



HAL
open science

La mobilité durable en zone urbaine : efficacité et perspectives des politiques d'environnement

Julie Bulteau

► **To cite this version:**

Julie Bulteau. La mobilité durable en zone urbaine : efficacité et perspectives des politiques d'environnement. Economies et finances. Université de Nantes, 2009. Français. NNT: . tel-00589001

HAL Id: tel-00589001

<https://theses.hal.science/tel-00589001v1>

Submitted on 27 Apr 2011

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

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

UNIVERSITÉ DE NANTES
INSTITUT D'ÉCONOMIE ET DE MANAGEMENT DE NANTES

2009 / N° :

Thèse présentée pour l'obtention du grade de
DOCTEUR EN SCIENCES ÉCONOMIQUES
DE L'UNIVERSITÉ DE NANTES

**LA MOBILITÉ DURABLE EN ZONE URBAINE :
EFFICACITÉ ET PERSPECTIVES DES POLITIQUES
D'ENVIRONNEMENT**

Soutenue publiquement par

Julie BULTEAU

3 avril 2009

JURY

Dorothee BRÉCARD , Professeur, Université de Nantes	Directeur de thèse
Olivier BEAUMAIS , Professeur, Université de Rouen	Rapporteur
Charles RAUX , Ingénieur de recherche CNRS, HDR, ISH Lyon	Rapporteur
Marc BAUDRY , Professeur, Université de Nantes	Examineur
Matthieu GLACHANT , Professeur, HDR, Mines ParisTech	Examineur

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail de recherche, quelle que soit la nature de leur contribution.

Je tiens à remercier en tout premier lieu Madame le Professeur Dorothee BRÉCARD, qui m'a accordé sa confiance en dirigeant cette thèse. Je tiens à la remercier pour son soutien scientifique, mais aussi pour ses qualités humaines qui m'ont été d'une aide précieuse lors de la réalisation de ce travail.

Je remercie également Messieurs Marc BAUDRY, professeur à l'université de Nantes, Olivier BEAUMAIS, professeur à l'université de Rouen, Matthieu GLACHANT, professeur à Mines ParisTech et Charles RAUX, ingénieur de recherche CNRS au Laboratoire d'Économie des Transports (LET), qui me font l'honneur de composer mon jury.

Cette thèse, menée au sein du Laboratoire d'Économie et de Management de Nantes Atlantique (LEMNA), a été financée les trois premières années par une bourse de Nantes Métropole. Sans cette dernière, la thèse serait restée en l'état de projet.

J'exprime ma profonde gratitude à Jack FEUILLET pour ses patientes et nombreuses relectures et pour son enthousiasme à lire des travaux d'économie. J'exprime également ma reconnaissance à Myriam NOURRY pour son soutien et ses commentaires rigoureux, ainsi qu'à Sébastien CANDEL pour son aide scientifique.

Je remercie également les membres du LET pour l'accueil qu'ils m'ont réservé lors d'un de leur séminaire, et Bernard FRITSCH pour sa proposition de projet de recherche.

Je ne saurais oublier mes collègues Souhir ABBES et Sandrine KOISSY-KPEIN pour les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir, ainsi qu'Isabelle COURCOUL pour son professionnalisme et sa gentillesse, Jacqueline FEUILLET pour ses nombreux conseils et Anouk SMETANA pour son aide en traduction.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à tous les membres de ma famille qui n'ont cessé de me soutenir durant la thèse : mes parents Monique et Joseph, mon frère Gwénaël, Pat, sans oublier mes amis qui ont pris régulièrement de mes nouvelles et grâce auxquels ces années se sont déroulées dans la bonne humeur : Morgane, Thierry, Arnaud, François et Sabrina, Greg.

Merci enfin à Thierry pour ses encouragements, son soutien sans faille, sa joie de vivre, sa curiosité et sa perspicacité. Sans lui, il m'aurait été beaucoup moins facile de réaliser cette thèse, que je lui dédie.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PREMIÈRE PARTIE : ENSEIGNEMENTS ET RÉINTERPRÉTATION DES OUTILS DE RÉGULATION ENVIRONNEMENTALE APPLIQUÉS AUX TRANSPORTS	11
CHAPITRE 1 : LE PÉAGE URBAIN	19
CHAPITRE 2 : TAXE <i>VERSUS</i> PERMIS D'ÉMISSIONS NÉGOCIABLES.....	75
DEUXIÈME PARTIE : EXTENSIONS ET DÉVELOPPEMENTS DE MODÉLISATION POUR UNE MOBILITÉ DURABLE	117
CHAPITRE 3 : MODÉLISATION DU PÉAGE URBAIN ASSOCIÉ À UNE POLITIQUE MODALE : PRISE EN COMPTE DES COÛTS ENVIRONNEMENTAUX.....	123
CHAPITRE 4 : MISE EN PERSPECTIVE D'UNE MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE PEN POUR LES AUTOMOBILISTES.....	183
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	245
BIBLIOGRAPHIE	253
ANNEXES	273
TABLE DES MATIÈRES	313

INTRODUCTION GÉNÉRALE

« De tout temps, les humains ont marqué de leur empreinte la Terre sur laquelle ils vivent. Alors que les déchets retrouvés des tribus primitives font le bonheur des paléontologues, ceux produits de nos jours sont devenus un fléau dont on ne sait comment se débarrasser. Les sentiers étaient les précurseurs des futures autoroutes, tout comme la conquête du feu était le premier jalon vers le problème de l'effet de serre. » Lorius¹ (1999)

La mobilité constitue un besoin fondamental de l'homme. Si la marche à pied représente le mode de déplacement le plus primaire, le progrès technique a singulièrement fait évoluer les moyens de transport, qu'il s'agisse de la navigation, du train, du cyclomoteur, ou encore de la voiture. L'image de liberté et d'indépendance véhiculée par l'automobile, notamment depuis les années 50, a permis d'accélérer la diffusion et le développement de la motorisation de l'ensemble des ménages. Cette révolution est indéniable et l'automobile s'est, au fil des années, imposée comme le principal mode de déplacement, même dans les villes. Selon le Comité des constructeurs français d'automobiles (2005), chaque jour, il est effectué 168 millions de déplacements urbains en France, dont 107 millions en automobile et seulement 15 millions en transport en commun. La voiture joue donc un rôle considérable dans l'accès à la mobilité, d'autant plus qu'elle est utilisée par toutes les classes de la société.

¹ Lorius C. est directeur de recherche émérite du CNRS au laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement. Il a travaillé sur les milieux polaires, notamment en Antarctique. Lui et son équipe de chercheurs ont, pour la première fois, mis en évidence le lien entre la teneur en gaz à effet de serre et l'évolution du climat à travers l'analyse des bulles d'air contenues dans la glace. Leurs travaux ont contribué à la prise de conscience de l'influence des activités humaines sur l'évolution future du climat de la planète.

Actuellement, dans le monde, on évalue à plus d'un milliard le nombre d'automobiles en circulation. En 1985, le parc automobile français comptait 24 millions de voitures en circulation, aujourd'hui il est estimé à près de 37 millions.

Non seulement l'utilisation de la voiture particulière domine les autres modes de transport, mais en outre le secteur automobile est particulièrement dynamique en France, puisqu'il constitue le premier secteur d'emploi et représente un poids important dans l'activité économique française. Soulignons, tout de même, que le secteur de l'automobile connaît un léger déclin depuis quelques années, qui s'est particulièrement accentué cette année.

Cependant, cette ascension fulgurante et l'accroissement continu de l'utilisation de l'automobile, dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement, sont peu à peu rattrapés par les externalités négatives qu'ils génèrent. Beaumais et Chiroleu-Assouline (2001) donnent la définition suivante des externalités : « Il existe un *effet externe*, ou une *externalité*, lorsque le bien-être d'un agent – l'utilité d'un consommateur ou le profit d'une firme – ou sa liberté de choix de comportement sont directement affectés par les actions d'un autre agent ne donnant lieu à aucune transaction de marché entre les deux protagonistes. [...] Une externalité peut être positive, si elle améliore le bien-être de l'agent concerné : on parle d'*économie externe* [...]. Lorsque l'effet externe dégrade le bien-être de l'agent, c'est une externalité négative, ou *déséconomie externe* : c'est le cas des externalités qui correspondent à une dégradation de l'environnement, comme les émissions de gaz à effet de serre, les déchets polluants, etc. ». Trois principales externalités négatives engendrées par l'automobile peuvent être soulignées :

- L'externalité de congestion, entraînant des pertes de temps, un gaspillage de carburant et une augmentation de la pollution.
- Les émissions de gaz à effet de serre, contribuant indéniablement au réchauffement climatique de la planète.
- La pollution atmosphérique locale, surtout en milieu urbain, représentant un risque pour la santé humaine (problèmes respiratoires, allergies, etc).

Longtemps occulté par les gouvernements, le problème de l'environnement occupe aujourd'hui une place centrale dans les politiques nationales et internationales. C'est en octobre 1984 que la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (*World commission on environment and development*) s'est réunie pour la première fois. En avril 1987, soit neuf cents jours plus tard, elle publie le rapport Brundtland intitulé « Notre avenir à tous ». Ce document donne pour la première fois une définition de la notion de développement durable :

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. »

C'est à partir de ce rapport que la Communauté internationale s'est lancée dans un long processus de protection et de prévention de l'environnement.

Que ce soit à l'échelle locale, nationale ou internationale, les actions publiques se déclinent en terme de durabilité. Le domaine du transport ne fait pas exception. La notion de transport durable fait partie intégrante des réflexions amorcées et des objectifs à réaliser dans les politiques de mobilité actuelles. Le transport durable a officiellement été établi en 1991 dans le cadre de la CEMT (Conférence européenne des ministres des transports). Il s'appuie sur les trois piliers fondamentaux de la définition du développement durable, dans la mesure où il doit « contribuer à la prospérité économique, au bien-être social, et ce sans nuire à l'environnement et à la santé de l'homme », CEMT (1991). À la suite de la conférence de Vancouver en 1996, intitulée : *Towards sustainable transportation*, l'OCDE (1997) a élaboré et précisé la définition en retenant que la mobilité durable constitue « un transport qui ne met pas en danger la santé publique et les écosystèmes, respecte les besoins de mobilité tout en étant compatible avec une utilisation des ressources renouvelables à un taux inférieur à celui nécessaire à leur régénération et une utilisation des ressources non renouvelables à un taux inférieur à celui nécessaire à la mise au point de ressources renouvelables de remplacement ».

Ainsi, les réflexions sur les politiques de transport ont progressivement intégré le principe de mobilité durable. Les schémas passés et actuels en matière de croissance de mobilité ne sont en effet pas réellement compatibles avec la notion de durabilité. À l'échelle européenne, des directives ciblant la mobilité urbaine ont été préconisées,

notamment dans le Livre Blanc (2001). L'objectif est de dissocier la croissance économique et la croissance des transports. En effet, dans la mesure où les agglomérations européennes représentent près de 85% du PIB de l'Union européenne (Commission européenne, 2007), et que les déplacements se font à 75% en voiture particulière, cela entraîne des nuisances incontournables et parfois irréversibles. La répartition spatiale des émissions de CO₂ de l'automobile est principalement d'origine urbaine, c'est pourquoi les actions sont particulièrement ciblées sur le transport urbain. Ainsi, en 2002, la Commission européenne a encouragé des opérations telles que la mise en place de la semaine de la mobilité. Cette dernière a pour but de sensibiliser et d'inciter les individus à utiliser des modes de déplacements alternatifs à la voiture (une journée est notamment consacrée au transport collectif (TC)). En septembre 2007, la Commission européenne a présenté son Livre Vert sur les transports intitulé « Vers une nouvelle culture de la mobilité urbaine ». Ce livre donne des indications pour trouver des alternatives à l'automobile. L'objectif à atteindre est de se déplacer autrement, mais il n'est en aucun cas question de réduire la mobilité.

Si l'Europe est soucieuse d'aboutir à une mobilité durable, il en est de même à l'échelle nationale et locale. En effet, la France, par exemple, à travers son récent Grenelle de l'environnement (2007), s'est préoccupée du problème des déplacements et a montré sa volonté d'agir en faveur d'un transport durable. Selon le Conseil national des transports (CNT, 2008), lors de ce Grenelle, il a été précisé des dispositions relatives au transport urbain et périurbain telles que l'élaboration d'un plan de développement des transports urbains, le développement du transport ferroviaire régional ou encore des programmes d'éco-conduite. Il faut souligner également les actions suivies par les collectivités locales à travers les Agendas 21 locaux : développement de l'offre des TC ou des modes alternatifs à l'automobile. La préoccupation d'aboutir à une mobilité durable devient donc un objectif commun, aussi bien aux échelles européenne que nationale et locale.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons aux déplacements de voyageurs en zone urbaine. L'objectif est de contribuer à l'amélioration des politiques

publiques en faveur d'une mobilité durable. Dans cette optique, notre réflexion concilie deux champs de l'économie : l'économie de l'environnement et l'économie des transports.

L'économie de l'environnement a su développer des outils comme la norme, la taxe ou encore les marchés de droits à polluer, afin de prendre en compte les externalités négatives comme la pollution provoquée par les entreprises. Pigou (1920) est à l'origine d'un système de taxation pour internaliser la pollution environnementale ; c'est le principe du pollueur-payeur. Bontems et Rotillon (2003) donne une définition du fonctionnement de cette taxe pigouvienne : « [...] Les externalités naissent de l'écart entre les coûts privés, pris en compte par les agents économiques au moment de leurs décisions, et les coûts sociaux que ces décisions font supporter à la collectivité. Le principe pollueur-payeur est un principe d'internalisation des coûts qui consiste à faire supporter au pollueur cette différence entre coût social et coût privé. Ainsi, c'est le coût social de ses décisions qui sera considéré par le pollueur, ce qui conduira à l'optimum de pollution. » Dales (1968a) a, quant à lui, posé les fondements de l'analyse du système de marché de droits à polluer. Le développement des instruments de l'économie de l'environnement n'est donc pas récent.

Par ailleurs, l'économie du transport urbain s'est déterminée et précisée au fil du temps. En effet, elle a été longtemps associée à l'aménagement du territoire, thématique relevant davantage des compétences de l'ingénieur et du géographe que de celles de l'économiste. En revanche, aujourd'hui, il existe une littérature abondante des principes fondamentaux de l'économie des transports, notamment concernant la demande et l'offre des transports (Quinet, 1998 ; Didier et Prud'homme, 2007), ainsi que de nombreux travaux traitant spécialement des déplacements urbains (Small, 1992 ; Small et Verhoef, 2007).

Les économistes du transport se sont peu à peu intéressés aux problèmes générés par les déplacements. Le phénomène de congestion a longtemps été au cœur des études, et constituait la seule externalité prise en compte liée aux déplacements. La mise en place des outils économiques tels que la taxe, sous forme de péage urbain, afin de réguler les déplacements urbains, a fait son chemin et a vu le jour pour la première fois à Singapour en 1975. L'idée d'appliquer des instruments économiques dans les politiques de régulation des transports n'est donc pas nouvelle. Cependant, comme nous l'avons noté

précédemment, les nuisances de l'automobile ne se réduisent pas aux seuls encombrements : les problèmes de pollution sont bien présents. Ainsi, un champ économique, associant les méthodes de l'économie de l'environnement aux éléments des politiques de transport urbain, est apparu.

Les réflexions et les analyses pour concilier le transport et l'environnement se sont particulièrement développées ces dix dernières années. Les rapports concernant les nuisances environnementales, comme celui de Le Peletier (2001), ceux relatifs à l'évaluation des coûts externes de l'automobile (Boiteux, 1994, 2001 ; INFRAS, 2000) ou encore ceux traitant des solutions à apporter pour un transport durable (MEDD, 2006), se sont multipliés. Notre travail de thèse s'inscrit dans cet axe de recherche liant transport et environnement. Notre ambition est d'analyser et de déterminer la pertinence et l'efficacité de différents outils économiques favorisant une mobilité durable à l'échelle urbaine.

Lors du Grenelle de l'environnement, la volonté de mettre à disposition l'outil du péage urbain aux collectivités locales a été soulignée. À l'heure où le Conseil d'analyse stratégique publie un rapport intitulé : « Péage urbain : principes pour une loi » (septembre 2008), il est nécessaire de discuter et d'analyser les instruments et politiques qui s'offrent aux villes pour obtenir une mobilité durable. Si, pour le moment, la France s'oriente vers un projet de loi mobilisant le péage urbain, il existe cependant d'autres instruments de l'économie de l'environnement, comme le système de marché de permis d'émissions négociables (Raux, 2002), pouvant être appliqués au domaine du transport routier.

Il paraît indispensable de donner la possibilité aux collectivités locales de connaître et de choisir les actions adéquates permettant d'internaliser les différentes nuisances engendrées par la circulation automobile en zone urbaine. Compléter les outils économiques par des politiques modales semble nécessaire. En effet, nous émettons des réserves sur la capacité des outils économiques d'avoir un impact à eux seuls sur les comportements des automobilistes. La sensibilisation des individus concernant les effets néfastes de l'utilisation de l'automobile est primordiale et s'associe pleinement à la réussite de l'outil économique. Les campagnes incitatives pour se déplacer autrement

qu'en automobile, celles prônant les bienfaits du covoiturage, et le développement des modes alternatifs à l'automobile, sont complémentaires à l'instrument économique.

L'objet de ce travail de recherche est précisément d'examiner et de comparer deux outils économiques : le système de taxation et celui de marché de permis d'émissions appliqués aux automobilistes d'une zone urbaine. L'intérêt est de montrer la diversité, l'efficacité et le fonctionnement des outils économiques que peut mettre en œuvre un régulateur.

Notre choix de comparer la taxe et le système de marché des permis a été motivé autant par un aspect théorique qu'idéologique. D'une part, « En théorie, en situation d'information parfaite et en l'absence d'incertitude, les taxes et les systèmes de permis d'émissions négociables sont équivalents. Pour atteindre un niveau de pollution donné (qu'il soit optimal ou pas), lorsque les coûts marginaux de dépollution sont parfaitement connus, les pouvoirs publics peuvent indifféremment choisir d'instaurer le taux de taxe qui correspond à ce niveau de pollution, ou créer un système de permis d'émissions négociables qui mette en circulation une quantité de permis respectant ce même niveau. », (Beaumais et Chiroleu-Assouline, 2001). D'autre part, la comparaison de la taxe et du marché de permis négociables permet aussi de confronter deux idéologies. En effet, la taxe est l'outil économique le plus utilisé en Europe ; elle peut être perçue comme une tradition du vieux continent. Pourtant, le système de marché de permis d'émissions négociables, moins répandu, a été désigné et préconisé par le protocole de Kyoto² comme l'instrument économique à mettre en place. Il est considéré comme un système plus flexible que la taxe.

Par l'analyse de travaux théoriques et la modélisation microéconomique, nous souhaitons apporter un éclairage au décideur public sur le choix de l'instrument économique favorisant un transport durable. Si le péage urbain a déjà montré son efficacité sur la congestion, qu'en est-il de sa vertu environnementale ? Quant au système de permis d'émissions négociables, son application à la circulation automobile est-elle possible et efficace ?

² Le Protocole de Kyoto a été adopté en 1997 et est entré en vigueur en février 2005. Ce traité définit des objectifs quantifiés de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les pays industrialisés, ayant ratifié le Protocole de Kyoto, doivent réduire leurs émissions combinées des 6 principaux GES (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆) durant la période 2008-2012 en deçà des niveaux de 1990.

Pour mener à bien notre argumentation, notre travail de recherche est structuré en deux grandes parties : l'une dresse un état de l'art des travaux et l'autre présente les développements de modèles microéconomiques. Chaque partie est constituée de deux chapitres.

La première partie de la thèse permet de présenter d'un point de vue théorique les avantages, les inconvénients, la faisabilité, le fonctionnement et les expériences de chaque instrument. Il s'agit d'analyser et de comparer l'efficacité des deux outils de régulation environnementale appliqués aux déplacements urbains.

Le premier chapitre est consacré à l'analyse du péage urbain. Il donne l'état de l'art des connaissances, théoriques et appliquées, de l'internalisation des nuisances de l'automobile par le biais de la taxe. Ce chapitre répertorie les différentes natures des externalités du transport et analyse principalement celle de congestion. S'ensuit la comparaison des deux approches fondamentales de la tarification de la congestion : l'analyse par le flux temporel (Henderson, 1974, 1981, 1992) et celle par la file d'attente (Vickrey, 1969). L'étude des expériences des différents péages urbains, comme celui de la ville de Londres, vient clore ce chapitre.

Le deuxième chapitre est centré sur l'analyse comparative des deux instruments. Nous faisons le point sur les conclusions théoriques fondamentales concernant le choix entre les deux instruments. Nous présentons également les différentes applications du système de permis d'émissions négociables (PEN), notamment dans le secteur du transport. Nous terminons ce chapitre par la présentation des apports et limites des principales justifications théoriques de l'application d'un système de PEN centré sur les automobilistes.

La seconde partie de la thèse est consacrée aux développements de deux modélisations. Il s'agit d'apporter des extensions au modèle de péage urbain et d'élaborer un modèle concernant le marché de PEN pour les automobilistes. Dans nos deux modélisations, le régulateur met en place un outil afin de prendre en compte les effets externes de l'utilisation de l'automobile. L'objectif est d'obtenir l'optimum social, de premier ou de second rang, au sens de Pareto. Dans nos deux formalisations, nous prenons en compte deux modes de transport que sont l'automobile et les transports

collectifs ; ces derniers suivent une hypothèse forte : ils sont considérés comme non polluants.

Dans le troisième chapitre, nous élaborons, à partir du modèle de file d'attente d'Arnott *et al.* (1990, 1993), une modélisation du péage urbain prenant en compte la congestion, mais aussi les externalités environnementales de l'automobile. Nous ajoutons à l'outil économique une politique modale de redistribution des recettes du péage urbain vers les TC. L'objectif du chapitre est de déterminer la politique optimale pour accéder à une mobilité durable.

Le quatrième chapitre propose une modélisation du système de marché de PEN appliqués aux automobilistes. Ce modèle novateur repose sur la microéconomie de l'environnement et l'économie du transport. Nous cherchons à élaborer une justification théorique au système de PEN afin qu'il puisse être utilisé et appliqué dans les politiques de transport urbain. L'objectif est de déterminer la politique optimale pour que le bien-être social soit maximisé.

Grâce à cette recherche, nous souhaitons aider les autorités régulatrices à choisir en connaissance de cause l'outil économique le plus efficace pour favoriser un transport durable. À l'issue de ce travail, nous pourrions proposer des pistes pour élaborer de nouvelles politiques de mobilité durable.

PREMIÈRE PARTIE

ENSEIGNEMENTS ET RÉINTERPRÉTATION DES OUTILS DE RÉGULATION ENVIRONNEMENTALE APPLIQUÉS AUX TRANSPORTS

Introduction de la première partie

La fin de l'année 2007 et le début de l'année 2008 ont été particulièrement riches en matière de politiques environnementales appliquées aux transports. L'Allemagne, l'Italie et la France ont adopté des outils afin de réguler la circulation urbaine ou de réduire la pollution due à l'automobile. En Italie, la ville de Milan a mis en place, depuis le premier janvier 2008, un péage écologique. Les véhicules les plus polluants doivent payer une taxe baptisée *Ecopass* afin d'accéder au centre-ville du lundi au vendredi de 7h30 à 19h30. L'accès reste libre et gratuit aux véhicules les moins polluants, aux transports collectifs ainsi qu'aux vélos. L'objectif de ce péage écologique est d'inciter les individus à laisser leur voiture à l'entrée de la ville et à se rendre au centre urbain par un mode alternatif, comme les transports collectifs. En Allemagne, une solution plus radicale a été choisie. Les voitures les plus polluantes sont tout simplement interdites dans les centres-villes de Berlin, Cologne et Hanovre. Les voitures possèdent des vignettes de différentes couleurs indiquant leur niveau de pollution. Quant à la France, à la suite du Grenelle de l'environnement, l'éco-vignette (appelée aussi l'éco-pastille) a vu le jour. Le principe est d'inciter les acheteurs de voitures neuves à privilégier les modèles les moins polluants. Un système incitatif de « bonus-malus » a été retenu. Un bonus est offert aux acheteurs de voitures neuves émettant moins de 130 grammes de CO₂ par kilomètre et un malus doit être payé par l'acheteur de véhicules émettant plus de 160 grammes de CO₂ par kilomètre.

Ces trois récents exemples européens montrent la volonté des autorités de prendre en considération le problème de la pollution automobile. Cette prise en compte de l'environnement dans les politiques de transport n'a pourtant pas toujours existé. Pendant des années, les objectifs de fluidité de trafic et de financement des infrastructures ont été au cœur des politiques de transport et notamment celles de transport urbain. Le but était de trouver des solutions aux problèmes de congestion. Aujourd'hui, il en va tout autrement. Il s'agit non seulement de réduire le trafic automobile, mais aussi d'éviter tous les autres effets externes de l'automobile comme la pollution et le bruit. L'objectif n'est plus réellement le même, car la congestion peut être considérée comme « un effet externe mais interne aux automobilistes » (le débat sur la nature de l'externalité de congestion a été analysée notamment par Rothengatter, 1993),

alors que les autres effets externes sont nuisibles, non seulement aux automobilistes, mais aussi au reste de la collectivité.

Dans la théorie économique, on parle d'effet externe ou d'externalité lorsque les décisions de consommation ou de production d'un agent affectent directement la satisfaction d'autres agents, sans que le marché évalue ou rétribue l'agent pour cette interaction ; l'effet peut être positif ou négatif. Dans ces conditions, la mobilité est une externalité positive, et la pollution engendrée par une voiture est une externalité négative. L'ensemble des coûts imposés par une activité économique à la collectivité correspond au coût social, dont une partie correspond aux coûts privés de l'agent. D'autres coûts, sans contreparties pécuniaires, peuvent être imposés à la collectivité. L'objectif de l'autorité régulatrice est alors d'égaliser le bénéfice et le coût marginal social pour maximiser le bien-être collectif par le biais d'outils économiques.

Si l'on reprend les principes de base de l'économie de l'environnement, il existe plusieurs moyens d'internaliser ces externalités. Ainsi, la réglementation, les normes, les taxes, les négociations directes entre les pollueurs et les pollués, les marchés de droits à polluer sont autant d'instruments des politiques environnementales qui permettent d'internaliser ces externalités négatives de la pollution. Sans que l'on entre dans les détails, quelques précisions seront données sur le fonctionnement de ces outils d'internalisation.

La norme peut être un moyen de parvenir à l'optimum de pollution. Dans ce cas, l'autorité régulatrice impose au pollueur un niveau seuil d'émissions qui ne doit pas être dépassé. Cette norme, définie par une quantité maximale de rejets, est assortie de pénalités dissuadant toute infraction et permet de restaurer l'optimum social. Dans le secteur des transports, les normes d'émissions Euro, dont la première a été mise en place par l'Union Européenne en 1988, sont un bon exemple. Elles fixent des limites maximales de rejets polluants pour les véhicules neufs roulants. Leur objectif est de limiter la pollution atmosphérique due au transport. Cependant, édicter une norme suppose la connaissance du niveau de pollution, c'est-à-dire celle des dommages et celle des coûts de dépollution. La connaissance des dommages s'obtient par des méthodes d'évaluation qui, par ailleurs, ne peuvent fournir au mieux qu'une approximation de la réalité. Les coûts de dépollution sont une information détenue par le pollueur.

L'obtention de l'information sur les coûts et une bonne estimation des dommages sont les deux principales difficultés dans la mise en œuvre d'une norme efficace. Le débat entre les constructeurs automobiles et la Commission européenne concernant le surcoût entraîné par les normes Euro constitue un bon exemple. En effet, aujourd'hui, c'est la norme Euro IV qui est appliquée. Toutefois, la norme Euro V sera instaurée dès 2009 sur les véhicules neufs et en 2011 sur tous les véhicules vendus. En 2014, il est prévu de passer à la norme Euro VI. Nous soulignons que les normes sont de plus en plus strictes sur les émissions de polluants. Selon les constructeurs automobiles, l'application de ces nouvelles normes va coûter beaucoup plus cher que ce qui est annoncé par la Commission européenne, d'où leur demande de report de la date d'entrée en vigueur.

Le deuxième instrument recommandé par l'économie de l'environnement est **la taxe**. On l'appelle taxe pigouvienne, car elle a été préconisée par Pigou (1920). Cette solution consiste à imposer au pollueur une taxe égale au dommage marginal de la pollution. Implicitement, cette solution revient à donner un droit de propriété sur l'environnement aux pollués. La répartition des revenus entre les pollués et les pollueurs qui en résulte est évidemment moins favorable pour les pollueurs que dans le cas de la norme. Ce principe est appelé « pollueur-payeur ». Concernant le secteur des transports, le système de bonus-malus mis en place en France peut être assimilé à une taxation. En effet, les acheteurs de véhicules neufs polluants, c'est-à-dire émettant plus de 160 grammes de CO₂ par kilomètre, doivent payer un malus. Un autre exemple est celui de la TIPP (Taxe Intérieure de consommation sur les Produits Pétroliers). Cette taxe peut être considérée comme une écotaxe dans la mesure où elle s'applique à la consommation de carburant et permet d'internaliser les coûts environnementaux liés à l'usage du pétrole.

Enfin, le troisième outil d'internalisation est celui des **marchés des droits à polluer**. Les dysfonctionnements de l'économie liés à la présence d'externalités s'expliquent la plupart du temps par l'absence de marché qui fixe un prix à l'externalité. Pour remédier à cela, certains économistes ont préconisé la mise en place d'un marché boursier où les parties concernées pourraient échanger des titres de propriété des ressources environnementales (Dales, 1968a). L'État fixerait un objectif de pollution, et l'on distribuerait ou allouerait le montant correspondant de droits à polluer. Si tous les droits ne sont pas utilisés, alors on peut les vendre et inversement. L'exemple du

système de permis pour la suppression du plomb dans l'essence, appliqué aux raffineries américaines de 1982 à 1988, est l'un des plus anciens systèmes de marché de permis mis en place. L'objectif de ce système était de diminuer progressivement la teneur en plomb de l'essence jusqu'à son interdiction totale de 1996.

Ces instruments économiques, d'abord appliqués dans un cadre d'entreprise polluante et de riverains pollués, peuvent être mis en place dans les politiques de transport afin de réduire l'utilisation de la voiture engendrant des externalités négatives. Nous soulignons que ce travail de recherche se centre sur les déplacements de voyageurs à l'échelle d'une zone urbaine. Ainsi, l'objectif de cette première partie de la thèse est de nous éclairer sur le choix d'un instrument d'économie de l'environnement appliqué aux transports urbains afin d'aboutir à une mobilité durable. Comme on l'a dit précédemment, la taxation peut être considérée comme la première mesure économique pour inciter un changement de comportement de l'automobiliste. Cette taxation, plus fréquemment appelée péage urbain, peut fonctionner sur différents critères tels que le nombre de kilomètres parcourus, les heures de pointe, ou les différentes performances environnementales des automobiles. Les travaux sur ce sujet sont abondants, Dupuit (1849), Pigou (1920), Boiteux (1956), Walters (1961), Vickrey (1963), Arnott *et al.* (1990, 1993), ont prôné les bienfaits de la taxe, notamment sur les problèmes de transports. Concernant les normes, elles peuvent aussi être appliquées aux transports urbains. Le système de permis d'émissions négociables, qui peut être considéré comme une norme, a vu le jour avec les travaux de Dales (1968a) et n'a cessé d'être exploré depuis. Les travaux de Montgomery (1972) sur les permis négociables en économie de l'environnement, ceux de Wang (1994) sur les constructeurs automobiles ou encore ceux de Verhoef *et al.* (1997) et de Raux et Marlot (2005) montrent l'intérêt des permis négociables comme moyen de réguler les externalités liées aux transports routiers, notamment en limitant le trafic dans les zones urbanisées.

Cette première partie de la thèse a pour objectif de déterminer les impacts de ces deux systèmes d'incitation au changement de comportement dans le secteur des transports. La taxe et le marché des permis d'émissions négociables sont opposés dans le sens où la nature de l'instrument diffère, l'un fonctionnant par les prix et l'autre par

les quantités. En effet, la taxe laisse incertain l'effet sur la pollution, mais les coûts payés par les pollueurs sont connus. À l'inverse, pour les permis négociables, on est assuré de la qualité de l'environnement, car l'objectif est fixé. En revanche, le prix est incertain dans la mesure où il est fixé par le marché. L'existence de ces deux principaux instruments d'internalisation des effets externes pose le problème du choix de l'instrument même. C'est pourquoi cette première partie de thèse est scindée en deux chapitres.

Le premier chapitre se concentre sur le péage urbain. Voulant répondre à notre problématique d'objectif de transport durable, l'étude de l'outil de la taxation est primordiale. Cette analyse se veut aussi bien théorique qu'appliquée. Les différentes conceptions, objectifs et résultats des éventuelles mises en place du péage urbain sont explorés. Ce chapitre mesure l'important développement de la modélisation du phénomène de congestion par le péage et la récente approche du problème environnemental des transports. En outre, notre objectif à travers le chapitre 1 est de donner l'état des connaissances théoriques et appliquées du péage urbain, mais aussi de mettre en lumière les lacunes des modélisations, et les inconvénients de cet outil afin de réinterpréter une utilisation plus efficace.

Le deuxième chapitre est, quant à lui, ciblé sur la confrontation de la taxe et de l'instrument des marchés de permis d'émissions. La récente utilisation de ce dernier dans le but de réduire les émissions des entreprises polluantes européennes ne peut qu'inciter à la curiosité. Les termes « droits à polluer » et « bourse carbone » ont tout de suite eu un « effet répulsif » de la part de la population, et les droits à polluer ont été victime d'une mauvaise interprétation. Pourtant, leur objectif premier est bien de réduire la pollution sous le contrôle d'une autorité régulatrice. Le protocole de Kyoto a préconisé cet instrument et l'Europe l'a donc mis en fonctionnement depuis 2005. C'est pourquoi l'idée d'une éventuelle utilisation du système de permis dans la régulation de la pollution des transports suscite encore beaucoup d'interrogations. Le chapitre 2 a pour objectif d'explorer les pistes de réalisation du système de permis d'émissions sur les automobilistes et de le comparer avec un instrument bien rodé : la taxe. Cette première partie a pour but d'analyser les avantages et lacunes de ces deux outils et de les confronter afin de poser les jalons de notre modélisation théorique (exposée dans la deuxième partie).

CHAPITRE 1

LE PÉAGE URBAIN

Introduction

L'étalement urbain, qui a commencé dans les années 50, peut être considéré comme un facteur d'accroissement de la multimotorisation des ménages. Ce phénomène, associé aux politiques publiques de la ville des années 70 prônant des politiques de déplacement « tout automobile », a entraîné l'utilisation prédominante de la voiture particulière. Aujourd'hui, selon les agglomérations, 50 à 70 % des déplacements urbains se font en automobile. Or, cette utilisation accrue de la voiture particulière provoque des externalités négatives telles que la congestion et la pollution. Le péage urbain semble être une solution efficace face à cet envahissement des centres-villes par l'automobile. Les nombreux travaux théoriques, ainsi que les expériences de Singapour et de Londres, montrent l'efficacité et la faisabilité de cet instrument économique.

Dans notre recherche, nous considérons que les nuisances engendrées par l'utilisation de l'automobile suivent la définition des externalités et le péage urbain celle du principe pollueur-payeur, toutes les deux déterminées dans l'introduction générale.

L'internalisation des différentes externalités négatives par le péage urbain est au cœur de ce chapitre. La réflexion sur les enseignements et la réinterprétation de l'utilisation de la taxe ne peut se faire sans avoir analysé la nature des externalités, ce qui sera traité dans la première section (§ 1.1). Dans la mesure où le secteur des

transports génère une activité économique importante, les externalités positives ne peuvent être occultées. La prise en compte des externalités négatives due à l'utilisation de l'automobile a fait l'objet de nombreux et récents rapports. Les méthodes d'évaluation des coûts de congestion et de pollution sont de plus en plus fiables, mais sont en constante évolution. Les études INFRAS (2000, 2004), ainsi que le rapport Boiteux (2001), en sont la preuve.

En économie des transports, les travaux ont longtemps porté sur l'externalité de congestion. Walters (1961), Lindsey et Verhoef (1999), ainsi que Verhoef (2001), ont axé leurs travaux sur la compréhension et la détermination économique de ce curieux phénomène qu'est la congestion, ainsi que son coût. La deuxième section (§ 1.2) explore l'externalité de congestion dans la théorie économique, et permet de constater le nombre plus restreint de travaux concernant la prise en compte du problème environnemental. Pourtant, aujourd'hui, la contribution des émissions polluantes des transports dans le réchauffement climatique n'est plus à prouver. Il semble donc inévitable de continuer et d'approfondir les recherches sur l'aspect environnemental en économie des transports.

La modélisation du péage urbain de congestion, dont la pertinence reste encore réelle aujourd'hui, est d'origine anglo-saxonne. Elle est apparue tardivement dans la communauté académique française. Cette modélisation est scindée en deux approches différentes : d'un côté, l'approche par le flux temporel élaborée par Henderson (1974, 1981, 1992) et reformulée par Chu (1995, 1999) ; d'un autre côté, l'approche par la file d'attente ou goulot d'étranglement modélisée par Vickrey (1969) et réinterprétée par Arnott *et al.* (1990, 1993). Dans la troisième section (§ 1.3), nous exposons et comparons ces modèles fondateurs du péage de congestion. Ces modélisations, toujours perspicaces, présentent pourtant une défaillance pour développer une mobilité dite « durable ». Seule l'externalité de congestion est prise en compte, la pollution est omise.

Les villes de Singapour, Londres et Stockholm ont mis en place l'instrument du péage urbain pour accéder à leur centre-ville. Si le but de Singapour et de Londres était clairement de désengorger le centre-ville, le péage de Stockholm a été mis en place non seulement pour cette raison, mais aussi dans une optique environnementale. Ainsi, le péage urbain se voit attribuer d'autres vertus. Si la mise en place du péage à Stockholm

est encore trop récente pour que l'on ait de véritables résultats sur son efficacité, les péages de Singapour et Londres ont été déjà bien étudiés. L'expérience de Singapour permet de souligner qu'il est possible de se servir d'un instrument de la théorie économique et que cette application peut être une réussite. En 1975, Singapour met en place un péage pour accéder à son centre des affaires. L'objectif était de désengorger le centre-ville, complètement congestionné aux heures de pointe, en faisant acheter aux automobilistes une vignette pour la journée. En 1998, le péage a évolué puisqu'il est devenu électronique et variable selon les périodes (de congestion ou non) de la journée. Entre 1975 et 1991, la circulation a diminué de 45 % et, depuis la mise en place du nouveau système, elle a encore diminué entre 10 et 15 %. Il est à noter que le système des transports de Singapour est centralisé, les transports collectifs sont gérés par le même organisme s'occupant du péage ce qui permet ainsi une parfaite coordination des objectifs. Dans la quatrième section (§ 1.4), nous réalisons l'analyse, par l'exploitation des résultats d'études empiriques, de la réussite ou de l'échec des objectifs à atteindre par la mise en place d'un péage.

À l'issue de ce chapitre, deux points semblent être importants : la modélisation en goulot d'étranglement apporte une approche plus applicable aux phénomènes de congestion que connaissent les villes que l'approche par les flux. De plus, les recherches sur le problème environnemental de l'automobile doivent continuer à être approfondies, car le péage urbain est surtout étudié et appliqué pour internaliser le phénomène de congestion et non celui de la pollution.

1.1. Les différentes externalités des transports

Cette section permet de faire l'inventaire des différentes natures d'externalités produites par les transports. Notre travail de recherche se concentrant sur les nuisances de congestion et de pollution, il convient de rappeler l'existence des effets positifs des transports, ainsi que d'autres externalités négatives telles que les accidents ou le bruit.

1.1.1. Les externalités positives des transports

« Dans une économie où la libre circulation des personnes est un droit fondamental, le premier objectif des infrastructures de transport est de faciliter la mobilité des citoyens. »
Didier et Prud'homme (2007)

Actuellement, l'utilisation de l'automobile et celle, en général, des modes de transport motorisés, diffusent une image négative, puisqu'elles sont associées aux phénomènes de pollution et participent au réchauffement climatique. Cependant, cette perception « négative » des transports n'a pas toujours été et ne fait pas l'unanimité. La mobilité a des effets positifs et contribue au développement de nos sociétés.

1.1.1.1. Les effets positifs induits par la mobilité

« L'expansion romaine s'appuie sur un développement des voies de communication entretenues et surveillées. La révolution industrielle et le développement du capitalisme ont été rendus possibles que par le développement des canaux, puis par la construction du réseau ferroviaire. » Didier et Prud'homme (2007)

L'amélioration des infrastructures de transport a trois principaux effets : la baisse des coûts des transports (augmentation des flux), l'intensification de la vitesse (augmentation de la distance parcourue) et la réduction des encombrements (hausse du gain de temps). Ces trois éléments favorisent la mobilité, autant en termes qualitatifs

que quantitatifs. Or, la progression de cette mobilité a très souvent été corrélée au développement de nos sociétés.

L'évolution de la mobilité a tout d'abord des effets positifs sur les échanges et les activités commerciales aux échelles locale, nationale et internationale. La libre circulation des personnes et des marchandises au sein de l'Union européenne, la hausse de la consommation de biens étrangers, le développement du tourisme, le désenclavement territorial, en sont autant d'exemples. Ces activités commerciales engendrent une croissance économique bénéfique à différents acteurs et à toutes les échelles.

À l'échelle urbaine, les transports sont un élément fondamental de la dynamique de la ville. L'étalement urbain³, amorcé dans les années 50, est à l'origine de l'essor des réseaux d'infrastructures de transport (la voirie occupe 20% de la surface des grandes villes européennes, Bavoux et Charrier, 1994) et est un facteur de la multimotorisation des ménages. Ces deux conséquences ont permis et permettent une meilleure accessibilité à l'emploi, ainsi qu'une valorisation foncière et immobilière des zones mieux desservies. La mobilité constitue un instrument capital d'aménagement et d'irrigation des territoires.

L'automobile est également un symbole de liberté et un vecteur de détente et de loisirs pour les individus. La contraction de l'espace-temps, principalement due à l'essor des réseaux autoroutiers, a provoqué un accroissement des déplacements d'ordre touristique (Marcadon *et al.*, 1997). La part d'utilisation de la voiture pour des déplacements personnels (achat, loisirs, visites) est plus importante que pour les déplacements liés au travail (42% contre 35% respectivement, Bavoux et Charrier, 1994). Ainsi, la diffusion de la mobilité améliore, dans une certaine mesure, le bien-être individuel.

³ Cet étalement, provoqué par la croissance urbaine, se traduit par un phénomène de périurbanisation depuis 1950-1960, et en particulier par une *rurbanisation* pavillonnaire (Bavoux et Charrier, 1994).

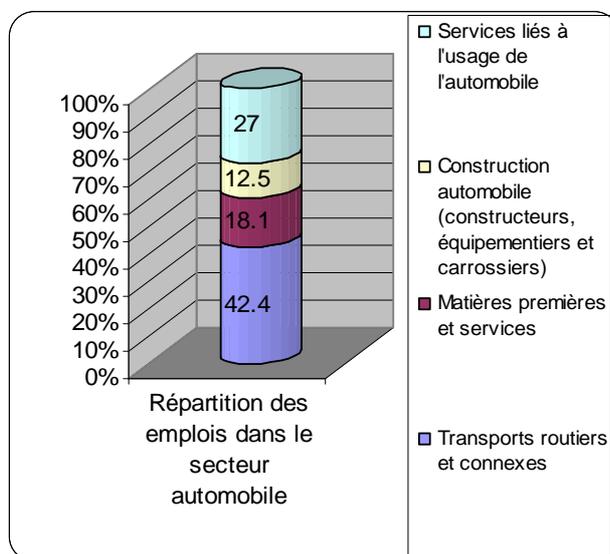
1.1.1.2. Les bienfaits de l'activité du secteur de l'automobile

« La mobilité des personnes et des marchandises est essentielle au développement économique de notre pays », Gilles de Robien⁴, Comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA, 2005).

L'automobile représente un élément essentiel de notre économie, la mobilité est créatrice de richesse. Le secteur de l'industrie automobile regroupe la construction de véhicules, la fabrication de carrosseries et de remorques et la fabrication d'équipements automobiles. Il occupe donc une place importante dans l'économie, même si on enregistre une légère baisse de l'activité depuis 2006.

Le premier constat est le nombre d'emplois que génère l'industrie automobile. En effet, selon le CCFA (2004, 2007), près de 2 500 000 emplois sont induits par l'automobile en France. Le graphique suivant montre la répartition des emplois selon les activités :

GRAPHIQUE N°1.1 : La répartition des emplois dans le secteur automobile



Source : données CCFA (2007)

Ce présent graphique indique que 1 050 000 personnes sont employées (42.4%) pour les transports et connexes, c'est-à-dire pour les transports de marchandises et de

⁴ Ministre de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, de mai 2002 à mai 2005.

voyageurs, pour les réseaux routiers et les administrations. Nous observons que les activités de conception et de production génèrent 761 000 emplois (30.6%) et que l'ensemble des services liés à l'usage de l'automobile⁵ représente 670 000 emplois (27%). Le secteur automobile crée un nombre d'emplois non négligeable dans notre société. D'après le CCFA, il est responsable de près de 10% des emplois en France.

Sur le plan des échanges internationaux, le secteur automobile représente environ 13% des exportations françaises, dégagant ainsi un solde positif. Il constitue l'un des piliers de la balance commerciale de la France. Quant à la production française de véhicules dans le monde, elle atteint presque 10% de la production mondiale. La France fait partie des grands producteurs européens derrière l'industrie automobile allemande.

On notera aussi que la voiture particulière est devenue un mode de déplacement essentiel pour les Français. En effet, selon une enquête CCFA/SOFRES de 2003, près de 81% des Français disent avoir besoin d'un véhicule, et 54% des déplacements en voiture représentent la part servant pour les trajets domicile-travail.

L'activité du secteur de l'automobile occupe donc une place importante dans l'économie française, notamment en termes d'emplois, de contribution sur le marché mondial et de satisfaction des besoins des individus. Les nuisances dues à l'utilisation de l'automobile vont être analysées et plus approfondies puisqu'elles correspondent aux externalités négatives que nous souhaitons internaliser durant cette recherche.

1.1.2. Les nuisances de l'automobile

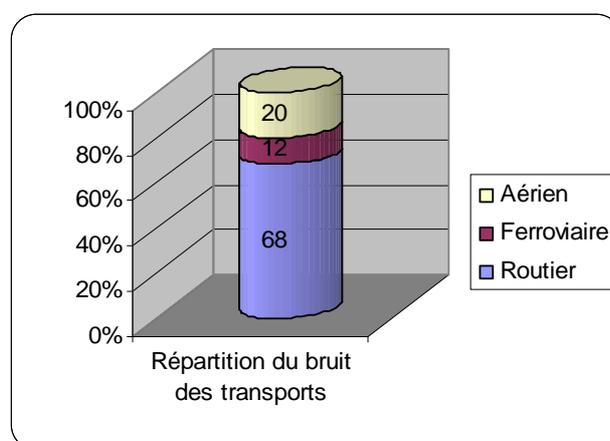
Les nuisances provoquées par l'utilisation de l'automobile sont nombreuses : le bruit, les accidents de la circulation, la congestion, la pollution atmosphérique et l'effet de serre en font partie. Se pencher sur ces différentes externalités négatives permet de comprendre les difficultés rencontrées par l'économiste afin d'obtenir une évaluation juste de leurs coûts. Nous présentons les différentes natures de ces nuisances, et analysons les méthodes de valorisation des effets externes du transport.

⁵ L'usage automobile intègre les ventes, les réparations, les contrôles techniques, la démolition/le recyclage, les assurances, le financement, la vente de carburant, les auto-écoles, la presse et l'édition.

1.1.2.1. Le bruit

Le bruit est la principale nuisance ressentie par les ménages en ville. Elle est particulièrement dénoncée puisqu'elle est directement perceptible. Selon l'ADEME, 43% des ménages français se déclarent gênés par le bruit, dont 23% par le bruit des transports. En France, 80% du bruit provient des transports selon la répartition suivante :

GRAPHIQUE N°1.2 : La répartition du bruit des transports



Source : données de l'ADEME

Mais qu'est-ce que le bruit ? Une définition peut être retenue : « Le bruit est dû à une variation de pression régnant dans l'atmosphère ; il peut être caractérisé par sa fréquence (grave, médium, aiguë) et par son intensité mesurée en niveau de pression acoustique. L'échelle usuelle de mesure est logarithmique : on parle de niveaux de bruit exprimés en décibel A (dB(A)), où A est un filtre caractéristique des particularités fréquentielles de l'oreille » (Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006).

Le seuil de 65 dB (A)⁶ est considéré en général comme le seuil où apparaît une forte gêne et à partir duquel l'appareil auditif devient en danger. Selon le rapport Serrou (1995), 7 millions de français, soit 12,3% de la population, seraient exposés au seuil de 65 dB (A) dû aux transports. En juin 2002, le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne ont promulgué une directive disant qu'en milieu urbain, le bruit ne doit pas dépasser 60 dB en moyenne dans la journée.

⁶ Le seuil 65 dB (A) est le niveau de bruit à 20 mètres d'une voiture roulant à 60 km/h.

L'évaluation des dommages liés au bruit provoqué par les transports paraît indispensable pour les études socio-économiques. L'évaluation du bruit a fait l'objet de beaucoup d'études et de rapports. La technique du consentement à payer est la plus utilisée pour estimer l'externalité du bruit. Il existe deux manières d'obtenir le consentement à payer, soit par enquêtes auprès des habitants, soit par l'observation des prix du marché de l'immobilier⁷. Selon le rapport Boiteux (2001), la deuxième solution, l'évolution du prix de l'immobilier, est la mieux adaptée et donne des résultats plus robustes. Un pourcentage de la dépréciation des valeurs immobilières en fonction des niveaux d'exposition du bruit peut être obtenu. Le tableau suivant présente les valeurs retenues :

TABLEAU N°1.1 : Dépréciation des valeurs immobilières en fonction des niveaux d'exposition au bruit

Leq ⁸ de jour en façade en dB(A)	55 à 60	60 à 65	65 à 70	70 à 75	Au-delà de 75
% de dépréciation/décibel	0.4%	0.8%	0.9%	1%	1.1%

Source : Boiteux (2001)

Par ailleurs, le rapport Boiteux (2001) préconise une majoration de 30% du coût externe lorsque l'individu est soumis à un niveau sonore de plus de 70 dB(A), afin de prendre en compte les effets sur la santé.

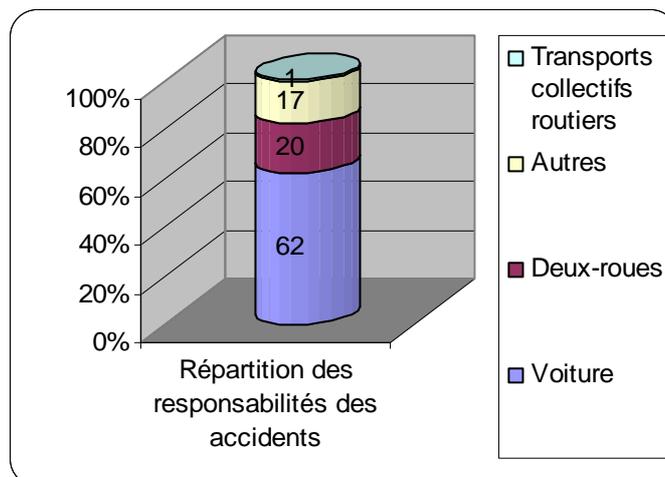
1.1.2.2. Les accidents de la circulation

En 2007, selon l'ONISR (Observatoire national interministérielle de sécurité routière), 4838 personnes ont été tuées dans un accident de la circulation, 39 754 considérées comme blessés graves et 66 955 comme blessés légers. La voiture particulière a la plus importante part de responsabilité dans les accidents de la circulation.

⁷ Le bruit engendre une dépréciation du foncier, donc une diminution de la valeur des logements.

⁸ Leq : Le niveau équivalent de bruit exprimé en décibels A.

GRAPHIQUE N°1.3 : Responsabilité des accidents de circulation



Source : données du site de l'ONISRP

L'évaluation des effets des accidents est un exercice très délicat. En effet, les accidents entraînent des conséquences négatives multiples comme les pertes de capacités productives, mais aussi des coûts difficiles à évaluer tels que la souffrance (physique ou psychologique) des individus. Afin d'homogénéiser la valeur des accidents, le coût externe des accidents dus à l'automobile comporte seulement la valeur tutélaire de la vie humaine. Différentes manières d'évaluation sont utilisées, nous les présentons sur le schéma suivant :

FIGURE N°1.1 : Trois types de méthodes pour évaluer la valeur de la vie humaine

Méthodes d'évaluation		
Coût d'indemnisation	Capital humain	Consentement à payer ou à accepter
	Manque à produire brut	Consentement des individus
	Manque à produire net	Consentement de la société
	Valeur de la perte d'années de vie	

Le débat sur les différentes méthodes à utiliser est toujours d'actualité (Boiteux, 2001). À titre indicatif, les valeurs tutélaires retenues pour la France sont les suivantes : 1,5 millions d'euros pour un tué, 150 000 euros pour un blessé grave et 22 000 euros

pour un blessé léger. Donner une valeur à la vie humaine reste d'un point de vue éthique et économique fragile et contestable.

1.1.2.3. La congestion

En France, la congestion est un phénomène spécialement présent dans la circulation urbaine. Elle représente une externalité négative quelque peu particulière, puisqu'elle peut être considérée comme « un effet externe mais interne aux automobilistes ». La première approche d'une définition de la congestion donnée par le rapport Boiteux (2001) reprise dans le rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement (MEDD, 2006) est la suivante : « 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 (concentration des véhicules) et la vitesse d'écoulement des trafics, compte tenu de la capacité (ou du débit maximal possible). »

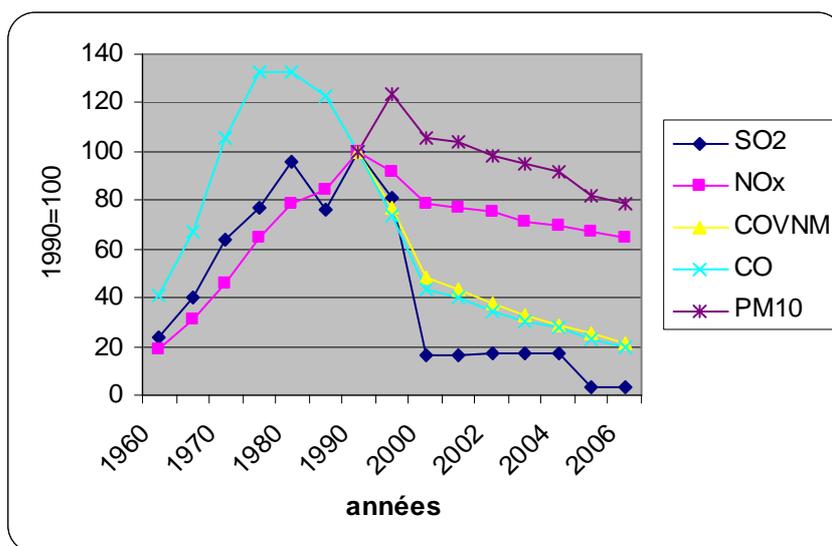
Pour évaluer le coût externe de congestion, plusieurs méthodes découlent directement de la notion théorique économique suivante : le coût de congestion est égal à la différence entre l'utilité obtenue de l'utilisation de la route et l'utilité que l'on pourrait obtenir si elle était utilisée de façon optimale. Cela revient à déterminer une situation de référence et à calculer les pertes de temps entre cette situation et la situation effective. Ce phénomène de congestion étant assez complexe, de grands écarts peuvent être observés dans sa valorisation. Dans le livre blanc de 2001 de la Commission européenne, le coût de congestion est évalué à 2% du PIB. Le rapport UNITE (2003) annonce 3.5% du PIB et si on se fie au rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement (MEDD, 2006), le coût de congestion est estimé à 5% du PIB. Ces différences dans les valeurs du coût externe de congestion nous montrent qu'il faut être prudent dans les interprétations que l'on peut faire de ces résultats. C'est pourquoi la section (§ 1.2) est consacrée entièrement à l'analyse du phénomène de congestion afin de mieux l'interpréter dans la suite de notre travail.

1.1.2.4. La pollution et l'effet de serre

Les émissions polluantes des transports ont de multiples impacts autant sur la santé que sur la dégradation de l'environnement. Deux types de pollution dus à l'automobile peuvent être distingués : les principaux polluants primaires ayant un impact sur la santé humaine et contribuant notamment aux phénomènes d'acidification, et les gaz à effet de serre (GES) tels que les émissions de CO₂ qui constituent le principal enjeu environnemental de long terme.

Concernant l'évolution des principaux polluants primaires, le graphique suivant nous montre la tendance :

GRAPHIQUE N°1.4 : Évolution des principaux polluants primaires de l'automobile



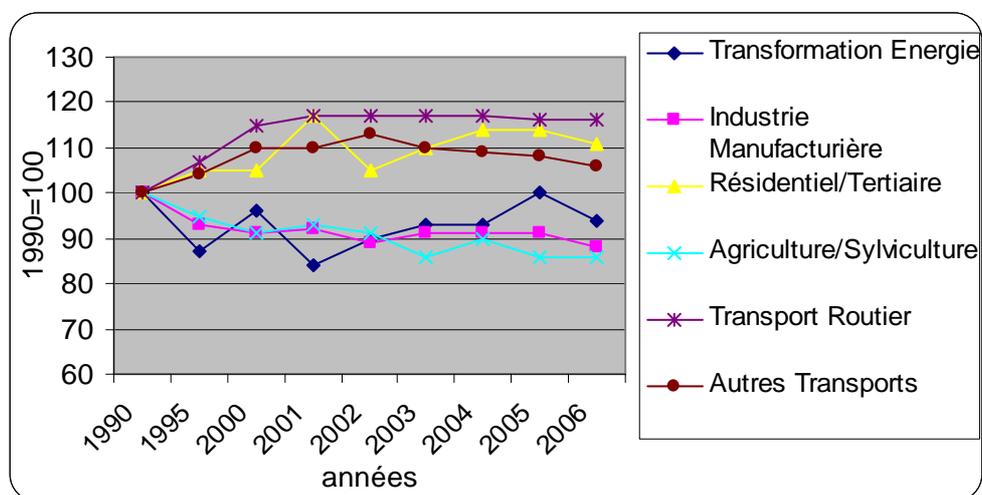
Source : données de la CITEPA (2008)

Ainsi, de 1990 à 2006, les émissions de dioxyde de soufre produites par le transport routier ont diminué de 97%, celles d'oxyde d'azote de 35%, celles de composés organiques volatiles non méthaniques de 79%, celles de monoxyde de carbone de 80%, et enfin les émissions de particules fines inférieures à 10 micromètres ont connu une réduction de 21%. Cette baisse de la pollution résulte en particulier des normes imposées, de plus en plus sévères, aux véhicules neufs.

Même si la tendance générale est à la baisse, il ne faut pas oublier leurs graves conséquences sur la santé humaine comme les troubles respiratoires, les maladies cardiovasculaires et celles sur l'environnement telles que les pluies acides. En 2006, les transports routiers représentaient 53% des émissions d'oxydes d'azote, 24% des émissions de monoxyde de carbone et 16% des émissions de composés organiques volatils non méthaniques.

L'activité humaine a modifié sensiblement la concentration des GES présents dans l'atmosphère. Le secteur des transports est désormais le secteur en France le plus émetteur de GES, en particulier d'émissions de CO₂. En 2006, à lui seul, le transport routier représente 33% des émissions totales de CO₂. Malgré une légère stagnation des émissions depuis 2002, le secteur des transports routiers est selon les spécialistes le secteur dont les émissions doivent croître le plus. Il semble important de contrôler ces émissions pour préserver notre planète. Le graphique suivant montre l'évolution des émissions de CO₂ produites selon les secteurs.

GRAPHIQUE N°1.5 : Évolution des émissions de CO₂ des principaux secteurs



Source : données CITEPA (2008)

Ainsi, entre 1990 et 2006, les émissions du transport routier ont augmenté d'environ 17% et celles des autres transports de 6%, alors que le secteur de l'industrie manufacturière, qui était le plus gros émetteur de CO₂ en 1990, a vu diminuer ses émissions de l'ordre de 12%. Le secteur des transports est donc invité à accentuer ses

efforts en matière de réduction des émissions afin de respecter les engagements pris par la Communauté internationale pour préserver notre planète sur le long terme.

L'évaluation monétaire de la pollution et son estimation des impacts sur le long terme sont difficiles à estimer. La pollution peut avoir des conséquences sur la santé, les milieux naturels, ou encore sur les matériaux. C'est pourquoi sa monétarisation n'est pas un exercice évident puisqu'il faut cerner les différents impacts qu'elle engendre et les effets combinés de plusieurs polluants. Comme le précise le rapport Boiteux (2001), la méthode de monétarisation se fait en deux temps. Dans un premier temps, il faut mesurer les concentrations de polluants, puis établir une relation entre, par exemple, le polluant et la santé ou le polluant et la végétation. Dans un second temps, il faut appliquer la méthode d'estimation choisie comme la méthode de préférences déclarées, ou révélées, ou le coût d'évitement.

Les principales études ayant monétarisé les effets externes de la pollution présentent des résultats avec de grandes disparités. Il faut donc prendre avec précaution les valeurs données à la pollution. À titre indicatif, le rapport Boiteux (2001) préconise⁹ une valeur de 2.9 € pour 100 véhicules par kilomètre pour les voitures particulières en milieu urbain dense¹⁰.

Quant à l'estimation de la valeur de la tonne de carbone¹¹, la valeur officielle préconisée par le rapport Boiteux (2001) est de 100 € la tonne, c'est-à-dire 27 € la tonne de CO₂. Le rapport du CAS (Centre d'analyse stratégique, 2008a) donne une valeur tutélaire de la tonne de CO₂, de 32 € en 2008¹² et de 56 € en 2020. Le scénario retenu s'appuie sur la valeur préconisée par Boiteux (2001) pour rejoindre la valeur pivot de 100 € la tonne en 2030. L'étude INFRAS (2004) retient un prix de 20 € la tonne de CO₂ avec un scénario « faible », c'est-à-dire où la sensibilité du changement climatique est faible, à 140 € la tonne de CO₂ pour un « scénario élevé » (avec un changement climatique élevé). Depuis l'existence du marché des quotas de CO₂ mis en place en

⁹ Le rapport Boiteux s'est lui-même appuyé sur la comparaison des valeurs des études existantes, comme celle de l'INFRAS (2000) et celle de l'OMS.

¹⁰ On considère l'urbain dense lorsque la densité est supérieure à 420 habitants par kilomètre carré.

¹¹ Une proposition faite au Grenelle de l'environnement par Nicolas Hulot et Nicolas Stern était de fixer la tonne de CO₂ à 25 €. La plupart des études convergent vers ce prix, mais ce dernier n'est pas stable, car il peut évoluer à la baisse comme à la hausse (Prud'homme, 2007).

¹² Valeur estimée, après prise en compte de l'inflation, à partir de celle qui est recommandée dans le rapport Boiteux (2001) de 27 € en 2001.

Europe en 2005, nous pouvons nous référer au prix du marché qui a longtemps fluctué entre 19 et 29 € la tonne avant de se stabiliser aux alentours de 23 €.

L'inventaire de ces effets externes était nécessaire dans la mesure où la suite de ce travail se concentre sur la recherche de solutions pour atteindre un objectif de mobilité durable. Les effets externes de congestion et de pollution sont ceux pris en compte dans notre étude. La congestion est particulièrement présente dans le milieu urbain et est un phénomène complexe, mais intéressant. La pollution, quant à elle, est un élément que l'on ne peut plus ignorer dans les politiques prônant un transport durable.

1.2. L'interprétation économique du phénomène de congestion et la prise en compte du problème environnemental

La congestion automobile est une externalité négative qui n'est pas prise en compte par le marché. Elle est due à la surutilisation d'un réseau routier à une période donnée entraînant une diminution de la vitesse de la circulation. Nous proposons d'analyser la congestion grâce à une détermination graphique et en nous appuyant sur les travaux de l'ingénierie. La détermination du coût de congestion nous amène à aborder les premiers travaux conséquents de la prise en compte de la seconde externalité nous intéressant : la pollution.

1.2.1. Détermination graphique de la congestion

L'analyse de la fonction de congestion de Lindsey et Verhoef (1999) et celle de Verhoef (2001), adaptées des travaux de l'ingénierie, sont à notre avis les plus accessibles à l'économiste pour comprendre le fonctionnement de la congestion. À partir d'un modèle standard de la fonction de congestion, Verhoef (2001) détermine les trois variables fondamentales définissant les flux de circulation sur une voirie :

- V : la vitesse de circulation, exprimée en kilomètres par heure.

- D : la densité de la circulation, exprimée en véhicules par voie et par kilomètre.
- q : le débit de la circulation, exprimé en véhicules par voie et par heure.

La relation découlant de ces trois variables est la suivante : $q = V \times D$ (1.1)

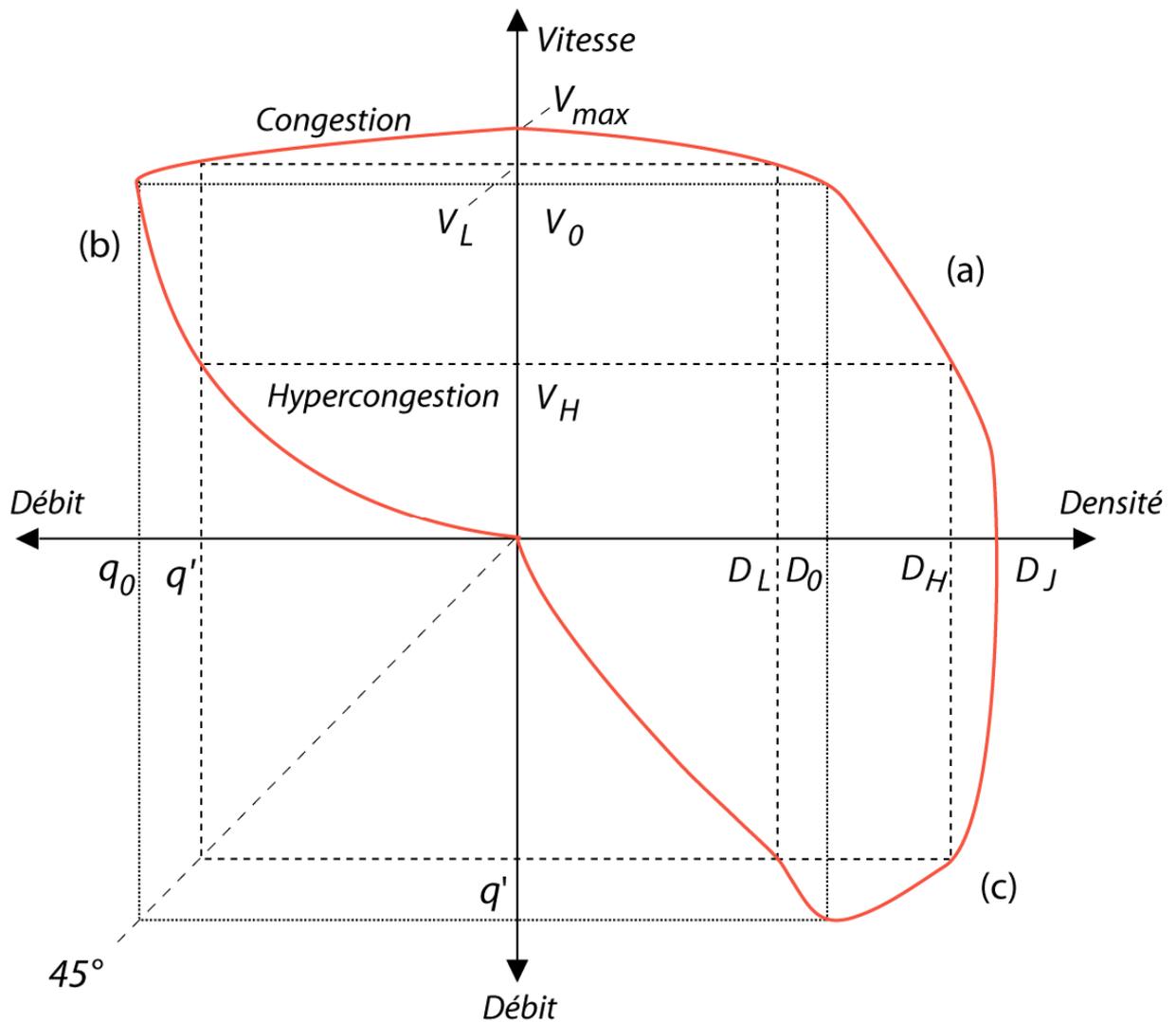
Le graphique (1.6) représente un diagramme issu de l'ingénierie qui met en évidence la relation entre ces trois variables. *A priori*, on suppose que lorsque la densité (D) augmente, la vitesse (V) diminue. Cela se vérifie sur la partie (a) du graphique. Mais on observe une certaine stagnation de la vitesse à un niveau élevé, lorsque la densité est comprise entre 0 et D_0 . Cela s'explique par le fait que les vitesses sur les voies rapides urbaines sont considérées comme étant proches de la vitesse de circulation fluide¹³ c'est-à-dire V_{max} . C'est seulement à partir d'un certain niveau de la densité que la courbe débit-vitesse (b) décroît plus rapidement. En effet, la partie (a) du graphique nous montre que la courbe passe du point (D_0, V_0) , où le débit (q) est considéré comme maximum ($q_0 = V_0 \times D_0$), au point $(D_j, 0)$ représentant une situation d'embouteillage maximum puisque la vitesse est nulle et donc engendre un débit nul : $q_0 = 0$.

Lorsque le débit est inférieur à q_0 (représenté par q' sur le graphique 1.6), deux situations se présentent. La première est d'avoir une vitesse réduite mais une forte densité : c'est le point (D_H, V_H) . À l'inverse, la seconde situation s'observe avec une vitesse forte et une faible densité : c'est le point (D_L, V_L) .

Cette courbe débit-vitesse alimente les débats entre les économistes et les ingénieurs. Elle permet l'obtention d'informations sur les différents seuils de congestion. Les ingénieurs affirment que la première partie de la courbe (b) illustre une circulation fluide et la deuxième une circulation congestionnée. Les économistes définissant la première partie comme congestionnée et la deuxième partie de la courbe comme hypercongestionnée (voir Lindsey et Verhoef, 1999).

¹³ Selon Hau (1998), le débit maximum pour une voie rapide urbaine est de 1 800 véhicules par heure et par voie à 55 km/h.

GRAPHIQUE N°1.6 : Diagramme issu des données de l'ingénierie



- (a) courbe vitesse-densité
- (b) courbe débit-vitesse
- (c) courbe débit-densité

Source : graphique adapté de Lindsey et Verhoef (1999)

1.2.2. Les enseignements de la courbe débit-vitesse

Comme nous venons de le préciser, cette partie de la congestion, déterminée par la courbe débit-vitesse, est la plus difficile à concevoir pour un économiste, étant donné

qu'elle découle de l'analyse hydraulique et plus spécialement de la circulation des fluides. Nous tentons de donner les éléments clés.

Considérant dans l'analyse que la voie et les trafics sont homogènes, on se rapproche d'un régime dit laminaire. Cet écoulement laminaire correspond en hydraulique, selon Derycke (1997), « à l'écoulement régulier d'un fluide à viscosité constante dans un conduit cylindrique fermé, à parois lisses, sans pente excessive et dont le diamètre est invariant. Dans un tel conduit, la vitesse d'écoulement est faible près des parois en raison des frottements, et de plus en plus élevée vers le centre de la canalisation où elle atteint sa valeur maximale dans l'axe du conduit. [...] Mais si les conditions se modifient : fluide à viscosité variable, parois rugueuses, coude, rupture de pente, variation de diamètre (traduisons : trafic hétérogène, un ou plusieurs véhicules immobilisés...), l'écoulement est perturbé : on s'achemine vers un régime forcé (écoulement dit turbulent, lisse ou rugueux) ».

Évidemment, cette comparaison entre les écoulements de fluide et les flux routiers n'est pas parfaite, mais elle a longtemps alimenté la réflexion en économie des transports. Afin d'appliquer cette approche, nous devons mettre en évidence la non stationnarité de la densité. Pour cela, nous reprenons l'équation (1.1) qui peut aussi être présentée sous la forme : $V = \frac{q}{D} \Rightarrow V(q)$. Prenant la relation basique de la vitesse

défini par $V(q) = \frac{L}{t}$ où L représente la distance et t le temps et posant l'hypothèse que

la distance parcourue est égale à un, on obtient la relation suivante :

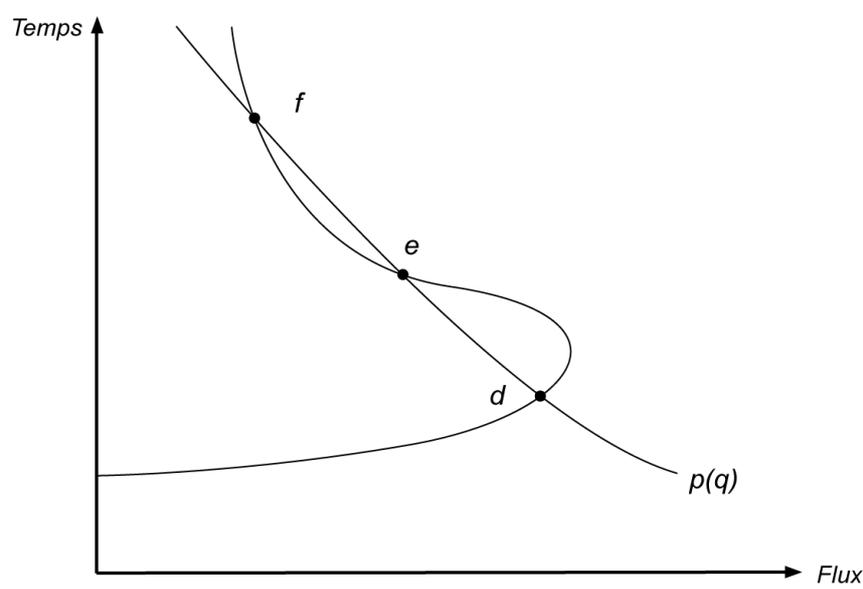
$$V(q) = \frac{1}{t} \text{ ou } t = V^{-1}(q) \Rightarrow t(q) \quad (1.2)$$

Cette relation temps-débit peut être superposée à la partie (b) du graphique n°1.6 en considérant en abscisse le débit q et en ordonnée le temps t . Les situations de congestion et d'hypercongestion s'en trouvent inversées. Un temps maximal relève d'une situation hypercongestionnée, alors qu'un temps faible prouve une situation seulement congestionnée.

Cette relation temps-débit (1.2) peut finalement être interprétée économiquement comme la qualité du service offert dépendant du temps de déplacement subi à différents

niveaux de circulation. Cette relation est par conséquent assimilable à une courbe d'offre de service et donc à une fonction de coût $C(q)$. À cette courbe d'offre, on peut confronter une courbe de demande (graphique n°1.7) afin d'obtenir un graphique typique d'offre-demande. La courbe de demande est simplifiée en une courbe linéaire monotone décroissante signifiant une faible demande lorsque le temps est élevé et une forte demande lorsque le temps est faible.

GRAPHIQUE N°1.7 : Relation offre-demande de déplacements



Source : graphique adapté de Derycke (1997)

La suite de notre analyse est fondée sur la détermination du coût de congestion.

1.2.3. Le coût de congestion de déplacement

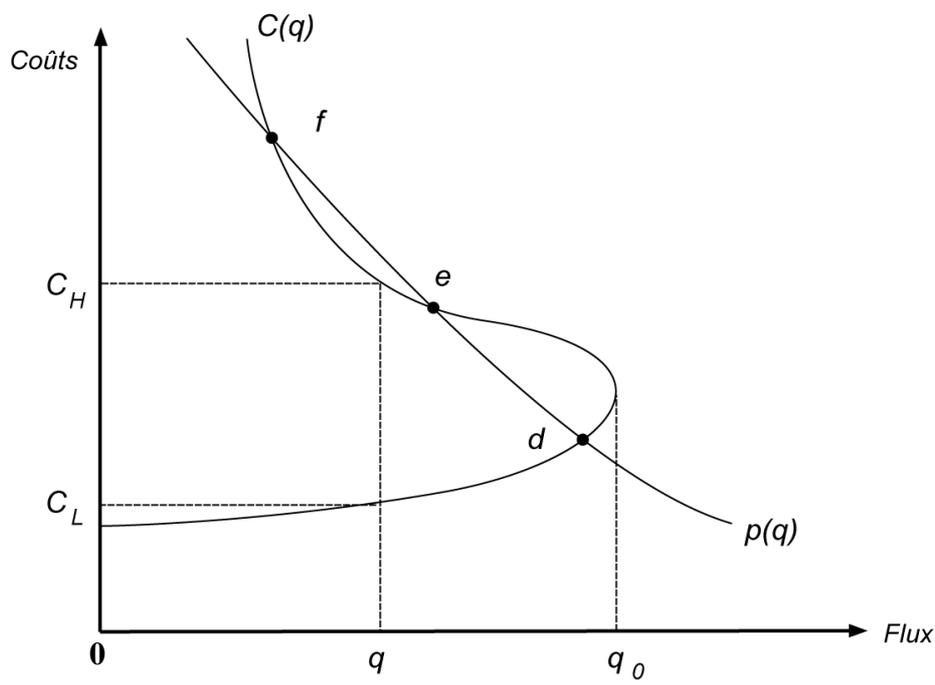
La littérature sur ce sujet n'est pas récente, mais évolue constamment. Nous nous fondons particulièrement sur les travaux de Walters (1961), mais aussi sur ceux de Lindsey et Verhoef (1999) afin de déterminer le coût dit de congestion.

Admettons que chaque usager endure un coût de déplacement, qu'il cherche à minimiser, pour une distance (L) et une valeur du temps (t) données. Avec les informations déterminées dans les sous-sections précédentes, nous pouvons en déduire une courbe du coût du déplacement :

$$C(q) = C_0 + \frac{\alpha L}{V(q)} \quad (1.3)$$

où α représente le coût unitaire du temps de déplacement, L la distance parcourue, $V(q)$ la vitesse exprimée en termes de débit (flux), et C_0 représente le coût privé de déplacement, indépendant de la congestion, comme le coût du carburant, de l'assurance, etc. Cette fonction de coût de déplacement $C(q)$ peut, comme dans le graphique n°1.7, être confrontée à une fonction de demande :

GRAPHIQUE N°1.8 : Relation coût de déplacement-demande



Source : graphique adapté de Lindsey et Verhoef (1999)

Trois points d'intersection sont identifiés : d , e et f . Comme nous l'avons fait remarquer dans la section (§ 1.2.2), la situation de congestion est la partie basse de la courbe et la situation d'hypercongestion est la partie haute. Le point d correspond à une situation de débit congestionné, alors que les points e et f correspondent à des situations d'hypercongestion¹⁴.

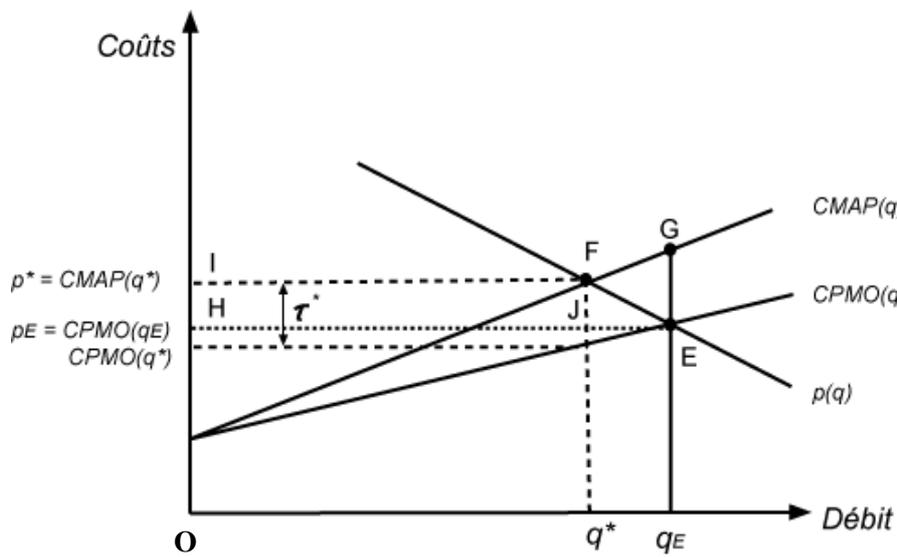
¹⁴ Voir Small et Chu (2003) ainsi que Verhoef (2003) pour le débat sur l'équilibre d'hypercongestion instable.

Pour déterminer le coût de l'externalité de la congestion, l'analyse économique ignore la partie d'hypercongestion de la courbe pour se focaliser sur la partie congestionnée (voir notamment Button, 1993).

La courbe $C(q)$ mesure le coût de déplacement par usager. Si les coûts externes du déplacement autre que la congestion ne sont pas pris en compte, alors $C(q)$ mesure le coût moyen social d'un déplacement que l'on appellera $CPMO(q)$.

De ce fait, le coût social total de q déplacements est le suivant : $CTS(q) = q \times CPMO(q)$. On en déduit le coût marginal social qui est de la forme $CMP(q) = CPMO(q) + q \times \frac{\partial CPMO(q)}{\partial q}$. Ainsi, la différence entre le coût moyen de déplacement $CPMO(q)$ et le coût marginal $CMP(q)$ représente le coût marginal externe de congestion, autrement dit « la part des coûts de congestion imposés par un usager aux autres automobilistes » selon Lindsey et Verhoef (1999). Ces différents coûts sont représentés sur le graphique suivant :

GRAPHIQUE N°1.9 : Détermination de la taxe



Source : graphique adapté de Lindsey et Verhoef (1999)

Sur le graphique n°1.9, q_E représente le nombre de déplacements de la situation initiale, c'est-à-dire de « laisser-faire ». L'optimum social de déplacement est trouvé lorsque le coût externe de congestion est pris en compte. Par ce graphique, l'optimum

social de déplacement est représenté par q^* , il correspond au point F , c'est-à-dire à l'intersection du coût marginal social $CMAP(q)$ et de la demande de déplacement $p(q)$. L'optimum peut alors être considéré comme un équilibre si les usagers payent un prix $p^* = CMAP(q^*)$. En effet, le prix à payer pour arriver à l'optimum social est $p = CPMO(q) + \tau$. La taxe pour obtenir l'optimum sera alors :

$$\tau^* = CMAP(q^*) - CPMO(q^*) \Rightarrow \tau^* = q^* \times \frac{\partial CPMO(q^*)}{\partial q} \text{ où } q^* \times \frac{\partial CPMO(q^*)}{\partial q} \text{ représente}$$

le coût marginal externe de congestion. L'aire FGE du graphique représente l'augmentation du bien-être global. Cependant malgré ce gain « collectif », les usagers voient leur situation empirer puisque le prix d'un trajet s'est élevé de OH à OI . Ce graphique montre comment internaliser l'externalité de congestion grâce à la mise en place d'une taxe dite pigouvienne.

Cette démonstration tirée des modèles classiques d'économie des transports donne des éléments intéressants sur les principes de la tarification optimale. Toutefois, dans l'objectif d'une mobilité durable, la prise en compte des externalités environnementales est un élément incontournable.

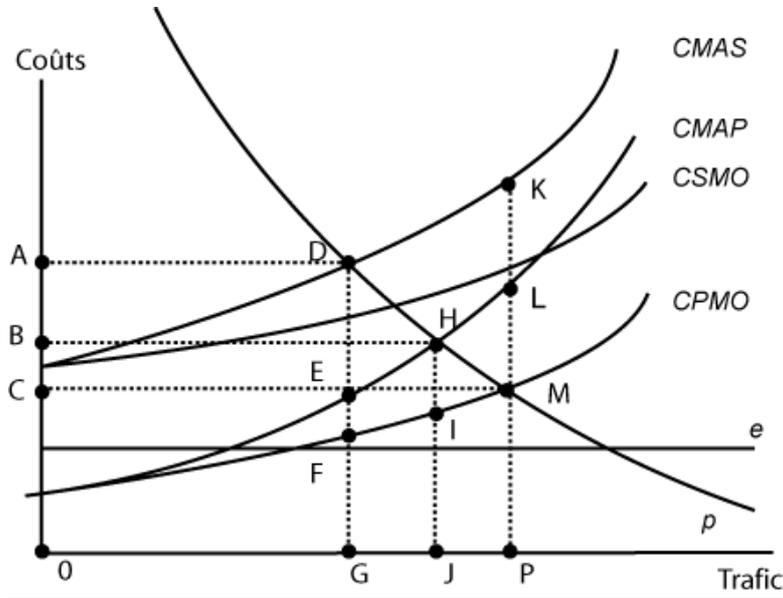
1.2.4. L'intégration de la question environnementale dans les modèles classiques

La volonté des autorités de favoriser une meilleure prise en compte de l'environnement dans les politiques de transport est en marche. Cependant, les fondements micro-économiques d'internalisation des effets de la pollution, en économie des transports, restent assez peu développés. La démarche suivie par De Palma et Lindsey (2005) repose sur le modèle classique analysé précédemment, et a pour objectif de poser un cadre théorique simple et solide à la prise en compte des effets environnementaux.

Dans ce modèle, les coûts environnementaux sont considérés comme constants pour un trajet et prennent la valeur e . L'addition de ces nouveaux coûts (e) à la fonction $CPMO(q)$, définie précédemment, donne le nouveau coût social moyen $CSMO(q)$. Le coût marginal social correspondant à celui-ci est $CMAS(q)$. Ce dernier s'élève au-dessus

du coût moyen privé ($CPMO(q)$) d'un montant égal à la somme du coût marginal de congestion et du coût environnemental : e . Leur représentation est la suivante :

GRAPHIQUE N°1.10 : Détermination de la taxe de congestion et environnementale



Source : De Palma et Lindsey (2005)

Le graphique n°1.10 montre que le trafic de la situation initiale (situation de « laisser-faire ») est représenté par P . Le trafic optimal, représenté par G^{15} , se situe au point D , à l'intersection de la demande $p(q)$ et de la courbe du coût marginal social $CMAS$. Cet équilibre est atteint si une taxe est mise en place. Cette taxe devrait être égale à un montant DF , comprenant deux éléments : le coût marginal de congestion EF et le coût marginal d'environnement DE qui est égal à e . Par conséquent, comme dans le cas de l'externalité de congestion simple, on observe que le gain du bien-être collectif a augmenté, il est représenté par l'aire DKM . Cependant, on observe aussi une augmentation du coût du déplacement passant de OB à OA . Formellement, la taxe optimale maximise le surplus collectif, le programme est donc le suivant :

$$\begin{cases} \text{Max} \Omega = \int_{q=0}^Q p(q) dq - Q(C(Q) + e) \\ \text{s.c. } p(Q) = C(Q) + \tau \end{cases} \quad (1.4)$$

¹⁵ Nous notons que le trafic optimal est inférieur au trafic en situation de « laisser-faire ».

avec τ le montant de la taxe, Q le volume du trafic, $p(Q)$ la courbe de demande inverse et $CMSO(Q)$ la courbe du coût moyen privé. La contrainte du premier ordre s'écrit :

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} = \left(p(Q) - \left(C(Q) + Q \frac{\partial C(Q)}{\partial Q} + e \right) \right) \frac{\partial Q}{\partial \tau} = 0 \quad (1.5),$$

dans laquelle on utilise la relation $\tau = p(Q) - C(Q)$.

Sous l'hypothèse $\frac{\partial Q}{\partial \tau} < 0$, on obtient le péage optimal $\tau = Q \frac{\partial C(Q)}{\partial Q} + e$ (1.6), le premier terme correspondant à l'externalité de congestion et le deuxième au coût environnemental.

La question de la redistribution des recettes du péage est abordée dans un contexte de financement et d'autofinancement des infrastructures de transports. Les auteurs reprennent et démontrent un résultat classique de la tarification aux heures de pointe (Mohring et Harwitz, 1962). Ce résultat énonce que les recettes de la tarification au coût marginal de congestion sur un équipement couvrent exactement les frais liés à une capacité optimale sous plusieurs conditions (Arnott *et al.*, 1993 et Lindsey et Verhoef, 2001). Cependant, ils soulignent que les recettes des taxes environnementales ne sont pas allouées à l'augmentation de la capacité du système de transport et précisent qu'« il y a deux raisons à cela : contrairement au cas de congestion, les usagers ne sont pas les premières victimes de la pollution ; et l'utilisation des revenus des taxes pour accroître la capacité augmenterait le trafic, et donc les coûts environnementaux », De Palma et Lindsey (2005).

Cette démonstration en économie des transports a posé les bases de la prise en compte du problème environnemental. Toutefois, même si la démonstration de De Palma et Lindsey (2005) se veut simple et théorique, elle reste la mieux explicitée sur l'internalisation de la pollution de l'automobile. Ce ne sont pas les suggestions et les propositions d'internalisation de la pollution qui font défaut, ce sont plutôt les modélisations théoriques qui sont si peu développées et qui sont pourtant indispensables pour une future application d'un outil tel que la taxe. La section suivante présente les deux principales approches de modélisation de la congestion.

1.3. Deux modélisations de références de la congestion : l'approche par les flux et l'approche par les files d'attente

Small (1982) a été le premier à démontrer que les individus supportent deux sortes de coûts lors de leur déplacement domicile-travail. En effet, il y a un coût appelé coût durée dû à la durée du trajet et le deuxième coût supporté par les individus est le coût horaire, c'est-à-dire un coût résultant de l'arrivée en avance ou en retard sur le lieu de travail. Selon les individus, ces deux types de coûts sont perçus différemment. En effet, un individu avec des horaires flexibles aura un coût horaire faible alors que pour l'ouvrier à la chaîne la contrainte horaire sera élevée.

Selon Chu (1995), il existe une capacité d'écoulement de la voirie K qui détermine les différences entre les modèles de flux, ainsi que ceux de file d'attente :

- Si on se trouve en dessous de K , alors la vitesse est liée négativement au débit, c'est-à-dire que nous sommes dans la situation où la vitesse diminue lorsque le débit augmente ; nous sommes dans la situation des modèles de flux de trafic.
- Si le débit atteint K , alors une file d'attente va se former, et le flux d'automobiles est limité par la capacité d'écoulement de la voirie, c'est-à-dire que nous sommes dans la situation des modèles de files d'attente ou de goulots d'étranglement. Dans ce cas, le débit est constant et égal à la capacité d'écoulement de la voirie.

Cette section est centrée sur l'analyse des deux approches fondamentales en termes de modélisation de la congestion. Les modèles ainsi que leurs limites sont présentés et comparés.

1.3.1. Le modèle temporel de flux

Suite aux travaux d'Henderson (1974, 1981, 1992), les modèles de flux ont été approfondis par Chu (1995, 1999). L'article de 1995 de Chu reformule l'approche développée par Henderson, notamment en revenant sur des hypothèses contradictoires développées au cours de cette section. De plus, Henderson aboutissait à un équilibre par

la numérisation, alors que Chu apporte un développement théorique de la résolution de l'équilibre.

1.3.1. Les principales caractéristiques

La première étape du modèle est de déterminer un niveau d'équilibre de congestion afin d'en déduire un coût total privé de déplacement, puis un coût total collectif. Le modèle est construit sur les hypothèses suivantes :

- HYPOTHÈSE 1 (H1) : La version du modèle de Chu (1995) diffère de l'approche d'Henderson (1974) dans la mesure où « 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 de départs lorsqu'il part de son domicile » p. 326.
- HYPOTHÈSE 2 (H2) : Le modèle se concentre sur une journée de travail, c'est-à-dire sur le trajet domicile-travail d'une longueur L , exprimée en kilomètres, commune à tous les individus.
- HYPOTHÈSE 3 (H3) : Tous les individus ont un objectif commun d'heure d'arrivée sur le lieu de travail : t^* .
- HYPOTHÈSE 4 (H4) : Les individus ont une fonction de coût agrégé selon le coût du temps de déplacement C_T et du coût horaire C_H . Le coût du temps de déplacement est fonction de α . Le coût horaire dépend soit d'un coût d'avance d'arrivée sur le lieu de travail (β), soit d'un coût de retard (ν).

Les valeurs de ces paramètres ont fait l'objet de différentes études.

- HYPOTHÈSE 5 (H5) : Les individus N sont supposés être homogènes et fixes.

Le fait que N soit fixé dans un modèle de flux engendre un raisonnement à court terme dans la mesure où la population est censée ne pas augmenter.

- HYPOTHÈSE 6 (H6) : Les individus choisissent leur horaire d'arrivée t' sur le lieu de travail afin de minimiser leur coût privé de déplacement.

➤ HYPOTHÈSE 7 (H7) : L'équilibre obtenu est un équilibre de Nash.

Le tableau n°1.2 a comme objectif d'indiquer les équations de base du modèle temporel de flux ainsi que les explications.

TABLEAU N°1.2 : Équations du modèle de flux de Chu (1995)

Significations	Équations	Notations
Coût total du déplacement privé (1.7)	$C(t') = C_T(t') + C_H(t')$	$C_T(t')$: coût du temps de déplacement. $C_H(t')$: coût horaire. t' : heure d'arrivée sur le lieu de travail.
Coût du temps de déplacement (1.8)	$C_T(t') = \alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right)$	α : coût unitaire du temps de déplacement. L : longueur du trajet domicile-travail en kilomètres. $V(t')$: vitesse en kilomètres/heure.
Coût horaire du déplacement (1.9a et 1.9b)	$C_H(t') = \begin{cases} \beta(t^* - t') & \text{si } t_1' \leq t' \leq t^* \\ \nu(t' - t^*) & \text{si } t^* \leq t' < t_2' \end{cases}$	β : coût unitaire d'avance sur le lieu de travail. ν : coût unitaire de retard sur le lieu de travail. t^* : heure objectif d'arrivée sur le lieu de travail. t_1' : heure du premier arrivé. t_2' : heure du dernier arrivé.
Coût total privé du déplacement (combinant (1.7), (1.8) et (1.9a et 1.9b)) (1.10)	$C(t') = \begin{cases} \alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right) + \beta(t^* - t') + \tau(t') & \text{si } t_1' \leq t' \leq t^* \\ \alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right) + \nu(t' - t^*) + \tau(t') & \text{si } t^* \leq t' < t_2' \end{cases}$	$\tau(t')$: péage éventuel.
Temps de déplacement pour effectuer un kilomètre (1.11)	$T(t') = \frac{1}{V(t')} = \frac{1}{V_{\max}} + \left[\frac{A(t')}{K} \right]^\gamma$	V_{\max} : vitesse en circulation fluide. $A(t')$: nombre d'arrivées de véhicules sur le lieu de travail (en véhicules par heure). K : capacité de la route (en véhicules par heure). γ : élasticité du temps de déplacement par rapport au taux d'arrivée.

L'équation (1.7) correspond au coût total privé de déplacement domicile-travail $C(t')$ comprenant le coût horaire (coût d'avance ou de retard) et le coût du temps de déplacement. Concernant l'équation (1.8), $V(t')$ représente la vitesse à laquelle un individu circule pour arriver en t' sur le lieu de travail.

Les équations (1.9a) et (1.9b) signifient respectivement que si l'individu arrive entre t'_1 et t^* , alors il sera en avance et subira un coût d'avance. Si l'individu arrive entre t^* et t'_2 , alors il sera en retard et subira un coût de retard.

Le coût total privé (1.10) dépend du coût du temps de déplacement, du coût d'avance ou de retard sur le lieu de travail, du péage s'il y a un. Enfin, le temps de déplacement pour effectuer un kilomètre (donné par l'équation (1.11) est égal au temps de déplacement en circulation fluide pour faire un kilomètre, plus le taux d'arrivée sur le lieu de travail par rapport à la capacité de la route, avec une élasticité du temps de déplacement.

1.3.2. Détermination de l'équilibre de congestion dans un modèle de flux

La détermination de l'équilibre de congestion, qui représente le trafic en situation initiale, permet d'obtenir le coût total privé d'un déplacement et le coût total social.

Chu (1995) propose trois conditions pour que l'équilibre de congestion soit vérifié.

- **Condition n°1** : Les usagers arrivant sur le lieu de travail en t'_1 ou en t'_2 ne sont pas victimes de la congestion car il n'y a aucun ralentissement de la circulation. Selon l'équation (1.10), cela

$$\text{implique : } C(t'_1) = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + \beta (t^* - t'_1) \quad (1.12)$$

$$\text{et } C(t'_2) = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + \nu (t'_2 - t^*) \quad (1.13)$$

- **Condition n°2** : Les coûts totaux privés doivent être égaux, que l'on arrive en t'_1 ou en t'_2 . Cela impose :

$$C(t'_1) = C(t'_2) \quad (1.14).$$

- **Condition n°3** : Tous les individus doivent arriver sur le lieu de travail entre t'_1 et t'_2 , cela signifie que : $\int_{t'_1}^{t'_2} A(t')dt' = N$ (1.15).

En supposant que les individus arrivent soit en avance sur le lieu de travail, soit en retard, on peut déterminer dans un premier temps les horaires d'équilibre. Le tableau n°1.3 présente les deux situations.

TABLEAU N°1.3 : Détermination des horaires d'équilibre sans péage

Individus arrivant en avance sur le lieu de travail : $t' \in [t'_1, t^*]$	Individus arrivant en retard sur le lieu de travail : $t' \in [t^*, t'_2]$
En combinant (1.10) et (1.12), $C(t') = C(t'_1)$ on obtient : Équilibre en fonction du temps de trajet : $\frac{L}{V(t')} = \frac{L}{V_{\max}} + \frac{\beta}{\alpha}(t' - t'_1)$ (1.16)	En combinant (1.10) et (1.13), $C(t') = C(t'_2)$ on obtient : Équilibre en fonction du temps de trajet : $\frac{L}{V(t')} = \frac{L}{V_{\max}} + \frac{v}{\alpha}(t'_2 - t')$ (1.18)
En combinant (1.11) et (1.16) on obtient : $\frac{L}{V_{\max}} + \frac{\beta}{\alpha}(t' - t'_1) = \frac{L}{V_{\max}} + L \left(\frac{A(t')}{K} \right)^\gamma \Rightarrow A^E(t') = K \left[\frac{\beta}{\alpha L} (t' - t'_1) \right]^{\frac{1}{\gamma}}$ (1.17)	En combinant (1.11) et (1.18) on obtient : $\frac{L}{V_{\max}} + \frac{v}{\alpha}(t'_2 - t') = \frac{L}{V_{\max}} + L \left(\frac{A(t')}{K} \right)^\gamma \Rightarrow A^E(t') = K \left[\frac{v}{\alpha L} (t'_2 - t') \right]^{\frac{1}{\gamma}}$ (1.19)

Si l'on suit la condition n°3, et en utilisant les équations (1.15), (1.17) et (1.19), alors on obtient :

$$\int_{t'_1}^{t'_2} A^E(t') dt' = N \Rightarrow \int_{t'_1}^{t^*} K \left[\frac{\beta}{\alpha L} (t' - t'_1) \right]^{\frac{1}{\gamma}} dt' + \int_{t^*}^{t'_2} K \left[\frac{v}{\alpha L} (t'_2 - t') \right]^{\frac{1}{\gamma}} dt' = N.$$

La condition se ramène à (cf. calculs en annexe 1.1) :

$$\left(\frac{1}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{\gamma}} K \left(\frac{\gamma}{1 + \gamma} \right) \left[\beta^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t'_1)^{\frac{1 + \gamma}{\gamma}} + v^{\frac{1}{\gamma}} (t'_2 - t^*)^{\frac{1 + \gamma}{\gamma}} \right] = N$$
 (1.20)

Suivant la condition n°2 :

$$C(t'_1) = C(t'_2) \Rightarrow \beta(t^* - t'_1) = v(t'_2 - t^*) \Rightarrow (t^* - t'_1) = \frac{v}{\beta}(t'_2 - t^*)$$
 (1.21)

En remplaçant (1.21) dans (1.20) on obtient :

$$(t'_2 - t^*) = \left(\frac{\alpha}{v} \right) \left[\frac{N \left(\frac{1 + \gamma}{\gamma} \right) \frac{L^\gamma \beta v}{\alpha(v + \beta)}}{K} \right]^{\frac{\gamma}{1 + \gamma}}$$
 (1.22)

On procède de la même façon pour obtenir :

$$(t^* - t'_1) = \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right) \frac{L^{\frac{1}{\gamma}} \beta v}{\alpha(v+\beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (1.23)^{16}$$

On peut déduire des équations (1.22) et (1.23) les horaires d'équilibre de congestion :

$$t'_1 = t^* - \psi \frac{\alpha}{\beta} \quad (1.24) \quad \text{et} \quad t'_2 = t^* + \psi \frac{\alpha}{v} \quad (1.25) \quad \text{avec}$$

$$\psi = \left(\frac{N}{K} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\delta}{\alpha} \frac{L^{\frac{1}{\gamma}}}{\alpha} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad \text{avec} \quad \delta = \frac{\beta v}{\beta + v}$$

La durée de l'heure de pointe est alors égale à $\boxed{t'_2 - t'_1 = \frac{\psi \alpha}{\delta}} \quad (1.26)$

L'équation (1.26) nous indique que l'heure de pointe à l'équilibre est croissante avec les paramètres α et ψ et décroissante avec δ (paramètre relatif aux coûts d'avance et de retard).

Les horaires d'équilibre de congestion permettent de déterminer, à l'équilibre, le coût privé d'un déplacement pour un individu et le coût total subi par tous les usagers. Le tableau n°1.4 nous les présente.

TABLEAU N°1.4 : À l'équilibre

Opérations	Équations
À l'équilibre : selon la condition n°1, les individus arrivant en premier ou en dernier ne subissent pas de ralentissement	$C_T(t'_1) = C_T(t'_2) = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right)$
À l'équilibre : les coûts privés de déplacement sont égaux :	$C(t'_1) = C(t'_2) \Rightarrow \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + \beta(t^* - t'_1) = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + v(t'_2 - t^*)$
À l'équilibre : en remplaçant les horaires t'_1 et t'_2 par leur valeur d'équilibre, on trouve le coût privé pour un individu :	$C^{E'} = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + \alpha \psi \quad (1.27)$
À l'équilibre : le coût total subi par tous les usagers (N) est :	$CT^{E'} = N \left(\alpha \frac{L}{V_{\max}} + \alpha \psi \right) \quad (1.28)$

¹⁶ Les calculs des équations (1.22) et (1.23) sont présentés en annexe 1.1.

Ensuite, on procède aux calculs des coûts des déplacements en fonction du coût de congestion et du coût total horaire subis par les automobilistes. Les calculs sont présentés en annexe 1.2. Le tableau n°1.5 donne les principaux résultats.

TABLEAU N°1.5 : Les différents coûts de déplacement à l'équilibre

Le coût total de congestion : $CTC^{E'}$	$CTC^{E'} = \alpha N \psi \frac{1+\gamma}{1+2\gamma}$ (1.29)
Le coût total horaire : $CTH^{E'}$	$CTH^{E'} = \alpha N \psi \frac{\gamma}{1+2\gamma}$ (1.30)
Le coût total social : $CTS^{E'} = CTC^{E'} + CTH^{E'}$	$CTS^{E'} = \alpha N \psi$ (1.31)
Le coût marginal social : $CmS^{E'} = \frac{\partial CTS^{E'}}{\partial N}$	$CmS^{E'} = \alpha \psi$ (1.32)

Le tableau n°1.5 montre que le coût total social à l'équilibre ($CTS^{E'}$) est égal au nombre d'individus N multipliés par les paramètres α et ψ . Le coût marginal social à l'équilibre ($CmS^{E'}$) est alors égal au produit des paramètres α et ψ .

Cette sous-section (§ 1.2.3) nous a permis de déterminer l'équilibre de congestion dans un modèle de flux temporel. L'objectif suivant est de trouver la valeur du péage urbain à mettre en place afin d'aboutir à l'optimum social.

1.3.3. Détermination de l'optimum social

Pour aboutir à l'optimum social, le régulateur cherche à minimiser le coût total social (CTS). Pour ce faire, il va agir sur le nombre d'arrivée sur le lieu de travail sous la contrainte que les individus arrivent entre t_1' et t_2' .

Le programme est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(CTS) = \int_{t_1'}^{t^*} A(t') \left[\alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right) + \beta(t^* - t') \right] dt' + \int_{t^*}^{t_2'} A(t') \left[\alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right) + \nu(t' - t^*) \right] dt' \\ \text{s.c.} : \int_{t_1'}^{t_2'} A(t') dt' = N \end{array} \right.$$

En posant λ le multiplicateur de Lagrange associé à cette contrainte, le lagrangien s'écrit :

$$\xi = \int_{t_1}^{t^*} A(t') \left[\alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right) + \beta(t^* - t') \right] dt' + \int_{t^*}^{t_2} A(t') \left[\alpha \left(\frac{L}{V(t')} \right) + v(t' - t^*) \right] dt' + \lambda \left[N - \int_{t_1}^{t_2} A(t') dt' \right] \quad (1.33)$$

Selon Henderson (1974), λ représente le coût marginal social d'une arrivée en t' .

La condition du premier ordre par rapport à $A(t')$ est comme suit :

$$\lambda = \begin{cases} \alpha \frac{L}{V(t')} + \beta(t^* - t') + \alpha A(t') \left(\frac{\partial \left(\frac{L}{V(t')} \right)}{\partial A(t')} \right) & \text{si } t_1 \leq t' \leq t^* \\ \alpha \frac{L}{V(t')} + v(t' - t^*) + \alpha A(t') \left(\frac{\partial \left(\frac{L}{V(t')} \right)}{\partial A(t')} \right) & \text{si } t^* < t' \leq t_2 \end{cases} \quad (1.34)$$

Pour atteindre l'optimum social, le régulateur peut faire payer un certain montant aux automobilistes sous forme de péage afin de prendre en compte le coût de congestion que les automobilistes font subir à la collectivité. Suivant les démonstrations d'Henderson (1974), les deux premiers termes de l'équation (1.34) peuvent être interprétés comme le coût privé payé par les individus. Le troisième terme est interprété comme le péage optimal que les individus doivent payer.

$$\text{Ainsi : } \tau(t') = \alpha A(t') \frac{\partial \left(\frac{L}{V(t')} \right)}{\partial A(t')} \text{ avec } t_1 \leq t^* \leq t_2 \quad (1.35)$$

En combinant l'équation (1.35) avec l'équation (1.11), on obtient le péage suivant :

$$\tau(t') = \alpha \gamma \left(\frac{L}{V(t')} - \frac{L}{V_{\max}} \right) \quad (1.36)$$

Cette relation indique que le péage est égal à la différence entre la durée du déplacement pour arriver sur le lieu de travail en t' et celle en circulation fluide, multipliée par le coût du temps de déplacement (α) et par l'élasticité du temps de déplacement par rapport au taux d'arrivées sur le lieu de travail (γ).

Avec ces résultats nous pouvons, comme dans la situation d'équilibre, déterminer les horaires de déplacements à l'optimum. Le tableau n°1.6 présente les situations où les individus arrivent en avance et en retard sur le lieu de travail lorsqu'un péage est mis en place.

TABLEAU N°1.6 : Les horaires de déplacements avec péage

Individus arrivant en avance sur le lieu de travail : $t' \in [t'_1, t^*]$	Individus arrivant en retard sur le lieu de travail : $t \in [t^*, t'_2]$
En combinant (1.9) et (1.36) on obtient : $C(t') = \alpha \frac{L}{V(t')} + \beta(t^* - t') + \alpha\gamma \left(\frac{L}{V(t')} - \frac{L}{V_{\max}} \right)$ (1.37)	En combinant (1.10) et (1.36) on obtient : $C(t) = \alpha \frac{L}{V(t)} + v(t' - t^*) + \alpha\gamma \left(\frac{L}{V(t)} - \frac{L}{V_{\max}} \right)$ (1.40)
En combinant (1.37) et (1.12): $C(t') = C(t'_1)$, on obtient : $\frac{L}{V(t')} = \frac{L}{V_{\max}} + \frac{1}{1+\gamma} \frac{\beta}{\alpha} (t' - t'_1)$ (1.38)	En combinant (1.40) et (1.13): $C(t) = C(t'_2)$, on a : $\frac{L}{V(t)} = \frac{L}{V_{\max}} + \frac{1}{1+\gamma} \frac{v}{\alpha} (t'_2 - t')$ (1.41)
En combinant (1.11) et (1.38) on obtient : $A^o(t') = K \left[\frac{1}{1+\gamma} \frac{\beta}{\alpha L} (t' - t'_1) \right]^{\frac{1}{\gamma}}$ (1.39)	En combinant (1.11) et (1.41), on arrive à : $A^o(t) = K \left[\frac{1}{1+\gamma} \frac{v}{\alpha L} (t'_2 - t') \right]^{\frac{1}{\gamma}}$ (1.42)

Si l'on suit la condition n°3 : $\int_{t'_1}^{t'_2} A(t') dt' = N$ présentée précédemment, les relations

(1.15), (1.39) et (1.42) conduisent à :

$$\int_{t'_1}^{t^*} K \left[\frac{1}{1+\gamma} \frac{\beta}{\alpha L} (t' - t'_1) \right]^{\frac{1}{\gamma}} + \int_{t^*}^{t'_2} K \left[\frac{1}{1+\gamma} \frac{v}{\alpha L} (t'_2 - t') \right]^{\frac{1}{\gamma}} = N \quad (1.43)$$

On en déduit :

$$K \left(\frac{1}{(1+\gamma)(\alpha L)} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \left(\beta^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t'_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} + v^{\frac{1}{\gamma}} (t'_2 - t^*)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} \right) = N \quad (1.44)$$

La condition n°2 étant toujours vérifiée :

$$C(t'_1) = C(t'_2) \text{ ce qui implique } \beta(t^* - t'_1) = v(t'_2 - t^*) \text{ d'où } \boxed{t^* - t'_1 = \frac{v}{\beta} (t'_2 - t^*)} \quad (1.14)$$

On peut déterminer les horaires à l'optimum en remplaçant (1.14) dans (1.44) :

$$(t_2' - t^*) = \left(\frac{\alpha}{v}\right) \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right) \frac{(1+\gamma)^{\frac{1}{\gamma}} L^{\frac{1}{\gamma}} \beta v}{\alpha(v+\beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (1.45)$$

On procède de la même façon pour obtenir :

$$(t^* - t_1') = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right) \frac{(1+\gamma)^{\frac{1}{\gamma}} L^{\frac{1}{\gamma}} \beta v}{\alpha(v+\beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (1.46)$$

On peut en déduire les horaires à l'optimum :

$$\boxed{t_1' = t^* - \psi \frac{\alpha}{\beta} (1+\gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}}} \quad (1.47) \quad \text{et} \quad \boxed{t_2' = t^* + \psi \frac{\alpha}{v} (1+\gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}}} \quad (1.48) \quad \text{avec}$$

$$\psi = \left(\frac{N}{K} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\delta}{\alpha} L^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad \text{avec} \quad \delta = \frac{\beta v}{\beta + v}.$$

La durée de l'heure de pointe est alors égale à la différence entre les horaires à

$$\text{l'optimum c'est-à-dire} \quad \boxed{(t_2' - t_1') = \frac{\psi (1+\gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \alpha}{\delta}} \quad (1.49)$$

Comme dans la durée de l'heure de pointe à l'équilibre (1.26), celle à l'optimum (1.49) est décroissante avec le paramètre δ , et croissante avec α et le paramètre ψ . Cependant, la durée de l'heure de pointe à l'optimum est aussi croissante avec un élément supplémentaire : $(1+\gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}}$ faisant intervenir l'élasticité du temps de déplacement par rapport au taux d'arrivées sur le lieu de travail.

Les horaires t_1' et t_2' permettent de déterminer, à l'optimum, le coût de déplacement pour un individu et le coût total social. Le tableau n°1.7 nous les présente.

TABLEAU N°1.7 : À l'optimum

Opérations	Équations
À l'optimum comme à l'équilibre : les individus arrivant en premier ou en dernier ne subissent pas de ralentissement	$C_T(t'_1) = C_T(t'_2) = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right)$
À l'optimum : les coûts privés de déplacement sont égaux :	$C(t'_1) = C(t'_2) \Rightarrow \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + \beta(t^* - t'_1) + \tau = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + v(t'_2 - t^*) + \tau$
À l'optimum : en remplaçant les horaires t'_1 et t'_2 par leur valeur, on trouve le coût privé pour un individu :	$C^{O'} = \alpha \left(\frac{L}{V_{\max}} \right) + \alpha \psi (1 + \gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (1.50)$
À l'optimum : le coût total subi par tous les usagers (N) est :	$CT^{O'} = N \left(\alpha \frac{L}{V_{\max}} + \alpha \psi (1 + \gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \right) \quad (1.51)$

Grâce à ces résultats, nous pouvons calculer les différents coûts de déplacement à l'optimum. Les calculs suivent les mêmes démonstrations que dans la situation à l'équilibre. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU N°1.8 : Les différents coûts à l'optimum

Le coût total de congestion : $CTC^{O'}$	$CTC^{O'} = \int_{t'_1}^{t'_2} \alpha A(t') \left[\frac{L}{A(t')} - \frac{L}{V_{\max}} \right] dt' = \alpha N \psi \frac{1 + \gamma}{1 + 2\gamma} (1 + \gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (1.52)$
Le coût total horaire : $CTH^{O'}$	$CTH^{O'} = \int_{t'_1}^{t^*} \beta A(t')(t^* - t') dt' + \int_{t^*}^{t'_2} v A(t')(t' - t^*) dt' = \alpha N \psi \frac{\gamma}{1 + 2\gamma} (1 + \gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (1.53)$
Le coût total social : $CTS^{O'} = CTC^{O'} + CTH^{O'}$	$CTS^{O'} = \alpha N \psi \frac{1 + \gamma}{1 + 2\gamma} (1 + \gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (1.54)$
Le coût marginal social : $CmS^{O'} = \frac{\partial CTS^{O'}}{\partial N}$	$CmS^{O'} = \alpha \psi \frac{1 + \gamma}{1 + 2\gamma} (1 + \gamma)^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (1.55)$

Le flux temporel des arrivées sur le lieu de travail est concentré autour de t^* , lorsqu'on se trouve à l'équilibre. Au contraire, avec l'instauration d'un péage $\tau(t')$ variable dans le temps, la trajectoire des arrivées est plus étalée sur la période de pointe $[t'_1, t'_2]$. Ainsi, selon Mirabel (1996), « la politique optimale des pouvoirs publics serait d'« étaler » 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) ».

1.3.2. Le modèle de file d'attente ou goulot d'étranglement

Suite aux travaux de Vickrey (1969), les modèles de file d'attente ou goulots d'étranglement ont été développés principalement par Arnott *et al.* (1990, 1993) et Tabuchi (1993).

Cette représentation de la congestion, en termes de goulots d'étranglement, est dérivée de la conception faite par Vickrey qui décrit celle-ci de cette manière : « Une infrastructure routière définit un débit maximum de passage compte tenu d'un taux d'arrivée aléatoire de véhicules. Si le taux devient supérieur au débit théorique, alors une file d'attente se forme et se répercute sur plusieurs périodes puisque le débit définit le nombre d'utilisateurs maximal pouvant passer à chaque période. » Ce genre de modèle est dit dynamique dans la mesure où le trafic d'une période de temps est directement lié au trafic des périodes précédentes autant qu'au taux de départ de la période courante. L'objectif de ces modèles est d'aboutir à un équilibre de congestion sans péage, d'évaluer les coûts subis par l'utilisateur, ainsi que par la collectivité, et d'analyser l'impact des différentes politiques de régulation mises en place afin d'arriver à l'optimum de premier ou second rang. Concrètement, l'équilibre trouvé est un équilibre de Nash dans un jeu de coordination non-coopératif.

1.3.2.1. Caractéristiques principales du modèle

Comme dans le modèle de flux, la première étape consiste à déterminer un niveau de congestion d'équilibre et d'en déduire un coût privé pour l'individu et un coût social total. Pour ce faire, il faut schématiser le plus simplement possible une infrastructure routière. On va considérer un modèle *bottleneck* dans sa version la plus restreinte (pas forcément la plus simple). Il comprend : un seul mode de transport (la voiture), un seul itinéraire pour faire le trajet domicile-travail, une seule heure d'arrivée au travail comme objectif, des valeurs temps identiques à chaque individu, une demande non-élastique, une capacité de l'infrastructure fixe et des utilisateurs homogènes.

Vickrey (1969) souligne que la durée de la congestion est endogène : l'utilisateur souhaitant arriver à une certaine heure est amené en période de pointe à arbitrer entre son temps de trajet et son temps d'avance ou de retard à l'arrivée s'il décale son départ.

Arnott *et al.* (1990) ont développé ce modèle en considérant que l'arrivée (qui peut être l'entrée sur l'infrastructure en trafic fluide) est régulée par l'intermédiaire d'un goulot ponctuel de débit maximum fixé, en amont duquel se forme éventuellement une queue dont la longueur détermine le temps d'attente. On introduit donc l'idée que les usagers sont susceptibles d'adapter leur heure de départ pour éviter de circuler en période de pointe.

Le modèle est construit sur les hypothèses suivantes :

- HYPOTHÈSE 1' (H1') : Si la cadence des arrivées au goulot d'étranglement est supérieure à la capacité K de la route, alors on observe la formation d'une file d'attente (concept introduit par Vickrey, 1969 et modèle réalisé par Arnott *et al.*, 1990, 1993). Les usagers sont supposés passer à travers le goulot (en un temps nul) dans leur ordre d'arrivée. Ce principe s'appelle « premier-arrivé, premier-servi » *first-in, first-out* (FIFO).
- HYPOTHÈSE 2' (H2') : L'objectif commun d'heure d'arrivée sur le lieu de travail est t^* .
- HYPOTHÈSE 3' (H3') : Les individus ont une fonction de coût « agrégé » qui dépend du coût du temps d'attente dans la file (α), du coût de retard (v) ou d'avance (β).

Les valeurs du temps sont classées comme suit : $v > \alpha > \beta$ selon l'étude de Small (1982)¹⁷.

- HYPOTHÈSE 4' (H4') : Dans le modèle, les individus N sont considérés comme homogènes.

Toutefois, cette hypothèse très restrictive peut être relâchée, en considérant que les individus peuvent être hétérogènes au travers des quatre variables exogènes du modèle : t^* , α , β , v .

- HYPOTHÈSE 5' (H5') : N est fixe, la demande est inélastique.

D'après Arnott *et al.* (1998), « la considération d'une demande élastique ne change pas grand-chose dans les considérations d'utilisation optimale de la capacité de

¹⁷ Depuis, différentes études ont été réalisées afin de déterminer les valeurs de ces paramètres ; un tableau récapitulatif est présenté dans l'annexe 3.5.

transport, mais devient particulièrement importante dans les considérations de choix de capacité optimale dans la mesure où la notion de demande latente de transport doit être considérée ».

- HYPOTHÈSE 6' (H6') : L'équilibre atteint est un équilibre de Nash, c'est-à-dire qu'aucun agent n'a intérêt à modifier son comportement, celui de tous les autres étant supposé fixe.

Sous H6', les flux de départ s'établissent alors de manière à égaliser les coûts généralisés de chaque usager puisqu'ils sont homogènes. Cela suppose une information parfaite de tous les individus. En effet, tous les individus ont le même coût généralisé, sinon ceux qui ont un coût plus élevé modifieraient leur départ.

Le tableau n°1.9 indique les équations de base du modèle d'Arnott *et al.* (1990,1993). À la différence du modèle de flux, les individus choisissent leur horaire de départ et non leur horaire d'arrivée.

TABLEAU N°1.9 : Équations de base du modèle d’Arnott. *et al.*

Significations	Équations	Notations
Temps de déplacement domicile-travail (1.56)	$T(t) = T^f + T^V(t)$	T^f : temps de trajet fixe. $T^V(t)$: temps de trajet variable. t : heure de départ du domicile.
Temps de déplacement domicile-travail (1.57)	$T(t) = T^V(t) = \frac{D(t)}{K}$	$D(t)$: longueur de la file d’attente. K : capacité du goulot d’étranglement.
Longueur de la file d’attente (1.58) Différenciation par rapport au temps t (1.59)	$D(t) = \int_{\hat{t}}^t r(u) du - K(t - \hat{t})$ $\frac{\partial D}{\partial t} = \dot{D}(t) = r(t) - K \quad \text{pour } D(t) > 0$	\hat{t} : dernier moment avant l’apparition de la file d’attente. $r(t)$: le taux des départs du domicile à l’heure t . $K(t - \hat{t})$: nombre de véhicules qui ont déjà franchi le bouchon entre \hat{t} et t .
Coût privé de déplacement (temps de trajet + coût d’avance ou de retard sur le lieu de travail) (1.60)	$C(t) = \begin{cases} \alpha T^V(t) + \beta(t^* - t - T^V(t)) + \tau(t) & \text{si } t + T^V(t) \leq t^* \\ \alpha T^V(t) + \nu(t + T^V(t) - t^*) + \tau(t) & \text{si } t + T^V(t) > t^* \end{cases}$	α : coût unitaire de temps de déplacement. β : coût unitaire d’avance sur le lieu de travail. ν : coût unitaire de retard sur le lieu de travail. $\tau(t)$: péage éventuel. t^* : heure objectif d’arrivée sur le lieu de travail.
Heure de départ du domicile afin d’arriver à l’heure sur le lieu de travail (1.61)	$\tilde{t} = t^* - T^V(\tilde{t})$	\tilde{t} : heure départ du domicile pour arriver à l’heure.

Le temps de trajet fixe de l’équation (1.56) est considéré comme nul. Le temps de déplacement est donc seulement fonction de la congestion, il correspond au temps passé dans la file d’attente. $D(t)$ est le nombre de voitures dans la file d’attente lorsque l’individu quitte son domicile en t , et K correspond à la quantité de véhicules pouvant passer à chaque période de temps. De l’équation (1.58), on déduit que $D(t)$ correspond au nombre cumulé des arrivées au niveau du goulot d’étranglement entre \hat{t} et t , moins le nombre de véhicules qui a déjà franchi le bouchon entre \hat{t} (dernier moment avant

l'apparition de la file d'attente) et t (heure du départ du domicile). Le coût privé du déplacement défini par l'équation (1.60) correspond à la somme du coût du temps de trajet variable ($\alpha T^V(t)$), du coût d'avance ou de retard sur le lieu de travail, et du péage s'il y en a un. L'heure de départ du domicile représentée en (1.61) est équivalente à l'heure de commencement du travail, moins le temps de trajet (temps passé dans les embouteillages).

1.3.2.2. Détermination de l'équilibre de congestion

Trouver l'équilibre de congestion permet de déterminer le coût de déplacement pour un individu et le coût total supporté par la collectivité.

Par l'hypothèse 6' du modèle, l'équilibre est obtenu lorsqu'aucun individu ne peut diminuer son coût de déplacement en modifiant son heure de départ. Par cette condition, on peut écrire $C(t) = \bar{c}$ ce qui implique $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$.

En supposant, pour l'instant, qu'il n'y a pas de péage mis en place, le prix d'un trajet pour un automobiliste peut se définir comme suit :

$$p(t) = C(t) \text{ avec } \tau(t) = 0 \text{ ce qui implique } p(t) = \bar{c} \text{ d'où } \frac{\partial p(t)}{\partial t} = 0 \quad (1.62)$$

En supposant, par ailleurs, que l'heure de pointe débute en t_1 et se termine en t_2 , alors en combinant les équations (1.60), (1.61) et (1.62), on obtient les résultats synthétisés dans le tableau suivant:

TABLEAU N°1.10 : Les différentes situations de l'heure de pointe

Individus arrivant en avance sur le lieu de travail : si $t \in [t_1, \tilde{t}]$	Individus arrivant en retard sur le lieu de travail : si $t \in [\tilde{t}, t_2]$
$p(t) = \alpha T^V(t) + \beta [t^* - t - T^V(t)]$ (1.63)	$p(t) = \alpha T^V(t) + v [t + T^V(t) - t^*]$ (1.67)
En combinant (1.63) et (1.62), on obtient : $(\alpha - \beta) \frac{\partial T^V(t)}{\partial t} - \beta = 0$ (1.64)	En combinant (1.67) et (1.62), on obtient : $(\alpha + v) \frac{\partial T^V(t)}{\partial t} + v$ (1.68)
Avec (1.57), (1.59) et (1.64) : $r(t) = K + \frac{\beta K}{(\alpha - \beta)}$ (1.65)	Avec (1.57), (1.59) et (1.68) : $r(t) = K - \frac{vK}{(\alpha + v)}$ (1.69)
D'après (1.57) et (1.65), on a : $\dot{D}(t) = r(t) - K = \frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} > 0$ (1.66)	D'après (1.59) et (1.69), on a : $\dot{D}(t) = r(t) - K = -\frac{vK}{(\alpha + v)} < 0$ (1.70)
Conclusion : la longueur de la file d'attente augmente sur la période $[t_1, \tilde{t}]$	Conclusion : la longueur de la file d'attente diminue sur la période $[\tilde{t}, t_2]$

Afin de caractériser totalement l'équilibre temporel du trafic, nous devons déterminer les horaires : t_1, \tilde{t} et t_2 . Deux conditions supplémentaires sont alors posées :

- **Condition n°1'** : Le nombre total de véhicules partant de leur domicile pendant l'heure de pointe $[t_1, t_2]$ est défini comme suit : $\int_{t_1}^{\tilde{t}} r(u) du + \int_{\tilde{t}}^{t_2} r(u) du = N$; en intégrant les équations (1.65) et (1.69), on obtient : $(\tilde{t} - t_1) \left(K + \frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} \right) + (t_2 - \tilde{t}) \left(K - \frac{vK}{(\alpha + v)} \right) = N$ (1.71)
- **Condition n°2'** : La file d'attente se forme en t_1 et disparaît en t_2 : cela signifie que l'ensemble du trafic N s'écoule sur la période $[t_1, t_2]$ au taux K : $(t_2 - t_1)K = N$ (1.72)
- **Ces deux conditions combinées (1.71) et (1.72) impliquent :**

$$(\tilde{t} - t_1) \left(\frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} \right) = (t_2 - \tilde{t}) \left(\frac{vK}{(\alpha + v)} \right) \quad (1.73)$$

Avec ces nouvelles conditions, on peut déterminer les horaires¹⁸ : t_1, \tilde{t} et t_2 .

$$\tilde{t} = t^* - \frac{\beta v}{\alpha(\beta + v)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad (1.74)$$

$$t_1 = t^* - \frac{v}{(\beta + v)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad (1.75)$$

$$t_2 = t^* + \frac{\beta}{(\beta + v)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad (1.76)$$

¹⁸ Les calculs sont présentés en annexe 1.3

On suppose que les individus partant de leur domicile en t_1 ou en t_2 subissent seulement les coûts d'avance ou les coûts de retard, mais en aucun cas le coût d'attente. Si $t = t_1, t_2$, alors $T^V(t) = 0$ donc $C(t_1) = \beta(t^* - t_1)$ et $C(t_2) = v(t_2 - t^*)$. Les horaires d'équilibre permettent de déterminer le coût d'un déplacement pour un individu et celui de l'ensemble des usagers à l'équilibre. Les résultats sont présentés dans le tableau n°1.11.

TABLEAU N°1.11 : À l'équilibre

Opérations	Équations
À l'équilibre : le coût subi par les usagers est identique, quelle que soit l'heure du départ du domicile.	$C(t) = C(t_1) = \beta(t^* - t_1)$
À l'équilibre : En remplaçant t_1 par sa valeur, le coût d'un déplacement est :	$C^E(t) = \frac{\beta v}{\beta + v} \left(\frac{N}{K} \right)$ (1.77)
À l'équilibre : le coût total subi par tous les usagers (N) est :	$CT^E = \frac{\beta v}{\beta + v} \left(\frac{N^2}{K} \right)$ (1.78)

Dans le tableau n°1.11, on constate que le coût d'un déplacement ne dépend plus du temps de déplacement, mais uniquement des coûts d'avance (β) et des coûts de retard (v).

Les coûts des déplacements fonctions du coût total d'attente (de congestion) et du coût total horaire subi par les automobilistes, ont été calculés par Arnott *et al.* à partir de la figure présentée en annexe 1.4. Le tableau suivant résume les résultats trouvés à l'équilibre.

TABLEAU N°1.12 : Les différents coûts de déplacement à l'équilibre

Le coût total horaire : CTH^E	$CTH^E = \frac{\beta v}{2(\beta + v)} \left(\frac{N^2}{K} \right)$ (1.79)
Le coût total de congestion (d'attente dans les embouteillages) : CTC^E	$CTC^E = \frac{\beta v}{2(\beta + v)} \left(\frac{N^2}{K} \right)$ (1.80)
Le coût total social : $CT^E = CTC^E + CTH^E$	$CT^E = \frac{\beta v}{\beta + v} \left(\frac{N^2}{K} \right) = \delta \left(\frac{N^2}{K} \right)$ avec $\delta = \frac{\beta v}{\beta + v}$
Sans péage, le prix d'un déplacement est égal au coût moyen total : $p^E = CTM^E = \frac{CT^E}{N}$	$p^E = \delta \frac{N}{K}$ (1.81)
Le coût marginal social : $CmS^E = \frac{\partial CT^E}{\partial N}$	$CmS^E = \frac{2\delta N}{K} = 2CTM^E$ (1.82)

Le tableau n°1.12 indique que le coût total social à l'équilibre (CT^E) est croissant avec le nombre d'individus N et avec le paramètre δ (relatif aux coûts d'avance et aux coûts de retard), et décroissant avec la capacité de la route K . On remarque aussi que le coût marginal social à l'équilibre (CmS^E) est égal à deux fois le coût moyen total d'équilibre ($2CTM^E$). On constate enfin que le coût marginal d'un usager est indépendant de son choix d'heure de départ du domicile.

1.3.2.3. L'optimum social

Le régulateur cherche l'optimum social au sens de Pareto. Il instaure un outil afin de prendre en compte les effets externes, de telle sorte que le coût social subi par la collectivité soit minimisé.

Le coût total de déplacement est composé d'un coût horaire et d'un coût de congestion (d'attente dans la file). Cela implique que le régulateur puisse agir sur l'un de ces deux coûts.

- Les coûts horaires ne peuvent pas être inférieurs à ceux de l'équilibre, puisque les variables K et N sont fixes. Cela signifie que la durée de la période de pointe est la même à l'optimum et à l'équilibre, c'est-à-dire :

$$(t_2 - t_1)K = N \Rightarrow (t_2^P - t_1^P) = \frac{N}{K}.$$
- Les coûts de congestion : le temps total d'attente dans la file est représenté par la surface OBDO de la figure n°A1.4 annexe n°1.4. L'objectif est de minimiser cette surface. Cet objectif est atteint lorsque le taux de départs du domicile est égal au taux des arrivées sur le lieu de travail, c'est-à-dire lorsque la file d'attente est nulle.

La situation optimale se réalise lorsque le trafic est parfaitement fluide¹⁹ : $CTC^P = 0$.

Les individus subissent seulement les coûts d'horaires suivants : $CTH^P(t) = \frac{\delta N^2}{2K}$

¹⁹ L'exposant P indique la situation optimale lors de la mise en place du péage.

(1.83). Le coût total à l'optimum ($CTH^P(t) = \frac{\delta N^2}{2K}$) est donc égal à la moitié du coût total à l'équilibre sans péage ($CT^E = \delta \left(\frac{N^2}{K} \right)$). Le tableau n°1.13 nous indique le coût subi par chaque usager à l'optimum.

TABLEAU N°1.13 : À l'optimum

	Si $t \in [t_1, t^*]$	Si $t \in [t^*, t_2]$
Coût subi par les usagers	$C(t) = \beta(t^* - t) + \tau(t)$ et $C(t_1) = \beta(t^* - t_1)$	$C(t) = v(t - t^*) + \tau(t)$ et $C(t_2) = v(t_2 - t^*)$
Condition d'équilibre toujours vérifiée : coûts égaux quelle que soit l'heure de départ du domicile	$C(t) = C(t_1) \Rightarrow \tau(t) = \beta(t - t_1)$	$C(t) = C(t_2) \Rightarrow \tau(t) = v(t_2 - t)$
Le nouveau coût subi par chaque usager à l'optimum ²⁰ :	$C^P(t) = \beta(t^* - t_1) = v(t_2 - t^*) = \frac{\delta N}{K}$ (1.84)	

On retrouve la même valeur que le coût dans la situation d'équilibre, exceptée la structure interne de ce coût qui n'est plus la même : le coût de congestion est remplacé par le péage. À l'optimum, le coût subi par l'automobiliste ($C^P(t) = \frac{\delta N}{K}$) est constitué

du coût horaire $CH^P(t) = \frac{\delta N}{2K}$ et du coût financier du péage $\tau(t) = \frac{\delta N}{2K}$.

« Le péage remplace le temps d'attente dans les embouteillages comme mécanisme de régulation des horaires d'arrivées, laissant le coût de déplacement (coût d'horaires plus péage) inchangé, mais améliorant le bien-être collectif du montant des recettes du péage. », Arnott *et al.* (1994 p. 144).

Deux autres tarifications optimales ont été déterminées par Arnott *et al.* Toutefois, l'optimum social résulte du péage de pointe (*fine toll*) ; or, en réalité, il est difficile de mettre en place un tel péage puisqu'il est totalement variable tout au long de la journée. Deux autres sortes de péages peuvent être considérés : le péage uniforme (*uniform toll*) à un prix identique toute la journée et le péage uniforme seulement pendant la période de pointe (*coarse toll*).

²⁰ Puisque la période de pointe du trafic n'est pas modifiée, il est évident que les relations (1.75) et (1.76) sont conservées.

TABLEAU N°1.14 : Le péage sous différentes formes

	Péage uniforme ²¹ ajoute des coûts constants à chaque trajet et ne modifie pas la configuration de l'ordre des départs du domicile.	Péage uniforme durant la période pointe ²² agit sur les horaires de départs des usagers, mais il n'élimine pas complètement la file d'attente Arnott <i>et al.</i> (1993) p.168
Coût total du trajet	$CT^U = \frac{\delta N^2}{K}$	$CT^{ct} = \left(\frac{\varphi \delta N^2}{K} \right) \text{ avec } \varphi = \frac{1}{4} \left[3 - \frac{(v-\alpha)\beta}{(\beta+v)(\alpha+v)} \right]$ ²³
Coût moyen de déplacement	$CM^U = \frac{CT^U}{N} = \frac{\delta N}{K}$	$CM^{ct} = \frac{CT^{ct}}{N} = \frac{\varphi \delta N}{K}$
Coût marginal social	$CmS = \frac{\partial CT^U}{\partial N} = \frac{2\delta N}{K} = 2CM^U$	$CmS^{ct} = \frac{\partial CT^{ct}}{\partial N} = \frac{2\varphi \delta N}{K} = 2CM^{ct}$
Prix d'un trajet	$p^U = CM^U + \tau^U$	$p^{ct} = CM^{ct} + \tau^{ct}$
A l'optimum, le prix d'un trajet doit être égal au CmS	$p^U = CM^U + \tau^U = CmS^U = 2CM^U$ $\tau^U = CM^U = \frac{\delta N}{K}$ (1.85)	$\tau^{ct} = CM^{ct} = \frac{\varphi \delta N}{K}$ (1.86)

Le tableau n°1.14 synthétise les résultats d'Arnott *et al.* (1993) sur les deux autres tarifications. Le prix d'un trajet, quel que soit le péage mis en place, est égal au coût moyen de déplacement additionné au coût du péage. À l'optimum, le prix d'un trajet doit être égal au coût marginal social. Nous remarquons que le péage uniforme est deux fois plus élevé que le péage de pointe. Nous observons également que le péage uniforme de pointe est égal au péage uniforme multiplié par la valeur φ .

Les travaux de Danielis et Marcucci (2002) comparent les péages. L'hypothèse 5' (H5') du modèle est relâchée, c'est-à-dire que N n'est plus fixe²⁴. Le péage uniforme implique le niveau le plus élevé du coût du trajet et entraîne la plus forte diminution de trafic. Au contraire, le péage de pointe engendre le coût du déplacement le plus faible équivalent au coût d'équilibre. Le péage de pointe n'engendre aucune baisse du niveau du trafic. Son but est de mieux répartir les automobilistes sur les périodes de pointe, et non de diminuer le trafic.

²¹ La situation avec le péage uniforme est indiquée par l'exposant U .

²² La situation avec le péage uniforme durant les périodes de pointe est précisée par l'exposant ct (*coarse toll*).

²³ Ce coût total de déplacement a été déterminé par Arnott *et al.* (1990).

²⁴ Les démonstrations sont reléguées en annexe n°1.5.

1.3.3. Comparaison, apports et limites des modèles

La grande différence entre les modèles de flux et les modèles de file d'attente est la suivante : dans le modèle de flux, l'écoulement du trafic augmente progressivement pendant la période de pointe avant de décroître pour revenir à une situation de circulation fluide, alors que dans les modèles de file d'attente, la vitesse de circulation reste la même jusqu'au rétrécissement de la route et donc de la création de la file d'attente. Les individus choisissent leur horaire de départ dans les modèles de file d'attente, alors que dans les modèles de flux temporel le choix se fait sur l'horaire d'arrivée sur le lieu de travail.

Ces modélisations sont peu critiquées du fait de leur pertinence, même aujourd'hui en 2008. Les critiques formulées ont été principalement faites par leurs auteurs. Henderson (1974) pointe le manque de généralité du modèle de file d'attente de Vickrey (1969) qui s'intéresse seulement à cette forme de congestion. Mais en 1992, Small a fait remarquer que les modèles de flux ne renvoient pas à la réalité de la situation de congestion observée dans les grandes villes. Henderson trouvera sa défense en signalant que les deux modèles sont basés sur des hypothèses de départ fortes et donc reflètent tous les deux une forme de congestion. Finalement, en 1995, Chu démontre que lorsque l'élasticité γ du coût du temps de déplacement par rapport aux taux d'arrivées des véhicules tend vers l'infini, alors les deux modèles aboutissent aux mêmes résultats (Mirabel, 1996). En effet, si γ tend vers l'infini, alors le taux d'arrivées des automobilistes sur le lieu de travail tend vers la capacité de la route K correspondant au taux des arrivées des automobilistes dans les modèles de file d'attente. Chu (1995) signale que les modèles de flux englobent toutes les situations et notamment celle du modèle de file d'attente.

Afin de concevoir une modélisation théorique fiable et robuste pour aboutir à notre objectif de mobilité urbaine durable, nous apportons plusieurs extensions à ce type de modèle de la congestion (**chapitre 3**). Auparavant, il convient, pour clore ce chapitre sur la taxe, d'exposer et d'analyser les expériences des villes où le péage a été ou pourrait être mis en place.

1.4. Mise en lumière de l'efficacité du péage urbain à travers les résultats d'études empiriques

Le péage urbain se décline sous différentes formes selon son objectif. Le premier type de péage qui a vu le jour, par Dupuit (1849), est celui de financement des infrastructures qui a pour but de couvrir les dépenses des infrastructures. Aujourd'hui, de nombreuses villes disposent de ce système de péage comme Oslo, Bergen, Trondheim, mais aussi Marseille et Lyon. Le deuxième type de taxe, analysé particulièrement dans ce chapitre, est le péage dit de congestion. Son objectif premier est de réguler la circulation urbaine ; il a été mis en place dans les villes telles que Singapour et Londres. Enfin, le péage environnemental constitue le troisième type de péage. L'objectif de cette taxe environnementale est de prendre en compte les nuisances de l'automobile comme la pollution. Si la ville de Stockholm a mis en œuvre un péage ayant pour but non seulement de réduire la congestion, mais aussi de diminuer la pollution de l'automobile, la ville de Milan, quant à elle, a instauré un péage écologique taxant les véhicules les plus polluants. Aujourd'hui, les péages se voient attribuer d'autres vertus que les financements des infrastructures, ils doivent réguler la circulation, mais aussi agir sur la pollution due aux transports.

1.4.1. Londres : échec ou réussite ?

Londres représente une métropole dynamique et attractive avec une forte croissance démographique et économique. La population de la capitale britannique croît en moyenne de 45 000 personnes par an depuis 1988, avec un pic enregistré en 2005, de 90 000 personnes. En 2006, Londres compte près de 15% des emplois du Royaume-Uni et représente 19% du PIB du Royaume-Uni. Toutefois, avant 2003, Londres reflétait l'image d'une ville complètement asphyxiée par la congestion automobile avec un réseau de transport collectif considéré comme de qualité médiocre. Les investissements en infrastructures en transports collectifs ont été trop longtemps négligés. En 2000, une

réduction de la circulation automobile s'impose, mais aussi une source de financement pour l'amélioration des TC doit être trouvée. Londres apparaît alors comme la ville idéale pour la mise en place d'un péage urbain de congestion.

Concernant l'acceptabilité de la mise en place d'un péage, les Londoniens y paraissent favorables. À l'époque selon les enquêtes réalisées, 70% des enquêtés confirment le problème de congestion et pensent que le système de péage urbain est une bonne solution à l'amélioration de la mobilité à Londres. C'est pourquoi l'instauration d'un péage urbain londonien figure dans le programme électoral de Ken Livingstone à la mairie de Londres. Après maintes consultations avec les différents représentants politiques, économiques et sociaux, le péage est mis en place le 17 février 2003. Rappelons tout de même que Ken Livingstone a été élu maire de Londres pour un premier mandat de 2000 à 2004, et il a été réélu avec succès pour un deuxième mandat en 2004, notamment grâce à sa promesse tenue sur la mise en place du péage urbain. Toutefois, il a été battu aux élections de 2008, et une des causes de cet échec est peut être l'extension de la zone initiale soumise au péage et les hausses du tarif. Le péage urbain est une mesure qui peut être considérée comme impopulaire²⁵ et a un enjeu politique fort.

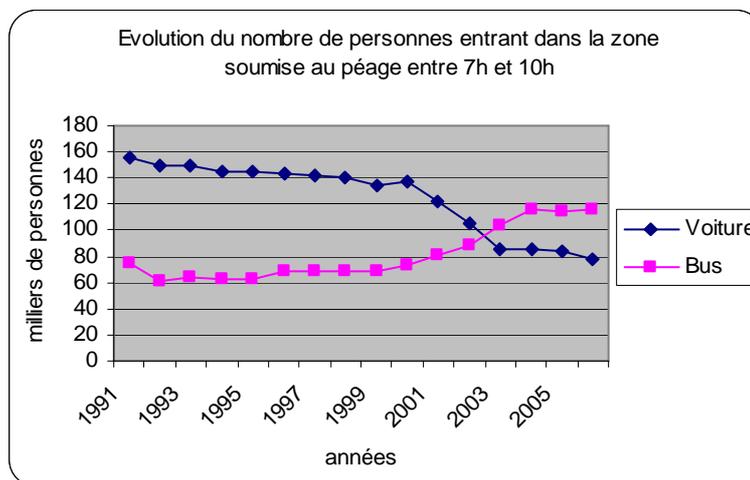
L'objectif principal, lors de la mise en place du péage, est de diminuer la congestion dans la zone définie : *Greater London*. L'autre but est de contribuer au financement de l'amélioration des transports collectifs (TC) afin d'augmenter le nombre d'usagers des TC. Le péage s'applique du lundi au vendredi de 7h à 18h30. Il a été fixé au départ à 5 € et est passé à 8 € en 2005. Les personnes habitant dans la zone ne paient que 10% de cette taxe. *Transport for London* (TfL) est l'organisme chargé du système de péage. TfL a opté pour un système fondé sur le pré-paiement, puis un contrôle par les plaques minéralogiques est effectué.

Les premiers résultats, présentés par TfL, sont plutôt positifs. La circulation dans la zone soumise au péage a diminué de 15% avec une réduction de 34% de celle des véhicules particuliers. La congestion a baissé de 35% c'est-à-dire que la vitesse dans la zone a augmenté, passant de 14 à 17 km/h. Les émissions polluantes dues aux transports ont aussi diminué avec une réduction de l'ordre de 19% pour les émissions de CO₂ et de

²⁵ Voir Raux et Souche (2004) pour une revue de la littérature sur l'acceptabilité du péage.

12% pour les émissions de PM₁₀ et NOx. Le graphique suivant montre l'évolution du nombre de personnes entrant dans la zone à péage à l'heure de pointe du matin.

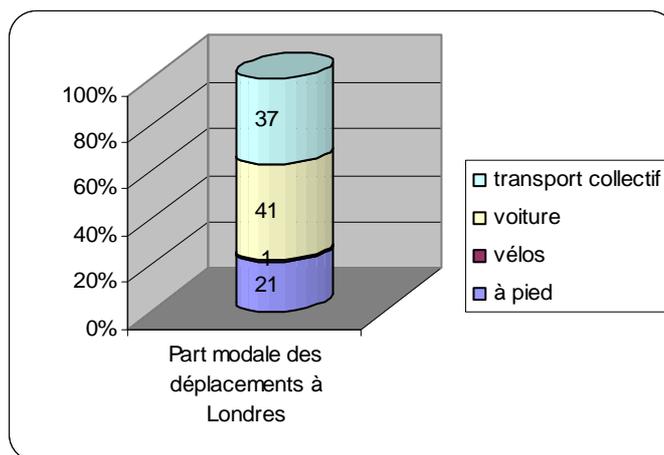
GRAPHIQUE N°1.11 : Évolution du nombre de personnes (en milliers) entrant dans la zone à l'heure de pointe de la matinée en voiture et en bus



Source : données de TfL(2007)

Le graphique n°1.11 confirme la diminution du nombre de personnes prenant leur véhicule pour entrer dans la zone payante et l'augmentation des usagers des bus.

GRAPHIQUE N°1.12 : Répartition des modes de transport à Londres



Source : données de TfL(2007)

Ainsi, malgré une diminution de l'utilisation de la voiture particulière, celle-ci reste le mode de transport le plus utilisé.

Cependant, même si ces chiffres montrent une certaine efficacité du péage, une analyse coût-bénéfice réalisée par Prud'homme et Bocajero (2005a) révèle quelques points noirs. Cette évaluation coût-bénéfice dévoile que le péage de Londres est considéré comme un échec économique. Les trois principaux bénéfices engendrés par le péage sont :

- la réduction de la congestion : estimée à 70 millions d'euros,
- le gain de temps des utilisateurs de bus : estimé à 30 millions d'euros,
- et la réduction de la pollution : évaluée à 5 millions d'euros.

Les deux principaux coûts sont :

- la mise en place du système du péage qui est de l'ordre de 170 millions d'euros,
- et le coût des subventions versées aux transports collectifs qui est de 5 millions d'euros.

Les bénéfices économiques sont alors inférieurs aux coûts économiques. Le péage n'est donc pas efficace économiquement.

Il est à noter que cette analyse coût-bénéfice a été réalisée en 2005. Elle ne peut prendre en compte les effets de moyen et long terme qui semblent, pourtant, importants dans un objectif de politique de transport durable. Les coûts de mise en place et les dépenses pour les transports collectifs, élevés sur le court terme, peuvent être réduits sur le moyen et long terme et, dans ce cas, le péage sera considéré comme économiquement viable. D'autant plus que la valeur temps choisie dans les estimations influe fortement sur le bénéfice dû à la réduction de la congestion. Certes, la modélisation théorique économique a eu tort d'omettre les coûts de mise en place, mais le péage de Londres ne peut pas être considéré comme un échec puisqu'il a eu un effet immédiat sur la réduction de la congestion, constituant l'objectif premier de ce péage, et parallèlement a agi sur l'environnement.

De plus, le péage n'est qu'un élément de la politique de transport londonienne. TfL annonçait, dans un rapport de (2006), des objectifs environnementaux à atteindre pour 2025. Comme 21% des émissions de CO₂ de la ville de Londres sont dues aux transports dont 80% aux transports routiers, des politiques environnementales ont été établies. Depuis le 4 février 2008, la zone à faibles émissions polluantes (*Low emission*

zone - LEZ) est appliquée. Elle couvre une zone beaucoup plus grande que celle soumise au péage et concerne les véhicules routiers les plus polluants.

1.4.2. À quand le péage parisien ?

« L'installation d'un péage urbain à Paris fait l'objet d'une étude de la Direction régionale de l'équipement d'Île-de-France (DREIF) dans le cadre de la révision du schéma directeur d'Île-de-France. Cette dernière évoque un " péage cordon en zone centrale semblable à celui de Londres".», *Les Échos* (21 novembre 2006).

« Paris : le péage urbain s'invite dans la campagne », *Le Figaro* (9 janvier 2008) faisant référence à la campagne municipale à la mairie de Paris.

Le péage urbain parisien n'existe pas encore, mais suscite depuis quelques années beaucoup de débats. Notamment très mal perçu par la population française²⁶, il constitue un enjeu politique majeur et donc délicat. D'un point de vue social et économique, il semble intéressant de se pencher sur les effets engendrés par un tel outil appliqué à la capitale française. L'étude de Glachant et Bureau (2006) réalisée à la base pour la Mission Interministérielle à l'Effet de Serre, évalue, à l'aide de plusieurs estimations économétriques du choix modal, les effets distributifs de quatre scénarii de péage urbain. Le tableau suivant montre la description des scénarii considérés dans le rapport.

²⁶ Selon « un sondage TNS-Sofres, octobre 2007 : seuls 25% des Français interrogés utilisant la voiture tous les jours seraient favorables à l'installation d'un péage urbain pour les voitures à l'entrée des grandes villes françaises. Élargi à la moyenne des Français, ce chiffre atteint 32%. » CAS (2008b).

TABLEAU N°1.15 : Description des quatre scénarii : définition, trafic concerné et niveau de péage permettant une diminution du trafic automobile régulier de 20%

Péage	Définition	Trafic dans la zone ²⁷ × 1000 déplacements	% du trafic régulier tarifé	Péage journalier en €
Zone Paris	Est tarifée la circulation dans ou à travers Paris	2420	100%	2.80 €
Zone Paris 10	Est tarifée la circulation dans ou à travers les 10 premiers arrondissements	574	100%	2.35 €
Cordon Paris	Est tarifée la circulation entrante dans Paris	2420	85%	3.85 €
Zone Paris + exemption des résidents	Réduction de 90% pour les résidents de Paris intra-muros	2420	100% (32% résidents)	4.90 €

Source : Glachant et Bureau (2006)

Ce tableau donne le montant du péage permettant une diminution de 20% de la circulation automobile. Ces résultats proviennent d'estimations économétriques (voir Glachant et Bureau, 2006). Le péage « zone Paris » doit être fixé à 2.80 € alors que le péage « zone Paris 10 » demande un tarif moins élevé, 2.35 € pour une même réduction de la circulation. L'article se basant sur le choix modal, ce résultat signifie que le transfert modal entre la voiture et les TC se fait plus facilement lorsque l'automobiliste circule dans l'hypercentre de Paris. Le péage cordon se monte à 3.85 €, il est plus élevé étant donné que seuls les automobilistes entrant dans Paris y sont soumis. De la même façon pour le dernier cas où les résidents paient seulement 10% du tarif, le péage se monte à 4.90 €. Dans la mesure où l'objectif de diminution de la circulation est le même pour tous les péages, celui-ci se voit augmenter si le nombre d'individus soumis diminue.

Les résultats significatifs de l'étude de Glachant et Bureau (2006) se trouvent dans l'estimation des gains ou des pertes des automobilistes soumis à un éventuel péage à Paris. Tous les scénarii étudiés engendrent une variation moyenne du surplus négative signifiant que les automobilistes perdent globalement lorsqu'un péage est mis en place.

²⁷ Ce nombre décrit les déplacements individuels par jour, qu'ils soient réguliers ou non, en voiture particulière et en véhicule utilitaire.

Les auteurs soulignent une limite de leur travail, dans la mesure où ils ne traitent pas des usagers des transports collectifs qui pourraient être positivement affectés si les recettes du péage étaient allouées au financement des transports collectifs (TC)²⁸.

Même si quelques automobilistes sont gagnants – ceux ne supportant pas le coût du péage, mais profitant de la diminution de la circulation – la variation moyenne de surplus reste négative. Glachant et Bureau (2006) soulignent l'importance de la valeur du temps accordée par les automobilistes. La perte est moins élevée lors d'un péage « zone Paris 10 » comparée à celle d'un péage « zone Paris ». L'hypothèse émise dans le rapport est la suivante : les automobilistes, circulant dans les 10 premiers arrondissements, accordent une valeur au temps plus élevée. Considérés comme plus riches, toutes choses égales par ailleurs, les automobilistes des 10 premiers arrondissements valorisent plus la réduction de la congestion.

Cependant, à l'issue de ces estimations, les automobilistes perdent lors de l'instauration d'un péage. L'opinion publique étant défavorable à la mise en place d'un péage urbain à Paris, cette étude ne peut qu'appuyer leur avis. Mais ne faudrait-il pas tester grandeur nature l'outil, comme cela a été le cas pour la ville de Stockholm, afin de mieux percevoir les effets ?

L'exemple de Stockholm montre que l'expérimentation du péage avant de décider sa mise en place définitive est une bonne façon d'améliorer son acceptabilité. L'expérience du péage stockholmois a duré sept mois, de janvier à juillet 2006. Pourtant, en décembre 2005, un sondage montre que les deux tiers de la population interrogée opposés au système du péage urbain. L'expérience des sept mois a finalement été bénéfique puisque lors du référendum de septembre 2006, 51% ont voté pour la mise en place permanente du péage. L'instauration du péage a engendré pendant sa phase d'expérimentation une diminution de l'ordre de 22% du trafic dans la zone. Les émissions de CO₂ et de dioxyde d'azote ont été réduites de 12%. D'où une meilleure acceptation du péage par la population. Pourtant, une évaluation coût-bénéfice réalisée par Prud'homme et Kopp (2007) montre une inefficacité économique du péage comme pour celui de Londres. Encore une fois, les gains réalisés par le péage tels que ceux de réduction du trafic, du gain de temps, des gains environnementaux ne couvrent pas les coûts de mise en place du système et de congestion des TC induits par le péage

²⁸ Nous soulignons également que les auteurs n'estiment pas les gains environnementaux, bénéfiques à la collectivité, procurés par la baisse de l'utilisation de l'automobile lors de la mise en place du péage.

automobile²⁹. De plus, la congestion était peu élevée par rapport à Londres et donc les gains de sa réduction à son niveau optimal sont faibles.

Au vu des résultats de ces expériences, la ville de Paris a tout intérêt à réaliser des études supplémentaires avant de se lancer dans la mise en place d'un péage urbain. Pourtant, si on considère seulement l'objectif de congestion et l'objectif environnemental, on peut alors estimer que le péage est efficace, car il réduit ces nuisances. D'ailleurs, le récent rapport du CAS (2008b) appuie l'instauration de ce type de régulation. Il pose les principaux éléments à inscrire dans une loi relative au péage urbain afin de permettre « aux collectivités territoriales d'utiliser cet outil comme l'une des réponses à un développement durable des transports ».

²⁹ Dans leur étude, l'innovation de Prud'homme et Kopp (2007) est de prendre en compte les conséquences du péage automobile sur le fonctionnement des transports collectifs. Ce coût de congestion dans les TC est notamment constitué du coût de l'augmentation de l'offre de TC et du coût de l'augmentation de la congestion des TC.

Conclusion du chapitre 1

À l'issue de ce chapitre, la taxe pigouvienne déclinée sous la forme du péage urbain paraît être une solution à l'internalisation des nuisances engendrées par l'automobile. La littérature foisonnante sur le péage de congestion nous a permis de mettre en avant ses capacités à obtenir l'optimum social au sens de Pareto.

Nous avons choisi de commencer notre chapitre par l'identification des différentes externalités de l'automobile afin de ne pas omettre que le secteur transport génère aussi des bienfaits pour la société tels que l'emploi (§ 1.1). La suite de notre travail se penche sur la prise en compte des nuisances de l'automobile, notamment celles de congestion (§ 1.2) et de pollution.

À travers la présentation et l'analyse des modèles de références de l'internalisation de la congestion (§ 1.3), deux principales conclusions se dessinent. La mise en parallèle du modèle de flux et du modèle de file d'attente montre des modélisations théoriques solides et toujours pertinentes. Le deuxième apport se situe dans la réinterprétation du modèle de file d'attente par Arnott *et al.* (1990). Trois tarifications optimales sont identifiées : le péage de pointe, le péage uniforme et le péage uniforme durant les périodes de pointe. Cette distinction permet une adaptation d'un modèle théorique à la réelle mise place d'un péage urbain. Le péage de pointe est considéré comme variable tout au long de la journée, ce qui, admettons-le, est pratiquement impossible à réaliser. Les péages uniformes et uniformes lors des périodes de pointes paraissent plus réalistes. Le péage de Londres en est une preuve puisqu'un péage uniforme est appliqué : les automobilistes doivent payer 8 € afin d'entrer dans le centre-ville.

La mise en lumière de l'efficacité des péages tels que ceux de Londres ou Stockholm a été faite (§ 1.4). Les analyses coûts-bénéfices effectuées sur ces deux péages montrent une certaine inefficacité économique du péage urbain, à cause notamment de son coût élevé de mise en place. La modélisation théorique économique a eu tort d'omettre les coûts de mise en œuvre, mais les évaluations sont fondées sur des valeurs temps estimées qui jouent un rôle primordial dans l'analyse du coût de congestion. De plus, les évaluations dégagent des résultats de court terme, ce qui *a priori* ne forment pas des résultats fiables.

Finalement, ce chapitre montre l'efficacité du péage dit de congestion, mais souligne le manque indéniable de prise en compte de l'aspect environnemental dans la modélisation théorique du péage urbain. Pour accéder à des politiques de transport durable, la modélisation économique se doit de continuer à développer la prise en compte de la pollution.

CHAPITRE 2

TAXE *VERSUS* PERMIS D'ÉMISSIONS NÉGOCIABLES

Introduction

La préoccupation du changement climatique étant de plus en plus importante, l'économie de l'environnement a su développer et adapter les outils théoriques de régulation à la société contemporaine. Cependant, le choix de l'instrument de contrôle de la pollution reste déterminant dans la réussite des politiques de régulation.

Les outils de la taxe et du marché des permis d'émissions diffèrent dans la mesure où l'un fonctionne par les prix et l'autre par les quantités. En situation d'information imparfaite, la taxe laisse incertain le niveau final de pollution, mais les coûts payés par les pollueurs sont connus. À l'inverse, les permis d'émissions assurent une qualité environnementale, puisqu'elle est prédéfinie, mais le prix des permis fixé par le marché reste incertain.

Si, dans les politiques de régulation, l'outil de la taxe est beaucoup utilisé, notamment à travers le péage urbain dans les politiques de transport, l'utilisation des permis d'émissions est assez récente et moins appliquée. Toutefois, on peut s'appuyer sur différents exemples nord-américains, comme le programme *Acid rain*, le *Chicago climate exchange* et le Marché climatique de Montréal, ou encore sur le récent système

européen d'échanges de quotas de CO₂. Le programme *Acid rain* est appliqué aux centrales thermiques électriques américaines, depuis 1995, avec comme objectif de réduire les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) engendrant les pluies acides. Le système *Chicago climate exchange*, lancé en 2003, a été le premier système d'échange de quotas d'émissions de GES au monde. C'est un système d'adhésion volontaire où les pollueurs participants s'engagent à réduire leurs émissions sur une période donnée. Le Marché climatique de Montréal est, quant à lui, une co-entreprise³⁰ de la Bourse de Montréal et du *Chicago climate exchange*. Avec l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto en 2005, l'utilisation de cet instrument s'est accélérée et développée. En effet, l'Union Européenne a mis en place un système de marché de quotas d'émissions de CO₂, en janvier 2005, appliqué aux entreprises polluantes européennes. L'objectif était dans un premier temps de tester l'outil, avant d'entrer dans la phase correspondant à celle des engagements de réduction des émissions pris dans le cadre du protocole de Kyoto (2008-2012).

Le système de permis d'émissions a souvent été mal interprété, et donc controversé. Cela peut expliquer en partie son utilisation peu étendue. De vives critiques ont été faites à son égard, mais on oublie souvent son objectif initial de réduction de la pollution. D'ailleurs, Godard et Henry (1998) rappellent que « l'instauration de quotas d'émissions consiste non pas à créer des « droits à polluer », mais à restreindre ces droits là où ils étaient illimités ».

L'objectif de ce deuxième chapitre est de comparer les deux outils de régulation pour obtenir une politique de transport optimale.

Dans ce dessein, une comparaison théorique des instruments est nécessaire. Une littérature foisonnante confrontant la régulation par les prix et celle par les quantités existe. En s'appuyant sur ces nombreux travaux allant de Weitzman (1974) à Goulder et Parry (2008), nous sommes en mesure de déterminer, d'un point de vue théorique, si un instrument prédomine sur l'autre ou au contraire si une éventuelle combinaison des outils ne se révèle pas plus efficace. Les conclusions théoriques fondamentales de cette importante littérature seront analysées dans la première section (§ 2.1).

³⁰ Une co-entreprise est une entreprise créée par deux entreprises, ou plus, détenue à parts variables par ces dernières (égales ou non).

Comme nous l'avons précisé précédemment, les expériences des permis d'émissions restent peu développées. Les applications les plus significatives sont celles mises en place avec les entreprises polluantes, comme le programme *Acid rain* ou le système européen de quotas de CO₂. Dans la mesure où chaque individu contribue plus ou moins à l'accélération du changement climatique, tous les acteurs sont invités à faire des efforts, et pas seulement les entreprises polluantes. L'idée d'une application du système de permis d'émissions totalement décentralisée, c'est-à-dire à un niveau individuel, émerge (cf. Fleming 1996, 2006, 2007). S'il existe la possibilité d'instaurer un marché « carbone » appliqué aux individus, il paraît alors tout à fait concevable d'imaginer l'application de ce système aux automobilistes. La deuxième section (§ 2.2) analyse, d'une part les différentes évolutions du système de permis d'émissions (notamment les acteurs du marché) et, d'autre part, les potentialités d'application du système dans les politiques de transport.

Imaginer la conception d'un système de permis d'émissions pour les automobilistes est une chose, l'application réelle de ce système en est une autre. Afin de mettre en place un outil économique, il est indispensable de s'appuyer sur une modélisation théorique. Les modélisations de cet instrument sont particulièrement développées dans un cadre de politique internationale (cf. Schwartz, 2006, Pratlong, 2005), mais peu adaptées à la problématique de la mobilité durable. Toutefois, il existe quelques rares modèles précurseurs, tels ceux de Daganzo (1995) ou de Raux et Marlot (2005) portant sur l'application d'un système hybride combinant la taxe et les permis d'émissions pour les automobilistes. Ce manque de développements théoriques constitue le principal point noir de l'instrument comparé à celui du péage urbain. La troisième section (§ 2.3) présentera les apports et limites des modèles de permis d'émissions et les mettra en parallèle avec ceux des modélisations du péage urbain.

2.1. Le choix théorique entre la taxe et les permis d'émissions négociables

Cette section commence par un examen du fonctionnement du système de droits à polluer. Notre démarche permettra une comparaison théorique des instruments de régulation par les prix et par les quantités et d'autre part de développer notre propre modélisation des permis d'émissions (chapitre 4).

2.1.1. Prémisses et fonctionnement d'un marché de droits à polluer ou permis d'émissions négociables

Les travaux de Coase (1960) ainsi que l'ouvrage de Dales (1968a), *Pollution, property and prices* sont considérés comme les premières références en faveur d'un marché des permis de pollution. C'est ainsi que Dales (1968b) soulève le problème des droits de propriété à travers un article sur la pollution de l'eau des lacs et des rivières au Canada. Selon cet article, le principal avantage engendré par le système de marché, par rapport à la taxe ou à la norme, est celui des économies de coûts³¹. Cependant, aucun cadre théorique n'est posé, les problèmes de formation des prix dits concurrentiels ne sont pas soulevés. L'inexistence de cadre théorique entraîne des questionnements sur la nature de l'équilibre (équilibre partiel ou général) et sur la nature de la concurrence (parfaite ou imparfaite). Certes, la réflexion est lancée, mais l'analyse théorique fait défaut.

Toutefois, Montgomery (1972) a fourni une justification théorique aux travaux fondateurs de Dales (1968a, 1968b), appelée le théorème dit « du moindre coût ». Montgomery établit qu'il existe un système de prix qui ajuste l'offre et la demande sur le marché concurrentiel de permis. Ce système est dit de moindre de coût dans la mesure où il respecte non seulement le niveau de pollution prédéfini, mais aussi les

³¹ Ces économies de coûts restent aujourd'hui un des principaux arguments en faveur d'un système des permis par rapport à la taxe.

conditions de minimisation des coûts des entreprises³². Ce résultat théorique est valide seulement sous des hypothèses assez restrictives (cf. Berta, 2006).

Aujourd'hui, le cadre d'analyse d'un système de marché de permis d'émissions est bien défini. En se référant aux principes de l'économie de l'environnement, le fonctionnement du système repose sur quatre étapes principales :

- 1- L'État fixe un niveau plafond de pollution considéré comme le niveau optimal de pollution.
- 2- Il distribue ou alloue (par exemple par le système d'enchères) le montant correspondant de droits à polluer aux entreprises.
- 3- L'entreprise polluante doit posséder un montant de droits à polluer au moins égal aux rejets effectués.
- 4- Au cours de l'échange, les entreprises dépassant leurs droits d'émissions doivent acheter les permis manquants sur le marché, dans la mesure où celles qui émettent moins que leurs droits vendent les permis inutilisés.

Ce fonctionnement permet d'obtenir le niveau de pollution optimal. Par ce système de marché, le prix du permis se fixe au niveau du coût marginal de réduction de la pollution (dépollution) de l'entreprise : elle a intérêt à acheter des permis jusqu'au moment où le prix de ceux-ci s'égalise avec le coût marginal de dépollution ; au-delà, acheter des permis deviendrait plus coûteux que dépolluer.

L'encadré suivant présente les deux systèmes de fonctionnement du marché des permis d'émissions ayant *a priori* la même efficacité théorique.

³² La condition de maximisation du profit de chaque entreprise entraîne l'égalisation du prix de chaque *output* à son coût marginal et celle du coût de dépollution au coût du permis.

ENCADRÉ N°2.1 : Les deux systèmes de fonctionnement de marché des permis d'émissions

Le système *Cap and Trade* :

Étape 1 : Le régulateur détermine un **plafond de pollution** à ne pas dépasser, appelé *cap* en anglais.

Étape 2 : Le régulateur procède à la **distribution** du nombre de droits à polluer, correspondant au total au plafond de pollution précédemment déterminé, aux pollueurs. Il existe deux manières de distribuer les droits à polluer :

- soit par une allocation gratuite : la distribution des permis peut se faire au prorata des émissions passées, c'est la méthode dite du *grandfathering*.
- soit par la méthode de mise aux enchères.

Étape 3 : **L'échange** : le marché fait émerger le prix du permis grâce à la confrontation de l'offre et de la demande. L'existence d'une offre et d'une demande de permis est possible si les entreprises ont des coûts de dépollution hétérogènes. Une entreprise avec un coût marginal élevé constitue la demande puisqu'il lui coûte moins cher d'acheter des permis que de dépolluer. Inversement, une entreprise avec un coût marginal de dépollution faible fait partie de l'offre. En dépolluant à bas coût, l'entreprise n'utilise pas ses permis et peut ainsi les vendre.

Le programme *Acid rain* est l'une des expériences phare du système *cap and trade*. Ce programme est appliqué aux centrales thermiques électriques américaines depuis 1995. Son objectif est de réduire les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) qui sont à l'origine des pluies acides. Bien que n'étant pas le seul exemple du système *cap and trade*, sa réussite lui a valu d'être considéré comme la source d'inspiration du système de quota prôné dans le protocole de Kyoto.

Le bon fonctionnement du programme *Acid rain* repose sur quatre éléments fondamentaux : la clarté du fonctionnement du système, la performance du système de mesure de contrôle des émissions, le nombre suffisamment grand de participants et des sanctions très lourdes sous forme d'amendes en cas de non respect du système.

Le système *Baseline and Credit* :

Étape 1 : Le régulateur détermine un **pourcentage de réduction** des émissions par rapport à une année de référence.

Étape 2 : Le régulateur distribue un **certain nombre de crédits d'émissions** à chaque pollueur afin qu'il réduise d'un certain pourcentage ses émissions de polluants. S'il le veut, le régulateur peut déterminer des objectifs de réduction différents adaptés à chaque pollueur.

Étape 3 : À la date fixée, si un pollueur a davantage réduit ses émissions que ce qui lui était demandé, alors il peut vendre ses crédits non utilisés à un pollueur qui, au contraire, n'a pas réussi à atteindre l'objectif fixé.

Source : les définitions sont adaptées de Glachant (2004)

Comme nous l'indique l'encadré n°2.1, la réussite d'un système de permis repose sur plusieurs caractéristiques fondamentales :

- Les acteurs, les émissions et les quotas doivent être parfaitement définis.
- Le système de mesure des émissions doit être performant.
- Le nombre de participants doit être suffisamment grand.
- Les sanctions en cas de non respect des règles doivent être incitatives.

Après ce rapide rappel sur les travaux fondateurs et les différents fonctionnements du système de marché de permis d'émissions, il convient de commencer l'analyse comparative des instruments de régulation. Cette comparaison, fondée sur la théorie économique, est motivée par la recherche du meilleur outil d'internalisation des nuisances environnementales dues aux transports.

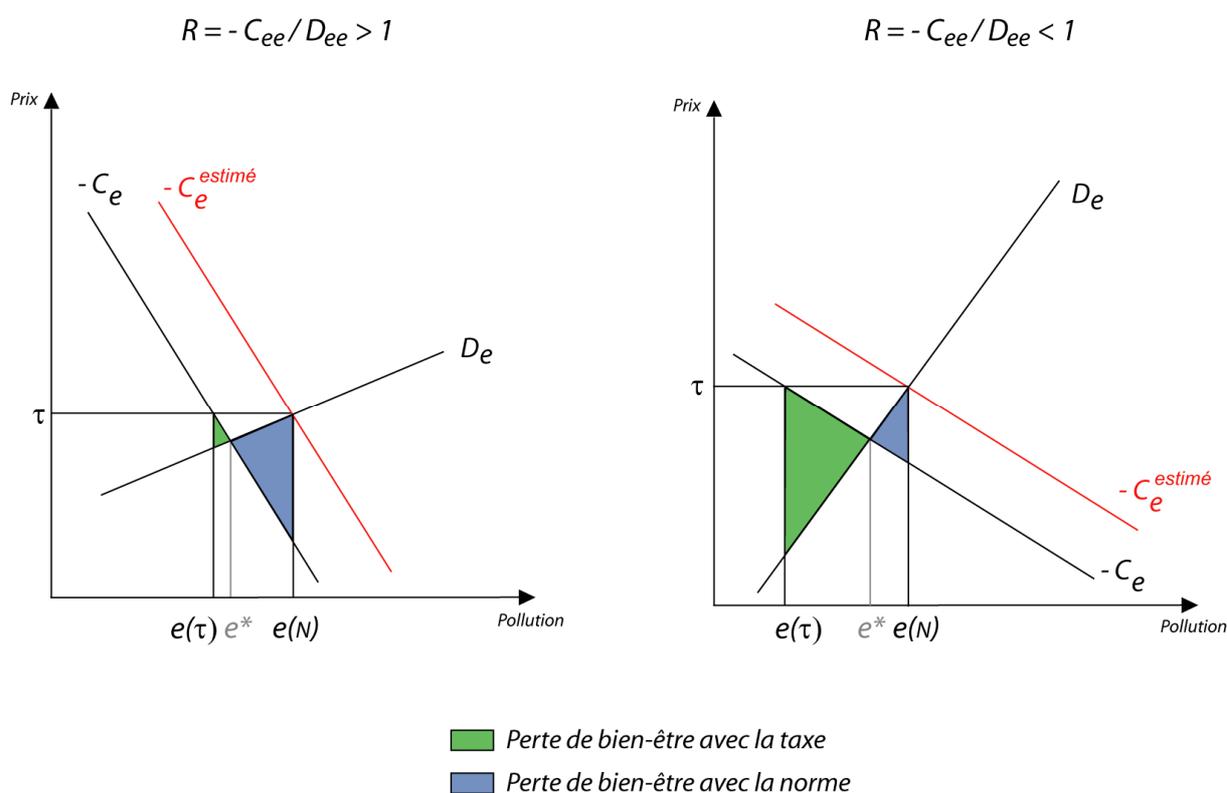
2.1.2. Efficacité et incertitudes

Avec le problème d'information imparfaite, l'efficacité des instruments, de la taxe (prix) et des permis d'émissions (quantité), diverge. Or, les dommages engendrés par la pollution et les coûts de réduction des nuisances environnementales sont difficiles à connaître et à monétiser. Il existe alors un problème d'incertitude qu'il faut prendre en compte.

Baumol (1972) s'est attardé sur le problème d'information imparfaite, mais c'est à Weitzman (1974) que l'on doit la démonstration devenue référence dans ce domaine. Il démontre que le régulateur, ne possédant pas toutes les informations nécessaires, réalise une estimation du coût marginal de dépollution ($-C_e^{estimé}$). La différence entre le coût marginal estimé ($-C_e^{estimé}$) et le coût marginal réel ($-C_e$) représente l'erreur du régulateur. Plus la pente est importante, plus l'écart est faible et donc moins l'erreur est forte.

Cependant, la différence d'efficacité entre l'instrument de la taxe et celui des permis d'émissions vient du ratio : pente du coût marginal/ pente du dommage marginal. Lorsque le ratio est inférieur à l'unité, le système de permis d'émissions négociables est plus efficace. Les permis d'émissions sont alors préférés à la taxe. Inversement, si la courbe de dommage est plate par rapport à la courbe de coût marginal, la taxe sera préférée. Le graphique suivant illustre la démonstration de Weitzman (1974).

GRAPHIQUE N°2.1 : Efficacité des instruments selon les résultats de Weitzman (1974)



Source : graphique adapté de Glachant (2004)

Si Weitzman (1974) s'est intéressé seulement au problème d'incertitude des coûts de réduction de pollution, Stavins (1996) soulève le problème d'incertitude, non seulement de la fonction de coût, mais aussi de la fonction des dommages provoqués par la pollution. Deux propositions se dessinent ; si les coûts et les dommages sont corrélés positivement, alors l'instrument des permis est le plus efficace. Inversement, si les coûts et les dommages sont corrélés négativement, la taxe est considérée comme plus efficace. Ces résultats ont été beaucoup contestés, notamment par Kaplow et Shavell (2002) et Stavins lui-même révèle que dans le cas du changement climatique il est préférable de considérer les deux fonctions de manière indépendante.

Afin de comparer les instruments en situation d'incertitude des coûts de dépollution, Hoel et Karp (2001, 2002) réalisent un modèle appliqué aux changements climatiques de court terme, et trouvent une supériorité au système de taxe par rapport à celui des

permis d'émissions. Newell et Pizer (2003) ont aussi conçu un modèle (où les coûts de dépollution et les dommages environnementaux sont corrélés positivement), et les résultats révèlent qu'une taxe carbone est, une fois encore, plus efficace qu'un système de marché de permis d'émissions. Ces résultats vont à l'encontre des propositions faites dans le protocole de Kyoto et la mise en place du système d'échange européen de quotas de CO₂. Toutefois, ces résultats sont à prendre avec prudence.

Un autre élément jouant sur la relation entre l'efficacité et l'incertitude est celui de l'aversion au risque des pollueurs que le régulateur ne connaît pas avec certitude. Baldurson et von der Fehr (2004) montrent, dans le cas où les entreprises polluantes répugnent à prendre des risques, la supériorité de la taxe pour réguler la pollution. Le prix des permis étant fixé par le marché, est incertain, c'est pourquoi le système de taxation est préféré. Si un système de marché de permis est mis en place, l'aversion au risque encourage les acheteurs de permis à investir dans les nouvelles technologies pour réduire leur pollution et donc réduire leur achat de permis. Cependant, l'aversion au risque entraîne les vendeurs de permis à sous-investir.

L'efficacité d'un outil économique peut aussi se traduire par sa capacité à inciter les pollueurs à innover dans les techniques de dépollution³³ sur le long terme. Même si en économie de l'innovation les travaux sont majoritairement théoriques, on peut se fonder sur les travaux de Milliman et Prince (1989), dont la base est de mesurer l'importance de l'incitation à l'innovation par rapport à l'importance des gains pour l'innovateur. Ce travail de comparaison peut être fait entre la taxe et les permis. Néanmoins, en différenciant une allocation gratuite des permis et une allocation par le système des enchères, Requate (1995) souligne que « ni les taxes ni les permis d'émissions négociables vendus aux enchères ne sont supérieurs pour donner la bonne incitation aux entreprises afin qu'elles adoptent une nouvelle technologie moins polluante ». Cependant, toujours dans un contexte d'incitation à l'innovation, Chiroleu-Assouline (2007) assure qu'il n'y a pas de différence notable entre les permis distribués par *grandfathering* et ceux qui sont vendus aux enchères. Toutefois, Requate (2005) insiste

³³ Dans le cas du secteur transport, les innovations peuvent concerner les constructeurs automobiles en les incitant à équiper les véhicules de moteurs hybrides (voir Albrecht, 2001). Cela peut aussi avoir un effet sur les automobilistes en les encourageant à investir dans des véhicules plus écologiques.

sur le fait que si le régulateur est myope³⁴, alors les taxes procurent des incitations plus fortes à investir en Recherche et Développement, et à adopter des nouvelles technologies que les permis d'émissions négociables. La raison est que le prix du permis diminue au fur et à mesure de la diffusion et de l'adoption des nouvelles technologies de réduction de la pollution.

Même s'il existe des différences d'efficacité dans les situations d'incertitude, aucun instrument ne paraît dominer l'autre théoriquement.

2.1.3. Les entraves au fonctionnement de la politique de régulation

Le problème de concurrence imparfaite peut être à l'origine d'un mauvais fonctionnement d'une politique de régulation de la pollution comme celle du système de marché de permis d'émissions. Certains acteurs peuvent avoir la capacité d'exercer un pouvoir de marché, par exemple empêcher l'entrée des autres concurrents sur le marché. Les dysfonctionnements peuvent venir aussi de la taille du marché. Les marchés avec peu d'acteurs sont plus facilement soumis aux comportements stratégiques que ceux qui sont composés d'un grand nombre de participants (cf. Stavins, 1995). Cependant, les transactions sur les marchés avec peu d'agent peuvent être plus faciles dans la mesure où les acteurs se connaissent. Hahn et Hester (1989) appuient cet argument en soulignant que la réussite du marché de permis de plomb dans l'essence aux USA vient en partie du fait que les raffineurs avaient l'habitude de travailler ensemble.

Hepburn (2006) expose une autre entrave au bon fonctionnement d'une politique de régulation : le problème de crédibilité sur le maintien de cette politique. La plupart du temps, les politiques de réduction des émissions engendrent d'importants investissements en nouvelles technologies de la part des entreprises polluantes. Ces investissements sont des coûts irrécupérables. Si le régulateur décide de relâcher la norme d'émissions (qu'il avait imposée) afin de parvenir à d'autres objectifs,

³⁴ Il n'anticipe pas l'arrivée de l'innovation et/ou n'exerce aucune politique incitative d'encouragement à l'innovation.

l'entreprise ayant investi est victime de hold-up³⁵. Helm *et al.* (2003) illustre ce problème par l'exemple d'un régulateur faisant face à trois objectifs contradictoires : régulation du prix de l'énergie, sécurité de l'offre et réduction des émissions. Le régulateur peut avoir l'intention de relâcher les normes de rejets d'émissions afin de garantir les deux autres objectifs, même si les entreprises ont déjà réalisé les investissements irrécupérables.

Les politiques de régulation par la taxe ou par les permis sont soumises de la même manière aux problèmes de crédibilité ou de dysfonctionnements.

2.1.4. La mise en place de l'instrument

Stavins (2003) souligne que le principal argument dans le choix d'un instrument est celui de sa mise en place.

Avant d'instaurer l'outil de régulation, il est indispensable de connaître le taux de la taxe ou le nombre de permis d'émissions approprié. Selon Weitzman (1974), ces éléments demandent la même information afin d'être correctement spécifiés. *A priori*, le coût est le même.

Généralement, on considère que la mise en place d'une taxe génère principalement des coûts administratifs, alors que le fonctionnement des marchés de permis repose surtout sur les coûts de transaction³⁶. Cependant, une partie des coûts engendrés par l'instauration de la taxe ou du système de permis sont communs, comme le suivi et la déclaration des émissions, ainsi que la mise au point des procédures d'estimation. Helm (2005) note que les coûts institutionnels de la construction d'un système de marché de permis d'émissions négociables peuvent excéder ceux de la taxe. La création d'une

³⁵ Les phénomènes de hold-up sont dus à l'incomplétude des contrats et à la présence d'investissement spécifique. Le problème de hold-up est un exemple d'opportunisme postcontractuel. Selon Klein, Crawford et Alchian (1978), la notion de hold-up relève d'une situation contractuelle où, après avoir fait un investissement, l'une et/ou l'autre partie prenante est contrainte d'accepter des changements désavantageux.

³⁶ Stavins (1995) a identifié trois sources de coûts : les coûts liés à l'acquisition d'informations sur les opportunités proposées et à la recherche de partenaires pour l'échange ; les coûts liés à la négociation et à la prise de décision ; les coûts liés au suivi et au respect des règles.

autorité régulatrice s'assurant du respect de la concurrence sur le marché engendre un coût supplémentaire non négligeable.

Après ces quelques éléments de comparaison de coût de mise en place, le système de permis peut sembler engendrer des coûts plus élevés. Toutefois, nous ne sommes pas en mesure de déterminer réellement si l'un des instruments est plus coûteux que l'autre.

2.1.5. L'instrument économique comme instrument politique

Les principaux éléments de la théorie économique ont été présentés dans les sous-sections précédentes. Mais en pratique, les critères liés à l'optimalité économique sont souvent dominés par des considérations de redistribution. En effet, dans la mesure où l'application d'un outil de régulation peut être une source de recettes et qu'un double dividende³⁷ peut aussi être engendré, la délicate question de la redistribution est alors soulevée. Le choix de l'instrument peut être influencé par l'enjeu politique. Cependant, l'outil de régulation environnementale ne doit pas devenir un outil de la finance publique.

L'encadré n°2.1 nous informe qu'il existe deux manières de distribuer les permis, l'une gratuitement et l'autre par les enchères. Si l'allocation des permis d'émissions est payante (achat par le système d'enchères) et que le marché est parfaitement concurrentiel, alors les recettes fiscales obtenues sont les mêmes que celles qui sont engendrées par la taxe. Si, au contraire, l'allocation des permis est gratuite et fondée sur les émissions passées, cela n'engendre pas de recettes. Cependant, on peut considérer que l'impact des permis échangés est le même que lorsque les revenus de la taxe sont totalement recyclés dans le système. Il n'existe pas de différence théorique notable entre les deux systèmes.

Toutefois, Hepburn (2006) cite plusieurs raisons d'opter pour un système d'allocation de permis non gratuit. Des raisons exposées, nous retiendrons les trois principales. Le premier élément en faveur d'une distribution des permis payante est le double dividende. Les recettes collectées peuvent être recyclées dans les politiques à l'emploi, ce qui est important dans le contexte actuel de notre société. La deuxième

³⁷ On parle de double dividende lorsque l'outil économique permet d'obtenir une modification du comportement des agents conduisant à une amélioration de l'environnement : c'est le premier dividende. Le second provient de l'impact macroéconomique du recyclage des recettes collectées.

raison est l'impact négatif environnemental qu'engendre une allocation gratuite. Cet impact négatif résulte du fait que les permis peuvent être distribués au prorata des émissions passées, incitant les entreprises à polluer « le plus possible » avant la mise en place du système. Enfin, le troisième élément est le principe pollueur-payeur. Si l'entreprise souhaite polluer, elle doit payer en achetant les permis d'émissions dès le départ, afin d'internaliser les coûts qu'elle fait subir à la société.

Cependant, le choix de l'instrument et d'un double dividende peut aussi être guidé par l'enjeu politique.

Parmi tous les éléments étudiés, nous ne pouvons pas assurer la supériorité d'un instrument par rapport à un autre. Ainsi, Goulder et Parry (2008) soulignent qu'aucun instrument seul ne peut corriger les défaillances du marché provenant des externalités négatives ainsi que des problèmes d'informations. Quant à Fisher et Newell (2008), ils indiquent que dans un contexte de changement climatique, employer un seul instrument pour réduire les émissions engendre un coût beaucoup plus élevé qu'utiliser les deux. Stavins (2003) souligne la supériorité théorique d'un système combinant les deux outils, appelé système hybride, bien que celui-ci n'ait jamais été appliqué.

2.1.6. Le système hybride : la solution ?

Le système hybride combinant les deux instruments que sont la taxe et le marché de droits à polluer, peut s'avérer être plus efficace que les instruments utilisés séparément. Le système hybride s'obtient par la mise en place d'un prix plafond et/ou plancher des permis sur le système de marché des permis d'émissions. L'idée vient de Roberts et Spence (1976) et a été développée par Baumol et Oates (1988). Cette solution est envisagée pour répondre au problème d'incertitude sur les coûts de dépollution (coûts de réduction des émissions) qui peut entraîner une quantité de permis distribuée non optimale. Lorsque la quantité de permis mise sur le marché est trop faible/élevée, alors on aboutit à une situation non optimale où le prix du permis est trop élevé/faible et où le coût marginal de dépollution est bien supérieur/inférieur à l'avantage marginal qu'elle procure. Le prix plafond sert dans la situation où le prix du permis est beaucoup trop élevé. Il permet aux participants d'acheter des permis supplémentaires en quantité

illimitée. Le prix plancher sert, à l'inverse, dans le cas où le prix du permis est trop faible. Il permet aux participants de vendre leurs permis inutilisés à un prix considéré comme une limite inférieure. D'après Courneade et Gastaldo (2002), les prix plancher et plafond bornent avec symétrie le dommage marginal correspondant à la quantité de permis distribuée. En effet, ils trouvent, d'après leur modèle analytique, que les valeurs optimales des prix plancher et plafond « [...] sont équidistants du coût marginal de dépollution à l'intersection entre la courbe de dommage marginal et la courbe d'espérance de coût marginal. Ils sont d'autant plus éloignés de cette valeur que la courbe de dommage marginal est pentue relativement à la courbe de coût marginal de dépollution ». Selon Philibert (2002), « le prix plafond doit être choisi dans la moitié supérieure des estimations de coûts de réduction associés à l'objectif quantifié global choisi ».

Le prix plancher est très peu préconisé par les économistes de l'environnement. Il peut être considéré comme une sorte de subvention à la réduction de la pollution et entraîne des difficultés de faisabilité au niveau international. Un système hybride dit asymétrique (seulement avec un prix plafond) est la plupart du temps recommandé. Toutefois, les analyses montrent aussi des problèmes de mise en place si une éventuelle ouverture à l'internationalisation du système est proposée (voir Müller *et al.*, 2001).

À l'issue de ce survol de la littérature concernant la comparaison de la taxe et du système de marché des permis d'émissions, il n'apparaît pas de solution clairement plus efficace qu'une autre. L'approche d'un instrument hybride a été étudiée et, malgré sa supériorité théorique, sa faisabilité semble compromise, notamment pour une application internationale. Un instrument peut rassembler tous les avantages théoriques, mais se révéler inapplicable en réalité. Pourtant, il nous semble que la faisabilité est un élément considérablement déterminant dans le choix d'un instrument.

Les différentes expériences de péage urbain ont été analysées dans le premier chapitre. Les expériences de système de marché de permis d'émissions doivent aussi être considérées, afin de mener à bien la comparaison des instruments. Cependant, l'utilisation des permis d'émissions est, comme nous l'avons déjà précisé, plus récente et donc moins appliquée que la taxe. C'est pourquoi nous commençons la section suivante par l'examen des expériences de permis d'émissions appliqués aux entreprises, puis nous nous penchons sur celles instaurées dans le secteur du transport. Il faut

souligner le fait que le péage urbain est appliqué sur le consommateur final de transport, c'est-à-dire l'automobiliste. C'est pourquoi nous cherchons, dans la mesure du possible, un système de permis agissant sur la même cible, d'autant plus que plus la mesure est décentralisée, plus elle est censée être efficace.

2.2. Applications des permis d'émissions négociables : vers une décentralisation totale

Cette section débute par l'examen d'un système de marché de permis concernant la pollution de l'air : le Système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE), qui constitue le plus grand marché des gaz à effet de serre mis en place de nos jours.

2.2.1. Le Système communautaire d'échanges de quotas d'émissions

Dans le cadre du protocole de Kyoto, fixant un objectif mondial de réduction de 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à celles de 1990, l'Union Européenne s'est alors engagée à réduire ses émissions de 8% entre 2008 et 2012. C'est en constatant le succès du programme *Acid rain*, mis en place en 1995 pour les centrales thermiques américaines, qu'un système de marché de permis d'émissions semble faisable, efficace et adapté aux problèmes de pollution. Ainsi, le protocole de Kyoto a désigné le système de permis d'émissions comme étant l'outil à utiliser pour parvenir aux objectifs de réduction des émissions.

L'Europe a voulu expérimenter cet instrument avant d'entrer dans la période 2008-2012. Elle a alors décidé d'instaurer un marché de permis d'émissions de CO₂ pour les industries considérées comme les plus polluantes telles que les raffineries, les industries de sidérurgie, de ciment, de papier, de verre et de céramique, ainsi que de combustion. Le système communautaire d'échanges de quotas d'émissions est né.

Les industriels concernés ont vu en ce système de marché deux facteurs favorisant leur acceptation de cette solution. Le premier est le fait que les quotas peuvent être

alloués gratuitement. Le second est leur crainte d'une politique environnementale alternative beaucoup plus contraignante, comme la taxe carbone, s'ils refusent de se soumettre au système de marché. Ces éléments ont joué en faveur de la mise en place du marché des permis puisqu'il ne pouvait être instauré sans l'accord des principales industries.

L'annexe 2.1 présente les différentes étapes importantes de l'évolution de la mise en place du système.

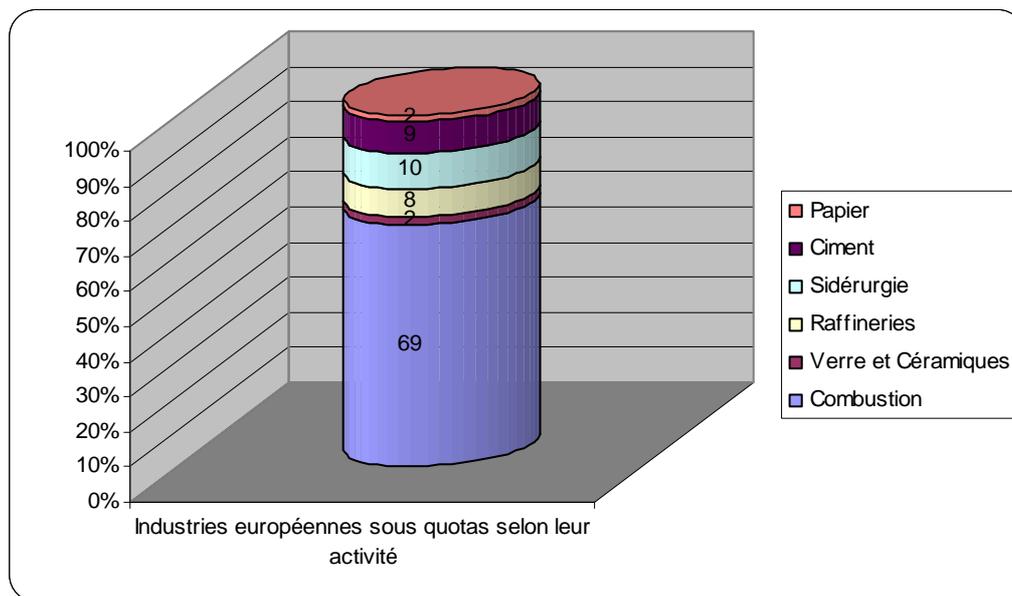
2.2.1.1. Les principales étapes du fonctionnement

L'Europe a mis en place le SCEQE de dioxyde de carbone en janvier 2005 scindé sur deux périodes : une période allant de 2005 à 2007 (phase 1) considérée comme une période test, et une autre allant de 2008 à 2012 (phase 2) correspondant à celle des engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto. La période test voit son utilité dans l'identification des différents problèmes de fonctionnement rencontrés lors de l'élaboration d'un marché de permis d'émissions.

Suivant le plan de la conception d'un marché de permis d'émissions, la première étape consiste à déterminer la quantité plafond d'émissions. La Commission européenne a fixé le plafond à 2,1 milliards de tonnes de CO₂ par an. L'étape suivante concerne l'allocation des quotas, qui est considérée comme un élément assez délicat, étant donné l'hétérogénéité des pays européens. C'est pourquoi la Commission européenne demande à chaque État membre de préparer un Plan national d'allocation des quotas (PNAQ) incluant le nombre de quotas demandé, ainsi que la répartition au sein des entreprises. Ensuite, les PNAQ doivent être ratifiés par la Commission européenne. En 2005, le système de quotas est appliqué à 11500 installations industrielles qui représentent environ 42% des émissions européennes de gaz à effet de serre. Notons que le système concerne seulement les émissions de CO₂ et qu'une des spécificités des règles d'allocations des quotas a été de faire porter l'effort de réduction des émissions principalement dans le secteur de l'énergie.

Le graphique suivant présente la répartition des quotas selon les activités des industries :

GRAHIQUE N°2.2 : Les industries européennes sous quotas selon leur activité



Source : données de De Perthuis (2008)

Les pays réalisent ensuite la distribution des quotas à leurs entreprises. Cette distribution est gratuite, même si une directive européenne indique que durant la première phase, chaque pays a le droit de mettre aux enchères 5% des quotas. Selon Convery *et al.* (2008), cette directive a été très peu suivie, étant donné que seulement quatre États ont choisi de le faire, ce qui représente environ 0,13% de la quantité totale des permis alloués.

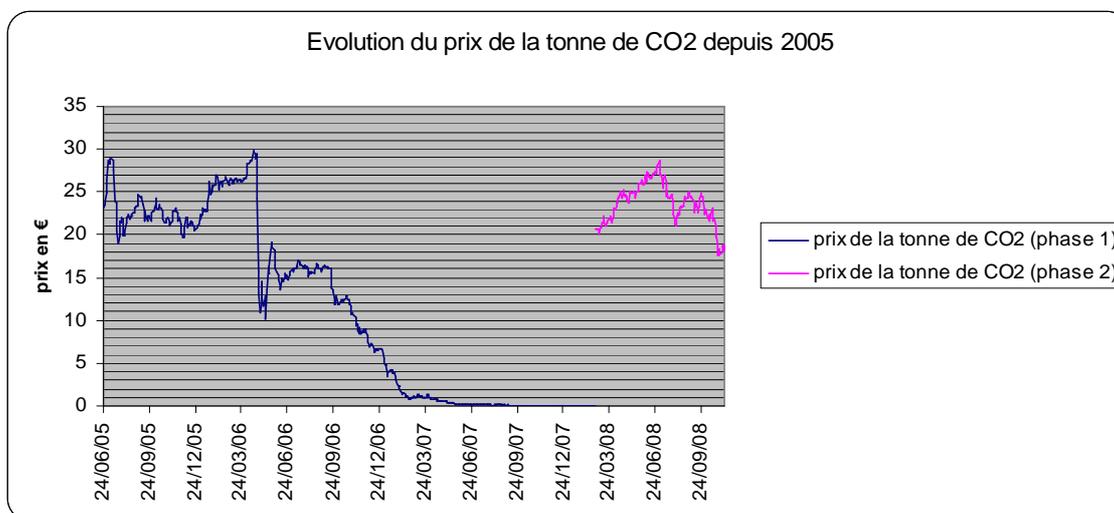
Les règles de fonctionnement du marché et le suivi des émissions, constituant des éléments importants dans la réussite du système, ont été clairement définis. Les quotas inutilisés peuvent se garder d'une année sur l'autre durant la première phase, mais en aucun cas ne peuvent être mis en réserve durant la phase test pour une utilisation sur la deuxième période. Chaque État membre doit posséder un registre national où les industries ouvrent un compte « quotas » qui enregistre, comme un compte bancaire, toutes les actions de transactions de quotas réalisées au cours de l'année. Ce registre est nécessaire et indispensable afin que la vérification puisse avoir lieu. Ces registres nationaux sont reliés au journal indépendant des transactions communautaires (*Community independant transaction log - CITL*).

2.2.1.2. Les résultats de la période 2005-2007

À la suite de la période test (2005-2007), quelques résultats peuvent être obtenus. En 2005, seulement 262 millions de quotas³⁸ ont été échangés. Puis le volume de quotas échangé n'a fait qu'augmenter, passant de 809 millions de tonnes en 2006 à 1,5 milliards de tonnes en 2007. Ce résultat est plutôt encourageant dans la mesure où il montre l'adaptation des industries au système de marché de permis. Seuls cinq pays ont enregistré un déficit de quotas : le Royaume-Uni, l'Italie, l'Espagne, l'Irlande et l'Autriche. Concernant l'évolution du prix de la tonne de CO₂, elle a été assez mouvementée. Au moment du lancement du marché, le prix de la tonne s'élevait aux alentours de 7 €. En 2005, la moyenne du prix s'est fixée à 22 € ; en 2006, la tonne a connu un pic à 30 €. Mais, il s'est avéré que beaucoup de pays, dont la France et l'Allemagne, ont surestimé les émissions de leurs industries, d'où une quantité de quotas sur le marché beaucoup trop élevée. La conséquence de cette surabondance de permis a été l'effondrement de son prix. C'est pourquoi, à l'issue de la période test, le prix de la tonne de CO₂ tend vers zéro, ce qui est économiquement logique, puisque l'offre de quotas est supérieure à la demande. De plus, selon la Caisse des dépôts, le fait de ne pas pouvoir garder ces quotas inutilisés de la première à la deuxième période a engendré la volatilité des prix. Cependant, depuis l'entrée dans la seconde phase, nous soulignons que le prix de la tonne de CO₂ s'est maintenu entre 18 et 28 €. Le graphique suivant présente l'évolution du prix de la tonne de CO₂ durant la période test (2005-2007) et la deuxième période (début 2008 à aujourd'hui).

³⁸ Un quota représente une tonne de CO₂

GRAPHIQUE N°2.3 : Évolution du prix de la tonne de CO₂ sur la période 2005-2007 (phase 1) et sur la deuxième période (février 2008 à aujourd'hui)³⁹



Source : données disponibles sur le site de BlueNext

Concernant l'objectif de réduction des émissions, une étude de Ellerman et Buchner (2008) montre une réduction des émissions de CO₂ d'environ 50 à 100 millions de tonnes par an, ce qui représente entre 2,5 à 5% d'émissions en moins qu'avec un scénario de « laisser-faire », c'est-à-dire sans le système de marché de permis d'émissions. Nous insistons tout de même sur le fait que le SCEQE n'intègre pas les industries de transports qui représentent 25% des émissions de GES.

Des conclusions et des propositions peuvent être réalisées grâce à la période qui a servi de test. Selon le rapport de Convery *et al.* (2008), le surplus d'allocation de quotas durant la phase 2005-2007 a permis à la Commission européenne d'harmoniser les règles d'allocation entre les différents États de l'Union et surtout de revoir à la hausse l'objectif de réduction des émissions de CO₂. L'appréhension de la Commission européenne sur la réalisation des profits d'aubaines des industries dus aux allocations gratuites des quotas ne s'est pas véritablement concrétisée. Quant à l'impact négatif du marché attendu sur la compétitivité des industries européennes, il n'a pas encore été prouvé empiriquement, d'autant plus que les entreprises européennes du secteur de l'énergie ont développé des bénéfices importants durant la phase test.

³⁹ L'échelle du graphique ne permet pas de visualiser les valeurs du prix de la tonne de CO₂ trop proches de zéro.

Au vu de ces résultats, le SCEQE fonctionne et a un bel avenir devant de lui, et son élargissement au niveau international est en bonne voie. Entre 2005 et 2007, le SCEQE comptait 25 États participants. En 2007, la Bulgarie et la Roumanie ont rejoint le SCEQE et au cours de l'année 2008, c'est au tour de la Norvège, de l'Islande et du Liechtenstein d'y adhérer. Les objectifs déterminés dans le protocole de Kyoto sont encore loin d'être atteints mais le SCEQE est l'exemple d'outil économique de régulation de la pollution qui peut faire avancer les négociations internationales sur le post-Kyoto.

Cet examen du SCEQE nous a permis de mettre en avant la réussite d'un marché de permis d'émissions négociables de grande envergure. Cependant, comme nous l'avons précisé, le SCEQE ne prend pas en compte les industries du secteur automobile qui sont pourtant responsables du quart des émissions de gaz à effet de serre. Il convient alors de se pencher sur l'analyse des systèmes similaires existant dans l'industrie automobile.

2.2.2. Les différents systèmes de marchés appliqués au secteur des transports

Albrecht (2001) montre que les émissions durant la fabrication d'une voiture sont beaucoup moins élevées que celles émises lors de son utilisation. La solution préconisée pour réduire les émissions de l'automobile est d'inciter les constructeurs automobiles à fabriquer des voitures moins polluantes. Les programmes de permis d'émissions instaurés dans le secteur automobile vont la plupart du temps dans ce sens.

2.2.2.1. Le programme *Corporate average fuel economy (CAFE)*

À la suite des crises pétrolières des années 70, le Congrès américain a adopté, pour la première fois, une loi obligeant les constructeurs automobiles à améliorer l'efficacité énergétique de leurs nouveaux véhicules de tourisme et des véhicules utilitaires légers. L'instauration de cette norme CAFE, entrée en vigueur en 1975, visait à réduire la

dépendance énergétique des États-Unis face aux pays de l'OPEP⁴⁰. Elle n'avait donc pas pour objectif de diminuer les émissions des véhicules.

Dans un premier temps, une norme CAFE est fixée. L'indicateur retenu pour déterminer l'efficacité énergétique d'un véhicule est le nombre de miles⁴¹ pouvant être fait avec un gallon⁴² de carburant (*MPG*). La valeur CAFE de la flotte d'un constructeur est alors définie par la moyenne des *MPG* de ses véhicules pondérée par ses quantités vendues. Les constructeurs de véhicules soumis au programme CAFE englobent aussi bien les fabricants américains qu'étrangers dans la mesure où leurs ventes se font sur le marché étasunien.

Le système CAFE est administré par la *National highway traffic safety administration* (NHTSA). Son fonctionnement est le suivant : les constructeurs ayant une performance moyenne meilleure que la norme peuvent obtenir des crédits qu'ils peuvent mettre en réserve pour compenser des dépassements les années ultérieures. Au contraire, les constructeurs n'ayant pas atteint la norme d'efficacité sont soumis à des amendes. Les crédits CAFE ne sont pas échangeables d'un constructeur à l'autre. Ce programme est similaire à un système de permis sans transactions de crédits entre les constructeurs.

Le programme a eu particulièrement de bons résultats les dix premières années qui ont suivi sa mise en place. Ensuite, sous la pression de certains constructeurs automobiles, la norme a été adoucie et seuls des changements mineurs dans la loi ont été réalisés. Cependant, en décembre 2007, le Congrès américain a adopté *l'Energy independence and security act* indiquant que les normes CAFE devaient être plus rigoureuses à partir de 2011, afin d'obtenir une moyenne de consommation des nouveaux véhicules de 35 *MPG* en 2020. Les nouvelles propositions CAFE ont vu le jour en avril 2008 ; elles incluent un système plus flexible en autorisant les constructeurs de véhicules à échanger les crédits. Les constructeurs dépassant la norme CAFE pourront obtenir des crédits pour leurs efforts, et la nouveauté est qu'ils pourront les vendre aux fabricants qui ne parviennent pas à les respecter. Cet ajout entraîne la transformation de l'outil de la norme CAFE, qui reposait sur le simple principe de crédits/pénalités, en un système de marché de permis échangeables.

⁴⁰ OPEP : Organisation des pays exportateurs de pétrole.

⁴¹ 1 mile = 1609 mètres.

⁴² 1 gallon = 3,7854118 litres.

Si le programme CAFE n'est pas encore totalement un système de permis négociables, il y tend. Dans la section suivante, on s'intéresse à un autre programme s'apparentant dès sa mise en place à un système de permis négociables : le programme ZEV.

2.2.2.2. Le programme *Zero emission vehicle* (ZEV)

Dès 1990, le CARB (*California air resources board*) a imposé aux constructeurs automobiles, intervenant sur le marché californien, un programme contraignant de développement de véhicules propres. Cette décision a été prise dans l'objectif de réduire les émissions polluantes en Californie. Le programme LEV (*Low emission vehicle*) mis en place en 1994, venait compléter le programme CAFE décrit précédemment. L'objectif de ce programme était d'introduire les véhicules non polluants⁴³ appelés ZEV (*Zero emission vehicle*) sur le marché de l'automobile et d'imposer des normes plus rigoureuses. Ce programme LEV définit quatre sortes de véhicules selon un certain niveau d'émissions de NMOG (*Non methane organic gas*) : les *Transitional* LEV, les LEV, les *Ultra* LEV et les ZEV. Comme dans le programme CAFE, les constructeurs calculent la performance environnementale de leur flotte de véhicules par rapport aux différentes catégories. Ils peuvent obtenir des crédits si la performance des véhicules dépasse celle imposée par la norme. Les crédits peuvent être gardés pour la période suivante ou vendus aux constructeurs n'ayant pas atteint la performance environnementale souhaitée. Seuls les constructeurs vendant plus de 35 000 véhicules par an en Californie sont concernés par la catégorie ZEV. Le CARB définit que la vente de ZEV doit atteindre 2% en 1998, 5% en 2001 et 10% en 2003 du nombre total de véhicules vendus par constructeur. Si les objectifs sont atteints, le constructeur obtient des crédits qu'il peut vendre ou utiliser les années suivantes. Si un constructeur n'a pas respecté les règles du système, une amende de 5000 \$ par véhicule non vendu est appliquée⁴⁴. Ce programme paraît assez strict étant donné le développement limité des véhicules électriques dans les années 90.

À la suite des pressions de l'industrie automobile, mais aussi des travaux universitaires du MIT dont ceux de De Neufville *et al.* (1996) prouvant l'inefficacité

⁴³ Les véhicules considérés comme non polluants sont les véhicules électriques.

⁴⁴ Voir Darbéra (2002)

économique du système ZEV, le programme a été modifié. Les objectifs de 1998 et 2001 sont suspendus afin de laisser du temps à la mise au point de véhicules électriques performants. En revanche, l'objectif de 10% de 2003 est maintenu.

Au vu de la difficulté des constructeurs à produire à moindre coût les véhicules électriques, la réglementation est une fois de plus changée en 1998. Le programme LEV 2 est instauré. Il introduit des crédits « ZEV partiels » qui sont obtenus en commercialisant des véhicules très propres, *Super ultra low emission vehicle*, mais pas électriques. Ce n'est qu'en 2000, selon Raux (2007a), que seule la Nissan Sentra a obtenu la certification pour prétendre à l'attribution des crédits partiels⁴⁵.

L'efficacité du programme LEV 2 n'est pas clairement prouvée. Néanmoins, ce programme a engendré une incitation à l'innovation, puisque les Japonais (en particulier Toyota) ont créé la surprise en commercialisant une voiture hybride, technologie que tous les constructeurs imitent aujourd'hui. De plus, ce programme a prouvé la faisabilité d'un système de permis échangeables entre constructeurs, à moindre coût administratif. Cependant, le manque d'information, évoqué dans la partie (2.1.2), sur les coûts des constructeurs automobiles, s'est révélé très problématique. Les modifications réalisées dans le programme à plusieurs reprises s'expliquent par l'incertitude du régulateur vis-à-vis des coûts des constructeurs automobiles.

Même si la pertinence du système en matière de réduction de pollution est contestée, ce programme est la preuve d'une faisabilité d'un système de marché de permis négociables dans le secteur des transports. Le dernier exemple de système de marché de permis que nous examinons n'est pas appliqué aux constructeurs automobiles, comme les deux précédents, mais aux raffineries.

2.2.2.3. Un système de permis pour la suppression du plomb dans l'essence

Un des plus anciens systèmes de marché de permis est celui appliqué aux raffineries américaines de 1982 à 1988. L'objectif de ce système était de réduire progressivement la teneur en plomb de l'essence produite par les raffineries jusqu'à son interdiction

⁴⁵ Nous notons que des modifications sont survenues dans le programme LEV 2 courant 2001 afin de réduire les coûts des constructeurs. (cf. Raux, 2007a).

totale de 1996. Entre 1960 et 1970, des études ont prouvé que les émissions de plomb sont très néfastes pour la santé humaine. C'est pourquoi l'EPA (*Environmental protection agency*) a décidé la mise en place d'un programme en 1973 afin d'aboutir progressivement à une diminution de la teneur en plomb en 1978.

À partir de 1982, l'EPA impose une nouvelle norme beaucoup plus stricte aux raffineries. Afin d'y parvenir, le système de marché des permis d'émissions de plomb est instauré. Le niveau de plomb dans l'essence est plafonné à 1,1 grammes par gallon d'essence. Le fonctionnement du marché est trimestriel. Les raffineries reçoivent un nombre de permis d'émissions correspondant au nombre de gallons d'essence plombée produit, un permis correspond à 1,1 grammes de plomb. Si, à la fin du trimestre, la raffinerie a utilisé moins de plomb que lui permettaient ses permis, alors elle peut vendre ses permis inutilisés aux raffineurs n'ayant pas respecté la norme, mais en aucun cas elle ne peut les garder pour les trimestres suivants. Notons que toutes les raffineries sont soumises à la norme, mais que seules les raffineries volontaires participent aux transactions. Le système de contrôle est très clair : à la fin de chaque trimestre, les raffineurs doivent non seulement déclarer leur production d'essence ainsi que la quantité de plomb utilisée, mais aussi indiquer l'identité de la raffinerie et les quantités de permis échangées s'il y a eu transaction.

Le plafond de la teneur de plomb dans l'essence a été réduit, une première fois en 1985, à 0,5 gramme par gallon, puis à 0,1 gramme par gallon en 1986. L'EPA a ajouté le droit d'épargner les permis d'émissions, en 1985, afin que la norme de 0,1 puisse être réalisée en 1986. Le programme s'est terminé en 1988 et le plomb a été totalement supprimé de la fabrication de l'essence en 1996.

Le système de marché de permis est considéré comme une réussite. Non seulement le plomb n'est plus utilisé dans la fabrication de l'essence, mais en plus l'adaptation progressive de la suppression du plomb, grâce au système de marché, a engendré des économies de coûts indéniables pour les raffineries (Hahn et Hester, 1989). Cependant, selon Kerr et Maré (1998), les coûts de transactions se sont révélés très élevés et ont évincé les petites raffineries du système d'échanges. C'est un point faible du système de marché que l'on a évoqué dans la section (§ 2.1.4) concernant les coûts de mise en place.

Ces deux premières sous-sections sur les expériences de marché de permis d'émissions nous ont permis d'établir l'utilisation possible de cet outil non seulement pour les entreprises polluantes (ex du SCEQE), mais aussi pour les industries automobiles (exemple des programmes CAFE et ZEV). Cependant, notre objectif est d'élaborer un système de permis d'émissions appliqué au consommateur final de véhicule, c'est-à-dire aux automobilistes. Le Royaume-Uni veut se doter d'un système de marché de quotas carbone appliqué à chaque individu. Si la faisabilité de ce système se révèle possible, alors l'application d'un marché de permis d'émissions pour les automobilistes ne semble plus irréaliste. Nous examinons les avancées en matière de marché de permis individuel dans la section suivante.

2.2.3. La carte carbone individuelle

Dans un contexte de changement climatique préoccupant, tous les individus sont invités à réduire leurs émissions. C'est au Royaume-Uni que l'idée d'instaurer un système de marché axé sur les ménages a vu le jour. Dans la mesure où les émissions de CO₂ provenant des ménages et du transport personnel représentent environ 40% de celles du Royaume-Uni, la proposition d'appliquer un outil de régulation aux individus ne paraît pas si surprenante.

L'idée d'introduire des quotas domestiques échangeables (*Domestic tradeables quotas* : DTQs) a été proposée par Fleming (1996) et renommée par la suite en *Tradable energy quotas* (TEQs) « quotas d'énergie échangeables » (Fleming, 2006, 2007). Starkey et Anderson (2005) ont développé plus précisément les DTQs et Hillman (2004) s'est intéressé à la *Personal carbon allowances* (PCAs) qui est aussi un dérivé du système de Fleming. Le tableau suivant montre leurs différences de fonctionnement :

TABLEAU N°2.1 : Le fonctionnement des trois systèmes de marché de permis individuel

	TEQs	DTQs	PCAs
Participants	Sur la totalité, 40% des quotas sont alloués gratuitement aux individus et 60% vendus aux enchères aux entreprises et organismes.	comme TEQs	Seulement aux individus
Allocations	Quotas distribués seulement aux adultes (et aux entreprises) chaque semaine.	Comme TEQs	Quotas distribués aux adultes et des demi-quotas aux enfants de moins de 18 ans
Cibles	Gaz, électricité, charbon, pétrole, essence pour la voiture.	Comme TEQs plus les déplacements personnels en avion	Gaz, électricité, charbon, pétrole, essence pour la voiture, et déplacements personnels en avion.

Source : Roberts et Thumim (2006)

Ces trois systèmes sont des propositions et n'ont pas encore été appliqués. Toutefois, des études pour la mise en place d'un tel programme ont été menées par le DEFRA (*Department for environment, food and rural affairs*) du Royaume-Uni durant ces dernières années.

Le système analysé par le DEFRA est le *Personal carbon trading* que nous appellerons carte carbone. Ce programme consiste en ce que chaque individu gère ses propres émissions de CO₂ issues de sa consommation domestique d'énergie (gaz, électricité, charbon, pétrole), de l'utilisation de sa voiture (carburant) et de ses déplacements personnels en avion. Le régulateur définit un plafond d'émissions de CO₂ et ensuite distribue une carte magnétique à chaque individu, comprenant le nombre de permis alloués pour une semaine. Le fonctionnement est ensuite calqué sur les systèmes existants dans la mesure où un individu peut vendre sur le marché les permis inutilisés aux individus ayant dépassé leurs quotas. Après avoir déterminé le fonctionnement, les analystes se sont penchés sur plusieurs facteurs déterminants de la mise en place du système, à savoir l'efficacité, l'équité et la distribution, l'acceptabilité ainsi que la faisabilité et les coûts de sa mise en place. Les résultats sont présentés dans le rapport de la *House of commons environmental audit committee* (HCEAC, mai 2008). Concernant l'efficacité du système, on apprend que les permis d'émissions doivent comprendre non seulement la consommation d'énergie domestique, mais aussi les déplacements de

loisirs faits en transports routiers et en avion, afin d'obtenir un réel impact sur la réduction des émissions. La réalisation de campagnes d'information est inévitable dans la mesure où un changement de comportement dans plusieurs secteurs doit se faire.

Au sujet de l'équité et de la distribution des permis, la théorie de distribuer le même nombre à tous les individus paraît *a priori* juste. Seulement, en pratique, ce n'est pas possible, les individus sont trop hétérogènes dans leurs émissions de CO₂. Plusieurs facteurs influençant la quantité des émissions des individus ont été déterminés comme le revenu, le nombre d'adultes vivant dans l'habitation, la situation géographique du lieu d'habitation (urbain/rural), le nombre de voitures, le type de chauffage utilisé, le nombre de chambres, le nombre d'enfants, etc. Dans l'étude du DEFRA (2008), une classification de la population a été effectuée en fonction de trois facteurs : le revenu, la situation géographique et la composition du ménage. L'allocation des permis aux individus est établie en fonction de cette caractérisation. Selon leurs estimations, 71% des individus avec des bas revenus sont gagnants avec la carte carbone dans la mesure où ils ne dépensent pas tous leurs permis, et 55% des individus avec de hauts revenus sont considérés comme perdants avec ce système. Toujours selon leurs estimations, les ménages avec de bas revenus qui sont perdants sont ceux qui habitent en milieu rural dans de grandes maisons et qui doivent utiliser leur véhicule pour se déplacer. Selon le rapport, ce système de marché de permis d'émissions semble être équitable dans la mesure où il favorise les ménages les plus pauvres.

À la suite de la réalisation d'enquêtes, l'opinion publique est plutôt défavorable à la mise en place d'un tel système. Même si les individus ont tendance à être d'accord avec la responsabilité individuelle face au changement climatique, la carte carbone semble un peu trop restrictive et entraîne des questionnements d'ordre juridique et éthique sur les libertés individuelles.

Concernant la faisabilité, aucun problème ne semble insurmontable d'un point de vue technique, même si une échelle de temps de 6 à 8 ans est préconisée afin d'obtenir un système totalement fiable. En revanche, son coût de mise en place est très important, même s'il est justifié sur le long terme.

Cependant, à l'issue de ces résultats, le gouvernement du Royaume-Uni n'a pas voulu se lancer dans l'instauration du système de carte carbone. Les coûts très élevés de la mise en place du système, ainsi que les réticences des individus ont été des éléments

décisifs dans le choix du gouvernement. Toutefois, le gouvernement maintient que c'est une idée intéressante, mais en avance sur son temps. Les recherches doivent continuer afin d'améliorer et de mieux appréhender les résultats.

Cette recherche de mise en place du système de permis d'émissions à l'échelle de toute une population d'un pays nous laisse penser que l'instauration à l'échelle des automobilistes est faisable. Aujourd'hui, nous avons trouvé une expérience individualisée appliquée aux transports, mais cela concerne les transports de marchandises.

2.2.4. Le programme écopoint en Autriche

Afin de limiter l'impact du transport routier sur l'environnement, l'Autriche a décidé de diminuer le trafic de transit à travers son territoire. Pour ce faire, le système « écopoint » a été instauré pour les poids lourds (véhicule de plus de 7,5 tonnes) immatriculés en Union européenne et voulant transiter par l'Autriche. L'objectif du programme est de réduire les émissions de NOx de 60% en 2003 par rapport à celles de 1991. Chaque année, un plafond d'émissions est déterminé et un nombre d'écopoints correspondant est fixé. La Commission européenne alloue les écopoints à chaque État membre. Sa répartition est fondée sur le nombre de transporteurs de chaque État ayant traversé l'Autriche en 1991. Les pays limitrophes ont évidemment plus d'écopoints que les autres. Ensuite, chaque État membre distribue les écopoints à ses transporteurs. Le nombre d'écopoints est dégressif d'année en année, et le nombre total de voyages annuels est limité à 108% par rapport à celui de 1991. Le dépassement de ce chiffre entraîne une diminution substantielle du nombre d'écopoints pour l'année suivante (CNT, 2002).

Tout poids lourd, doit payer un certain nombre d'écopoints à chaque traversée de l'Autriche. Ce nombre d'écopoints dépend évidemment de la distance parcourue et des caractéristiques d'émissions de NOx de chaque camion. S'il y a tentative de fraude, alors une amende de 1450 € doit être payée. Les écopoints qui ne sont pas utilisés ne sont pas vendus sur un marché, ils sont remis dans la distribution de l'année suivante. Les transactions de quotas entre transporteurs ou États ne sont pas possibles.

La clause de la limitation du trafic à 108% a créé beaucoup de conflits notamment entre l'Allemagne et l'Autriche. La Commission européenne a décidé d'abolir cette clause en 2000 afin que les transporteurs allemands puissent circuler à travers l'Autriche sans être dans l'illégalité (pas assez d'écopoints). Finalement, le système écopoints sans la clause des 108% est prolongé jusqu'à 2006, c'est-à-dire jusqu'à l'adoption de la nouvelle directive Eurovignette⁴⁶.

Ce programme a entraîné, d'une part une baisse considérable du trafic de poids lourds fort émetteurs de NOx et d'autre part une augmentation du trafic des véhicules peu polluants. Ce système d'écopoints a incité indirectement les transporteurs à s'adapter aux nouvelles normes Euros. Cependant, une critique assez récurrente de ce système est son application restreinte aux poids lourds traversant l'Autriche. Les poids lourds circulant seulement en Autriche ou au départ de l'Autriche ne sont pas soumis au système d'écopoints. Toutefois, on peut se satisfaire qu'un système de quotas d'émissions décentralisé pour les transporteurs ait vu le jour.

À travers l'analyse des différentes expériences, le système de marché de permis d'émissions a prouvé sa faisabilité. Si le SCEQE montre un bon fonctionnement, les systèmes de marché appliqués aux industries du secteur transport sont, soit un peu moins conformes, soit ont révélé quelques dysfonctionnements. La norme CAFE, par exemple, s'associait plus à un système crédits/pénalités qu'à un système de marché. La récente décision d'instaurer le droit de transactions en fait maintenant un réel marché de permis d'émissions. Le programme ZEV, quant à lui, fonctionne typiquement comme un système de marché. Cependant, il a connu quelques péripéties, notamment à cause du problème d'incertitude sur les coûts des constructeurs. Mais ces programmes reflètent la possibilité de l'utilisation des permis dans le secteur transport. Toutefois, voulant comparer l'efficacité d'un système de permis d'émissions avec le péage urbain, l'analyse des expériences de marché plus décentralisé a été réalisée. Les recherches menées au Royaume-Uni sur la carte carbone individuelle montrent que l'idée est dans l'air du temps, mais qu'il reste encore du chemin à faire afin de mettre ce système en

⁴⁶ La nouvelle directive Eurovignette (2006/38/CE) du 17 mai 2006 remplace la directive Eurovignette (1999/62/CE) du Parlement européen et du Conseil, du 17 juin 1999. Elle instaure un nouveau cadre communautaire relatif à la taxation des poids lourds pour l'usage de certaines infrastructures routières. (cf. <http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l24045b.htm>).

place. Cependant, s'il est difficile de vouloir soumettre tous les individus d'un pays à un système de permis d'émissions concernant plusieurs activités, il semble possible de l'appliquer à une partie des individus sur une seule activité : les automobilistes. La seule expérience décentralisée sur le transport est celui du système écopoints mis en place en Autriche. Néanmoins, ce système de quotas fonctionnait sans échanges. Il est intéressant de se rapprocher d'une autre solution. C'est pourquoi l'idée d'appliquer un système de permis d'émissions aux automobilistes nous paraît faisable. Même s'il n'existe pas encore d'expériences concrètes, il existe toutefois quelques modélisations théoriques que nous présentons dans la section suivante.

2.3. La rareté de la modélisation des systèmes de marché de permis appliqués aux automobilistes

Les développements de travaux tels que ceux de Verhoef *et al.* (1997), de Marlot (2002) ou encore de Raux (2007b) montrent l'intérêt porté à l'instauration d'un système de permis d'émissions appliqués aux déplacements des automobilistes dans une zone urbaine. Cependant, les modélisations microéconomiques de cet instrument se font plutôt rares, à l'exception du modèle réalisé par Daganzo (1995) et celui de Raux et Marlot (2005) portant notamment sur la mise en place d'un système hybride. Toutefois, on ne peut négliger toute la littérature existante sur la formalisation du système de permis d'émissions en réseaux. La modélisation de Dafermos (1982) sur l'équilibre de trafic en réseau a inspiré les modèles de système de permis d'émissions appliqué à un réseau de transport où les flux d'équilibre sont égaux aux permis détenus. Ces formalisations ont été notamment développées par Nagurney *et al.* (1998), Nagurney (2000) et Nagurney et Zhang (2001). Cependant, ces études relèvent d'un vaste champ économique correspondant à celui de l'économie de réseau et nous ne le traiterons pas dans ce travail de thèse. Notre objectif se limite à l'obtention d'une mobilité durable en zone urbaine et ne prend donc pas en compte les différents réseaux de transport. Par ailleurs, l'économie des réseaux voit une application plus pertinente aux déplacements périurbains.

La section débute par la présentation des modèles de systèmes hybrides et se poursuit par l'analyse des apports et limites de ces modélisations afin que l'on puisse comparer l'instrument des permis d'émissions avec le système de taxation.

2.3.1. Le modèle précurseur de système hybride et ses extensions

L'article de Daganzo (1995) porte sur la modélisation d'un système hybride appliqué aux automobilistes. Il développe un modèle combinant le rationnement de l'utilisation de l'automobile et la tarification de la route afin de réguler la congestion. Pour ce faire, une voirie avec un goulot d'étranglement est modélisée. Les individus sont supposés avoir le choix entre prendre leur voiture ou un mode alternatif à la route comme les transports collectifs. La constitution de différentes classes « sociales » de voyageurs selon les différentes valeurs du temps forme le point important du modèle de Daganzo.

À partir de cette base, Daganzo montre que l'optimum de Pareto n'est pas obtenu avec le péage urbain, dans la mesure où toutes les classes de voyageurs n'y gagnent pas. C'est pourquoi le système de rationnement est intégré dans le modèle. Son fonctionnement est le suivant : certains individus sont soumis à un rationnement de leur véhicule certains jours de la semaine, en sachant que les autres jours ils bénéficient d'une libre circulation. Si, parmi ces conducteurs, certains souhaitent utiliser leur véhicule les jours de rationnement, alors ils doivent acheter des droits à circuler. Les droits ne sont pas échangeables et les recettes sont supposées ne pas être redistribuées à la population.

L'article de Daganzo (1995) est un des premiers à donner une modélisation du système hybride pour réduire la congestion. Ce modèle a pour objectif d'intégrer de la flexibilité et de compléter le simple instrument de péage. De plus, selon Daganzo (1995), ce modèle de système hybride est dit Pareto optimum puisqu'il est bénéfique pour toutes les catégories « sociales » de voyageurs, contrairement au système de péage seul, à condition que les recettes ne soient pas redistribuées à la population. L'encadré suivant présente les principales hypothèses et résultats du modèle développé par Daganzo (1995).

ENCADRÉ N°2.2 : Principales hypothèses et résultats du modèle de Daganzo (1995)**Les hypothèses****Hypothèse n°1 : One bottleneck** : un seul goulot d'étranglement

Une partie des automobilistes choisit cet itinéraire chaque jour afin d'arriver sur le lieu de travail. La fonction de congestion, c'est-à-dire le temps de trajet supplémentaire, est déterminée seulement par le nombre d'automobilistes empruntant cet itinéraire. La fonction est croissante avec le nombre d'automobilistes et nulle si le nombre d'automobilistes est nul.

Hypothèse n°2 : Fixed time and cost for nonusers : Les coûts en temps et en argent pour les non usagers de voirie congestionnée

Les individus sont supposés avoir le choix entre utiliser leur voiture ou un mode alternatif à la route. Les usagers des modes alternatifs ont des coûts en temps et en argent propres à chacun et surtout indépendants du nombre d'automobilistes empruntant le goulot d'étranglement. Toutefois, les voyageurs avec les mêmes valeurs du temps et du coût financier du déplacement sont regroupés dans une même classe.

Hypothèse n°3 : Additive/linear utility : L'utilité est supposée être additive et linéaire

La fonction d'utilité est représentée par la somme des utilités journalières. Chaque jour, les individus choisissent le mode de transport correspondant à l'utilité la plus élevée. L'utilité quotidienne est linéaire et spécifique à chaque voyageur.

Hypothèse n°4 : Nonreturned revenues : revenus non redistribués

On suppose que les recettes du péage ne sont pas redistribuées à la population.

Les résultats :

Résultat 1 : La tarification classique, par la mise en place d'un péage, engendre une diminution de l'utilité pour certaines classes d'usagers.

Résultat 2 : Le rationnement de l'utilisation de l'automobile est une solution plus équitable pour toutes les classes d'usagers, mais semble irréaliste à instaurer.

Résultat 3 : Le système hybride combinant le péage et le rationnement est efficace pour réduire la congestion et est Pareto-optimum dans la mesure où il est bénéfique à toutes les classes d'usagers.

Source : Daganzo (1995)

Ce système hybride a été estimé empiriquement par Nakamura et Kockelman (2002) sur le corridor du San Francisco Bay Bridge. Le choix du lieu paraît idéal à l'application du modèle, puisque le San Francisco-Oakland Bay Bridge est un pont reliant la ville de San Francisco à la rive Est de la baie. Cependant, les auteurs modifient certaines hypothèses restrictives du modèle analytique de Daganzo (1995). En effet, leur modélisation est non linéaire et donc plus performante. La méthode utilisée pour déterminer le choix modal des usagers est un modèle *nested-logit* d'utilité aléatoire, réalisé par la *Metropolitan transportation commission* (MTC). Les résultats de l'estimation montrent que les choix modaux des individus sont sensibles à la combinaison du système de péage et de droits à circuler. Toutefois, les conclusions

indiquent qu'il est très difficile d'obtenir l'optimum de Pareto avec la politique préconisée par Daganzo (1995). Trouver une combinaison de péage et de rationnement bénéfique pour tous les groupes d'individus semble impossible dans la mesure où il n'existe pas de redistribution des recettes.

En s'appuyant sur ce modèle, Kockelman et Kalmanje (2005) ont développé une nouvelle stratégie appelée *Credit-based congestion pricing* (CBCP). Avec cette politique, les automobilistes reçoivent gratuitement une allocation mensuelle de crédits, sous une forme monétaire, afin de pouvoir circuler sur les routes soumises à la tarification de la congestion (péage). Si un automobiliste dépense tous ses crédits, il est soumis au péage urbain. Au contraire, si un automobiliste n'utilise pas la totalité de ses crédits, le surplus peut être employé les mois suivants ou échangé avec le régulateur contre de l'argent. Selon Kockelman et Kalmanje (2005), une politique CBCP aboutit à une utilisation optimale des infrastructures de transport. Ce système est dit efficace et équitable, dans la mesure où les automobilistes peuvent choisir entre dépenser leurs crédits ou les conserver selon leur besoin de déplacements. Par ailleurs, l'équité vient aussi de l'allocation initiale des crédits prenant en compte les différents critères sociaux des automobilistes (ménages à faibles revenus, parents isolés). Un autre avantage du CBCP est la redistribution totale des recettes servant à l'allocation des crédits du mois suivant. Des détails supplémentaires sur la politique CBCP sont donnés dans l'article de Gulipalli *et al.* (2005). Cependant, ce système CBCP s'appuie seulement sur le modèle théorique de Daganzo (1995), aucune autre modélisation n'est développée. Les travaux de Kockelman et Kalmanje (2005) traitent uniquement de la perception de la mise en place de ce système pour les habitants d'Austin au Texas. Le modèle de Daganzo (1995) constitue une source théorique rare.

2.3.2. Modèle hybride appliqué à la consommation de carburant des automobilistes

Raux et Marlot (2005) préconisent la mise en place d'un système hybride combinant la taxe et le marché de permis d'émissions sur la consommation de carburant des automobilistes. Le modèle de Daganzo (1995) analysé précédemment ciblait le problème de congestion. Le système de Raux et Marlot (2005), quant à lui, a pour

objectif de réduire la pollution automobile à travers la diminution de la consommation de carburant. Le principe de leur système repose sur le système hybride défini par Baumol et Oates (1988), exposé dans la section (§ 2.1.6). Un système de marché de permis d'émissions négociables est mis en place ainsi qu'une taxe CO₂. Les automobilistes participant au marché sont volontaires, les individus ne souhaitant pas y participer paient la taxe CO₂ appliquée aux litres de carburants achetés. Le régulateur détermine le nombre moyen de litres de carburant consommés par un automobiliste pendant une année. Il distribue gratuitement à chaque automobiliste volontaire une quantité de permis, chaque permis correspondant à un litre de carburant. La gratuité des permis est justifiée afin de garantir une mobilité pour tous. Le fonctionnement du marché est conforme aux principes théoriques basiques : si un individu ne dépense pas tous ses permis, il peut les vendre aux automobilistes ayant épuisé leurs quotas. La taxe CO₂ sert de prix plafond au permis puisqu'un individu ayant utilisé la totalité de ses permis a le choix entre acheter des permis sur le marché ou payer la taxe.

Dans un premier temps, les auteurs ont estimé et comparé les surplus des automobilistes et du régulateur, engendrés par un système de taxation et par un système de permis d'émissions appliqués à la France. Les évaluations des surplus sont réalisées à partir d'une fonction de consommation de carburant prenant en compte la valeur de l'élasticité-prix de la demande et le lieu d'habitation des automobilistes⁴⁷. L'élasticité-prix de la demande est estimée à -0.3 et -0.7, respectivement pour le court terme et le long terme (cf. Goodwin, 1988). Ces valeurs donnent une indication au régulateur quant au taux de taxe à imposer afin d'obtenir la réduction de la consommation de carburant souhaitée. Afin de comparer les instruments (taxe et permis d'émissions), l'hypothèse fondamentale posée est que le prix du permis d'émissions est égal au taux de taxe optimal. Trois principaux résultats peuvent être retenus de leurs estimations. Premièrement, le régulateur obtient un gain fiscal avec la taxe, mais une perte lors de la mise en place d'un système de permis d'émissions. Deuxièmement, la taxe a très peu d'effet sur les surplus des différentes classes d'automobilistes, dans la mesure où toutes y perdent en faveur de la collectivité. Troisièmement, les permis jouent un rôle important dans la variation des surplus entre les classes d'automobilistes.

⁴⁷ Raux et Marlot (2005) définissent quatre zones d'habitation : ville-centre, banlieue, zone périurbaine et zone rurale.

Dans un second temps, les auteurs ont effectué une analyse qualitative du système hybride. Nous retenons les conclusions suivantes : la mise en place d'une taxe permet d'une part de plafonner le prix du permis, et d'autre part de réduire le développement d'un marché noir ; une allocation des permis gratuite et sur critères socio-économiques est préconisée pour répondre à des critères d'efficacité et d'équité ; enfin, le système sur les litres de carburants semble moins coûteux qu'un autre système de permis décentralisé.

2.3.3. Le modèle décentralisé pour les automobilistes de la ville de Mexico

Mexico est considérée comme une des villes les plus polluées au monde et cette pollution atmosphérique est très inquiétante, notamment d'un point de vue sanitaire. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce niveau de pollution élevé : le développement industriel, la croissance démographique et la circulation intense de l'automobile. La ville de Mexico compte plus de 8 millions d'habitants (environ 18 millions dans l'agglomération) et près de 4 millions de véhicules y circulent chaque jour dans les rues ; de plus le parc automobile n'est pas des plus récents.

L'objectif des travaux de Goddard (1997, 1999) consiste à trouver un système efficace permettant la réduction des émissions provenant de l'automobile à Mexico. Le système de l'époque, instauré par les autorités de la ville, agit directement sur la quantité d'utilisation de l'automobile en interdisant tout simplement de prendre son véhicule certains jours de la semaine. Le programme utilise des plaques d'immatriculation de différentes couleurs déterminant les jours où les automobiles ne peuvent pas circuler. Goddard (1997, 1999) propose une amélioration du système en intégrant une certaine flexibilité, à travers l'instauration d'un système de marché de permis négociables pour les automobilistes.

Dans un cadre microéconomique basique, l'auteur pose le programme du régulateur qui doit maximiser le bien-être de la société, comprenant l'utilité agrégée des automobilistes et le coût total de réduction des émissions (dépendant de l'investissement en technologie moins polluante), sous la contrainte de pollution fixée. L'autorité régulatrice a la possibilité d'agir sur la réduction de la pollution par la diminution de

l'utilisation de l'automobile et/ou par l'incitation aux investissements en technologie moins polluante. Par la mise en place d'un système de permis d'émissions, le régulateur agit directement sur l'utilisation de l'automobile *via* la quantité de permis allouée définie par le niveau plafond d'émissions.

L'idée originale du modèle de Goddard (1997, 1999) est de proposer une offre diversifiée de permis afin de respecter le plafond d'émissions fixé. Trois sortes de permis journaliers par semaine sont alors identifiées :

- Un permis constant basique désignant les jours d'utilisation de la voiture, quelle que soit la pollution atmosphérique de la ville.
- Un permis constant suspensif différant du précédent dans la mesure où il peut être déclaré inutilisable les jours de grande pollution.
- Un permis dit temporaire pouvant être utilisé les jours de non conduite afin d'entrer dans la ville. Ce dernier permis fonctionne comme le système de péage.

Les trois sortes de permis sont distribuées gratuitement par le régulateur aux automobilistes. Les automobilistes n'ayant pas utilisé la totalité de leur permis ont la possibilité de les garder pour une future utilisation ou de les vendre aux automobilistes ayant épuisé leurs permis par l'intermédiaire d'un marché.

Toutefois, la modélisation de Goddard s'attache essentiellement à la détermination de la contrainte environnementale, fondée sur les données de l'indice de dispersion de pollution. Le cadre théorique du fonctionnement du marché tel que les évolutions de prix du permis, de la demande, etc., reste peu développé. Cependant, ce modèle est l'un des premiers à avoir étudié la conception d'un système de permis sous une contrainte environnementale déterminée.

2.3.4. Apports et limites de la modélisation théorique du système de PEN par rapport à celui de la taxation

Ces différentes modélisations de système de marché de permis sont la preuve de l'intérêt porté à cet instrument afin de réduire la pollution automobile. Cependant, à travers la présentation et l'analyse de ces modèles, des lacunes apparaissent. Le seul cadre théorique totalement modélisé est celui du système hybride développé par

Daganzo (1995) afin de réduire la congestion automobile. Selon lui, le péage seul ne suffit pas à obtenir une solution efficiente. Seule l'instauration d'un système de tarification combiné avec un système de rationnement aboutirait à un optimum de Pareto pour les différentes classes d'automobilistes sous la condition qu'aucune redistribution des recettes ne soit réalisée. Toutefois, ce résultat théorique est contesté par Nakamura et Kockelman (2002). En testant le modèle, il apparaît une réelle difficulté à trouver la combinaison efficace entre les deux instruments afin d'obtenir un bénéfice pour toutes les classes d'automobilistes en ne considérant aucune redistribution des recettes. La pertinence des résultats théoriques est alors remise en cause. Raux et Marlot (2005) apporte une nouvelle conception du système de permis en l'appliquant aux litres de carburant consommés par les automobilistes combiné avec une taxe CO₂ servant de prix plafond aux permis. Leurs résultats théoriques se fondent sur l'analyse des gains et des pertes engendrés par la mise en place d'un système de permis et par celui d'une taxe CO₂ avec différents scénarii possibles. Le dernier modèle étudié est celui de Goddard (1997) qui porte sur un système de permis d'émissions négociables appliqués aux automobilistes de la ville de Mexico. Si Goddard se focalise sur la pertinence théorique de la détermination de la contrainte environnementale, le cadre théorique du fonctionnement du marché est laissé un peu de côté.

Ces modélisations du système de permis paraissent moins abouties que les modèles théoriques de péage urbain développés dans le chapitre 1. La pertinence de la modélisation théorique du péage urbain dans les modèles de flux temporel et de file d'attente forme la fiabilité de l'instrument. Le manque de justification théorique du système de permis d'émissions pour les automobilistes entraîne indubitablement un manque d'application. La recherche sur la modélisation d'un système de permis afin d'internaliser les nuisances de l'automobile doit continuer pour montrer l'efficacité de cet instrument.

Conclusion du chapitre 2

Si la question du choix de l'instrument économique entre la taxe et le système de marché passonne, elle est loin d'offrir une réponse théorique ou appliquée ferme et unique, notamment dans le secteur du transport.

La première section a été consacrée à la confrontation des avantages et des inconvénients des deux instruments. À l'issue de cette analyse comparative, aucun élément théorique ne prouve la supériorité d'un des outils économiques. Par ailleurs, on s'aperçoit que le système hybride combinant la taxe et le marché de permis d'émissions offre beaucoup d'avantages théoriques, mais se révèle difficile à mettre en place. La faisabilité constitue pourtant un élément décisif dans la sélection de l'outil. Ne pouvant pas déterminer le choix de l'instrument par l'analyse des éléments de la théorie économique, nous nous sommes penchés sur les différentes expériences d'instauration du système de marché de permis.

Le système de marché de permis d'émissions négociables est beaucoup moins utilisé que la taxe. C'est pourquoi l'analyse des expériences s'est portée autant sur les problèmes de pollution des entreprises que sur ceux du secteur transport. Les expériences appliquées aux entreprises comme le système SCEQE, ou aux industries de transports comme la norme CAFE ou le programme ZEV, se sont révélées plutôt réussies et assez répandues. À l'inverse, les expériences décentralisées d'un système de marché se font plutôt rares. L'application d'un système de quotas non échangeables sur les transporteurs, le programme écopoints en Autriche, s'est révélée être la seule expérience dans le secteur des transports. Elle montre, toutefois, la faisabilité de ce système de permis appliqué à des sources mobiles. Le projet carte carbone mené par le DEFRA au Royaume-Uni n'a quant à lui pas vu le jour, notamment à cause de son coût économique. Cependant, si on imagine instaurer un système de marché de permis d'émissions à l'échelle de la population d'un pays et sur plusieurs secteurs, il paraît alors faisable de l'appliquer aux automobilistes. L'absence d'expérience de ce système pour les automobilistes peut s'expliquer par le fait que les justifications théoriques sont encore trop peu nombreuses.

La troisième section de ce chapitre inventorie et analyse trois modèles théoriques développés pour la mise en place du système de marché de permis d'émissions pour les automobilistes. Si le modèle de Daganzo (1995) est le seul à poser réellement un cadre théorique du fonctionnement de son système hybride combinant la taxe et le rationnement, ses résultats sont contestables. Nous soulignons l'originalité des modèles de Raux et Marlot (2005) et de Goddard (1997), l'un se focalisant sur les gains et les pertes engendrés par la taxe et les permis, et l'autre sur la détermination de la contrainte de pollution. Cependant, les justifications théoriques de ce système restent à développer.

Conclusion de la première partie

L'internalisation des nuisances provoquées par l'automobile en milieu urbain est au cœur de cette première partie. Cette prise en compte des effets externes du transport passe indéniablement par le choix de l'outil économique le mieux adapté. La comparaison effectuée au cours de cette première partie s'est concentrée sur l'instrument de la taxe par rapport à celui des marchés de permis d'émissions négociables. Cette analyse comparative a été menée autant d'une façon théorique qu'appliquée.

La première démarche adoptée a été de faire un état des lieux du système de la taxation appliqué aux transports. Dans tous les domaines confondus, la taxe est certainement l'instrument le plus utilisé afin d'internaliser les effets externes négatifs. C'est pourquoi son application dans le secteur du transport n'est pas récente, et les travaux de recherches théoriques et empiriques sont très développés. Sous la forme de péage urbain, le système de taxation a eu longtemps comme principal objectif de réguler la circulation urbaine. Les exemples d'application sont nombreux (péage de Singapour ou de Londres), et ceux de modélisations théoriques sont aussi développés (modèle de file d'attente ou de flux temporel). Cependant, le péage urbain s'oriente aujourd'hui vers un but complémentaire à celui de réduction de la congestion, qui est celui de régulation de la pollution automobile. Si l'exemple du péage de Stockholm montre l'évolution des objectifs, le péage écologique mis en place à Milan, au début de l'année 2008, prouve la tendance à se centrer davantage sur les problèmes de pollution que de congestion. Cette récente modification du péage entraîne des modélisations théoriques peu développées sur la prise en compte des nuisances environnementales engendrées par l'automobile. Pourtant, il apparaît aujourd'hui certain que la régulation environnementale est l'une des priorités de notre société.

Le deuxième chapitre a été consacré à la mise en parallèle des outils. Les éléments de l'analyse théorique économique étudiés ne nous ont pas permis d'affirmer que le péage urbain est supérieur au marché de permis d'émissions, ou inversement. Les travaux abondants sur ce sujet voient la solution en un système hybride qui,

théoriquement, concentre tous les avantages, mais dont l'application, concrètement, semble compromise. De plus, le choix d'un outil économique peut être biaisé par l'enjeu politique, les analyses économiques théoriques passant alors à la trappe. Ensuite, comme pour le péage urbain, les expériences d'application du système de marché de permis d'émissions ont été exposées et analysées. Cependant, les utilisations de ce système sont récentes et beaucoup moins répandues que celles du péage. Malgré quelques expériences dans le secteur du transport, il n'existe pas, à notre connaissance, de système de marché appliqué aux automobilistes d'une zone urbaine. Afin de mener à bien notre comparaison des outils, les modèles précurseurs du système de permis sur les automobilistes ont été présentés et étudiés.

À l'issue de cette première partie, il apparaît que le choix de l'instrument n'est pas évident. À travers l'analyse de l'efficacité, des problèmes d'informations imparfaites, des coûts de mises en application, aucun instrument ne paraît dominer l'autre économiquement. Les modélisations théoriques et les applications du péage urbain, beaucoup plus développées que celles du système de permis d'émissions, ne peuvent pas constituer l'argument décisif du choix de l'outil. Cette première partie ne nous permet pas de conclure sur l'instrument le mieux adapté pour l'accès à une mobilité durable. Cependant, elle nous indique les éléments à développer afin de rendre plus pertinents les systèmes de taxation et de permis d'émissions.

Les problèmes environnementaux engendrés par l'utilisation croissante et excessive de l'automobile en milieu urbain ne peuvent plus être occultés. Dans une optique environnementale, le premier chapitre nous instruit sur les lacunes des modélisations du péage urbain. Les modèles développés comme ceux de file d'attente ou de flux temporel ont été réalisés afin d'internaliser le phénomène de congestion et non celui de pollution. Pourtant, il semble nécessaire de prendre aussi en considération le problème des nuisances environnementales. Le second chapitre, quant à lui, a mis en lumière plusieurs problèmes liés au système de marché de permis d'émissions appliqués aux automobilistes. La principale faille nous semble provenir du fait que les justifications théoriques sont encore peu développées, ce qui explique en partie le manque d'expériences. La mise en place d'un tel système paraît faisable, mais passe indéniablement par le développement d'un modèle théorique robuste.

Ces différentes analyses nous amènent à répondre à un double objectif dans la seconde partie. D'une part, dans le chapitre 3, plusieurs extensions seront apportées au modèle de file d'attente. D'autre part, le chapitre 4 sera consacré à la conception d'un modèle théorique de fonctionnement du système de marché de permis d'émissions appliqués aux automobilistes. Nous contribuons ainsi, par ces deux aspects, à l'élaboration de politiques de mobilité durable.

DEUXIÈME PARTIE

EXTENSIONS ET DÉVELOPPEMENTS DE MODÉLISATION POUR UNE MOBILITÉ DURABLE

Introduction de la deuxième partie

Les politiques publiques en faveur d'un transport durable sont de plus en plus désignées comme une priorité, aussi bien à l'échelle locale que nationale. Les propositions, visant à limiter la place de l'automobile en centre-ville et à faciliter le transfert modal, sont considérées aujourd'hui comme des solutions pour parvenir à une mobilité dite durable.

Les politiques modales telles que la création de parkings-relais, le stationnement payant ou encore le développement des transports collectifs, ont pour objectif commun d'entraîner une diminution de l'automobile, notamment en incitant les individus à utiliser les modes alternatifs à la voiture. Ces politiques modales sont complémentaires aux instruments économiques de régulation comme le péage urbain ou le système de marché de permis d'émissions négociable (PEN), étudiés dans la première partie de la thèse.

Il est alors fondamental de prendre en considération ces différents outils et politiques modales dans l'élaboration d'un modèle théorique. L'utilisation de la formalisation, c'est-à-dire des outils mathématiques, dans l'analyse économique permet de garantir la logique, la rigueur et la robustesse du raisonnement, ainsi que des résultats.

« La science économique élabore des modèles des phénomènes sociaux. Par modèle, nous entendons une représentation simplifiée de la réalité. La puissance d'un modèle découle de l'élimination des détails non pertinents, ce qui permet à l'économiste de se concentrer sur les aspects essentiels de la réalité économique qu'il essaie de comprendre. » Varian (2006)

La mise en place d'une politique de régulation de l'automobile, passant par le choix d'un outil économique, est une décision importante dans la mesure où elle peut engendrer des conséquences non seulement économiques, mais aussi politiques, selon la réussite ou non des objectifs souhaités. Il apparaît alors primordial, pour le régulateur,

de connaître les éventuelles difficultés et les différents résultats engendrés par la mise en place d'un instrument.

L'analyse de la littérature exposée dans la première partie de la thèse a dégagé deux principales conclusions. Premièrement, même si le péage urbain a fait l'objet de modélisations pertinentes de l'externalité de congestion, les nuisances environnementales sont mises de côté et les politiques de transfert modal sont souvent occultées. Deuxièmement, les justifications théoriques du système de PEN appliqué aux automobilistes mériteraient d'être plus développées.

L'objectif de cette deuxième partie est donc d'améliorer et d'adapter ces deux outils économiques afin de contribuer aux politiques publiques en faveur d'un transport durable.

Les modèles de file d'attente d'Arnott *et al.* (1990, 1993) sont considérés comme ceux qui reflètent le mieux la situation de congestion observée dans les grandes villes. Cependant, ils renvoient à la structure des villes américaines où les transports collectifs sont peu développés et où l'automobile est « reine ». C'est notamment pour cette raison que la question des politiques modales n'est pas abordée dans leur analyse. Tabuchi (1993) et Danielis et Marcucci (2002) pallient cette lacune en intégrant, dans les modèles de file d'attente classique, une répartition modale entre la voiture et les transports collectifs. Toutefois, aucune proposition de politique de transfert modal n'est envisagée et l'externalité de pollution demeure non internalisée. Les modélisations existantes sur le péage urbain ne réunissent donc pas toutes les conditions nécessaires pour caractériser une politique de transport durable. Pourtant, les préoccupations environnementales sont, aujourd'hui, au centre des politiques de transport urbain.

Ainsi, dans **le chapitre 3**, nous fournissons plusieurs extensions du modèle de file d'attente d'Arnott *et al.* (1990, 1993). L'objectif de notre modélisation est double : diminuer l'utilisation de l'automobile et inciter les individus à prendre les transports collectifs. Nous développons un modèle répondant mieux aux critères de politiques de transport actuelles, en intégrant une politique modale de redistribution des recettes du péage urbain vers les transports collectifs et en prenant en compte les nuisances environnementales provoquées par l'automobile dans le prix du péage. Nous nous

appuyons notamment sur les travaux de Danielis et Marcucci (2002) concernant la répartition modale, et ceux de Mirabel (1996) relatifs à la politique de redistribution.

S'il existe un nombre incontestable de travaux théoriques du système de permis d'émissions appliqués aux entreprises comme Malueg (1990), Sartzetakis (1997) ou encore Pratlong (2005) et Rosendhal (2008), les modélisations de cet instrument appliqué aux automobilistes sont rares.

Ainsi, le **chapitre 4** a pour objectif de développer une justification théorique du système de marché de PEN, adaptée à la problématique de mobilité durable. À partir des éléments de la microéconomie de l'environnement et ceux de l'économie des transports, nous présentons une modélisation d'un système de marché de PEN. À l'aide des modèles exposés dans la première partie de la thèse, mais aussi grâce au raisonnement et à la logique de ceux appliqués aux entreprises, nous développons un modèle théorique simple montrant le fonctionnement d'un système de marché de PEN appliqué aux automobilistes.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DU PÉAGE URBAIN ASSOCIÉ À UNE POLITIQUE MODALE : PRISE EN COMPTE DES COÛTS ENVIRONNEMENTAUX

Introduction

Aujourd'hui, l'incitation au partage modal constitue un élément majeur des politiques de transport. Les analyses et les bases de données traitant du transfert modal sont de plus en plus riches et pertinentes. On peut citer notamment Kaufmann et Guidez (1996) sur les déterminants du choix modal, Ortuzar *et al.* (1998) sur les comportements des voyageurs, et l'étude de Vivier (2001) qui analyse les facteurs jouant sur la substitution de la voiture par les transports collectifs, à partir d'une base de données *The Millenium Cities Database For Sustainable Transport*⁴⁸. Ces travaux soulignent que les politiques modales sont complémentaires aux outils économiques comme le péage urbain. L'emploi de politiques pénalisant l'utilisation de la voiture semble particulièrement efficace si le transfert modal se fait facilement. Ainsi, le développement des modes alternatifs à l'automobile contribue et accentue le report

⁴⁸ Base réalisée par l'UITP (Union Internationale des Transports Publics) sur 100 villes du monde regroupant au total 66 indicateurs pour l'année 1995 et mise à jour en 2006 avec 120 indicateurs.

modal. Le cas de la ville de Singapour constitue le parfait exemple relatif à la réussite de la réduction de l'utilisation de l'automobile. La ville a, en effet, mis en place un péage urbain, accompagné d'une politique de taxation lors de l'achat d'une automobile, et a développé parallèlement un réseau de transport collectif efficace, rapide et confortable. L'association de ces trois éléments est la clé du succès de la politique de régulation de l'automobile à Singapour.

L'objectif de ce troisième chapitre est de rendre le système de péage urbain plus pertinent et mieux adapté aux attentes des politiques de transport urbain actuelles, notamment dans une optique environnementale. Pour ce faire, nous apportons plusieurs extensions au modèle de file d'attente, développé par Arnott *et al.* (1990, 1993) et présenté dans le chapitre 1. D'une part, afin de mieux percevoir l'approche environnementale donnée au péage urbain, nous intégrons les coûts environnementaux liés à l'utilisation de l'automobile ; et d'autre part, nous associons à l'instrument une politique modale incitative. La question de politique modale de redistribution des recettes du péage a été analysée par Mirabel (1996) et reprise par Reymond (2005). Ainsi, le but est d'internaliser, par le système de péage, les effets externes négatifs du transport afin d'aboutir à la minimisation du coût total supporté par l'ensemble de la collectivité.

La conception et la formalisation des extensions apportées au modèle de goulot d'étranglement ne peut se faire sans avoir, dans un premier temps, justifié leur apport. La première section (§ 3.1) expose les principales raisons ayant guidé notre choix de nouvelles hypothèses que nous apportons au modèle de file d'attente, à savoir l'intégration du coût environnemental de l'automobile et une politique modale de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs.

La deuxième section (§ 3.2) présente la modélisation. Nous prenons en compte les coûts générés par les deux modes de transport (automobile et transports collectifs) et les coûts de congestion, auxquels nous ajoutons les coûts environnementaux engendrés par l'automobile. L'introduction des coûts environnementaux est novatrice dans la mesure où les modélisations de péage urbain s'appuyant sur l'approche de file d'attente ne les prennent pas en compte. Nous modélisons, d'une part, la mise en place d'un péage

internalisant la congestion et la pollution de l'automobile et, d'autre part, l'instauration d'une politique modale de redistribution des recettes vers les TC, afin d'atteindre l'optimum social. Cette modélisation passe notamment par l'analyse des différents péages qui peuvent être instaurés, comme le péage de pointe, le péage uniforme lors des périodes de pointe, ainsi que le péage uniforme pour minimiser le coût total social. Par ailleurs, nous étudions le fonctionnement de la politique de redistribution des recettes du péage mise en place. Enfin, nous dressons un bilan comparatif des politiques optimales obtenues.

Afin d'appuyer les résultats de notre modélisation théorique, des simulations numériques sont réalisées. Elles permettent de compléter notre analyse sur les impacts engendrés par le système de péage urbain associé à la politique modale. La troisième section (§ 3.3) expose les résultats des tests de sensibilité relatifs aux valeurs des différents paramètres significatifs du modèle (valeur du temps et valeur des coûts fixes). Selon leur évolution, les résultats engendrés par les diverses politiques diffèrent. Ces simulations viennent appuyer nos résultats théoriques, et représentent ainsi une validation numérique de notre modèle.

3.1. Les extensions apportées

L'intégration des coûts environnementaux de l'automobile et celle de la mise en place d'une politique modale de redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs constituent nos contributions à l'amélioration du modèle de péage urbain. Le choix d'ajouter ces deux extensions au modèle de file d'attente a été motivé par différentes raisons. Dans cette première section, nous exposons les justifications et la nature de nos apports.

3.1.1. L'ajout des externalités environnementales

La diversité des émissions polluantes produites par l'utilisation excessive de l'automobile en milieu urbain n'est plus à prouver. Comme nous l'avons déjà précisé au cours du chapitre 1, la pollution automobile entraîne non seulement de graves conséquences sur la santé humaine, mais contribue aussi d'une façon importante et croissante au réchauffement climatique accéléré de notre planète. C'est pourquoi il semble nécessaire de prendre en compte le coût environnemental, provoqué par les transports, que subit l'ensemble de la collectivité.

La modélisation par l'approche de la file d'attente, présentée dans la (§ 1.3.2) du premier chapitre, détermine les différents coûts engendrés par l'utilisation de l'automobile. Le coût total de déplacement comprend un coût horaire et un coût de congestion. Au vu de l'importance des externalités de pollution, nous ajoutons, à ce coût total de déplacement, un coût environnemental. L'objectif du modèle est d'analyser l'optimalité d'un péage urbain qui tienne compte des effets externes de congestion et de pollution, et qui minimise le coût total subi par la collectivité.

L'évaluation des coûts environnementaux engendrés par le transport routier se révèle très incertaine. La section (§ 1.1.2.4) du chapitre 1 montre les difficultés à trouver une valeur, fiable et unique, au coût de la pollution émise par les automobiles. La valeur du coût environnemental utilisée pour les simulations numériques de notre modèle

théorique (présentées dans la section (§ 3.3)) est déduite des principales études sur la valorisation des effets externes du transport.

Les rapports INFRAS (2004) et UNITE (2001) ou encore l'étude donnée par le Schéma directeur de la région Île-de-France (2003) séparent les coûts de la pollution atmosphérique (polluants primaires⁴⁹) et les coûts de l'effet de serre (associé au dioxyde de carbone) entraînés par les déplacements routiers. Ainsi, le coût moyen, en Europe, de la pollution atmosphérique donné par le rapport INFRAS (2004), est de 1.27 € pour 100 véhicules par kilomètre et celui de l'effet de serre, avec un scénario dit élevé⁵⁰, est de 1.76 € pour 100 véhicules par kilomètre. Le coût de la pollution, présenté dans le document de la région Île-de-France (2003) concernant la ville de Paris, est de 1.87 € pour 100 véhicules par kilomètre et le coût de l'effet de serre est évalué à 0.46 € pour 100 véhicules par kilomètre.

À la vue de ces différents résultats et des diverses méthodes d'estimation de valorisation de la pollution utilisées, nous ne sommes pas en mesure de choisir avec certitude le coût environnemental le mieux adapté pour notre modèle. Cependant, le rapport Boiteux (2001) préconise des valeurs de référence pour la France. Les valeurs estimées tiennent compte des effets sanitaires provoquées par la pollution, de la densité de la population et de la topologie des lieux d'émissions. Le tableau suivant présente les valeurs calculées, et conseillées par le rapport, pour la pollution atmosphérique :

TABLEAU N°3.1 : Valeurs du coût de la pollution engendrée par l'automobile pour l'année 2000 (unité : euro/100 véhicules par kilomètre)

	Urbain dense ⁵¹	Urbain diffus	Rase campagne ⁵²	Moyenne
Voiture particulière	2.9	1.0	0.1	0.9

Source : rapport Boiteux (2001)

Nous retenons ainsi la valeur de 2.9 € pour 100 véhicules par kilomètre pour le coût environnemental afin d'effectuer nos simulations numériques de la section (§ 3.3). Cependant, cette valeur, comme l'indique le rapport Boiteux (2001), sera amenée à

⁴⁹ Les principaux polluants primaires sont les suivants : SO₂, NO_x, COVNM, CO, PM₁₀.

⁵⁰ Scénario où la tonne de dioxyde de carbone est évaluée à 140 €.

⁵¹ On parle d'urbain dense lorsque la densité est supérieure à 420 habitants au kilomètre carré.

⁵² On parle de rase campagne lorsque la densité est inférieure à 37 habitants au kilomètre carré.

évoluer au cours des années en fonction de la valeur de la vie humaine, de la connaissance des effets de long terme de la pollution, etc. En outre, il faut prendre avec précaution le montant du coût donné aux nuisances environnementales. Néanmoins, la prise en compte du coût environnemental, provoqué par l'utilisation de la voiture, reste un élément essentiel dans les politiques de transport durable.

3.1.2. L'ajout d'une politique modale

Développer et accentuer le transfert modal constitue une des principales recommandations des politiques de transport urbain. Le principe du report modal est simple, il a pour objectif de réduire la part des automobilistes en incitant les individus à utiliser les modes alternatifs à la voiture. D'ailleurs, l'Union européenne, dans son Livre Blanc sur les transports (2001), insiste sur le développement du transfert modal. Cependant, la justification essentielle avancée en faveur d'un report modal est le fait que l'automobile engendre beaucoup plus de nuisances que les autres modes de transport. Cet argument est réellement fondé, mais doit être utilisé à bon escient.

3.1.2.1. La complémentarité des politiques modales

L'instauration d'un outil économique, comme le péage urbain, pénalisant directement l'utilisation de l'automobile, doit être complétée par des politiques incitatives modales. Sans alternative modale, l'efficacité de l'instrument économique est limitée. En effet, la diminution de l'utilisation de l'automobile ne concernerait que les trajets non obligatoires ou très courts. La mise en place des politiques modales telles que le développement des transports collectifs est donc justifiée.

Si la réduction de l'utilisation de la voiture dans le centre-ville de Singapour est principalement due à la mise en place de l'outil économique, on ne peut négliger l'importance qu'a jouée l'offre des transports collectifs dans cette réussite. Singapour possède, en effet, un réseau de transports collectifs dense, attractif et très rapide, ce qui a facilité l'acceptation du péage urbain et le report modal. La mise en place du péage londonien s'est, quant à elle, accompagnée d'un programme de développement des transports collectifs, en particulier les réseaux de bus. Comme nous l'avons constaté

dans la section (§ 1.4.1), le péage de Londres a engendré, non seulement une diminution de la circulation automobile dans la zone soumise à la tarification, mais aussi une augmentation du nombre d'usagers des bus. L'existence de ce transfert modal est en partie due aux mesures consacrées à l'amélioration de l'offre des transports collectifs. La réussite de l'outil économique dépend, en particulier, de la réalisation du report modal des automobilistes vers les modes alternatifs.

Dans ces conditions, la prise en compte d'une politique modale dans notre modélisation théorique du péage urbain apparaît donc nécessaire. L'objectif, maintenant, est de concevoir la nature de la politique modale incitative à mettre en place.

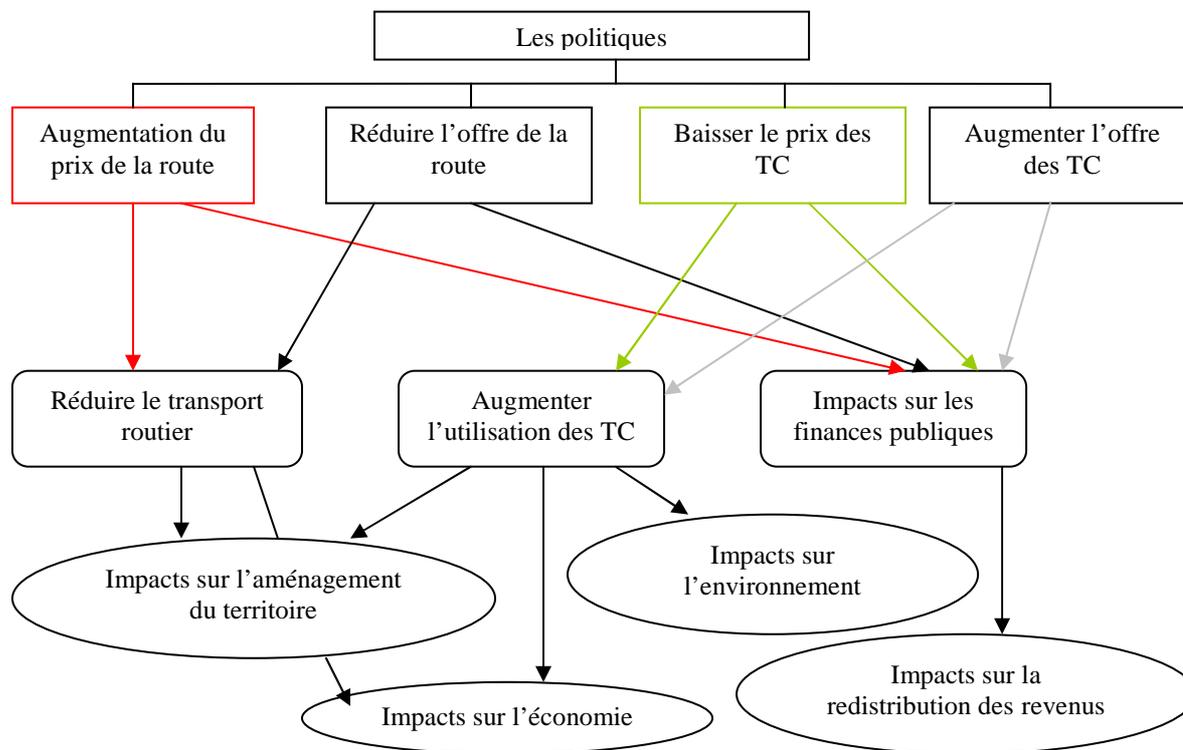
3.1.2.2. La nature des différentes politiques modales

En économie des transports, on reconnaît l'existence de quatre principaux moyens pour favoriser le transfert modal :

- 1- **Augmenter le coût de l'utilisation de la voiture** par l'intermédiaire de taxes ou d'instauration de péages.
- 2- **Diminuer le prix des transports collectifs pour l'utilisateur** en augmentant, par exemple, les subventions accordées.
- 3- **Diminuer l'offre des infrastructures routières de la voiture** comme réduire la voirie consacrée à l'automobile.
- 4- **Augmenter l'offre de transports collectifs** par le prolongement des lignes de métros, de tramways, etc.

Ces quatre mesures ont pour objectif d'encourager un transfert modal des automobilistes vers les transports collectifs. Le rapport de Didier et Prud'homme (2007) rappelle que ces politiques ont des conséquences, aussi bien positives que négatives, sur l'environnement, la croissance économique, le niveau de vie et d'emploi, mais aussi sur l'aménagement du territoire et la redistribution des revenus. Le schéma suivant indique les impacts et les interactions de ces politiques.

FIGURE N°3.1 : Analyse des politiques de report modal



Source : figure adaptée de Didier et Prud'homme (2007)

Didier et Prud'homme (2007) ont dressé un bilan coûts-avantages des différentes politiques de report modal déjà mises en place et de leurs impacts (fig. n°3.1). Leur étude aboutit à trois principales conclusions qui ne sont pas toutes en faveur des politiques modales. La première indique que le coût économique du report modal, certes très variable selon la politique utilisée, est indéniablement moins élevé lors de la mise en place d'un outil fiscal comme le péage urbain que lors de politiques d'investissements directs telles que l'augmentation de l'offre de transport collectif. La seconde montre que le gain environnemental procuré, quelle que soit la politique modale mise en place, est bien inférieur au coût économique engendré par la mesure. Enfin, la dernière conclusion, qui semble un peu radicale, affirme que les politiques modales représentent un moyen inefficace pour lutter contre l'effet de serre. Toutefois, malgré ces résultats assez pessimistes quant aux bienfaits d'une politique modale, ils ne s'opposent pas à la nature de la politique que nous avons choisi d'ajouter et de modéliser.

Le type de politique modale incitative retenu dans notre modélisation est celui d'une redistribution des recettes du péage vers les transports collectifs afin d'en faire diminuer

le prix. Ce choix peut être soutenu pour deux raisons : d'une part, la mise en place du péage urbain semblerait être moins coûteuse que les autres mesures et, d'autre part, la redistribution de ses recettes vers les transports collectifs n'entraîne pas de dépenses supplémentaires pour la collectivité dans la mesure où il y a un recyclage.

Les extensions que nous apportons au modèle classique de file d'attente (intégration du coût environnemental et d'une politique modale incitative) permettent d'obtenir un modèle répondant de façon plus appropriée aux critères de mobilité durable.

3.2. Le modèle du péage urbain avec le coût environnemental et la mise en place d'une politique modale incitative

Le péage dit de congestion ayant comme objectif premier la réduction de l'utilisation de l'automobile engendre parallèlement une baisse des effets externes environnementaux. Comme nous l'avons montré précédemment, nous considérons que l'impact environnemental doit être pris en compte. Pour ce faire, une hypothèse supplémentaire concernant les coûts environnementaux de l'automobile est introduite dans le modèle de référence d'Arnott *et al.* (1990, 1993).

La mise en œuvre d'un péage pour minimiser le coût social total entraîne des changements de comportement des individus. Afin d'accentuer un transfert modal vers les transports collectifs, nous supposons une redistribution des recettes du péage. L'objectif de cette politique est de faire baisser le tarif des TC pour inciter les individus à les utiliser. Dans un souci de simplicité, nous posons l'hypothèse forte que les TC sont considérés comme non polluants. En réalité, les TC sont seulement moins polluants que l'automobile.

À travers ces deux extensions, nous souhaitons trouver l'optimum social qui résulte d'une minimisation du nouveau coût social total obtenu par l'intensification du transfert modal.

3.2.1. Modèle bimodal comprenant le coût environnemental

Les principes et développements théoriques relatifs à l'intégration de la première extension, à savoir le coût de la pollution automobile, sont exposés dans cette section.

3.2.1.1. Les principales caractéristiques du modèle

Le partage modal implique une modification de certaines hypothèses du modèle de référence d'Arnott *et al.* (1990, 1993) présenté dans le chapitre 1. Les hypothèses H1', H2', H3' et H4' restent les mêmes :

- HYPOTHÈSE 1' (H1') : Si la cadence des arrivées au goulot d'étranglement est supérieure à la capacité K de la route, alors on observe la formation d'une file d'attente (concept introduit par Vickrey, 1969 et modèle réalisé par Arnott *et al.*, 1990, 1993).
- HYPOTHÈSE 2' (H2') : L'objectif commun d'heure d'arrivée sur le lieu de travail est t^* .
- HYPOTHÈSE 3' (H3') : Les individus ont une fonction de coût « agrégé » qui dépend du coût du temps d'attente dans la file (α), du coût de retard (ν) ou d'avance (β).
- HYPOTHÈSE 4' (H4') : Les individus N sont considérés comme homogènes.

En revanche, les hypothèses 5' et 6' sont changées et deviennent :

- HYPOTHÈSE 5'' (H5'') : N est fixe, mais on considère N_A les individus ayant choisi d'utiliser l'automobile et N_B les individus ayant choisi les transports collectifs.

Comme le montre Tabuchi (1993), la somme $N_A + N_B = N$ est fixée.

- HYPOTHÈSE 6'' (H6'') : L'équilibre atteint n'est plus un équilibre de Nash, c'est un équilibre de Wardrop (1952).

H6'' implique qu'à l'équilibre, les usagers sont indifférents aux deux modes proposés dans la mesure où les coûts du temps de déplacement qu'ils subissent en automobile et en TC sont les mêmes. Autrement dit, en cherchant individuellement à optimiser leur itinéraire, les individus aboutissent à une situation d'équilibre selon

laquelle : « Aucun usager ne peut améliorer son temps de parcours en changeant unilatéralement de route. », (Daganzo et Sheffi, 1977).

Afin de prendre en compte le coût environnemental de l'automobile, nous considérons une hypothèse supplémentaire qui est la suivante :

- HYPOTHÈSE 7 (H7) : Chaque automobile émet un certain niveau moyen d'émissions e . Ce niveau d'émissions est monétarisé à un coût moyen constant C_E . C_E est strictement positif et introduit directement dans le coût total social.

H7 est une hypothèse simple, dans la mesure où elle suggère que le dommage environnemental est proportionnel aux émissions provoquées par l'utilisation de l'automobile, mais elle est nécessaire pour la résolution du modèle.

Les principales caractéristiques du modèle comprenant les nouvelles hypothèses sont présentées dans le tableau suivant :

TABLEAU N°3.2 : Caractéristiques principales du modèle avec partage modal et coût environnemental

<i>Significations</i>	<i>Équations</i>	<i>Notations</i>
Coût moyen subi par un usager des TC (3.1)	$C_B = c + \frac{F}{N_B}$	c : coût marginal. F : coûts fixes des TC. N_B : nombre d'usagers des TC.
Coût subi par un automobiliste (3.2)	$C_A = \frac{\delta N_A}{K}$	N_A : nombre d'automobilistes. K : capacité de la route δ : paramètre relatif aux coûts du temps d'avance et de retard (déterminé par Arnott <i>et al.</i> (1990, 1993) ⁵³
Équilibre modal (3.3)	$\begin{cases} C_A = C_B \text{ pour } N_B > 0 & \text{(3.3a)} \\ C_A < C_B \text{ pour } N_B = 0 & \text{(3.3b)} \end{cases}$	(3.3a): les deux modes de transport sont utilisés. (3.3b): seule l'automobile est utilisée.
Coût social total (3.4)	$\begin{cases} CST = C_A N_A + C_B N_B + C_E N_A \text{ pour } N_B > 0 & \text{(3.4a)} \\ CST = (C_A + C_E) N \text{ pour } N_B = 0 & \text{(3.4b)} \end{cases}$	C_E : coût environnemental de l'automobile. (3.4a): les deux modes sont utilisés. (3.4b): seule l'automobile est utilisée.

L'équation (3.1) nous indique que si le nombre d'utilisateurs des TC (N_B) augmente, alors le coût C_B diminue. L'équation (3.2), quant à elle, représente le coût de déplacement d'un automobiliste défini par le modèle d'Arnott *et al.* (1990) (voir chapitre 1, équation (1.77)). L'équilibre modal, désigné par l'équation (3.3) et défini par l'hypothèse 6''(H6''), implique que les usagers sont indifférents entre les deux modes de transport, dans la mesure où les coûts du temps de déplacement qu'ils subissent en TC ou en automobile sont identiques. Un tel équilibre modal fondé seulement sur les coûts suppose une parfaite substitution entre les deux modes. Cet équilibre bimodal est déterminé par la littérature comme un équilibre modal de Wardrop. D'après les équations (3.4a) et (3.4b), si les coûts environnementaux sont nuls ($C_E = 0$), alors on obtient les coûts sociaux totaux du modèle de Danielis et Marcucci (2002).

⁵³ Ce paramètre a été déterminé dans le chapitre 1. Son expression est la suivante : $\delta = \frac{\beta v}{\beta + v}$ avec β et v respectivement le coût unitaire d'avance et de retard d'arrivée sur le lieu de travail.

3.2.1.2. Détermination de l'équilibre modal

Dans un premier temps, nous déterminons le partage modal à l'équilibre, c'est-à-dire le nombre d'automobilistes et d'usagers des TC sans politique de régulation encore mise en place. L'objectif de l'instauration du péage et de la politique modale incitative sera d'améliorer cet équilibre afin de parvenir à un optimum de second rang⁵⁴.

Par la combinaison des équations (3.1), (3.2) et (3.3a), on obtient le polynôme du second degré suivant : $\delta N_B^2 + (cK - \delta N)N_B + FK = 0$.

Deux conditions sont posées :

- **Condition n°1** : Une seule solution du polynôme est retenue afin que $N \geq \frac{cK}{\delta}$ soit toujours vérifiée. En effet, le polynôme n'admet de solution réelle que si le déterminant est supérieur ou égal à zéro, c'est-à-dire si (après simplifications) $N \geq \frac{cK}{\delta}$.
- **Condition n°2** : Il existe un seuil \bar{N} au-dessus duquel il semble raisonnable économiquement de construire des transports collectifs. Au-dessous de \bar{N} , seule la voiture particulière est utilisée. Au-dessus de \bar{N} , la voiture particulière et les transports collectifs sont utilisés et les coûts fixes sont couverts. On peut noter que le nombre d'utilisateurs de transports collectifs N_B ne peut pas être petit à l'équilibre, parce que les coûts fixes F dans le secteur des TC ne seraient sinon pas couverts. Par conséquent, la distribution est discontinue jusqu'à $N = \bar{N}$. Lorsque $N < \bar{N}$, la distribution (N_A^E, N_B^E) ⁵⁵ demeure $(N, 0)$, mais à partir de $N = \bar{N}$ la distribution « saute » à (N_A^E, N_B^E) .

Sous ces nouvelles conditions, on obtient la répartition modale à l'équilibre suivante :

⁵⁴ À défaut de pouvoir obtenir l'optimum social de premier rang (à cause du cadre d'analyse qui n'est pas parfait, car il existe des difficultés d'évaluation des dommages environnementaux, plusieurs externalités, mais un seul outil économique, etc.), on cherche un optimum de second rang. L'optimum de second rang est la meilleure situation économique qu'il soit possible d'atteindre lorsque l'optimum de premier rang ne peut l'être.

⁵⁵ L'exposant E désigne la situation d'équilibre.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N} : \\ (N_A^E, N_B^E) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2\delta} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta}\right)^2 - \frac{FK}{\delta}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta}\right)^2 - \frac{FK}{\delta}} \right) \quad (3.5a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N} : \\ (N_A^E, N_B^E) = (N, 0) \quad (3.5b) \end{array} \right.$$

avec $\bar{N} = \frac{cK}{\delta} + 2\sqrt{\frac{FK}{\delta}}$: valeur pour laquelle la racine carrée est nulle.

On remarque que le paramètre relatif aux coûts temporels (d'avance et de retard) (δ) et les coûts fixes des TC (F) jouent un rôle important dans l'équation (3.5a) de l'équilibre modal et dans la valeur du seuil \bar{N} .

En combinant ces résultats (3.5a) et (3.5b) avec respectivement (3.4a) et (3.4b), on obtient les coûts sociaux totaux à l'équilibre :

$$\left\{ \begin{array}{l} CST_1^E = cN + \frac{N}{N_B^E} F + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2\delta} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta}\right)^2 - F \frac{K}{\delta}} \quad \text{si } N > \bar{N} \quad (3.6a) \\ CST_2^E = C_E N + \frac{\delta N^2}{K} \quad \text{si } N \leq \bar{N} \quad (3.6b) \end{array} \right.$$

Encore une fois, si les coûts environnementaux sont nuls, nous obtenons des résultats identiques à ceux de Danielis et Marcucci (2002). Nous pouvons, maintenant, procéder à la détermination de l'optimum social. Ce dernier est obtenu par la minimisation du coût social total. L'objectif est d'établir, pour un modèle avec partage modal, différents types de péages associés à une politique modale de redistribution afin de trouver l'optimum social de second rang.

3.2.2. L'ajout d'une politique modale incitative et l'optimum social

Les effets externes de congestion et ceux de pollution, engendrés par l'utilisation de l'automobile, doivent être pris en compte par le péage urbain, afin que le coût total collectif soit minimisé.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 1 (§ 1.3.2.3), Arnott *et al.* (1990, 1993) ont déterminé trois tarifications différentes du péage afin d'obtenir l'optimum social. Dans notre modélisation, nous reprenons ces trois sortes de péage, à savoir le péage de pointe (*fine toll*), le péage uniforme lors des périodes de pointe (*coarse toll*) et le péage uniforme (*uniform toll*).

Suivant notre objectif de mobilité durable, une hypothèse capitale doit être ajoutée dans la modélisation : elle concerne l'incitation au transfert modal et constitue notre seconde extension :

- HYPOTHÈSE 8 (H8) : On considère une politique de redistribution des recettes du péage quelle que soit sa forme. On suppose que l'instauration du péage se fait à la période T . La redistribution des recettes du péage en T aura seulement un impact sur le tarif des TC à la période $T+1$.

L'objectif est d'inciter les individus à prendre les TC, car ils sont supposés non polluants. En réalité, les TC sont *a priori* seulement moins polluants que l'automobile. Cependant, pour des raisons de résolution du modèle, nous considérons un mode polluant : l'automobile, et un mode alternatif (TC) non polluant.

Afin de résoudre le modèle contenant ces nouvelles hypothèses, nous développons une démarche en neuf étapes. Elle est divisée en deux périodes : la période T concernant l'instauration du péage et la période $T+1$ où la politique modale de redistribution des recettes est appliquée. Les divers types de péages considérés suivent cette même méthodologie. L'encadré n°3.1 présente les différentes étapes de la résolution du modèle :

ENCADRÉ N°3.1 : Méthodologie appliquée

La résolution à la période T est constituée des cinq étapes suivantes :

- **Étape n°1** : Détermination du coût subi par l'automobiliste avec le péage mis en place.
- **Étape n°2** : Détermination du prix du billet, c'est-à-dire du coût subi par l'utilisateur des TC.
- **Étape n°3** : Détermination de l'équilibre modal en égalisant le coût subi par l'automobiliste et celui subi par l'utilisateur des TC (principe de Wardrop, H6'').
- **Étape n°4** : Calcul du coût social total grâce à l'équilibre modal déterminé dans l'étape précédente.
- **Étape n°5** : Calcul des recettes du péage.

La résolution analytique à la période T+1 prenant en compte la redistribution des recettes est composée des quatre étapes suivantes :

- **Étape n°6** : Calcul du nouveau coût des TC, en ôtant au tarif les recettes du péage déterminées par l'étape n°5.
- **Étape n°7** : Détermination du nouvel équilibre modal.
- **Étape n°8** : Détermination du nouveau coût subi par l'automobiliste grâce au nouvel équilibre modal.
- **Étape n°9** : Calcul du nouveau coût social total.

3.2.2.1. Le péage de pointe

Nous appliquons les neuf étapes de la méthodologie développée ci-dessus afin de déterminer l'optimum social lors de la mise en place d'un péage de pointe.

Par l'étape n°1, nous déterminons le coût subi par l'automobiliste avec le péage mis en place : $C_A^P = \frac{\delta N_A}{K}$ (3.7) qui est composé d'un coût horaire $C_H^P = \frac{\delta N_A}{2K}$ et du coût financier du péage de pointe $C^P = \frac{\delta N_A}{2K}$.

L'étape n°2 détermine le prix du billet, c'est-à-dire le coût subi par l'utilisateur des TC :

$$p_{(T)} = C_B^P = c + \frac{F}{N_{B(T)}} \quad (3.8)$$

Ensuite, l'équilibre modal est obtenu en égalisant les équations (3.7) et (3.8) :

$C_A^P = C_B^P$ avec $N \geq \frac{cK}{\delta}$. Par la résolution du polynôme du second degré en N_B , on

obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } N > \bar{N}^P : \\ (N_A^P, N_B^P) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2\delta} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta}\right)^2 - \frac{FK}{\delta}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta}\right)^2 - \frac{FK}{\delta}} \right) \quad (3.9a) \\ \text{si } N \leq \bar{N}^P : \\ (N_A^P, N_B^P) = (N, 0) \quad (3.9b) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \bar{N}^P = \frac{cK}{\delta} + 2\sqrt{\frac{FK}{\delta}}$$

Sans négliger l'impact des autres variables, nous soulignons, comme dans la situation d'équilibre sans péage, l'importance du paramètre relatif aux coûts temporels (d'avance et de retard) (δ) et des coûts fixes des TC (F) dans l'équation de l'équilibre modal avec péage de pointe (3.9a) et dans celle de la valeur seuil \bar{N}^P .

En combinant les équations (3.4a) et (3.4b) avec respectivement (3.9a) et (3.9b), comme nous l'indique l'étape n°4, on trouve le coût social total:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N}^P : \\ CST_1^P = cN + \frac{N}{N_B^P} F - \frac{\delta(N_A^P)^2}{2K} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{2\delta} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{2\delta}\right)^2 - \frac{FK}{\delta}} \quad (3.10a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N}^P : \\ CST_2^P = \frac{\delta N^2}{K} + C_E N \quad (3.10b) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \bar{N}^P = 2\sqrt{KF} + \frac{cK}{\delta}$$

$$\text{Les recettes du péage sont déterminées comme suit: } R^P = \tau^P \times N_A^P = \frac{\delta(N_A^P)^2}{2K} \quad (3.11)$$

avec τ^P représentant le péage de pointe.

Nous observons que la principale différence par rapport à la situation d'équilibre sans péage (cf. **3.6a**) est que la mise en place du péage de pointe génère des recettes qui viennent diminuer le coût social total (cf. **3.10a**).

Le nouveau coût des TC est obtenu par l'étape n°6 où l'on ôte au tarif du billet les recettes du péage déterminées par l'équation **(3.11)**

$$\begin{aligned}
 p_{(T+1)} = C_{B,(T+1)}^P &= c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^P} - \frac{R_{(T)}^P}{N_{B,(T+1)}^P} \\
 \Rightarrow c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^P} - \frac{\delta(N - N_{B,(T)}^P)^2}{2KN_{B,(T+1)}^P} &\quad \text{(3.12)}
 \end{aligned}$$

On détermine le nouvel équilibre modal en combinant **(3.7)** et **(3.12)** : $C_{A,(T+1)}^P = C_{B,(T+1)}^P$. Par la résolution du polynôme du second degré en N_B , on obtient (cf. annexe 3.1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } N > \bar{N}^{P'} : \\ (N_A^{P'}, N_B^{P'}) = \left(N + \frac{cK}{\delta} - \sqrt{\frac{c^2K^2 + \delta^2N^2 - 2\delta FK}{\delta^2}}, -\frac{cK}{\delta} + \sqrt{\frac{c^2K^2 + \delta^2N^2 - 2\delta FK}{\delta^2}} \right) \\ \text{si } N \leq \bar{N}^{P'} : \\ (N_A^{P'}, N_B^{P'}) = (N, 0) \end{array} \right. \quad \text{(3.13a)}$$

$$\left(N_A^{P'}, N_B^{P'} \right) = (N, 0) \quad \text{(3.13b)}$$

$$\text{avec } \bar{N}^{P'} = \sqrt{\frac{2FK}{\delta}} \quad (\text{car } N_B^{P'} > 0)$$

Par l'étape n°8, nous déterminons le nouveau coût subi par l'automobiliste. En combinant **(3.13a)** et **(3.7)**, il résulte : $C_A^{P'} = \frac{\delta N_A^{P'}}{K} \Rightarrow \frac{\delta N}{K} + c - \frac{\sqrt{c^2K^2 + \delta^2N^2 - 2\delta FK}}{K}$ **(3.14)**, ce qui implique :

$$\begin{cases} C_A^{P'} = \frac{\delta N}{K} + c - \frac{\sqrt{c^2 K^2 + \delta^2 N^2 - 2\delta FK}}{K} \\ C_B^{P'} = \frac{\delta N}{K} + c - \frac{\sqrt{c^2 K^2 + \delta^2 N^2 - 2\delta FK}}{K} \end{cases} \quad (3.15)$$

Le nouveau coût social total est obtenu par l'étape n°9 ; en combinant (3.15) avec (3.4a), et (3.4b) on obtient :

$$\begin{cases} \text{si } N > \bar{N}^{P'} : \\ CTS_1^{P'} = cN + \frac{\delta N^2}{K} + C_E \left(N + \frac{cK}{\delta} \right) - \sqrt{c^2 K^2 + \delta^2 N^2 - 2\delta FK} \left(\frac{N}{K} + \frac{C_E}{\delta} \right) \\ \text{si } N \leq \bar{N}^{P'} : \\ CTS_2^{P'} = \frac{\delta N^2}{K} + C_E N \end{cases} \quad (3.16a)$$

$$(3.16b)$$

Notons que l'exposant P représente la situation de péage de pointe (période T) et l'exposant P' celle d'un péage de pointe avec redistribution des recettes du péage vers les TC (période $T+1$). La comparaison des différentes situations (équilibre, péage de pointe et péage de pointe avec redistribution des recettes) est réalisée dans la section (§ 3.2.3).

3.2.2.2. Le péage uniforme de pointe (*coarse toll*)

On suit la même méthodologie en neuf étapes, afin de déterminer l'optimum social lors de la mise en place d'un péage uniforme durant les périodes de pointe.

Le coût subi par un automobiliste avec un péage uniforme lors des périodes de pointe, dont la démonstration est faite dans le chapitre 1, est de l'ordre de :

$$C_A^{ct} = \frac{2\phi\delta N_A}{K} \quad (3.17)$$

Le coût subi par un usager des TC reste le même que celui défini par l'équation

$$(3.1), \text{ c'est-à-dire } p_{(T)} = C_B^{ct} = c + \frac{F}{N_{B,(T)}} \quad (3.18)$$

Ainsi, en appliquant l'étape n°3, l'équilibre modal obtenu est de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N}^{ct} : \\ (N_A^{ct}, N_B^{ct}) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{4\varphi\delta} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4\varphi\delta} \right)^2 - \frac{KF}{2\varphi\delta}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{4\varphi\delta} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4\varphi\delta} \right)^2 - \frac{KF}{2\varphi\delta}} \right) \quad (3.19a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N}^{ct} : \\ (N_A^{ct}, N_B^{ct}) = (N, 0) \quad (3.19b) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \bar{N}^{ct} = 2\sqrt{\frac{KF}{2\varphi\delta}} + \frac{cK}{2\varphi\delta}.$$

Nous soulignons l'importance de trois variables : celles des paramètres relatifs aux coûts du temps (δ) et (φ)⁵⁶ et celle des coûts fixes des TC (F), dans l'équation (3.19a) et dans la valeur du seuil \bar{N}^{ct} .

La réalisation de l'étape n°4 nous donne les coûts sociaux totaux suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N}^{ct} : \\ CST_1^{ct} = cN + \frac{N}{N_B^{ct}} - \frac{\varphi\delta(N_A^{ct})^2}{K} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{4\varphi\delta} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4\varphi\delta} \right)^2 - \frac{KF}{2\varphi\delta}} \quad (3.20a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N}^{ct} : \\ CST_2^{ct} = \frac{2\varphi\delta N^2}{K} + C_E N \quad (3.20b) \end{array} \right.$$

⁵⁶ Le paramètre φ a été déterminé dans le chapitre 1, il est égal à : $\varphi = \frac{1}{4} \left[3 - \frac{(v-\alpha)\beta}{(\beta+v)(\alpha+v)} \right]$

Les recettes obtenues par le péage sont de l'ordre de $R^{ct} = \tau^{ct} \times N_A^{ct} = \frac{\varphi\delta N_A^2}{K}$ (3.21)

On observe deux principales différences par rapport à la situation d'équilibre sans péage. Premièrement, le coût d'un déplacement d'un automobiliste est multiplié par 2φ . Deuxièmement, la mise en place du péage uniforme de pointe engendre des recettes qui viennent diminuer le coût total subi par la collectivité.

Ainsi, pour la période $T+1$, le prix du billet des TC, déterminé par l'étape n°6, est :

$$P_{(T+1)} = C_{B,(T+1)}^{ct} = c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^{ct}} - \frac{\varphi\delta(N - N_{B,(T)}^{ct})^2}{KN_{B,(T+1)}^{ct}} \quad (3.22)$$

Par l'étape n°7, nous trouvons le partage modal en $T+1$ (cf. annexe 3.1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } N > \bar{N}^{ct'} : \\ (N_A^{ct'}, N_B^{ct'}) = \left(N + \frac{cK}{2\varphi\delta} - \sqrt{\frac{c^2K^2 - 4\varphi\delta FK + 4\varphi^2\delta^2 N^2}{4\varphi^2\delta^2}}, -\frac{cK}{2\varphi\delta} + \sqrt{\frac{c^2K^2 - 4\varphi\delta FK + 4\varphi^2\delta^2 N^2}{4\varphi^2\delta^2}} \right) \\ \text{(3.23a)} \\ \text{si } N \leq \bar{N}^{ct'} : \\ (N_A^{ct'}, N_B^{ct'}) = (N, 0) \quad \text{(3.23b)} \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \bar{N}^{ct'} = \sqrt{\frac{FK}{\varphi\delta}}$$

L'équation (3.23a) engendre les nouveaux coûts de déplacements suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_A^{ct'} = \frac{2\varphi\delta N}{K} + c - \frac{\sqrt{c^2K^2 - 4\varphi\delta FK + 4\varphi^2\delta^2 N^2}}{K} \\ C_B^{ct'} = \frac{2\varphi\delta N}{K} + c - \frac{\sqrt{c^2K^2 - 4\varphi\delta FK + 4\varphi^2\delta^2 N^2}}{K} \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Finalement, lors de la mise en place du péage uniforme de pointe et de la politique modale de redistribution, les coûts sociaux totaux sont de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N}^{ct'} : \\ CST_1^{ct'} = N(c + C_E) + \frac{2\phi\delta N^2}{K} + \frac{cKC_E}{2\phi\delta} - \sqrt{c^2K^2 - 4\phi\delta FK + 4\phi^2\delta^2 N^2} \left(\frac{N}{K} + \frac{C_E}{2\phi\delta} \right) \quad (3.25a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N}^{ct'} : \\ CST_2^{ct'} = \frac{2\phi\delta N^2}{K} + C_E N \quad (3.25b) \end{array} \right.$$

Notons, pour ce cas, que l'exposant ct représente le péage uniforme lors des périodes de pointe et l'exposant ct' est relatif à la situation de péage uniforme de pointe associé à la politique de redistribution des recettes. L'analyse comparative entre la situation de péage uniforme de pointe et la situation où le péage est associé à la politique modale est réalisée dans la section (§ 3.2.3).

3.2.2.3. Le péage uniforme

Suivant la même démarche que dans les deux cas précédents, nous présentons les résultats obtenus lors de la mise en place du péage uniforme.

Le coût d'un déplacement automobile est de l'ordre de $C_A^U = \frac{2\delta N_A}{K}$ (3.26) (nous reprenons la valeur du coût déterminée par le modèle de référence).

Le coût d'un déplacement en TC, présenté par l'équation (3.1), donne

$$P_{(T)} = C_B^U = c + \frac{F}{N_{B,(T)}} \quad (3.27)$$

L'équilibre modal avec le péage uniforme est de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N}^U : \\ (N_A^U, N_B^U) = \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{4\delta} - \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4\delta} \right)^2 - \frac{KF}{2\delta}}, \frac{N}{2} - \frac{cK}{4\delta} + \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4\delta} \right)^2 - \frac{KF}{2\delta}} \right) \quad (3.28a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N}^U : \\ (N_A^U, N_B^U) = (N, 0) \quad (3.28b) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \bar{N}^U = 2\sqrt{\frac{KF}{2\delta}} + \frac{cK}{2\delta}$$

On remarque encore une fois l'importance du paramètre (δ) et celle des coûts fixes des TC (F) dans les équations de l'équilibre modale (3.28a) et du seuil \bar{N}^U .

Ainsi, les coûts sociaux totaux sont déterminés comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } N > \bar{N}^U : \\ CST_1^U = cN + \frac{N}{N_B^U} F - \frac{\delta(N_A^U)^2}{K} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{cK}{4\delta} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{cK}{4\delta} \right)^2 - \frac{KF}{2\delta}} \quad (3.29a) \\ \text{pour } N \leq \bar{N}^U : \\ CST_2^U = \frac{2\delta N^2}{K} + C_E N \quad (3.29b) \end{array} \right.$$

Les recettes effectuées par le péage uniforme sont de l'ordre de :

$$R^U = \tau^U \times N_A^U = \frac{\delta(N_A^U)^2}{K} \quad (3.30)$$

On observe deux principales différences par rapport à la situation d'équilibre sans péage. D'une part, le coût de déplacement en automobile a doublé, il est de $C_A^U = \frac{2\delta N_A}{K}$, et d'autre part, la mise en place du péage uniforme génère des recettes qui viennent, comme dans les deux situations de péage précédentes, diminuer le coût social total.

À la période $T+1$, c'est-à-dire lors de la mise en place de la redistribution des recettes du péage, nous obtenons le nouveau coût du déplacement pour un usager des TC :

$$p_{(T+1)} = C_{B,(T+1)}^f = c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^U} - \frac{\delta(N - N_{B,(T)}^U)^2}{KN_{B,(T+1)}^U} \quad (3.31)$$

L'équation suivante détermine le nouvel équilibre modal (cf. annexe 3.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } N > \bar{N}^{U'} : \\ (N_A^{U'}, N_B^{U'}) = N + \frac{cK}{2\delta} - \sqrt{\frac{c^2K^2 - 4\delta FK + 4\delta^2 N^2}{4\delta^2}}, -\frac{cK}{2\delta} + \sqrt{\frac{c^2K^2 - 4\delta KF + 4\delta^2 N^2}{4\delta^2}} \quad (3.32a) \\ \text{si } N \leq \bar{N}^{U'} : \\ (N_A^{U'}, N_B^{U'}) = (N, 0) \quad (3.32b) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \bar{N}^{U'} = \sqrt{\frac{KF}{\delta}}$$

En appliquant l'étape n°8, les nouveaux coûts de déplacements sont de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_A^{U'} = c + \frac{2\delta N}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 - 4\delta FK + 4\delta^2 N^2}}{K} \\ C_B^{U'} = c + \frac{2\delta N}{K} - \frac{\sqrt{c^2K^2 - 4\delta KF + 4\delta^2 N^2}}{K} \end{array} \right\} \quad (3.33)$$

Le système d'équations suivant présente les coûts sociaux totaux :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } N > \bar{N}^{U'} : \\ CST_1^{U'} = N(c + C_E) + \frac{2\delta N^2}{K} + C_E \frac{cK}{2\delta} - \sqrt{c^2K^2 - 4\delta KF + 4\delta^2 N^2} \left(\frac{N}{K} + \frac{C_E}{2\delta} \right) \quad (3.34a) \\ \text{si } N \leq \bar{N}^{U'} : \\ CST_2^{U'} = \frac{2\delta N^2}{K} + C_E N \quad (3.34b) \end{array} \right.$$

Précisons que l'exposant U indique la situation de péage uniforme et l'exposant U' représente celle du péage uniforme associé à la politique modale incitative de redistribution des recettes.

Les calculs réalisés vont nous permettre non seulement de comparer l'efficacité des péages par rapport à la situation d'équilibre, mais aussi de déterminer si la politique modale incitative a réellement intensifié le transfert modal des automobilistes vers les TC. Le tableau n°3.3 récapitule les résultats de notre modélisation.

TABLEAU N°3.3 : Résultats

Instrument	$\eta_A = N_A/N$	$\eta_B = N_B/N$	CST
Situation à l'équilibre, sans péage	$\eta_A^E = \frac{1}{2} + \frac{ck}{2N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}}$	$\eta_B^E = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}}$	$CST^E = cN + \frac{F}{\eta_B^E} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{2}\right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{2}\right)^2 - Fk}$
Péage de pointe. Résultat à la période T	$\eta_A^P = \frac{1}{2} + \frac{ck}{2N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}}$	$\eta_B^P = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}}$	$CST^P = cN + \frac{F}{\eta_B^P} - \frac{(\eta_A^P)^2 N^2}{2k} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{2}\right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{2}\right)^2 - Fk}$
Péage de pointe avec redistribution des recettes. Résultats à la période T+1	$\eta_A^{P'} = 1 + \frac{ck}{N} - \sqrt{\frac{c^2 k^2}{N^2} + 1 - \frac{2Fk}{N^2}}$	$\eta_B^{P'} = -\frac{ck}{N} + \sqrt{\frac{c^2 k^2}{N^2} + 1 - \frac{2Fk}{N^2}}$	$CST^{P'} = cN + \frac{N^2}{k} + C_E (N + ck) - \sqrt{c^2 k^2 + N^2 - 2Fk} \left(\frac{N}{k} + C_E\right)$
Péage uniforme lors des périodes de pointe. Résultats à la période T.	$\eta_A^{ct} = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4\varphi N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi N^2}}$	$\eta_B^{ct} = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi N^2}}$	$CST^{ct} = cN + \frac{F}{\eta_B^{ct}} - \frac{\varphi(\eta_A^{ct})^2 N^2}{k} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{4\varphi}\right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{4\varphi}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi}}$
Péage uniforme lors des périodes de pointe avec redistribution des recettes. Résultats à la période T+1.	$\eta_A^{ct'} = 1 + \frac{ck}{2\varphi N} - \sqrt{\frac{c^2 k^2}{4\varphi^2 N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2} + 1}$	$\eta_B^{ct'} = -\frac{ck}{2\varphi N} + \sqrt{\frac{c^2 k^2}{4\varphi^2 N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2} + 1}$	$CST^{ct'} = N(c + C_E) + \frac{2\varphi N^2}{k} + \frac{ckC_E}{2\varphi} - \sqrt{c^2 k^2 - 4\varphi Fk + 4\varphi^2 N^2} \left(\frac{N}{k} + \frac{C_E}{2\varphi}\right)$
Péage uniforme. Résultats à la période T.	$\eta_A^U = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4N}\right)^2 - \frac{kF}{2N^2}}$	$\eta_B^U = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4N}\right)^2 - \frac{kF}{2N^2}}$	$CST^U = cN + \frac{F}{\eta_B^U} - \frac{(\eta_A^U)^2 N^2}{k} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{4}\right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{4}\right)^2 - \frac{kF}{2}}$
Péage uniforme avec redistribution des recettes. Résultats à la période T+1.	$\eta_A^{U'} = 1 + \frac{ck}{2N} - \sqrt{\frac{c^2 k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2} + 1}$	$\eta_B^{U'} = -\frac{ck}{2N} + \sqrt{\frac{c^2 k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2} + 1}$	$CST^{U'} = N(c + C_E) + \frac{2N^2}{k} + C_E \frac{ck}{2} - \sqrt{c^2 k^2 - 4kF + 4N^2} \left(\frac{N}{k} + \frac{C_E}{2}\right)$

Dans ce tableau, nous ne raisonnons plus par nombre d'individus, mais par part. En effet, nous avons : $N_A + N_B = N$ où $\eta_A + \eta_B = 1$ avec $\eta_i = \frac{N_i}{N}$ où $i = A; B$

Nous avons aussi transformé $\frac{K}{\delta} = k$ afin de simplifier les équations. Nous nous intéressons seulement au cas où les deux modes de transport sont utilisés.

Grâce aux résultats fournis par le tableau n°3.3, les différentes politiques optimales vont être analysées et comparées.

3.2.3. Les politiques optimales

L'instauration d'un outil économique pénalisant l'utilisation de la voiture suscite souvent de vives réserves de la part de la population. Le péage urbain n'en est pas épargné. En effet, d'après le CAS (2008b), selon « un sondage TNS-Sofres, octobre 2007 : seuls 25% des Français interrogés utilisant la voiture tous les jours seraient favorables à l'installation d'un péage urbain pour les voitures à l'entrée des grandes villes françaises ». Cependant, la problématique du réchauffement climatique étant très actuelle, s'il est prouvé que le péage a un véritable impact sur l'environnement, sa mise en place en sera certainement moins controversée.

Par ailleurs, la mise en place d'un instrument économique tel que le péage urbain incite à un changement de comportement de la part des automobilistes. Comme nous l'avons déjà précisé dans la section (§ 3.1), l'intérêt d'associer une politique modale telle que le développement des TC ou la diminution du tarif des TC, afin de faciliter le changement de comportement des usagers, est souvent établi. Néanmoins, encore faut-il prouver l'efficacité de la politique modale incitative mise en place.

Par l'analyse des résultats présentés dans le tableau n°3.3, nous pouvons comparer l'efficacité des différents péages étudiés visant à réduire la part des automobilistes par rapport à la situation d'équilibre. De plus, nous cherchons à savoir si la politique modale de redistribution des recettes du péage, instaurée en $T+1$, a un réel impact sur la réduction du coût social total par rapport à la situation obtenue en T .

Ainsi, dans les sous-sections qui suivent, nous comparons analytiquement chaque péage aux périodes T et $T+1$ par rapport à la situation d'équilibre sans péage. D'un point de vue analytique, il apparaît difficile de comparer l'efficacité de chaque péage (péage de pointe, péage de uniforme de pointe et péage uniforme). Cette comparaison entre les péages sera, toutefois, réalisée numériquement dans la section (§ 3.3).

3.2.3.1. Situation avec péage de pointe

Les parts des automobilistes et des usagers des TC à l'équilibre sans péage sont exactement les mêmes que dans la situation avec péage de pointe sans redistribution des recettes. Cette égalité vient du fait que le péage de pointe ne réduit pas la part des automobilistes, puisque son objectif est seulement de fluidifier le trafic aux heures de pointe. Cependant, un péage de pointe accompagné de la politique de redistribution des recettes entraîne des modifications. Nous constatons que la part d'automobilistes diminue ($\eta_A^p > \eta_A^{p'}$) et, à l'inverse, que la part des usagers des TC augmente ($\eta_B^p < \eta_B^{p'}$). Nous démontrons ces inégalités grâce à l'utilisation du développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$, appliqué sur la part des automobilistes. La démonstration est reléguée en annexe 3.2.

Le péage de pointe seul n'a aucun impact sur la situation d'équilibre, mis à part que les recettes du péage viennent réduire le coût social total. En revanche, le péage accompagné de la politique de redistribution des recettes a les effets escomptés. Nous assistons à un transfert modal des automobilistes vers les TC. Le coût social total de la période $T+1$ a diminué par rapport celui de la période T ($CST^{p'} < CST^p$), notamment grâce à la baisse de la part des automobilistes. En outre, on assiste à la réduction des coûts environnementaux.

3.2.3.2. Situation avec péage uniforme lors des périodes de pointe

Contrairement au péage de pointe, le péage uniforme lors des périodes de pointe agit sur la part d'automobilistes. Il entraîne une réduction du trafic automobile ($\eta_A^{ct} < \eta_A^E$), ainsi qu'une augmentation des usagers des TC ($\eta_B^{ct} > \eta_B^E$).

Par ailleurs, nous cherchons aussi à savoir si la redistribution des recettes du péage incite les automobilistes à prendre les TC. En utilisant la même méthode que précédemment, c'est-à-dire le développement limité, il en résulte que la part des automobilistes a encore diminué $\eta_A^{ct} > \eta_A^{ct'}$ et que l'augmentation de la part des usagers des TC s'est amplifiée $\eta_B^{ct} < \eta_B^{ct'}$ (les démonstrations sont présentées en annexe 3.3).

Non seulement il existe une diminution des automobilistes lors de la mise en place d'un péage uniforme durant les périodes de pointe, mais, en plus, l'ajout d'une politique de redistribution des recettes accentue ce phénomène. Le coût social total s'en trouve minimisé par rapport à la situation d'équilibre initiale ($CST^{ct'} < CST^{ct} < CST^E$).

En outre, l'outil économique (péage lors des périodes de pointe) accompagné d'une politique modale permet d'atteindre l'objectif souhaité en minimisant le coût social par rapport à la situation d'équilibre.

3.2.3.3. Situation avec péage uniforme

Comme le péage uniforme durant les périodes de pointe, le péage uniforme engendre une réduction des automobilistes par rapport à la situation d'équilibre initiale ($\eta_A^U < \eta_A^E$).

Une fois de plus, nous cherchons à déterminer si le péage complété par la politique de redistribution engendre un transfert modal plus important vers les TC que le péage uniforme seul. Les résultats indiquent que l'association du péage et de la politique de redistribution des recettes accentue le report modal dans la mesure où la part d'automobilistes diminue et que la part des usagers des TC augmente : $\eta_A^U > \eta_A^{U'}$ et $\eta_B^U < \eta_B^{U'}$. L'annexe 3.4 présente la justification de ces résultats.

Ainsi, l'instauration du péage uniforme réduit la part des automobilistes par rapport à la situation initiale, mais, en plus, l'ajout d'une politique modale intensifie le transfert modal des automobilistes vers les TC. Le coût social total se révèle minimisé par rapport à la situation d'équilibre ($CST^{U'} < CST^U < CST^E$). L'objectif de minimisation du coût social total est atteint grâce à la complémentarité du péage et de la politique modale incitative.

À l'issue de l'analyse des résultats théoriques, nous pouvons établir plusieurs conclusions. Nous constatons que la mise en place d'un péage uniforme lors des périodes de pointe, ainsi que celle d'un péage uniforme, réduisent la part des automobilistes par rapport à celle à l'équilibre sans péage. Toutefois, le péage de pointe seul n'a pas cette vertu. Il ne réduit pas la part des automobilistes, dans la mesure où son

principal objectif est de fluidifier la circulation lors des périodes de pointe et non de la réduire. Cependant, ce résultat évolue dès lors que la politique modale de redistribution est associée au péage de pointe.

La principale conclusion réside dans la réussite de l'association du péage, quel qu'il soit, et de la politique modale incitative dont l'objectif est de minimiser le coût social total par rapport à celui à l'équilibre. À chaque fois que l'on a complété le péage de la politique de redistribution des recettes, le transfert modal des automobilistes vers les TC s'est accentué, entraînant une réduction de la pollution et la minimisation du coût total collectif. L'efficacité de la politique modale incitative est démontrée.

Ces résultats théoriques sont étayés, dans la section suivante, par des simulations numériques. Ces dernières vont permettre de mieux concevoir l'impact des politiques mises en place.

3.3. Simulations numériques

Les applications numériques ont pour objectif d'enrichir et d'agrémenter les résultats de la modélisation théorique. L'analyse comparative menée dans la section précédente a montré l'efficacité du péage urbain (quelle que soit sa forme) associé à une politique modale. Afin d'appuyer ces résultats, nous effectuons des simulations numériques.

Après avoir testé la sensibilité des différentes variables du modèle, le constat est clair : seules les variables valeur du temps⁵⁷ α et les coûts fixes des transports collectifs F ont une réelle influence sur la part des automobilistes et des usagers des TC, ainsi que sur le coût social total. C'est pourquoi nous nous concentrerons, dans un premier point, sur l'analyse de la valeur temps, pour nous intéresser par la suite à la valeur des coûts fixes.

⁵⁷ Le temps est une composante importante de la demande en transport et du partage modal. Il est un paramètre prépondérant à prendre en compte. Cependant, donner une valeur à ce temps dans les transports est un exercice délicat. Les valeurs temps publiées par différents auteurs varient fortement.

3.3.1. Tests de sensibilité relatifs à la valeur du temps

Le choix de la valeur du temps dans les évaluations des politiques de transport est souvent problématique. En effet, la valeur du temps des individus est très hétérogène d'une ville à une autre. Par exemple, la valeur du temps utilisée dans la région de Londres s'élève à 15.6 €/h⁵⁸ (euros par heure) (Prud'homme et Bocajero, 2005b), alors que celle appliquée en Île-de-France est de 8.8 €/h (Boiteux, 2001).

Afin de réaliser notre première simulation numérique, nous nous fondons sur certaines valeurs⁵⁹ utilisées dans l'article de Danielis et Marcucci (2002). Les auteurs utilisent des valeurs actualisées issues en partie de Straszheim (1979) et Arnott *et al.* (1993). Nous considérons un même nombre d'individus N qui est fixé à 24 100, un même coût marginal des TC de 1.94 €, et un coût fixe des transports collectifs F similaire s'élevant à 6 174 €. La capacité de la route K est également reprise, et se fixe à 8 100 véh/h (véhicules par heure).

Concernant la valeur du temps α , nous choisissons les recommandations officielles du rapport Boiteux (2001). La valeur préconisée est de 9.5 €/h⁶⁰. De plus, compte tenu des diverses études sur le coût de retard et d'avance, dont les principales estimations sont présentées en annexe 3.5, nous utilisons un ratio : $\frac{\beta}{\alpha} = 0.5$ et $\frac{v}{\alpha} = 2.5$, ce qui implique un coût unitaire d'avance $\beta = 4.75$ € et un coût unitaire de retard de $v = 23.75$ €. Sur la base du rapport Boiteux (2001), la valeur de la pollution atmosphérique⁶¹ seule retenue dans notre simulation est de l'ordre de 2.9 €/100 véh/km. Enfin, nous considérons qu'un déplacement urbain est, au maximum, égal à 10 kilomètres. Cette valeur découle des analyses de Baccaïni *et al.* (2007) et de la CERTU (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions

⁵⁸ Raux (2005) souligne que cette valeur est « loin d'être excessive » pour les évaluations du péage urbain du centre-ville de Londres, et « pourrait être à l'origine d'une sous-estimation » des gains de temps.

⁵⁹ En les actualisant au taux 1 \$=0.686 € (cours de décembre 2007).

⁶⁰ Valeur fixée à 55% du coût salarial, 77% du salaire brut, pour un déplacement domicile-travail dans la France entière.

⁶¹ Les valeurs proposées dans le rapport Boiteux (2001) sont des approximations qui devront être reconsidérées au fil des avancements des travaux sur la valorisation de la pollution. Par exemple, le handbook de la CE (2007), en tentant d'homogénéiser les valeurs au niveau européen, actualise la valeur de la pollution locale en multipliant par 2.5 celle du rapport Boiteux (2001).

publiques) concernant les transports urbains. Le tableau n°3.4 présente les résultats de la simulation numérique.

TABLEAU N°3.4 : Application numérique n°1 avec comme valeur du temps : $\alpha = 9.5 \text{ €/h}$

Paramètres : $\alpha = 9.5 \text{ €/h}; \beta = 4.75 \text{ €/h}; v = 23.75 \text{ €/h}; c = 1.94 \text{ €}; K = 8100 \text{ véh/h}; F = 6174 \text{ €};$ $N = 24100; C_E = 0.29 \text{ €}$					
		Équilibre sans péage	Péage de pointe	Péage uniforme lors des périodes de pointe	Péage uniforme
Période <i>T</i>	$\eta_A = N_A/N$	0.191633	0.191633	0.129561	0.0943716
	$\eta_B = N_B/N$	0.808367	0.808367	0.870439	0.905628
	Coût social total	55730.9	50519.3	53008.4	51703.1
Période <i>T+1</i>	$\eta_A = N_A/N$	-	0.172943	0.121059	0.0409522
	$\eta_B = N_B/N$	-	0.827057	0.878941	0.959048
	Coût social total	-	50295.5	51159.5	51646.8

Les principales observations dégagées du tableau n°3.4 sont les suivantes. Premièrement, la part des automobilistes est relativement faible par rapport à celle des usagers des TC. En effet, en situation d'équilibre sans péage, elle est d'environ 19%, et reste inchangée lors de la mise en place d'un péage de pointe. Cependant, elle diminue respectivement à 12.9% et à 9.4% lors de l'instauration d'un péage uniforme de pointe et d'un péage uniforme. Deuxièmement, le coût social total à l'équilibre sans péage est le plus élevé à la période *T*. Ainsi, quel que soit le péage mis en place, le coût social total est minimisé. Troisièmement, la mise en place de la politique de redistribution des recettes du péage vers les TC a les impacts attendus. En effet, la part des automobilistes a diminué par rapport à la situation où seul le péage est mis en place. Pour la situation avec péage de pointe, elle passe de 19% à environ 17% quand la politique modale est ajoutée ; pour la situation avec le péage uniforme, elle passe de 9.4% à la période *T* à environ 4% à la période *T+1*. Enfin, tous les coûts sociaux totaux à la période *T+1* sont relativement moins élevés que celui à l'équilibre sans péage.

Les résultats de notre première simulation doivent être comparés avec ceux obtenus lors d'une variation de la valeur du temps. Nous réalisons ainsi une deuxième application reprenant exactement les mêmes valeurs des paramètres que celles utilisées dans l'article de Danielis et Marcucci (2002), où la valeur du temps est fixée à 3.43 €/h. Nous ajoutons, cependant, la valeur des coûts environnementaux considérée

précédemment. Le tableau n°3.5 expose les résultats obtenus par cette nouvelle simulation.

TABLEAU N°3.5 : Application numérique n°2 avec comme valeur du temps : $\alpha = 3.43 \text{ €/h}$

Paramètres :		$\alpha = 3.43 \text{ €/h}; \beta = 2.1 \text{ €/h}; v = 8.15 \text{ €/h}; c = 1.94 \text{ €}; K = 8100 \text{ véh/h}; F = 6174 \text{ €};$ $N = 24100; C_E = 0.29 \text{ €}$			
		Équilibre sans péage	Péage de pointe	Péage uniforme lors des périodes de pointe	Péage uniforme
Période <i>T</i>	$\eta_A = N_A/N$	0.492005	0.492005	0.31977	0.228675
	$\eta_B = N_B/N$	0.507995	0.507995	0.68023	0.771325
	Coût social total	62346.3	47854.9	53602	50095.7
Période <i>T+1</i>	$\eta_A = N_A/N$	-	0.366116	0.267292	0.168252
	$\eta_B = N_B/N$	-	0.633884	0.732708	0.831748
	Coût social total	-	46393.7	48536.1	49780.9

La principale différence de cette deuxième application numérique par rapport à la première est que dans la situation d'équilibre sans péage, la part des automobilistes et celle des usagers des TC sont presque équivalentes ($\eta_A = 49.2\%$ et $\eta_B = 50.8\%$). En revanche, comme dans la première simulation, ces parts restent inchangées lors de la mise en place d'un péage de pointe ; lors de l'instauration d'un péage uniforme de pointe et d'un péage uniforme, la part des automobilistes diminue (elle passe respectivement à environ 31.9% et à 77.2%). Nous notons également, comme dans la première simulation, que la part des automobilistes à la période *T+1* s'est réduite par rapport à la période *T*.

Une autre distinction peut être relevée. La différence entre le coût social total à l'équilibre sans péage et celui lors de l'instauration d'un péage quel qu'il soit, est plus importante dans la deuxième application. Cela signifie que les péages ont un impact plus significatif (réduction du coût social total plus importante) lorsque la valeur du temps est moins élevée.

Malgré des résultats chiffrés assez différents, on constate pour les deux simulations l'ordre des coûts sociaux suivant :

- pour la période *T* : le coût social total à l'équilibre est le plus élevé. Il est supérieur à celui avec un péage uniforme lors des périodes de pointe, qui est

supérieur à celui avec un péage uniforme, lui-même plus élevé que le coût social total avec un péage de pointe : $CST^E > CST^{ct} > CST^U > CST^P$.

- pour la période $T+I$: le coût social avec un péage uniforme est le plus élevé. Il est supérieur à celui avec un péage uniforme de pointe, lui-même supérieur à celui avec un péage de pointe : $CST^{U'} > CST^{ct'} > CST^{P'}$.

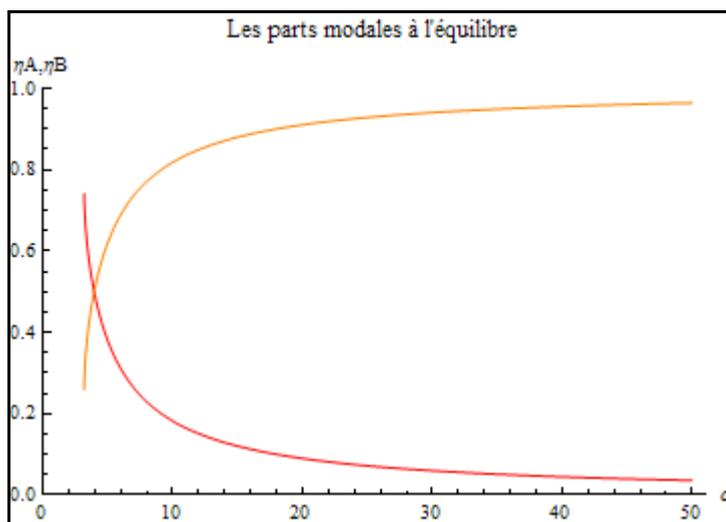
Le péage de pointe, qu'il y ait une politique de redistribution ou non, paraît être le plus efficace pour minimiser le coût social total. Toutefois, on observe que la part des automobilistes est la plus petite avec un péage uniforme, non seulement sur la période T ($\eta_A^U < \eta_A^{ct} < \eta_A^P = \eta_A^E$), mais aussi sur la période $T+I$ ($\eta_A^{U'} < \eta_A^{ct'} < \eta_A^{P'}$). Ces résultats sont logiquement inversés pour la part des usagers des TC.

Les impacts de chaque péage aux périodes T et $T+I$ vont maintenant être analysés en fonction de la valeur du temps. Nous établirons ensuite une comparaison générale de l'efficacité des différents péages.

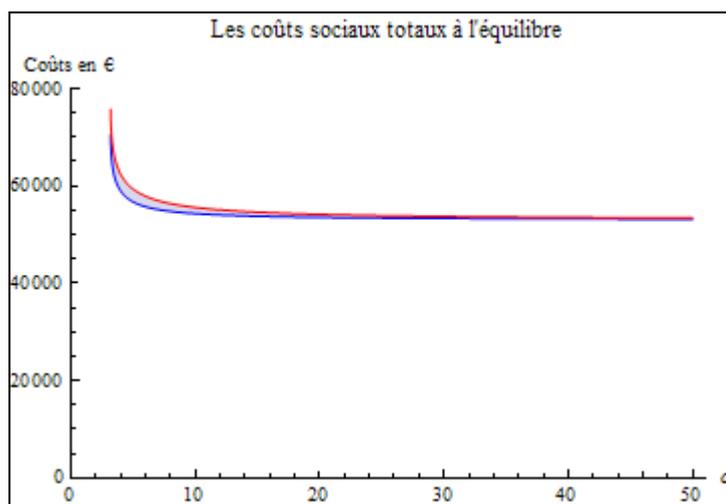
3.3.1.1. La situation d'équilibre initiale

On ne peut étudier l'impact des différentes politiques instaurées sans avoir précédemment analysé la situation de référence, c'est-à-dire la situation d'équilibre avant toute intervention.

GRAPHIQUES N°3.1 : Situation d'équilibre en fonction de la valeur du temps



— Part des usagers des TC — Part des automobilistes



— Coût social total sans C_E — Coût social total avec C_E

■ Représente C_E

On observe que la part des automobilistes et celle des usagers des TC sont respectivement décroissante et croissante avec la valeur du temps. La part des automobilistes est supérieure à celle des usagers des TC ($\eta_A^E \geq \eta_B^E$) lorsque la valeur du temps α appartient à l'intervalle $[3.19, 3.95]$ ⁶². En outre, à partir de 3.95 €/h, la part des

⁶² La borne inférieure de l'intervalle est fixée à 3.19, puisque la valeur du temps pour laquelle la racine carrée des expressions de η_A^E et η_B^E n'est pas définie est environ de 3.1826 €/h.

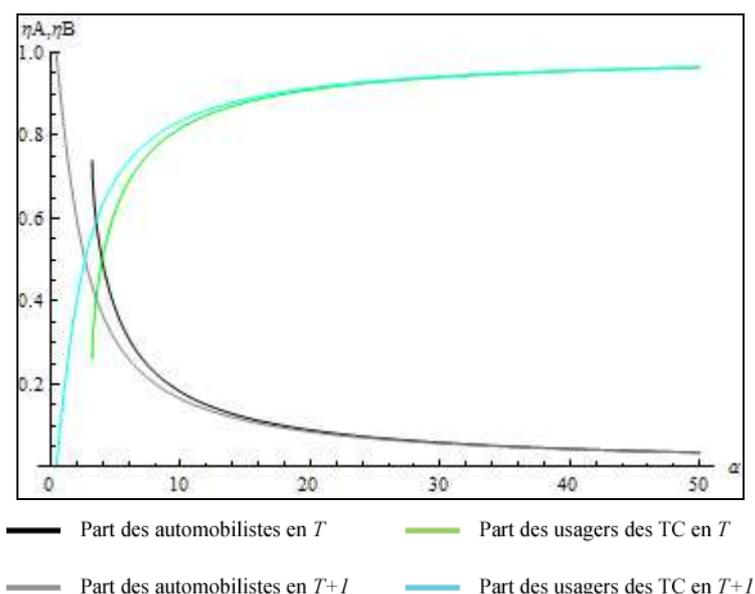
usagers des TC devient supérieure à celle des automobilistes et augmente continuellement avec la valeur du temps.

Par l'observation du graphique concernant les coûts sociaux totaux, on remarque, sans réelle surprise, que la prise en compte du coût environnemental (C_E) entraîne un coût social total plus élevé. Cela se vérifie, notamment, lorsque la valeur du temps tend vers 3.19 €/h : dans ce cas, le coût social total est de 70 062.5 € sans C_E et de 75 000 € avec C_E . La prise en compte de C_E engendre une augmentation du coût social non négligeable. Toutefois, on remarque que les deux coûts sociaux totaux tendent vers une même limite de 52 928 € lorsque la valeur du temps tend vers l'infini. Cette limite a une expression analytique qui est présentée en annexe 3.6.

3.3.1.2. La situation avec un péage de pointe

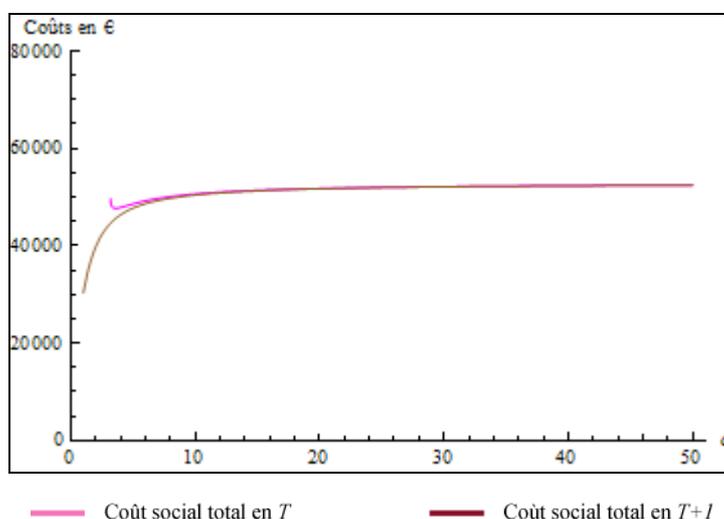
Nous cherchons à comparer, en fonction de la valeur du temps, l'impact de la mise en place du péage de pointe sur la part des automobilistes et sur la réduction du coût social à la période T , mais aussi à la période $T+1$ lorsque la politique modale incitative est ajoutée.

GRAPHIQUE N°3.2 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur du temps



À la période T , le péage de pointe n'a aucune influence sur la part des automobilistes, elle reste identique à celle déterminée par la situation d'équilibre. Ainsi, les courbes représentant la situation à la période T correspondent à celles du graphique n°3.1. En revanche, l'ajout de la politique modale a les effets incitatifs attendus, puisqu'elle favorise l'utilisation des TC ($\eta_B^{P'} > \eta_B^P$). Cela s'observe particulièrement lorsque la valeur du temps est faible. Néanmoins, on remarque que plus la valeur du temps augmente, plus les effets de la politique modale s'atténuent.

GRAPHIQUE N°3.3 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur du temps

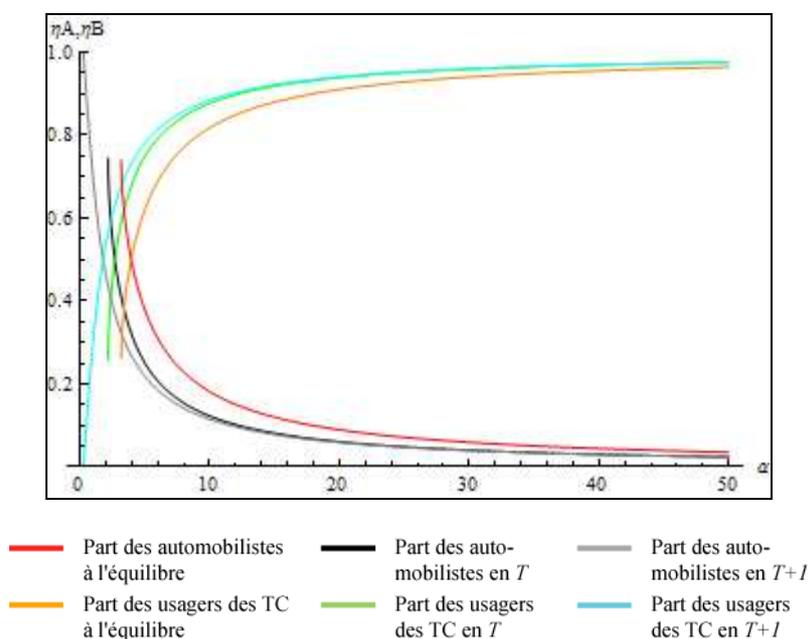


Dans ce graphique, nous constatons que lorsque la valeur du temps tend vers 3.19 €/h, alors le coût social total à la période T (CST^P) s'élève à 49 448 €. Celui à la période $T+I$ ($CST^{P'}$) est, quant à lui, de l'ordre de 44 623.5 €. Ainsi, on peut confirmer que l'ajout de la politique modale incitative au péage de pointe minimise le coût social total pour une valeur du temps assez faible. Cependant, la même observation que pour la situation d'équilibre peut être faite. Si la valeur du temps tend vers l'infini, les coûts sociaux totaux résultant de la mise en place d'un péage de pointe, avec ou sans l'instauration d'une politique de redistribution, tendent vers une même limite de 52 928 € (cf. annexe 3.6).

3.3.1.3. La situation avec péage uniforme lors des périodes de pointe

Comme dans la situation avec le péage de pointe, nous souhaitons comparer l'efficacité des politiques mises en place, selon la valeur du temps, à la période T et à la période $T+1$.

GRAPHIQUE N°3.4 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur du temps

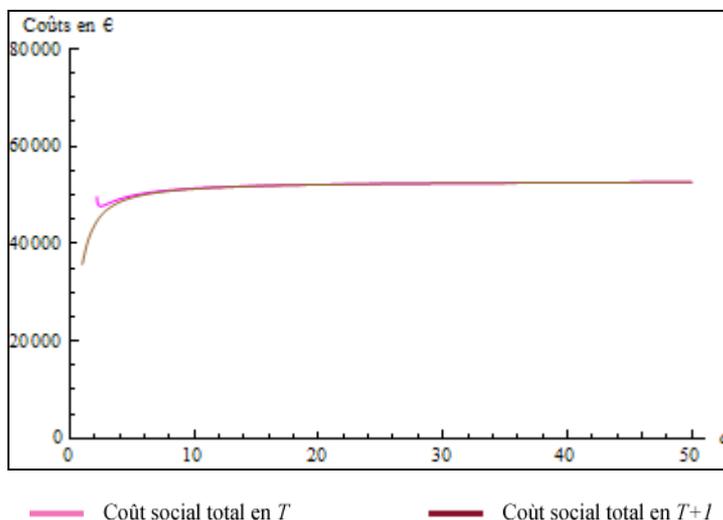


D'une part, pour une même valeur du temps, on observe une diminution de la part des automobilistes par rapport à la situation d'équilibre sans péage, quelle que soit la politique de régulation instaurée (péage seul ou accompagné de la politique de redistribution).

D'autre part, on remarque que la mise en place de la politique modale de redistribution accentue le transfert modal des automobilistes vers les TC. En effet, la courbe de la part des usagers des TC à la période $T+1$ est relativement plus élevée que celle à la période T ($\eta_B^{ct'} > \eta_B^{ct}$). L'effet inverse est observé pour la courbe de la part des

automobilistes ($\eta_A^{ct'} < \eta_A^{ct}$)⁶³. Néanmoins, l'écart entre T et $T+I$ des courbes des usagers des TC, mais aussi des automobilistes, se réduit lorsque la valeur du temps augmente.

GRAPHIQUES N°3.5 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur du temps



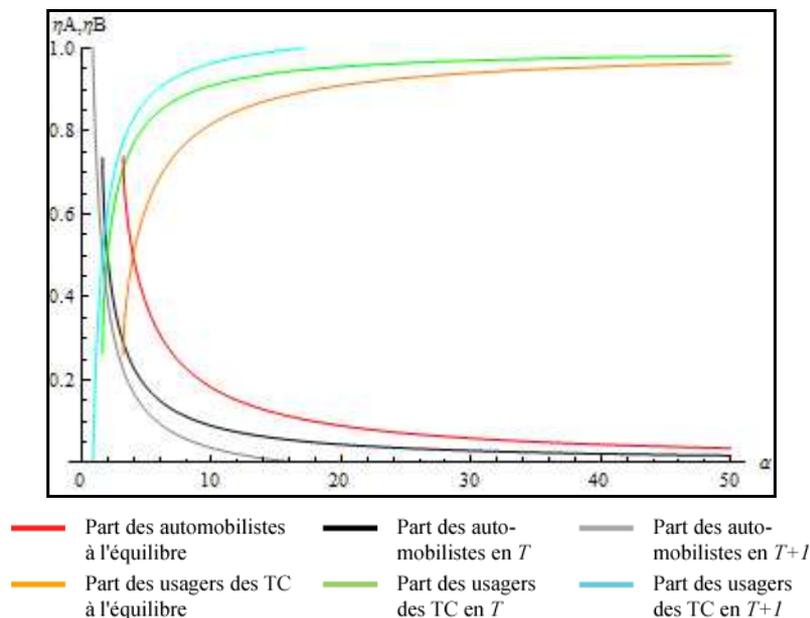
Ainsi, on observe que le coût social total en $T+I$ est moins élevé que celui de la période T , signifiant que la mise en place du péage complété de la politique modale réduit le coût social total. Effectivement, lors de l'instauration du péage uniforme de pointe seul, le coût social total CST^{ct} s'élève à 49 724 €, lorsque la valeur du temps α tend vers 2.18 €/h. Or, pour cette même valeur du temps, si l'on considère le péage associé à la politique de redistribution, le coût social total $CST^{ct'}$ se réduit à 44 655.8 €. Néanmoins, on observe, une fois de plus, que si la valeur de α tend vers l'infini, la limite du coût social total de la période T , mais aussi celui de la période $T+I$, est de 52 928 € (cf. annexe 3.6).

3.3.1.4. La situation avec péage uniforme

Nous menons une analyse comparative entre l'efficacité du péage uniforme seul et celle du péage uniforme accompagné de la politique modale, toujours en fonction de la valeur du temps.

⁶³ Nous notons que la valeur du temps, pour laquelle la racine carrée des expressions de la part des automobilistes et de celle des usagers des TC à la période T (η_A^{ct} et η_B^{ct}) n'est pas définie, est de l'ordre de 2.1773 €/h.

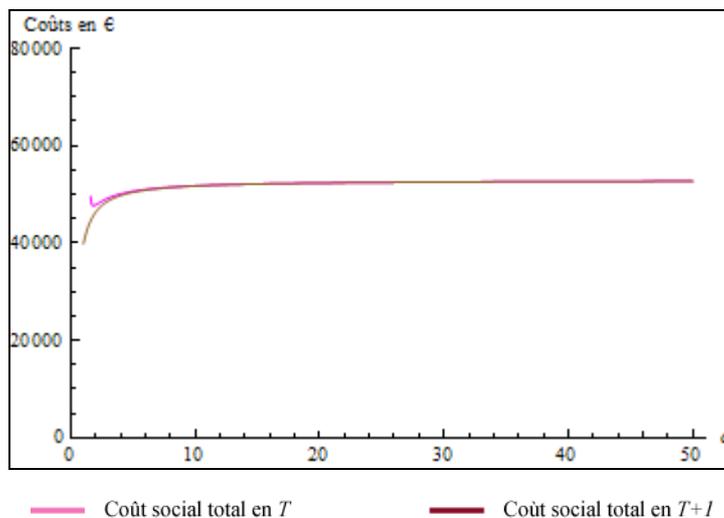
GRAPHIQUE N°3.6 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur du temps



Le graphique n°3.6 montre que, quelle que soit la politique de régulation appliquée, elle réduit la part des automobilistes et augmente celle des usagers des TC⁶⁴ par rapport à la situation d'équilibre initiale. On remarque cependant que le péage uniforme associé à la politique modale a des effets plus importants sur la réduction de la part des automobilistes que le péage seul. Néanmoins, par rapport aux situations précédentes, la différence entre l'efficacité du péage seul et celle du péage accompagné de la politique modale est moins prononcée lorsque la valeur du temps est faible. Pour des valeurs moyennes, l'écart s'accroît, puis se résorbe au fur et à mesure que α augmente.

⁶⁴ Nous notons que la valeur du temps, pour laquelle la racine carrée des expressions de la part des automobilistes et celles des usagers des TC à la période T (η_A^U et η_B^U) n'est pas définie, est de l'ordre de 1.5941 €/h.

GRAPHIQUE N°3.7 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur du temps



Le graphique n°3.7 nous indique que lorsque la valeur du temps tend vers 1.60 €/h, le coût social total relatif à la période T s'élève à 49 023.8 € et celui pour la période $T+I$ est de l'ordre de 44 676.7 €. Nous constatons une même limite de 52 928 € pour les coûts sociaux totaux des deux périodes, lorsque la valeur du temps tend vers l'infini (cf. annexe 3.6). Une fois de plus, la minimisation du coût social total est réalisée par l'association du péage uniforme avec la politique modale de redistribution pour une valeur de temps relativement faible.

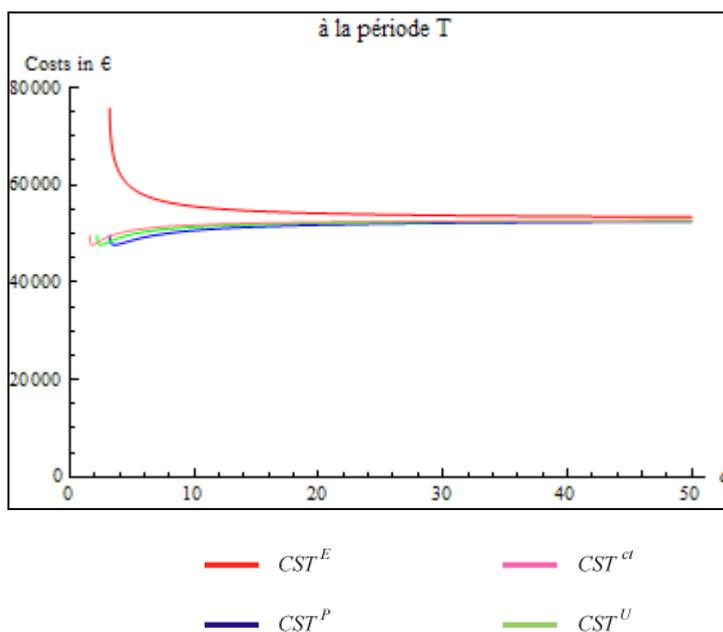
- *Résultat 1a : Le péage, quelle que soit sa forme, associé à la politique de redistribution des recettes, intensifie le transfert modal des automobilistes vers les TC par rapport à la situation de péage seul.*
- *Résultat 1b : Les effets de la politique de redistribution sont particulièrement prononcés lorsque la valeur du temps est faible pour le péage de pointe et le péage de pointe uniforme. Plus la valeur du temps s'élève, plus la différence d'efficacité entre le péage et le péage accompagnée de la politique de redistribution s'atténue.*

- *Résultat 2a* : Le péage, sous tout type de forme, accompagné de la politique modale de redistribution, minimise le coût social total par rapport au péage seul.
- *Résultat 2b* : Si la valeur accordée au temps est très élevée, alors le péage et le péage associé à la politique modale ont des effets similaires.

3.3.1.5. Comparaison générale

À l'issue de ces analyses détaillées par péage, nous rassemblons les résultats concernant les coûts sociaux totaux afin de déterminer la politique optimale.

GRAPHIQUE N°3.8 : Coût social total pour chaque situation de péage en fonction de la valeur du temps



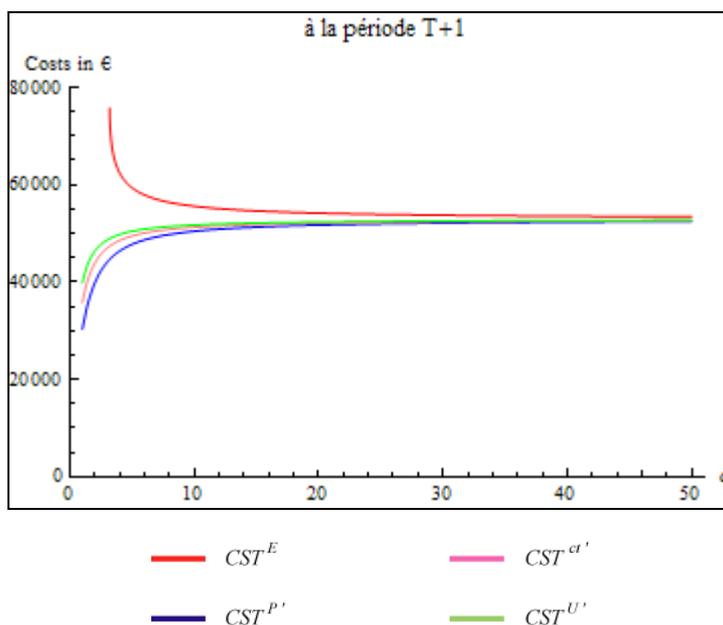
Pour une valeur de α comprise dans l'intervalle $]0,30]$ ⁶⁵, l'ordre des coûts obtenu par nos deux simulations numériques est vérifié. En effet, on observe que le coût social total à l'équilibre sans péage est supérieur à celui avec le péage uniforme de pointe, qui est supérieur à celui avec un péage uniforme, lui-même suivi du coût social total avec péage pointe : $CST^E > CST^{ct} > CST^U > CST^P$. Le péage de pointe est considéré comme

⁶⁵ Intervalle correspondant, en général, aux valeurs du temps estimées par différentes études (cf. Brownstone et Small, 2005 ; Lam et Small, 2001)

étant le plus efficace, puisqu'il minimise le coût social total. Toutefois, on observe que lorsque la valeur du temps est élevée, les coûts convergent vers une même limite de 52 928 €. Notons qu'il existe certaines valeurs du temps pour lesquelles les coûts ne sont pas définis. Les détails ont été donnés précédemment pour chacun des péages.

Le graphique suivant montre les coûts sociaux totaux avec les différents péages accompagnés de la redistribution des recettes vers les TC.

GRAPHIQUE N°3.9 : Coût social total, à la période $T+1$, en fonction de la valeur du temps



Le graphique n°3.9 confirme que le coût social total avec péage de pointe et redistribution ($CST^{P'}$) est le moins élevé. Cependant, si l'on compare ces résultats à ceux de la période T , on observe une inversion des coûts relatifs aux péages uniforme et uniforme lors des périodes de pointe. Le péage uniforme avec redistribution des recettes ($CST^{U'}$) semble moins efficace que le péage uniforme de pointe avec redistribution ($CST^{ct'}$), pour une valeur de α comprise entre 0 et 15. Les coûts sont effectivement ordonnés comme suit : $CST^{U'} > CST^{ct'} > CST^{P'}$ pour une valeur de α petite. Cependant, plus la valeur du temps est élevée, plus elle atténue les effets des différents péages accompagnés de la politique modale.

- *Résultat 3* : Le péage de pointe, avec ou sans la politique modale de redistribution des recettes, minimise le coût social total par rapport aux autres péages, pour une valeur du temps inférieure à 30 €/h.

Il convient, maintenant, de réaliser des tests de sensibilité sur la seconde variable importante du modèle : les coûts fixes des transports collectifs.

3.3.2. Tests de sensibilités relatifs aux coûts fixes des TC

Les coûts fixes F des transports collectifs ont une influence significative sur les coûts sociaux totaux. Afin de déterminer l'impact des coûts fixes, nous réalisons une nouvelle simulation numérique. Nous considérons les mêmes valeurs des paramètres que ceux de l'application numérique n°1 présentée par le tableau n°3.4, tout en faisant varier F de 6 174 € à 21 500 €⁶⁶. Le tableau n°3.6 présente les résultats de cette troisième simulation numérique.

TABLEAU N°3.6 : Application numérique n°3 avec comme valeur des coûts fixes des TC : $F = 21\,500\text{ €}$

Paramètres : $\alpha = 9.5\text{ €/h}; \beta = 4.75\text{ €/h}; \nu = 23.75\text{ €/h}; c = 1.94\text{ €}; K = 8100\text{ véh/h}; F = 21500\text{ €};$ $N = 24100; C_E = 0.29\text{ €}$					
		Équilibre sans péage	Péage de pointe	Péage uniforme lors des périodes de pointe	Péage uniforme
Période T	$\eta_A = N_A/N$	0.26824	0.26824	0.175215	0.125681
	$\eta_B = N_B/N$	0.73176	0.73176	0.824785	0.874319
	Coût social total	78010.0	67798.7	69286.7	67739.6
Période T+1	$\eta_A = N_A/N$	-	0.22897	0.158978	0.067208
	$\eta_B = N_B/N$	-	0.77103	0.841022	0.932792
	Coût social total	-	66589.3	67184.3	67499.2

Plusieurs conclusions peuvent être dégagées de la comparaison entre les résultats de la première application numérique (cf. tableau n°3.4) et ceux issus du tableau n°3.6. Premièrement, la part des usagers des TC à l'équilibre sans péage est moins élevée, elle

⁶⁶ En réalisant différents tests de sensibilité, il est apparu qu'à partir du montant de 21 500 € de F , l'efficacité des différents péages se modifie. C'est pourquoi nous avons choisi cette valeur dans notre application numérique n°3.

est passée de 81% à 73%. L'augmentation des coûts fixes des TC engendre une diminution de la part des usagers des TC, puisqu'elle a un effet sur le prix du déplacement en TC. Deuxièmement, comme dans la première simulation, la part des automobilistes lors de la mise en place d'un péage de pointe est identique à celle de la situation d'équilibre sans péage (26.8%), mais elle diminue avec l'instauration du péage uniforme de pointe (17.5%) et du péage uniforme (12.5%). On observe aussi que le coût social total obtenu, quel que soit le péage mis en place à la période T , est inférieur à celui de l'équilibre sans péage. Enfin, l'association de la politique modale au péage, quel qu'il soit, engendre une réduction de la part des automobilistes par rapport à celle de la période T , et une diminution du coût social total par rapport à celui à l'équilibre sans péage.

Les résultats de l'application numérique n°1 montrent que le péage de pointe, à la période T , est le plus efficace dans la mesure où il minimise le coût social total ($CST^E > CST^{ct} > CST^U > CST^P$). À partir d'une certaine valeur des coûts fixes F (application numérique n°3), on observe des changements dans l'ordre des coûts sociaux totaux. Le péage uniforme devient le plus efficace, car il minimise le coût social total. Ce dernier est inférieur à celui avec le péage de pointe ($CST^E > CST^{ct} > CST^P > CST^U$). Cependant, si l'on applique la politique modale de redistribution des recettes, l'ordre se rétablit. Le péage de pointe redevient le plus efficace et le péage uniforme se trouve alors être le moins efficace ($CST^{U'} > CST^{ct'} > CST^{P'}$, comme dans l'application numérique n°1).

L'application numérique n°3 montre que la mise en place d'un péage uniforme implique la plus grande réduction de la part des automobilistes, alors que l'instauration d'un péage de pointe engendre la moins importante, pour la période T et la période $T+1$ ($\eta_A^U < \eta_A^{ct} < \eta_A^P = \eta_A^E$ et $\eta_A^{U'} < \eta_A^{ct'} < \eta_A^{P'}$). L'ordre reste inchangé par rapport à l'application numérique n°1.

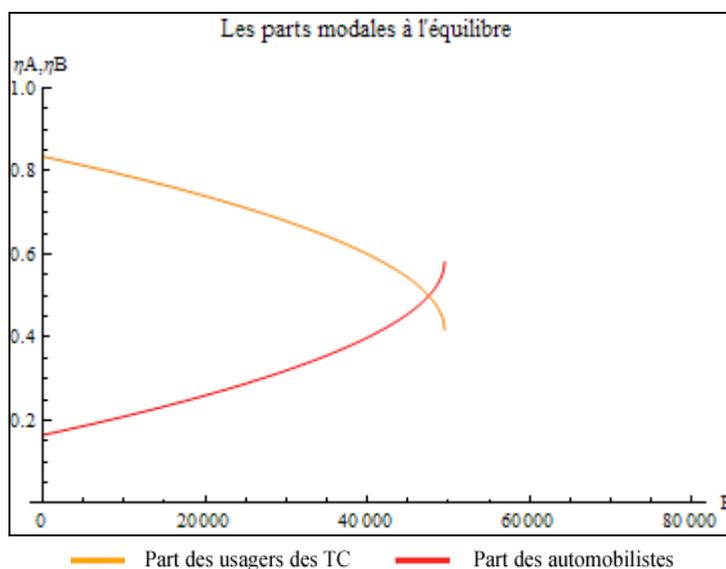
L'augmentation des coûts fixes provoque une réduction de la part des usagers des TC, mais n'a pas d'effet concernant l'influence des péages sur les parts des automobilistes et des usagers des TC. Néanmoins, nous pouvons conclure qu'à partir d'une certaine valeur des coûts fixes des TC, les péages n'ont plus la même efficacité pour minimiser les coûts sociaux.

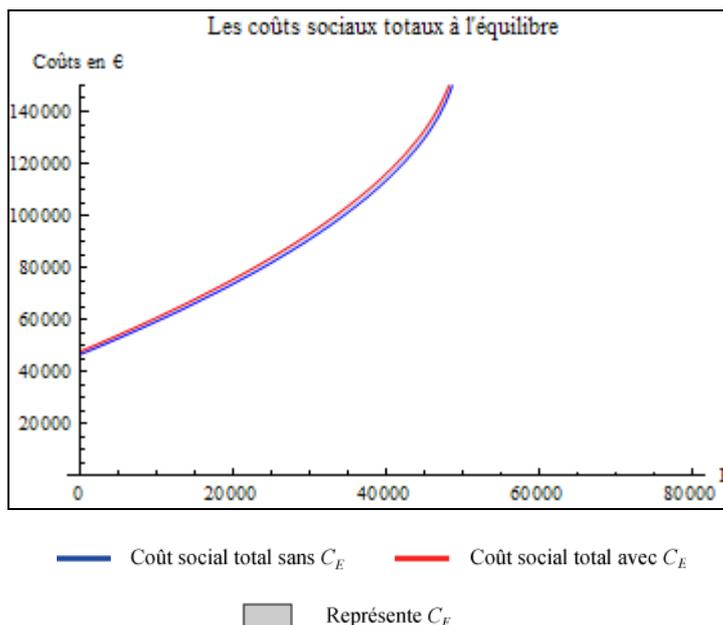
Dans un premier temps, nous effectuons les tests de sensibilité relatifs à la valeur des coûts fixes F selon les différents péages aux périodes T et $T+1$. Puis nous établissons une comparaison générale de l'efficacité de chaque type de péage pour déterminer la politique optimale en fonction de la valeur des coûts fixes des TC.

3.3.2.1. La situation d'équilibre initiale

Les graphiques suivants représentent la situation d'équilibre initiale, sans mise en place de péage ni de politique modale incitative.

GRAPHIQUES N°3.10 : Situation d'équilibre en fonction de la valeur des coûts fixes



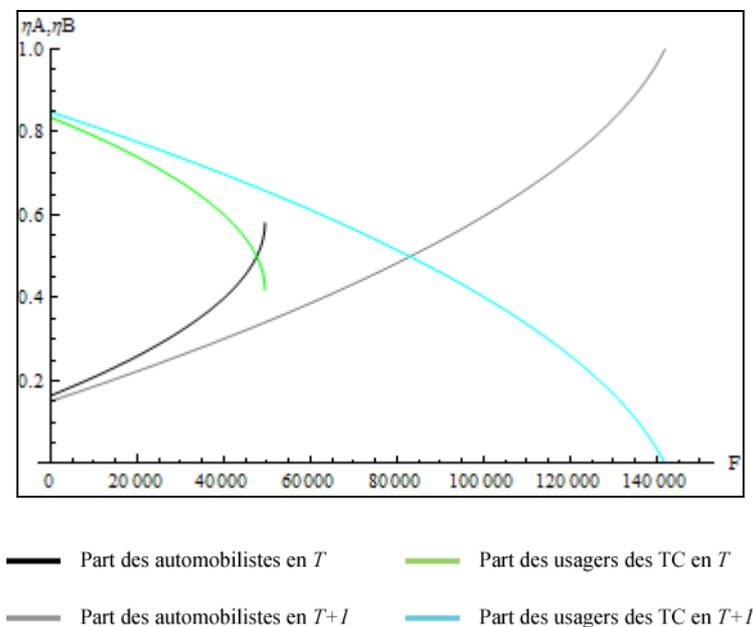


Le graphique relatif aux parts modales à l'équilibre montre que la part des usagers des TC et celle des automobilistes sont respectivement décroissante et croissante avec les coûts fixes (F). L'augmentation des coûts fixes des TC entraîne une diminution de la part des usagers des TC, puisqu'elle vient augmenter le prix du déplacement en TC. On observe que la part des usagers des TC est supérieure ou égale à celle des automobilistes pour une valeur des coûts fixes comprise dans l'intervalle $[0, 47581]$. Concernant les coûts sociaux totaux, on observe que la prise en compte du coût environnemental de l'automobile engendre une augmentation du coût social total. Si F tend vers zéro, la limite du coût social total sans C_E est de 46 754 €, et celle du coût social total avec C_E s'élève à 47 905.3 €. L'impact environnemental engendré par l'utilisation de l'automobile, même peu élevé, ne doit pas être négligé.

3.3.2.2. La situation avec le péage de pointe

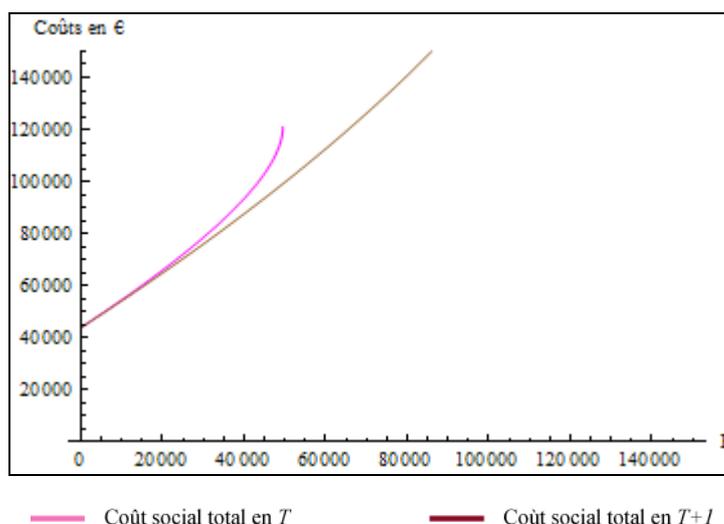
L'analyse suivante va nous permettre d'établir les différences engendrées par la mise en place d'un péage de pointe seul et celle d'un péage accompagné d'une politique modale, en fonction de la variation des coûts fixes F .

GRAPHIQUE N°3.11 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur des coûts fixes



La mise en place d'un péage de pointe seul, comme nous l'avons déjà précisé, n'a aucune influence sur la part des automobilistes par rapport à la situation d'équilibre. En revanche, l'association du péage de pointe avec une politique de redistribution entraîne une réduction de la part des automobilistes. Nous constatons que, non seulement la part des usagers des TC à la période $T+I$ est toujours plus élevée que celle de période T , mais aussi que la part des usagers des TC, en $T+I$, reste supérieure à celle des automobilistes pour une valeur assez élevée des coûts fixes (83 060 €). La raison est que, pour des coûts fixes identiques aux deux périodes, la politique modale de redistribution à la période $T+I$ vient diminuer le coût d'un déplacement en TC, incitant les individus à les utiliser.

GRAPHIQUE N°3.12 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur des coûts fixes

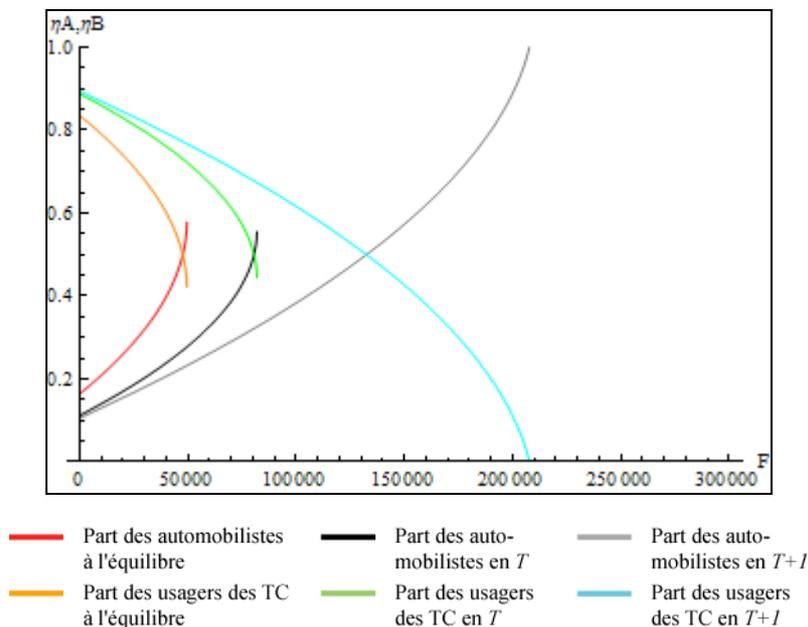


Le graphique n°3.12 nous montre qu'avec un unique péage de pointe, le coût social total se révèle être plus élevé qu'avec la combinaison du péage et de la politique modale de redistribution. Nous obtenons, notamment, lorsque les coûts fixes F tendent vers une valeur nulle, un coût social total à la période T de 44 054,5 € et celui à la période $T+I$ de l'ordre de 43 986,1 €. Lorsque les coûts fixes augmentent, l'écart entre les deux coûts sociaux totaux s'élève. Nous pouvons alors conclure à la pertinence de l'association du péage de pointe à la politique modale incitative dans l'objectif de minimisation du coût.

3.3.2.3. La situation avec le péage uniforme lors des périodes de pointe

Les graphiques qui suivent représentent les différents cas analysés avec un péage uniforme de pointe associé ou non à une politique modale incitative toujours par rapport à l'évolution de la valeur des coûts fixes F .

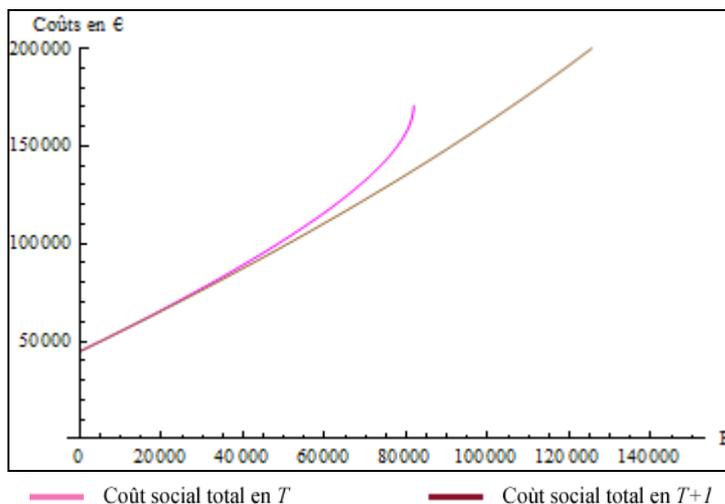
GRAPHIQUE N°3.13 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur des coûts fixes



On observe, pour toute valeur des coûts fixes, que la mise en place d'une politique de régulation quelle qu'elle soit (péage ou péage avec politique modale) engendre une réduction de la part des automobilistes par rapport à la situation d'équilibre initiale.

Lors de l'instauration d'un péage uniforme de pointe, la part des usagers des TC est supérieure à celle des automobilistes pour une valeur des coûts fixes F comprise dans l'intervalle $[0, 80525.8]$. Cet intervalle devient celui-ci $[0, 132477]$ lorsque l'on ajoute la politique modale incitative au péage. En effet, la part des usagers des TC de la période $T+I$ est supérieure à celle de la période T , et reste supérieure à celle des automobilistes jusqu'à une valeur très élevée des coûts fixes. Encore une fois, la politique modale incitative fonctionne, dans la mesure où la redistribution des recettes vers les TC engendre une diminution du coût du déplacement en TC. Ainsi, pour la même valeur des coûts fixes (F) aux deux périodes, la part des usagers des TC sera plus élevée à la période $T+I$.

GRAPHIQUE N°3.14 : Coût social total, en T et en $T+I$, en fonction de la valeur des coûts fixes

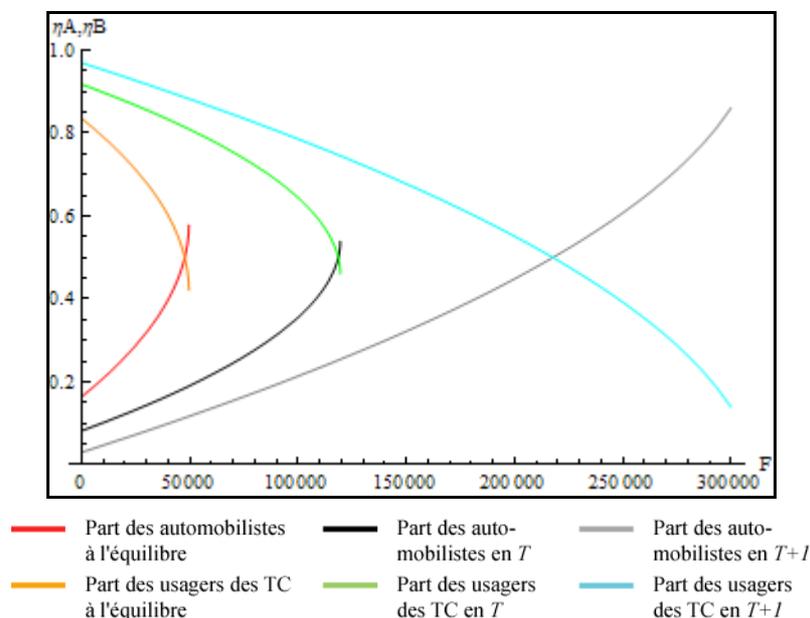


Une fois de plus, on peut observer, à travers ce graphique, que le coût social total de la période $T+I$ est inférieur à celui de la période T , quelle que soit la valeur prise par les coûts fixes des TC. On trouve notamment un coût social total à la période T de 46 130.6 €, et à la période $T+I$ de 44 874.6 €, lorsque la valeur des coûts fixes tend vers zéro. La combinaison des outils réduit le coût social total.

3.3.2.4. La situation avec le péage uniforme

Il convient de réaliser une analyse similaire aux précédentes avec le péage uniforme. Les graphiques suivants montrent les différentes situations en fonction de la valeur prise par les coûts fixes F .

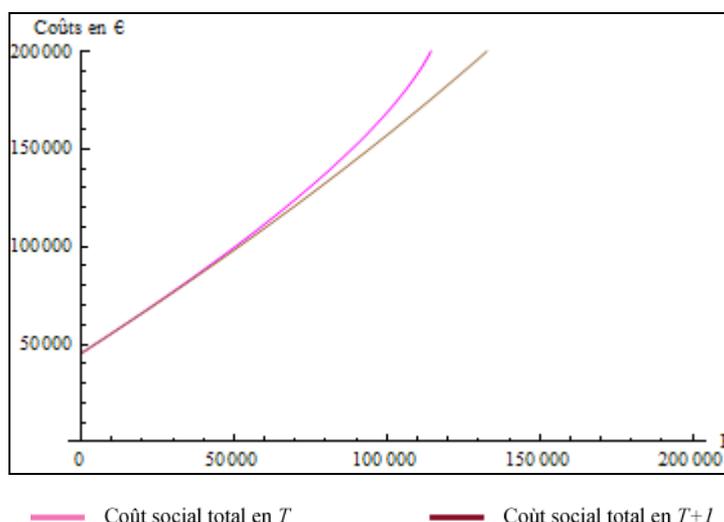
GRAPHIQUE N°3.15 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur des coûts fixes



Une nouvelle fois, nous observons une réduction de la part des automobilistes lors de l'instauration du péage ou du péage accompagné de la politique modale, quelle que soit la valeur des coûts fixes, par rapport à la situation d'équilibre.

Par ailleurs, nous remarquons qu'avec un péage uniforme, la part des usagers des TC est supérieure à celle des automobilistes pour une valeur des coûts fixes F comprise entre 0 et 118 539 €. Avec la mise en place de la politique de redistribution des recettes du péage uniforme, la part des usagers des TC est non seulement supérieure à celle de la période T , mais elle est également supérieure à celle des automobilistes jusqu'à ce que les coûts fixes atteignent 217 739 €. Le péage uniforme avec la politique modale engendre une réduction importante de la part des automobilistes. Pour une valeur des coûts fixes identique aux deux périodes, la part des usagers des TC est plus élevée à la période $T+I$, puisque les recettes du péage uniforme viennent réduire le coût d'un déplacement en TC.

GRAPHIQUE N°3.16 : Coût social total en fonction de la valeur des coûts fixes



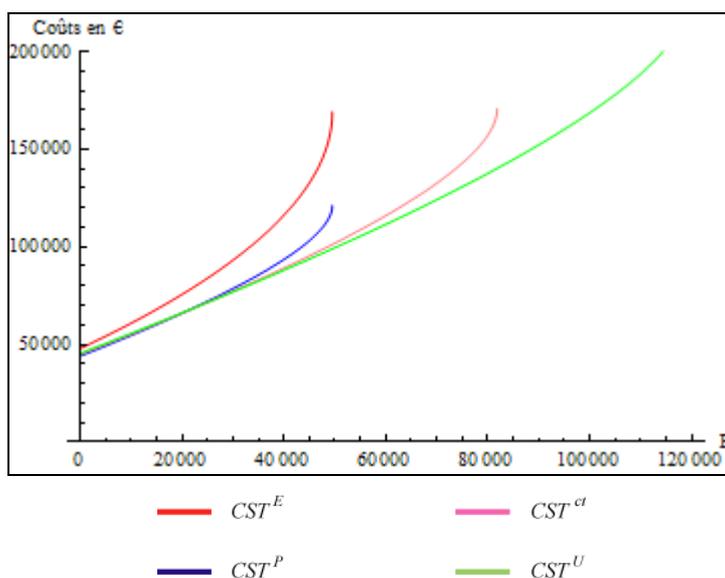
Le graphique nous indique que le coût social de la période T est légèrement supérieur à celui de la période $T+1$. Effectivement, nous constatons que si les coûts fixes tendent vers zéro, alors le coût social total en T est de l'ordre de 45 404,3 €, et celui de la période $T+1$ de 45 383,8 €. Cependant, plus la valeur des coûts fixes F est élevée, plus l'écart entre les deux coûts s'accroît. Le coût social total se trouve réduit lors de la période $T+1$, c'est-à-dire lors de la combinaison des deux politiques.

- *Résultat 4 : La politique modale de redistribution des recettes vers les TC a les effets attendus. D'une part, elle favorise l'utilisation des TC à la période $T+1$ par rapport à la période T , dans la mesure où elle vient diminuer le coût d'un déplacement en TC. D'autre part, elle permet d'avoir des coûts fixes plus élevés qu'à la période T sans « pénaliser » les usagers.*
- *Résultat 5 : Le péage, sous tout type de forme, accompagné de la politique modale de redistribution, minimise le coût social total par rapport au péage seul, quelle que soit la valeur des coûts fixes des TC.*

3.3.2.5. Comparaison générale

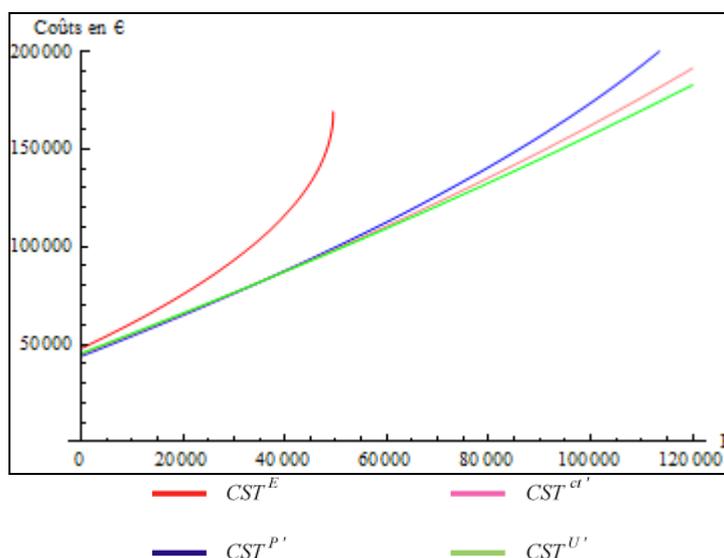
Sur la base de ces différentes analyses, nous élaborons une comparaison générale de l'efficacité de chaque péage aux périodes T et $T+1$, lors de la variation des coûts fixes F des TC.

GRAPHIQUE N°3.17 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur des coûts fixes pour la période T



Le graphique n°3.17 montre que les coûts sociaux totaux pour une valeur de F relativement faible (inférieure à 21 500 €) sont très proches. Cependant, on observe que la courbe du coût social total dans le cas d'un péage de pointe coupe non seulement celle du coût social total lors d'un péage uniforme CST^U , mais aussi celle du péage uniforme de pointe CST^{ct} . Cela signifie que l'ordre des coûts, obtenu avec une valeur des coûts fixes relativement faible ($CST^E > CST^{ct} > CST^U > CST^P$), est modifié au fur et à mesure que les coûts fixes F augmentent. Les coûts sociaux totaux à la période T sont très sensibles à la valeur des coûts fixes des TC. Pour une valeur de F élevée, on remarque que le péage uniforme est le plus efficace puisqu'il minimise le coût social total.

GRAPHIQUE N°3.18 : Coûts sociaux totaux à la période $T+I$ en fonction de la valeur des coûts fixes



Mis à part le coût social à l'équilibre qui se révèle être plus élevé, ce graphique indique des valeurs de coûts sociaux totaux très proches, lorsque F est compris entre 0 et 60 000 €. En outre, plus la valeur de F est élevée, plus les coûts divergent. Cependant, la politique modale atténue les effets de distorsion entre les coûts venant du péage seul. Dans cette situation, on remarque également que l'ordre des coûts sociaux totaux, obtenu avec une valeur des coûts fixes faible ($CST^E > CST^{U'} > CST^{ct'} > CST^{P'}$), change lorsque F est très élevé. Par exemple, lorsque F s'élève à 60 000 €, le péage de pointe associé à la politique modale se révèle être le moins efficace, alors que le péage uniforme avec la politique de redistribution devient optimal. En effet, pour des coûts fixes très élevés, l'incitation à utiliser les TC doit être forte. Le péage uniforme génère les plus importantes recettes, aussi l'impact de la politique de redistribution des recettes sera-t-il plus conséquent qu'avec les autres péages.

- *Résultat 6* : La mise en place de la politique modale de redistribution des recettes vers les TC permet de maintenir l'efficacité du péage de pointe (par rapport aux autres péages) dans un intervalle de coûts fixes plus important.
- *Résultat 7* : Si les coûts fixes sont très élevés, le péage uniforme, associé ou non à la politique modale, devient le plus efficace dans la minimisation du coût total.

Au vu des résultats des applications numériques et des simulations réalisées, plusieurs conclusions peuvent être établies.

Premièrement, nous avons montré l'influence de la valeur du temps sur les politiques de régulation étudiées. On a constaté que le péage, quelle que soit sa forme, associé à la politique modale, accentue le transfert modal des automobilistes vers les TC. L'efficacité de la combinaison de la politique modale avec le péage de pointe ou le péage uniforme de pointe est particulièrement prononcée lorsque la valeur du temps est faible. Nous avons également montré que le péage, associé à la politique de redistribution, minimisait le coût social total par rapport à un péage utilisé seul. Cependant, une valeur du temps très élevée atténue les différences entre les politiques mises en place. Enfin, nous avons mis en exergue le fait que le péage de pointe, avec ou sans politique modale, est le plus efficace, puisqu'il minimise le coût social total. Toutefois, il faut souligner que le péage uniforme permet la plus grande réduction de la part des automobilistes, alors que le péage de pointe n'a aucune influence sur elle, puisque son objectif est simplement de fluidifier le trafic automobile.

Deuxièmement, nous avons mis en avant l'impact des coûts fixes des TC sur les différentes politiques analysées. Nous avons montré que la politique modale de redistribution des recettes du péage vers les TC a les effets souhaités. En effet, elle favorise le partage modal vers les TC, puisqu'elle permet de diminuer le coût d'un déplacement en TC tout en ayant des coûts fixes très élevés. Ensuite, nous avons mis en exergue que, quelle que soit la valeur des coûts fixes des TC, l'association du péage et de la politique modale minimise le coût social total par rapport à l'utilisation d'un péage seul. Enfin, nous avons déterminé le fait que la valeur des coûts fixes influence l'efficacité des différents péages, contrairement à la valeur du temps. Pour une valeur des coûts fixes faible (inférieure à 21 500 €), le péage de pointe est le plus efficace. L'ajout de la politique de redistribution permet de maintenir son efficacité pour une valeur des coûts fixes plus élevée (environ 30 000 €). Cependant, pour une valeur élevée des coûts fixes (supérieure à 21 500 €) à la période T , le péage uniforme est l'outil le plus efficace, dans la mesure où il minimise le coût social total. Comme nous l'avons souligné précédemment, en présence de coûts fixes des TC très élevés, l'incitation à utiliser les TC doit être importante, car le coût du déplacement en TC est cher. Comme

le péage uniforme génère les recettes les plus élevées, l'impact de leur redistribution vers les TC sera plus conséquent qu'avec les autres péages.

Conclusion du chapitre 3

La prise de conscience par les autorités publiques de l'impact environnemental provoqué par l'utilisation de l'automobile en zone urbaine a permis de développer des axes prioritaires dans les politiques de transport urbain. *Accentuer* et *inciter au transfert modal* sont des termes récurrents dans les plans de déplacements urbains (PDU) des villes françaises, et même dans les politiques européennes de transports. L'importance donnée aux politiques modales incitatives nous a conduits à les intégrer dans un modèle de goulot d'étranglement classique.

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux extensions au modèle de file d'attente classique, afin de prendre en compte l'aspect environnemental et la dimension durable d'une politique de transport urbain.

La première section de ce chapitre (§ 3.1) expose les caractéristiques des extensions apportées : celles du coût environnemental de l'automobile et celles de la politique incitative favorisant le report modal.

La deuxième section (§ 3.2) présente la modélisation. En nous appuyant notamment sur le modèle du partage modal de Danielis et Marcucci (2002), nous avons intégré deux nouvelles hypothèses. La première concerne le coût environnemental de l'automobile et a été ajoutée directement au coût social total. La seconde constitue la mise en place de la politique modale incitative. Nous avons développé une méthodologie en deux périodes. Dans un premier temps, nous avons supposé que le péage, décliné sous trois formes différentes, est instauré à la période T . Dans un second temps, nous avons intégré, à la période $T+1$, la politique de redistribution des recettes du péage vers les TC, afin de diminuer le tarif de ces derniers. Nos résultats analytiques mettent en avant une réduction du nombre d'automobilistes par le biais d'un péage uniforme ou d'un péage uniforme de pointe, mais non par celui de pointe. Cependant, à la période $T+1$, il est montré que l'association de la politique modale de redistribution des recettes au péage, quel qu'il soit, réduit le coût social total par rapport à celui à l'équilibre. Le modèle théorique prouve que l'outil économique et la politique de redistribution sont complémentaires, dans la mesure où le transfert modal des automobilistes vers les TC

est intensifié, et efficace dans le sens où le coût social total est minimisé par rapport à la situation d'équilibre.

Afin d'étayer nos résultats théoriques, nous avons eu recours à des simulations numériques, présentées dans la troisième section (§ 3.3). Les simulations ont mis en évidence, d'une part, l'importance de la prise en compte du coût environnemental dans le coût total collectif et, d'autre part, la réussite de l'association du péage et de la politique modale.

Nous avons effectué des tests de sensibilité relatifs aux deux principales variables influençant les résultats de notre modèle : la valeur du temps et la valeur des coûts fixes des TC. Les résultats des tests mettent en avant que, quelle que soit la valeur du temps, le péage de pointe, associé ou non à la politique modale, est l'outil le plus efficace pour minimiser le coût social total. Cependant, une valeur du temps très élevée atténue les effets des politiques de régulation. Il faut souligner le fait que la mise en place d'une politique modale avec le péage urbain accentue le partage modal en faveur des TC par rapport à une situation avec un péage seul. Ce constat s'observe particulièrement lorsque la valeur du temps est relativement faible, pour les péages de pointe et uniforme de pointe. Les tests de sensibilité relatifs aux coûts fixes des TC dégagent des conclusions quelque peu différentes. En effet, l'efficacité des péages diffère selon la valeur des coûts fixes des TC. Le péage uniforme se révèle être plus efficace que celui de pointe pour des coûts fixes élevés. En revanche, pour des coûts fixes des TC relativement faibles, le péage de pointe est le plus efficace. De plus, l'instauration d'une politique de redistribution permet de maintenir son efficacité sur un intervalle de coûts fixes plus important. Toutefois, quelle que soit la valeur des coûts fixes des TC, la politique optimale s'obtient par la combinaison du péage et de la politique de redistribution des recettes vers les TC.

Finalement, ce troisième chapitre a mis en valeur la vertu environnementale du péage urbain et le succès de l'association du péage avec une politique modale. Ce résultat pourra orienter le régulateur dans ses choix de politiques de transport durable.

CHAPITRE 4

MISE EN PERSPECTIVE D'UNE MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE PEN POUR LES AUTOMOBILISTES

Introduction

La piste des permis d'émissions négociables (PEN), comme outil économique favorisant la mobilité durable, est de plus en plus évoquée dans les recherches relatives aux politiques de transport urbain (cf. CNT, 2001). Néanmoins, il apparaît que cet instrument appliqué aux automobilistes demeure actuellement sans expérience.

Le manque d'applications d'un outil économique peut venir de fondements théoriques peu développés, incomplets, voire inexistants. Cela engendre une méfiance des décideurs publics envers l'instrument et entraîne une mise à l'écart de celui-ci dans les expérimentations à l'échelle d'une ville. Le chapitre 2 a souligné cette insuffisance de justifications théoriques concernant le fonctionnement d'un système de PEN appliqué aux automobilistes, malgré l'existence de trois principales modélisations de Daganzo (1995), de Goddard (1997) et de Raux et Marlot (2005).

Ainsi, pour compléter et finaliser l'analyse comparative entre les instruments de péage urbain et de permis d'émissions, menée dans ce travail de recherche, l'élaboration d'une modélisation théorique relative à l'instrument des PEN pour les automobilistes est

indispensable. C'est pourquoi l'analyse du fonctionnement d'un système de PEN, internalisant les externalités négatives de l'automobile, est au cœur de ce quatrième chapitre.

La modélisation est, de toute évidence, un exercice intéressant mais complexe, malgré son objectif de simplifier les phénomènes économiques. C'est pour cette raison que, dans une première section (§ 4.1), nous proposons, avant de concevoir et de présenter la formalisation, les principales hypothèses à retenir concernant les caractéristiques d'un système de marché de PEN.

La conception d'un cadre microéconomique de référence constitue l'objectif de la deuxième section (§ 4.2). Nous élaborons une justification théorique de cet outil appliqué aux automobilistes d'une zone urbaine en puisant nos sources de réflexions dans les formalisations d'un système de PEN appliqué aux entreprises et en s'appuyant sur des éléments de la microéconomie du consommateur et de l'économie de l'environnement. Notre raisonnement part de l'hypothèse suivante : nous supposons que l'autorité régulatrice d'une ville met en place un système de PEN pour limiter le nombre de kilomètres parcourus en automobile, afin de réduire la pollution émise. Nous utilisons une fonction d'utilité C.E.S. (*Constant Elasticity of Substitution*) et déterminons une situation d'équilibre de référence où l'automobiliste n'est soumis à aucune réglementation environnementale. Nous intégrons ensuite l'instrument économique afin de procéder à l'analyse de la situation où l'automobiliste se voit imposer un quota de kilomètres à parcourir. Non seulement nous étudions les quantités et les prix d'équilibre révélés par le marché de PEN, mais nous analysons aussi les effets de la mise en place de cet outil sur le bien-être social, afin de trouver la quantité optimale de permis à allouer. Dans le cadre de notre analyse, nous présentons tous les aspects du fonctionnement d'un système de PEN appliqué aux automobilistes, ce qui, à notre connaissance, n'a encore jamais été réalisé.

Nous effectuons et présentons des simulations numériques au cours de la troisième section (§ 4.3). Ces dernières permettent d'étayer les résultats obtenus par notre modèle théorique. Ainsi, nous testons la sensibilité des variables significatives de la modélisation et analysons leur influence sur les différentes valeurs d'équilibre trouvées. Nos simulations appuient un de nos résultats théoriques : une quantité trop élevée de PEN sur le marché entraîne l'inefficacité du système de régulation mis en place.

À partir du moment où un développement de modélisation voit le jour, il semble utile et nécessaire de rechercher les améliorations qui peuvent y être apportées. C'est ainsi que nous intégrons, dans la quatrième section (§ 4.4), deux extensions. La première correspond à une contrainte kilométrique, qui permet de tenir compte de la réalité des déplacements en ville. La seconde représente la consommation d'un bien composite. Elle a pour but de rendre possible la substitution des dépenses en transport vers un autre bien. Nous analysons les effets de ces ajouts sur les résultats du modèle de référence.

4.1. Principales hypothèses et caractéristiques du fonctionnement du système de PEN appliqué aux automobilistes

Avant de s'engager dans la formalisation, il faut nécessairement bien identifier toutes les caractéristiques du système de régulation qui sera mis en place. De ce fait, les différentes hypothèses retenues, comme l'identification de la cible et de la variable d'action (§ 4.1.1), l'allocation des permis (§ 4.1.2) ou encore la technologie utilisée (§ 4.1.3), sont exposées et explicitées à travers cette première section.

4.1.1. La cible et identification de la variable d'action

Le système de marché de permis peut se décliner sous plusieurs formes et concerner différents types d'émissions, selon l'objectif souhaité.

Comme nous l'avons dit dans le chapitre 2, les systèmes de PEN ont été appliqués pour diverses raisons. Si le Système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE) vise à réduire les émissions de CO₂ des entreprises européennes, le programme écopoint, quant à lui, concernait les émissions de NO_x des poids lourds. Ainsi, les permis peuvent prendre différentes formes. Par exemple, les quotas du programme écopoint sont calculés selon les caractéristiques du camion et le nombre de kilomètres parcourus, alors qu'un permis du programme SCQE équivaut à une tonne de CO₂. C'est pourquoi, pour notre modélisation, il est capital d'identifier et de déterminer la nature du facteur permettant d'agir sur les externalités visées par l'instauration du système de PEN.

L'objectif de notre système de PEN est de réduire la pollution automobile à travers la diminution de l'utilisation de la voiture particulière. Il existe plusieurs variables incitatives par lesquelles nous pouvons agir afin de réduire les externalités environnementales provoquées par l'automobile. En effet, l'économie du transport recense cinq variables d'action : le nombre de kilomètres parcourus, le temps de conduite, les émissions unitaires (type de véhicule utilisé), la consommation de

carburant et l'usage des sols. Le nombre de kilomètres parcourus et la consommation finale de carburant sont considérés comme les deux facteurs les plus appropriés à une application décentralisée du système de PEN sur les automobilistes, et qui ont le plus d'impact sur les externalités que nous voulons prendre en compte.

D'un côté, l'étude de Verhoef *et al.* (1997) nous indique que les externalités environnementales, mais aussi le bruit, les accidents et la congestion, sont étroitement liés au nombre de kilomètres parcourus en automobile. Au vu de cette forte corrélation entre le nombre de kilomètres parcourus et les différentes externalités, il paraît alors évident d'appliquer un système de PEN sur les automobilistes par le biais du kilométrage. Cependant, comme le souligne Verhoef *et al.* (1997), le contrôle du nombre de kilomètres semble être pertinent, mais difficile à mettre en place.

D'un autre côté, Raux et Marlot (2005) et Raux (2007a) mettent en évidence la consommation finale de carburant comme levier d'action, avec pour objectif de réduire les gaz à effet de serre et la pollution locale. Néanmoins, il est reconnu que ce moyen d'action a peu ou aucun impact sur la congestion. Raux (2007a) montre que la consommation finale de carburant, ainsi que le nombre de kilomètres parcourus, entraînent un rationnement de la mobilité. Cependant, Raux (2007a) justifie le choix d'agir sur la consommation finale de carburant dans la mesure où elle engendre une incitation à la réduction des émissions plus prononcée que le nombre de kilomètres parcourus. En outre, pénaliser la teneur en CO₂ du carburant encourage les automobilistes à investir dans des véhicules propres ou moins polluants.

À l'issue de l'analyse de ces éléments, nous avons finalement déterminé le nombre de kilomètres parcourus comme variable d'action pour notre modèle. Ce choix a été guidé par son efficacité à réguler l'externalité de pollution et pour son impact sur les autres nuisances. Par ailleurs, nous supposons, comme pour le péage urbain, que le système de PEN est instauré dans un périmètre urbain restreint. Ainsi, les individus ont accès à un mode de substitution à l'automobile, ce qui atténue le problème de rationnement de la mobilité relevé par Raux (2007a). De plus, nous considérons, dans notre modélisation, des transports collectifs non polluants comme mode alternatif à la voiture.

Après avoir précisé notre choix d'utiliser le nombre de kilomètres parcourus dans notre système de marché de PEN appliqués aux automobilistes, nous cherchons maintenant à savoir comment vont être alloués les permis d'émissions.

4.1.2. L'allocation des permis d'émissions

En économie de l'environnement, on distingue deux principales manières de distribuer les permis d'émissions. La première façon est une distribution gratuite de ceux-ci. Dans ce cas, la règle de répartition la plus utilisée repose sur une allocation au prorata des émissions passées : nous parlons alors de système *grandfathering*. La deuxième manière est de distribuer les permis par une vente aux enchères. Dans ce cas, l'autorité régulatrice vend les permis aux pollueurs les plus offrants. Ce système limite les échanges entre pollueurs sur le marché, dans la mesure où chaque pollueur a déjà réalisé les arbitrages dits « pollution-achats » lors des enchères initiales.

En économie des transports, la question de l'allocation de permis, si un système de PEN est préconisé, est peu traitée. Nous pouvons néanmoins citer quelques pistes de recherche récemment développées. Dans le système de PEN étudié par Kockelman et Kalmanje (2005) et présenté dans la section (§ 2.3.1) du chapitre 2, les automobilistes reçoivent gratuitement une allocation monétaire permettant de circuler sur les routes soumises au péage de congestion. Ainsi, deux solutions se dessinent : si les crédits sont totalement utilisés, les automobilistes devront acquitter le montant du péage ; s'ils n'ont pas tout employé, ils pourront les garder ou les vendre. Le problème d'allocation des permis est aussi traité dans l'étude de Raux (2007b). Son questionnement porte non seulement sur la manière d'allouer les permis (par un système d'enchères ou gratuitement), mais aussi sur la sélection des individus recevant ces allocations. D'un côté, le système d'enchères assure l'efficacité économique, car il révèle les préférences des agents pollueurs. D'un autre côté, ce système supprime le principal avantage d'acceptabilité de l'instrument des permis à cause de l'achat de ces derniers dès le départ. En outre, si une allocation gratuite des PEN est décidée, il faut déterminer à qui les donner : les possesseurs de voiture ou les habitants de la ville. Si une allocation gratuite est réalisée auprès des habitants, cela revient, comme le mentionne Raux (2007b), « à compenser les habitants pour les conséquences de la congestion et de la

pollution qu'ils subissent ». En effet, certains des habitants ne possèdent pas de voiture ou utilisent des modes doux de déplacements.

Dans notre modèle, nous supposons une allocation gratuite des permis afin de garantir la mobilité de tous. Par ailleurs, comme cela a été signalé par Raux (2007b), l'allocation gratuite constitue le principal avantage relatif à l'acceptabilité de l'instrument des PEN comparé à celui du péage urbain classique. Nous supposons une allocation au prorata des émissions passées. Cette distribution concerne les N individus devant se rendre au travail dans le centre-ville. Ce système vise les déplacements domicile-travail. Les individus n'utilisant que les TC pourront alors vendre les PEN dont ils disposent. Les individus dont la quantité de PEN n'est pas épuisée pourront vendre le surplus (ou le garder pour une utilisation ultérieure). Enfin, les agents ayant utilisé tous leurs permis et voulant continuer à utiliser leur véhicule pourront acheter des permis supplémentaires sur le marché.

Les principales caractéristiques de la distribution des permis viennent d'être déterminées. Nous nous centrons maintenant sur la recherche d'une technologie adéquate pour assurer le bon fonctionnement du système de PEN.

4.1.3. Technologie de contrôle et mise en place

Le système de PEN, que nous modélisons, est mis en place afin de réduire les émissions polluantes de l'automobile *via* le contrôle du nombre de kilomètres parcourus. C'est pourquoi un système de vérification du kilométrage des automobilistes doit être instauré.

Une nouvelle technologie, appelée puce RFID (*Radio frequency identification*), est actuellement en train de se développer. Ce système consiste à équiper les automobiles de ces puces RFID qui transmettent les informations concernant le véhicule, comme le nombre de kilomètres parcourus, à des récepteurs automatiques appelés EVR (*Electronic vehicle registration*). Dès lors, nous pouvons imaginer la mise en place de ce système dans la zone urbaine soumise au marché des PEN. Dans ce contexte, les véhicules des individus seraient équipés de puces, et la zone délimitée posséderait des

bornes d'entrée et de sortie (comme pour le péage urbain) équipées de lecteurs EVR enregistrant le nombre de kilomètres parcourus par l'automobile dans l'aire soumise au système de PEN. Cependant, ce système peut soulever le débat des libertés individuelles dans la mesure où il est capable de suivre à la trace les déplacements de tous les véhicules. Nous pouvons citer l'exemple de l'archipel des Bermudes, peuplé de 63 000 habitants et de 47 000 voitures pour une surface de 55 kilomètres carrés, qui a mis en œuvre ce système de puces afin de contrôler les fraudes émanant des récentes restrictions imposées à la possession d'automobiles.

Toutefois, nous ne préconisons pas cet unique moyen de contrôle, dans la mesure où le problème du choix de la technologie d'un système assurant un contrôle efficace relève plus particulièrement des compétences de l'ingénieur que de celles de l'économiste. Cependant, l'existence de ces nouvelles technologies prouve que vouloir contrôler le nombre de kilomètres parcourus n'est peut être pas simple à mettre en place, mais qu'il n'est pas utopique.

Les hypothèses essentielles concernant les caractéristiques du fonctionnement du système de marché de PEN ont été posées. Ainsi, nous avons en notre possession tous les éléments nécessaires pour élaborer la formalisation.

4.2. Le modèle

Nous considérons N consommateurs de transport indexés $i=1,\dots,N$. Le consommateur représentatif i peut se déplacer soit en voiture particulière notée V_i qui produit des émissions polluantes (externalités négatives), soit en transports collectifs TC_i supposés non-polluants. Nous posons une fonction d'utilité pour le consommateur $U_i(V_i, TC_i)$ et nous considérons que V_i et TC_i sont exprimés en kilomètres parcourus. Nous supposons que U_i est croissante et quasi concave en V_i et TC_i , malgré une préférence prononcée pour l'utilisation de l'automobile. Les deux modes de transport sont parfaitement substituables, ce qui engendre deux solutions en coin : $U_i(V_i, 0) > 0$ et $U_i(0, TC_i) > 0$. Nous posons R_{T_i} le revenu « transport » que l'agent i consacre à ses

déplacements, p_v le coût de la voiture par kilomètre parcouru représentant les dépenses d'entretien, de carburant et d'assurance, et enfin p_{TC} le prix des transports collectifs par kilomètre parcouru. Le revenu transport correspond à $R_T = R_i - M_i$ où R_i est le revenu total de l'individu i et M_i correspond aux dépenses de consommation en bien composite. Nous considérons dans un premier temps R_T comme une donnée propre à chaque individu, mais nous relâcherons cette hypothèse dans l'extension du modèle où le revenu transport pourra varier avec la consommation de M_i (cf. § 4.4).

Le cadre de base de notre modèle étant défini et posé, l'équilibre de référence, c'est-à-dire sans régulation environnementale (§ 4.2.1), ainsi que la situation avec la mise en place du système de marché de PEN (§ 4.2.2), vont d'abord être déterminées et comparées. Ensuite, nous analyserons l'équilibre révélé par le marché des PEN (§ 4.2.3), puis les effets sur le bien-être social engendré par l'instauration de cet outil (§ 4.2.4).

4.2.1. L'équilibre sans régulation environnementale

Nous considérons, comme cas de référence, une situation où l'autorité régulatrice de la ville n'impose aucune réglementation sur l'utilisation de la voiture. Cette section décrit la situation d'équilibre avant la mise en place d'un instrument économique tel que les permis d'émissions négociables.

Nous choisissons la fonction d'utilité suivante : $U_i(V_i, TC_i) = [a_i V_i^\rho + (1 - a_i) TC_i^\rho]^\frac{1}{\rho}$ où a_i représente la part du budget transport que l'agent i consacre à l'utilisation de sa voiture et $a_i > \frac{1}{2}$, puisque l'agent préfère utiliser sa voiture plutôt que les transports collectifs. La raison principale de l'utilisation de la forme C.E.S. (*Constant Elasticity of Substitution*) est qu'elle englobe une famille très large de formes traditionnelles selon le niveau d'élasticité de substitution noté σ , avec $\sigma = \frac{1}{1 - \rho}$, (la démonstration est présentée en annexe 4.1). Nous effectuerons des tests de sensibilité relatifs au

paramètre ρ , puisqu'il joue un rôle important dans le modèle. Cette forme C.E.S. respecte les conditions suivantes : elle est croissante et quasi concave en V_i et TC_i . L'agent i cherche à maximiser son utilité sous la contrainte budgétaire :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max} U_i(V_i, TC_i) = [a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho]^{\frac{1}{\rho}} \\ \text{s.c. } p_V V_i + p_{TC} TC_i \leq R_i \quad (\lambda) \\ \text{s.c. } V_i \geq 0 \quad (\mu_V) \\ \text{s.c. } TC_i \geq 0 \quad (\mu_{TC}) \end{array} \right\} \quad (4.1) \text{ avec } i = 1, \dots, N$$

Soit le Lagrangien associé :

$$L = [a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho]^{\frac{1}{\rho}} - \lambda (p_V V_i + p_{TC} TC_i - R_i) + \mu_V V_i + \mu_{TC} TC_i \quad (4.2)$$

Suivant ce programme, trois situations peuvent refléter les déplacements domicile-travail des individus. Tout d'abord, nous pouvons considérer que l'individu utilise les deux moyens de transport : la voiture et les transports collectifs, pour effectuer le trajet. Dans ce cas, nous obtenons une solution intérieure à la maximisation (cas n°1). La deuxième situation est celle où les transports collectifs ne sont pas utilisés. Ce cas peut se vérifier notamment lorsque les TC sont considérés comme trop chers ou bien qu'il n'y ait pas, à proximité du lieu d'habitation, de station de TC. Par conséquent, l'individu utilisera un seul moyen de transport : la voiture. Cette situation est la première solution en coin du programme (cas n°2). Enfin, le dernier cas analysé concerne les individus utilisant seulement les transports collectifs. Cette situation renvoie, par exemple, aux individus ne possédant pas de voiture ou disposant d'un arrêt de transports collectifs à proximité de leur lieu d'habitation (et/ou de travail). Cela représente la deuxième solution en coin du programme (cas n°3). Cependant, ces trois cas exposés n'englobent pas toutes les solutions dont dispose un individu pour faire un déplacement domicile-travail. En effet, on néglige les autres modes de transport comme le vélo, la marche, etc. Néanmoins, l'avantage de leur analyse est d'obtenir un aperçu des possibilités pouvant être envisagées.

4.2.1.1. Analyse des équilibres possibles entre les modes

Nous présentons dans cette sous-section les trois équilibres possibles entre les modes de transport.

➤ **CAS N°1** : Les deux modes de transport sont utilisés

Comme nous l'avons mentionné précédemment, si tous les modes de transport sont utilisés, à savoir la voiture V_i et les transports collectifs TC_i , nous obtenons une solution intérieure telle que $\mu_V = 0$ et $\mu_{TC} = 0$, $V_i > 0$ et $TC_i > 0$.

Des deux conditions du premier ordre, dont les calculs sont présentés en annexe 4.2, nous déduisons le taux marginal de substitution suivant :
$$\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} = \frac{p_V}{p_{TC}} \quad (4.3)$$

Nous avons donc à l'optimum l'égalité entre le rapport des utilités marginales et le rapport des prix.

En prenant en compte que $\sigma = \frac{1}{1-\rho}$ et la condition (4.3), à l'équilibre, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs pour l'agent i sont les suivants :

$$V_i^* = \left(\frac{a_i}{p_V} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i}}{a_i^\sigma p_V^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.4a),$$

$$TC_i^* = \left(\frac{1-a_i}{p_{TC}} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i}}{a_i^\sigma p_V^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.4b)$$

où (*) correspond à la situation de référence (sans réglementation environnementale).

Pour l'ensemble des individus N , nous avons les relations suivantes :

$$V^* = \sum_{i=1}^N V_i^* \quad \text{et} \quad TC^* = \sum_{i=1}^N TC_i^*$$

Ainsi, l'équilibre de référence pour N individus est déterminé par :

$$V^* = \frac{1}{p_V^\sigma} \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i^\sigma R_{T_i}}{a_i p_V^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.5a)$$

$$TC^* = \frac{1}{p_{TC}^\sigma} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(1-a_i)^\sigma R_{T_i}}{a_i p_V^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.5b)$$

Ces résultats sont conformes à nos attentes. En effet, les kilomètres parcourus en voiture et ceux en transports collectifs, à l'équilibre, sont croissants avec le revenu des individus (R_{T_i}) et décroissants avec leur coût respectif (p_V et p_{TC}) (cf. annexe 4.3). Dans le cas où les deux modes de transport sont employés, si les prix augmentent, les kilomètres parcourus diminueront, alors que si le revenu des individus s'accroît, les kilomètres parcourus augmenteront.

➤ **CAS N°2** : Le mode des transports collectifs n'est pas utilisé : première solution en coin

Nous considérons, à travers ce deuxième cas, que l'individu utilise seulement sa voiture pour réaliser le trajet domicile-travail. Cette situation représente assez bien nos modes de vie actuels où environ 70% des déplacements domicile-travail se font uniquement en voiture particulière.

Si les transports collectifs ne sont pas utilisés, une solution en coin se profile. Cette situation renvoie au système
$$\begin{cases} TC_i = 0, & \mu_{TC} > 0 \\ V_i > 0, & \mu_V = 0 \end{cases}$$

Après avoir déterminé les conditions de premier ordre (présentées en annexe 4.2), nous obtenons le taux marginal de substitution (TMS) suivant :

$$\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} > \frac{p_V}{p_{TC}} \quad (4.6)$$

Cette relation (4.6) nous indique que le prix des transports collectifs est relativement trop élevé, compte tenu des préférences reflétées par le TMS. C'est pourquoi les TC ne sont pas utilisés. Par exemple, le simple fait que notre lieu d'habitation ne soit pas desservi par les TC peut entraîner une non utilisation de ceux-ci. En effet, si l'individu

doit utiliser un autre mode de transport pour accéder à un arrêt de TC, le prix du TC sera augmenté du coût engendré par l'utilisation de l'autre mode.

À l'équilibre, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs sont :

$$V_i^{*} = \frac{R_{T_i}}{p_V} \quad (4.7a) \quad \text{et} \quad TC_i^{*} = 0 \quad (4.7b)$$

Cette solution en coin, telle que $U_i^{*}(V_i^{*}, 0) > 0$, existe seulement pour une fonction d'utilité linéaire, *i.e* $\rho \rightarrow 1$. Nous verrons les conditions d'existence de cette solution dans la section suivante (§ 4.2.1.2), dans le paragraphe consacré à la forme linéaire.

Ainsi, pour les N individus, dans le cas où les transports collectifs ne sont pas utilisés, l'équilibre de référence est déterminé par :

$$V^{*} = \frac{1}{p_V} \sum_{i=1}^N R_{T_i} \quad (4.8a) \quad \text{et} \quad TC^{*} = 0 \quad (4.8b)$$

Cette relation (4.8a) nous apprend que le nombre de kilomètres parcourus en voiture, à l'équilibre, est croissant avec le revenu (R_{T_i}) et décroissant avec le coût de la voiture (p_V) (cf. annexe 4.3). De la sorte, si le revenu transport des individus augmente, alors le nombre de kilomètres parcourus en voiture augmentera et au contraire, si le coût de la voiture augmente, l'individu diminuera son nombre de kilomètres parcourus en voiture. Par ailleurs, nous remarquons qu'à l'équilibre, le budget transport des individus est totalement consacré à l'utilisation de la voiture, puisque les TC ne sont pas utilisés. Nous observons également qu'une augmentation du prix de la voiture peut conduire à la situation correspondant au cas n°1 où il existe un partage modal. De même, si le coût de la voiture augmente très fortement, on peut basculer au cas n°3 où seul le mode des TC est utilisé.

➤ **CAS N°3** : L'automobile n'est pas employée : deuxième solution en coin

Avec ce troisième cas, nous supposons que seuls les transports collectifs sont utilisés. Cette situation peut représenter le fait que l'individu ne possède pas de véhicule

particulier ou bien qu'il décide de ne prendre que les TC dans la mesure où son lieu de travail et son lieu d'habitation sont desservis par les TC. Cette situation renvoie au système suivant $\begin{cases} TC_i > 0, & \mu_{TC} = 0 \\ V_i = 0, & \mu_V > 0 \end{cases}$ signifiant que la voiture particulière n'est pas utilisée.

Nous obtenons le taux marginal de substitution : $\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} < \frac{P_V}{P_{TC}}$ (4.9) ; les

calculs sont présentés en annexe 4.2. Ce TMS nous indique que le prix de la voiture est trop élevé pour obtenir l'égalité entre le rapport des utilités marginales et celui des prix.

À l'équilibre, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs sont alors :

$$V_i^{*n} = 0 \quad (4.10a) \text{ et } TC_i^{*n} = \frac{R_{T_i}}{P_{TC}} \quad (4.10b)$$

Comme dans le cas précédent, cette solution en coin : $U_i^{*n}(0, TC_i^{*n}) > 0$ n'existe que pour des modes de transport parfaitement substituables, *i.e* $\rho \rightarrow 1$. Nous déterminerons les conditions d'existence de cette solution dans la section suivante (§ 4.2.1.2), dans le paragraphe consacré à la fonction d'utilité de la forme linéaire.

Pour l'ensemble des individus, l'équilibre est déterminé par :

$$V^{*n} = 0 \quad (4.11a) \text{ et } TC^{*n} = \frac{1}{P_{TC}} \sum_{i=1}^N R_{T_i} \quad (4.11b)$$

À l'équilibre, l'équation (4.11b) nous informe que le nombre de kilomètres parcourus en transport collectif est croissant avec le revenu (R_{T_i}) et décroissant avec le prix des TC (P_{TC}). Si une augmentation du prix des transports collectifs est appliquée, alors l'individu diminuera son nombre de kilomètres parcourus en TC. Au contraire, si le revenu est augmenté, les kilomètres parcourus en TC le seront aussi. L'automobile n'étant pas utilisée, l'individu consacre la totalité du budget transport à l'utilisation des transports collectifs. Par ailleurs, une augmentation du prix des TC peut conduire au cas

n°1 où les deux modes de transport sont utilisés. La situation peut également basculer au cas n°2 où seule l'automobile est utilisée, si la hausse du prix des TC est très élevée.

À travers l'analyse du cas général de la fonction C.E.S., nous avons exposé et déterminé trois situations possibles d'utilisation de la voiture et des transports collectifs pour réaliser les déplacements domicile-travail. Ainsi, à l'équilibre, nous avons déterminé d'une part que l'utilisation de la voiture et celle des transports collectifs diminuent quand leur prix respectif augmente et d'autre part, que l'utilisation des deux modes augmente si le revenu de l'individu est augmenté. De plus, si l'un des modes n'est pas utilisé, le revenu de l'individu est consacré en totalité à l'utilisation de l'autre mode de transport. Nous avons également remarqué l'importance de l'influence des prix des modes de transport sur leur utilisation. Cependant, la fonction C.E.S. englobe des situations particulières, notamment en fonction des valeurs prises par le paramètre d'élasticité.

4.2.1.2. La substituabilité des modes de transport

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'identification du paramètre ρ est capitale dans l'analyse d'une fonction d'utilité C.E.S. Selon sa valeur, nous pouvons déterminer différentes formes traditionnelles de la fonction d'utilité telles que la forme Cobb-Douglas, la forme Leontief ou encore une simple forme linéaire. En outre, ces différents types de fonction d'utilité nous informent sur la nature de la substituabilité des modes de transport (telle que leur substituabilité ou leur complémentarité). Nous avons recensé trois principaux cas, que nous exposons et étudions.

- **Fonction Cobb-Douglas : Modes de transport imparfaitement substituables**
quand le paramètre ρ tend vers zéro : $\rho \rightarrow 0$

La condition, donnée par ρ tendant vers zéro, suppose que l'élasticité de substitution σ est toujours égale à l'unité. Cela implique, certes, une substituabilité entre les différents modes de transport, mais qui est considérée comme non parfaite. En effet, il n'existe pas de parfaite indifférence du consommateur, ce qui implique :
 $U_i(0, TC_i) = U_i(V_i, 0) = 0$.

À l'équilibre, le taux marginal de substitution déterminé par l'équation (4.3) devient alors le suivant :

$$\frac{a_i TC_i}{(1-a_i)V_i} = \frac{p_V}{p_{TC}} \quad (4.12)$$

La relation (4.12) représente les préférences déterminées par une fonction d'utilité de la forme Cobb-Douglas suivante : $U_i(V_i, TC_i) = V_i^{a_i} TC_i^{1-a_i}$. Cette forme de fonction suppose non seulement que la voiture peut remplacer les transports collectifs et inversement, mais elle implique aussi la positivité des deux modes de transport : $V_i > 0$ et $TC_i > 0$. Cette hypothèse semble assez restrictive et ne paraît pas se vérifier dans les déplacements domicile-travail dans la mesure où l'individu peut ne pas utiliser l'un des modes de transport. Nous étudions tout de même ce cas afin d'avoir un point de vue global de toutes les situations.

Avec ce type de fonction, le nouvel équilibre pour l'agent i est alors :

$$V_i^* = \frac{a_i R_{T_i}}{p_V} \quad (4.13a) \quad \text{et} \quad TC_i^* = \frac{(1-a_i) R_{T_i}}{p_{TC}} \quad (4.13b)$$

Pour les N individus, nous obtenons :

$$V^* = \frac{1}{p_V} \sum_{i=1}^N a_i R_{T_i} \quad (4.14a) \quad \text{et} \quad TC^* = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N (1-a_i) R_{T_i} \quad (4.14b)$$

Comme dans le cas général de la fonction C.E.S., où les deux modes de transport sont utilisés, les kilomètres parcourus en voiture, à l'équilibre, sont croissants avec le revenu et décroissants avec le coût de la voiture. Il en est de même pour les kilomètres parcourus en TC : à l'équilibre, ils sont croissants avec le revenu et décroissants avec leur prix (p_V) (cf. annexe 4.3). Cependant, nous soulignons que, dans cette situation, les modes de transport ne sont pas totalement substituables, puisque non seulement la voiture, mais aussi les transports collectifs doivent être utilisés, ce qui n'est pas nécessairement observé pour les déplacements domicile-travail.

➤ **Forme linéaire : Modes de transport parfaitement substituables**

quand le paramètre ρ tend vers l'unité : $\rho \rightarrow 1$

Si le paramètre ρ tend vers l'unité, alors le TMS déterminé par l'équation (4.3) devient : $\frac{a_i}{(1-a_i)} = \frac{p_V}{p_{TC}}$ (4.15). Cette relation représente le TMS d'une fonction d'utilité de forme linéaire impliquant la parfaite substituabilité entre l'automobile et les transports collectifs.

La relation (4.15) indique une utilisation des deux modes de transport sous la condition suivante : $a_i = \frac{p_V}{p_{TC} + p_V}$. Étant donné que nous supposons la saturation de la contrainte budgétaire, la courbe d'indifférence peut se confondre, à l'équilibre, avec cette dernière. Nous trouvons alors, à l'équilibre, une première solution de la forme suivante :

$$p_V V_i^* + p_{TC} TC_i^* = R_{T_i} \quad (4.16)$$

Deux solutions en coin peuvent être relevées. En effet, si $\frac{a_i}{(1-a_i)} > \frac{p_V}{p_{TC}}$, ce qui implique la condition suivante : $a_i > \frac{p_V}{p_{TC} + p_V}$, alors l'individu utilisera seulement son automobile. Les kilomètres parcourus en voiture particulière, à l'équilibre, sont de la forme : $V_i^* = \frac{R_{T_i}}{p_V}$. Cette quantité d'équilibre signifie que le nombre de kilomètres parcourus est décroissant avec le coût de l'automobile, mais croissant avec le revenu. Par ailleurs, nous remarquons que tout le revenu transport de l'individu est dépensé dans l'utilisation de l'automobile, puisque les TC ne sont pas utilisés. À l'inverse, si $\frac{a_i}{(1-a_i)} < \frac{p_V}{p_{TC}}$, impliquant la condition $a_i < \frac{p_V}{p_{TC} + p_V}$, alors on obtient la seconde solution en coin : l'individu utilise uniquement les transports collectifs. Le nouvel équilibre sera de la forme : $TC_i^* = \frac{R_{T_i}}{p_{TC}}$, montrant que le nombre de kilomètres

parcourus en transports collectifs est croissant avec le revenu et décroissant avec le prix. Finalement, nous obtenons à l'équilibre, pour les N individus, trois situations en fonction des combinaisons possibles d'utilisation des modes de transport, à savoir :

$$\text{Si les deux modes de transport sont utilisés : } p_V \sum_{i=1}^N V_i^* + p_{TC} \sum_{i=1}^N TC_i^* = \sum_{i=1}^N R_{T_i} \quad (4.17)$$

$$\text{Si la voiture seule est utilisée : } V^* = \frac{1}{p_V} \sum_{i=1}^N R_{T_i} ; \quad (4.18a) \text{ et } TC^* = 0 \quad (4.18b)$$

$$\text{Si les TC seuls sont utilisés : } V^* = 0 \quad (4.19a) \text{ et } TC^* = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N R_{T_i} \quad (4.19b)$$

Ces trois situations d'équilibre, représentées par les équations (4.17), (4.18a) et (4.19b), et venant de la forme linéaire de l'utilité, reflètent davantage la réalité que celles qui sont décrites par la forme Cobb-Douglas, dans la mesure où l'individu peut soit combiner les deux modes de transport, soit en utiliser un seul afin de faire le déplacement domicile-travail. Néanmoins, la substituabilité parfaite et linéaire entre les deux modes est une hypothèse forte, car la préférence pour l'automobile semble plus conforme à la réalité.

➤ **Forme Leontief : Modes de transport complémentaires**

quand le paramètre ρ tend vers l'infini : $\rho \rightarrow \infty$

Le TMS déterminé par l'équation (4.3) tend vers zéro lorsque le paramètre ρ tend vers l'infini. Nous sommes confrontés à une fonction d'utilité de la forme Leontief, c'est-à-dire : $U_i(V_i, TC_i) = \text{Min}[a_i V_i^*; (1-a_i) TC_i^*]$, où les solutions d'équilibre sont les suivantes : $a_i V_i^* = (1-a_i) TC_i^*$ (4.20).

Cette forme nous indique que les biens consommés sont des biens complémentaires. En effet, nous pouvons imaginer qu'un agent i parcourt un certain nombre de kilomètres en automobile, puis stationne son véhicule afin de continuer son itinéraire en transports collectifs. C'est notamment le cas pour les individus n'ayant pas accès aux transports collectifs à proximité de leur domicile. Dès lors, les agents utilisent leur véhicule jusqu'à une station de TC (tram, train de banlieue, R.E.R., etc.) pour ensuite emprunter

les TC afin d'arriver sur leur lieu de travail. Cependant, nous notons que cette complémentarité semble entraîner des investissements dans des infrastructures adaptées telles que des aires de stationnement au niveau des stations des TC. Toutes les villes ne disposent pas assurément de ces infrastructures. Néanmoins, leur existence est bien réelle. Par exemple, les parkings relais trams à Nantes ont été pensés et construits justement pour favoriser la complémentarité entre l'automobile et les TC. Ils sont présents à chaque extrémité des lignes de tramways et permettent aux individus de stationner leur véhicule afin d'utiliser les TC pour se rendre dans le centre urbain.

La modélisation du système de marché de PEN appliqué aux automobilistes ne pouvait se faire sans avoir dans un premier temps modélisé la situation dite de référence, c'est-à-dire la situation initiale sans régulation environnementale. Pour ce faire, une fonction d'utilité de la forme C.E.S. a été choisie afin d'étudier les différents cas possibles à l'équilibre sans régulation environnementale et d'analyser la nature de la substitution entre les modes de transport.

4.2.2. L'équilibre avec régulation environnementale

Nous supposons que l'autorité régulatrice met en place un système de permis d'émissions négociables sur le nombre de kilomètres parcourus en automobile afin de réguler la pollution provoquée par cette dernière. L'objectif est de trouver l'optimum social de premier rang. Nous nous proposons d'analyser les conséquences de l'instauration de cet outil, notamment sur l'équilibre de référence déterminé dans la section précédente.

4.2.2.1. La relation entre les émissions polluantes et l'utilisation de l'automobile

Les externalités environnementales, engendrées par l'automobile, peuvent être réduites si les individus remplacent leurs déplacements en voiture par des déplacements

en transports collectifs. Cependant, nous supposons que les individus ont une préférence marquée pour la voiture impliquant un coefficient $a_i > \frac{1}{2}$.

Les émissions notées e_i sont croissantes avec le nombre de kilomètres parcourus en voiture V_i par l'agent i . Nous supposons que chaque kilomètre parcouru émet une unité de pollution : $e_i = V_i$. Nous normalisons ces émissions en prenant en compte les normes « bonus, malus » prises lors du Grenelle de l'environnement concernant les achats de voitures en France. Le principe vise à verser un bonus écologique à la première immatriculation pour tout achat d'un véhicule particulier neuf émettant moins de 130 grammes de CO_2 par kilomètre. Nous retenons cette norme dans notre modèle. Nous supposons qu'un kilomètre parcouru équivaut à une émission de $130 \text{ g}CO_2$; la relation est la suivante : $e_i = V_i = 130 \text{ g}CO_2$.

Les émissions provoquent une dégradation de l'environnement exprimée par une fonction croissante et convexe de dommages environnementaux $D(e)$. L'objectif de l'autorité régulatrice est de maximiser le bien-être de la société, c'est-à-dire de maximiser l'utilité du consommateur en déduisant le dommage environnemental subi. Pour ce faire, l'autorité régulatrice met en place un système de permis d'émissions appliqué aux automobilistes. Les émissions sont représentées comme suit :

$$e = \sum_{i=1}^N e_i = \sum_{i=1}^N V_i, \text{ alors que le plafond d'émissions fixé par l'autorité s'exprime par } \bar{e} = \bar{V} = \sum_{i=1}^N \bar{V}_i.$$

Chaque permis donne le droit d'émettre une unité de pollution ; autrement dit, chaque permis permet de parcourir un kilomètre en voiture. Le nombre total de ces permis définit le nombre total d'émissions autorisées.

4.2.2.2. La maximisation de l'utilité avec un système de PEN

L'autorité régulatrice met en place le système de PEN. Comme nous l'avons indiqué dans la première section, l'allocation des permis se fait gratuitement, les individus reçoivent alors un nombre de permis : \bar{V}_i . Les agents, dans la maximisation de leur utilité, considèrent cette allocation de permis comme donnée, ainsi que le prix de celui-ci noté : p_e .

Ainsi, l'individu doit prendre en compte son nombre de kilomètres alloué, ainsi que le prix des permis s'il désire parcourir plus de kilomètres en voiture. De nouveau, l'agent i cherche à maximiser sa fonction d'utilité : $U_i(V_i, TC_i) = [a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho]^\frac{1}{\rho}$ sous la nouvelle contrainte budgétaire intégrant le prix du permis, soit le programme suivant :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max } U_i(V_i, TC_i) = [a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho]^\frac{1}{\rho} \\ \text{s.c. } p_v V_i + p_e (V_i - \bar{V}_i) + p_{TC} TC_i \leq R_{T_i} \quad (\lambda) \\ \text{s.c. } V_i \geq 0 \quad (\mu_v) \\ \text{s.c. } TC_i \geq 0 \quad (\mu_{TC}) \end{array} \right\} \quad (4.21)$$

Le Lagrangien associé est :

$$L = [a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho]^\frac{1}{\rho} - \lambda (p_v V_i + p_e (V_i - \bar{V}_i) + p_{TC} TC_i - R_{T_i}) + \mu_v V_i + \mu_{TC} TC_i \quad (4.22)$$

Si $V_i > \bar{V}_i$, alors l'agent i devra acheter des permis en fin de période.

Si $V_i < \bar{V}_i$, la dotation initiale en permis est supérieure au nombre de permis détenus en fin de période, et alors l'agent pourra les vendre (ou les garder pour une future utilisation).

Nous remarquons que le prix de l'utilisation de la voiture s'est élevé du montant du prix du permis. Le rapport des utilités marginales est égal au rapport des prix des modes de transport dans lequel le prix de l'automobile intègre le coût du permis d'émissions.

4.2.2.3. Analyse des équilibres possibles entre les modes

Comme dans la section (§ 4.2.1.1), trois cas se dessinent en fonction des différentes utilisations des modes de transport. Nous retrouvons la situation où les deux modes de transport sont utilisés (la voiture et les TC), la situation où l'individu utilise uniquement la voiture particulière et enfin, la troisième situation représente celle où seuls les TC sont utilisés.

➤ **CAS N°4** : Les deux modes de transport sont utilisés

Comme nous l'avons observé dans le cas n°1, si les deux modes de transport (V_i et TC_i) sont utilisés, impliquant $\mu_V = 0$ et $\mu_{TC} = 0$, ainsi que $V_i > 0$ et $TC_i > 0$, alors le programme possède une solution intérieure.

Des deux conditions du premier ordre, présentées dans l'annexe 4.4, nous déduisons

$$\text{le taux marginal de substitution suivant : } \frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} = \frac{p_V + p_e}{p_{TC}} \quad (4.23)$$

L'équation (4.23) nous indique que le rapport des utilités marginales est égal au rapport des prix. Cependant, le prix de l'utilisation de la voiture est augmenté du prix des permis p_e par rapport à la situation de référence représentée par l'équation (4.3).

À l'équilibre, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs pour l'agent i sont les suivants :

$$V_i^{**} = \left(\frac{a_i}{p_V + p_e} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.24a)$$

$$TC_i^{**} = \left(\frac{1-a_i}{p_{TC}} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.24b)$$

$$U_i^{**}(V_i^{**}, TC_i^{**}, \bar{V}_i) = (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \left(a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}} \quad (4.24c)$$

où (**) correspond à la situation avec une réglementation environnementale.

Sachant que, pour l'ensemble des individus N , nous avons les relations suivantes :

$$V^{**} = \sum_{i=1}^N V_i^{**}, \quad TC^{**} = \sum_{i=1}^N TC_i^{**}, \quad \bar{V} = \sum_{i=1}^N \bar{V}_i \geq V^{**}$$

alors l'équilibre avec une contrainte environnementale pour les N individus est :

$$V^{**} = \left(\frac{1}{p_V + p_e} \right)^\sigma \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i^\sigma (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.25a)$$

$$TC^{**} = \left(\frac{1}{p_{TC}} \right)^\sigma \sum_{i=1}^N (1-a_i)^\sigma \left(\frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right) \quad (4.25b)$$

Nous cherchons à déterminer les impacts du prix du permis d'émissions (p_e). Tout d'abord, il faut souligner que le prix du permis des émissions a deux effets contradictoires. D'un côté, il engendre une augmentation du coût de l'utilisation de la voiture : $(p_V + p_e)$. Cette hausse du coût de l'automobile serait comparable à celle engendrée par une taxe au kilomètre parcouru ($p_e V_i$). Mais, d'un autre côté, le prix du permis augmente le revenu transport de l'individu ($R_{T_i} + p_e \bar{V}_i$). Cette hausse de revenu peut être assimilée à une subvention transport ($p_e \bar{V}_i$) versée aux individus pour leur déplacement.

Nous étudions les effets du prix des permis des émissions (p_e) sur le nombre de kilomètres parcourus en voiture (V^{**}) et en transports collectifs (TC^{**}). Dans l'annexe 4.5, nous montrons la relation suivante : $\frac{\partial V^{**}}{\partial p_e} < 0$ sous la condition que $R_{T_i} > p_V \bar{V}_i$.

Cela signifie que lorsque le prix du permis augmente, alors le nombre de kilomètres parcourus en automobile diminue, si le pouvoir d'achat « transport » pour l'automobile $\left(\frac{R_{T_i}}{p_V} \right)$ est supérieur à la dotation de permis (\bar{V}_i).

Inversement, la relation entre le nombre de kilomètres parcourus en TC et le prix du permis est positive : $\frac{\partial TC^{**}}{\partial p_e} > 0$, indiquant qu'une augmentation du prix du permis sur le marché entraîne une augmentation du nombre de kilomètres parcourus en TC par les individus. Par conséquent, le prix du permis a les effets incitatifs attendus sur les différents modes de transport.

D'une part, nous constatons que l'introduction d'un système de PEN modifie la situation d'équilibre de référence (sans régulation environnementale). D'autre part, la mise en place du système de PEN pour réduire les émissions fonctionne. En effet, il faut souligner qu'une hausse du prix des permis a pour conséquence une hausse de la prise des TC, mais surtout une baisse de l'utilisation de la voiture engendrant une diminution

des émissions polluantes. Nous pouvons aussi d'ores et déjà affirmer que s'il y a une hausse très élevée du prix du permis, alors l'individu utilisera seulement les TC et nous obtiendrons le cas n°6 où l'automobile n'est pas employée.

Cependant, nous remarquons également que la quantité de permis \bar{V}_i allouée à chaque individu procure une augmentation du revenu transport, dans la mesure où nous avons supposé une allocation des permis gratuite pour assurer une mobilité pour tous. De ce fait, le revenu de l'individu i consacré au transport se voit, dans un premier temps, augmenter d'un montant $p_e \bar{V}_i$. Analysons maintenant le cas où l'individu utilise uniquement sa voiture pour faire les trajets domicile-travail.

- **CAS N°5** : Les transports collectifs ne sont pas utilisés : première solution en coin

Si un seul mode de transport est utilisé, alors une solution en coin est déterminée comme nous l'avons exposé dans le cas n°2. Nous supposons, dans ce cas n°5, que les transports collectifs ne sont pas utilisés. Cette situation est reflétée par le système

$$\text{suivant : } \begin{cases} TC_i = 0, & \mu_{TC} > 0 \\ V_i > 0, & \mu_V = 0 \end{cases} .$$

$$\text{Nous obtenons le taux marginal de substitution : } \frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} > \frac{p_V + p_e}{p_{TC}} \quad (4.26),$$

dont les calculs sont présentés en annexe 4.4. L'analyse de la relation (4.26) nous indique que le prix des transports collectifs est relativement trop élevé, engendrant la non utilisation des TC.

À l'équilibre, la contrainte budgétaire est saturée, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs sont alors :

$$V_i^{***} = \frac{R_i + p_e \bar{V}_i}{p_V + p_e} \quad (4.27a) \text{ et } TC_i^{***} = 0 \quad (4.27b)$$

Cette solution en coin $U_i^{***}(V_i^{***}, 0) > 0$ est possible seulement pour une fonction d'utilité de la forme linéaire, *i.e* $\rho \rightarrow 1$. Nous déterminerons les conditions d'existence

de cette solution dans la section (§ 4.2.2.4), dans le paragraphe consacré à la forme linéaire.

Ainsi, pour les N individus, dans le cas où les transports collectifs ne sont pas utilisés, l'équilibre est déterminé par :

$$V^{**} = \frac{1}{p_V + p_e} \sum_{i=1}^N (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \quad (4.28a) \quad \text{et} \quad TC^{**} = 0 \quad (4.28b)$$

Nous cherchons à étudier les effets du prix du permis des émissions, seulement sur l'utilisation de la voiture V_i^{**} , puisque les TC ne sont pas utilisés. Nous obtenons la

relation suivante : $\frac{\partial V^{**}}{\partial p_e} < 0$ si $R_{T_i} > p_V \bar{V}_i$ (cf. calculs annexe 4.5). Cette relation nous

indique qu'une augmentation du prix du permis entraîne une diminution du nombre de kilomètres parcourus en automobile si le pouvoir d'achat « transport » de l'individu

pour la voiture est supérieur à la dotation de permis $\left(\frac{R_{T_i}}{p_V} > \bar{V}_i \right)$. Autrement dit, le

nombre de kilomètres parcourus en automobile dans la situation de référence (avec $TC_i^* = 0$) est supérieur à la dotation de permis (\bar{V}_i). Ainsi, la mise en place de l'outil des PEN pour les automobilistes fonctionne bien comme une contrainte par rapport à la situation initiale.

Par ailleurs, comme dans le cas n°4, nous observons les mêmes effets contradictoires du prix du permis d'émissions, puisque d'un côté il augmente le coût de la voiture ($p_V + p_e$), mais d'un autre côté il augmente le revenu transport de l'individu ($R_{T_i} + p_e \bar{V}_i$).

Il existe une conséquence directe d'une variation du prix du permis sur le niveau d'utilité des individus dans la mesure où la prise des transports collectifs est nulle. De la sorte, le niveau d'utilité des individus diminuera si le prix du permis augmente. Cependant, si le prix du permis augmente fortement, alors nous reviendrons au cas n°4 où il y a un partage modal entre l'automobile et les transports collectifs. Si l'augmentation du prix du permis se révèle encore plus élevée, alors nous parviendrons au cas n°6 où seuls les TC sont utilisés. L'utilisation des deux modes de transport est

sensiblement liée aux évolutions du prix du permis d'émissions. Ces évolutions nous renseignent sur les choix de modes de transport de l'individu i .

➤ **CAS N°6** : L'automobile n'est pas utilisée : deuxième solution en coin

Cette situation implique une seconde solution en coin de notre programme, puisque la voiture particulière n'est pas utilisée, renvoyant au système suivant

$$\begin{cases} TC_i > 0, & \mu_{TC} = 0 \\ V_i = 0, & \mu_V > 0 \end{cases}$$

En combinant les deux conditions du premier ordre, (cf. annexe 4.4), nous obtenons le taux marginal de substitution : $\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} < \frac{p_V + p_e}{p_{TC}}$ (4.29), signifiant que le coût total de la voiture (prix de la voiture et prix du permis) est relativement trop élevé. Cette raison peut expliquer le fait que les individus prennent seulement les TC pour se déplacer.

À l'équilibre, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs sont alors :

$$V_i^{***} = 0 \text{ (4.30a), et } TC_i^{***} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_{TC}} \text{ (4.30b)}$$

Comme dans le précédent cas, la solution en coin telle que $U_i^{***}(0, TC_i^{***}) > 0$ existe seulement pour une fonction d'utilité de la forme linéaire, *i.e* $\rho \rightarrow 1$, lorsque les modes de transport sont parfaitement substituables. Nous verrons les conditions d'existence de cette solution dans la section (§ 4.2.2.4).

Pour l'ensemble des N individus, l'équilibre est déterminé par :

$$V^{***} = 0 \text{ (4.31a) et } TC^{***} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N R_{T_i} + p_e \bar{V}_i \text{ (4.31b)}$$

Nous remarquons que le prix du permis d'émissions augmente le revenu transport de l'individu ($R_{T_i} + pe\bar{V}_i$) consacré à l'utilisation des TC.

Nous analysons, comme pour les précédents cas, l'influence du prix du permis d'émissions sur l'usage des transports collectifs à l'équilibre. Nous obtenons la relation suivante : $\frac{\partial TC^{**}}{\partial p_e} > 0$ (cf. calculs annexe 4.5), ce qui implique qu'une augmentation du prix du permis augmentera toujours l'utilisation des transports collectifs. Nous observons qu'une diminution du prix du permis pourrait nous faire revenir au cas n°4 où les deux modes de transport sont utilisés. Cependant, une très forte diminution du prix du permis aboutirait au cas n°5 où seule la voiture est utilisée. Par conséquent, l'évolution du prix du permis d'émissions constitue un élément capital dans notre modèle.

Afin d'obtenir une analyse complète de la situation comprenant le système de marché de PEN, les différentes formes de la fonction d'utilité, relatives à la valeur de l'élasticité, doivent être prises en compte.

4.2.2.4. La substituabilité des modes de transport

Comme nous l'avons déjà précisé, la fonction d'utilité de la forme C.E.S. permet de prendre en compte plusieurs situations selon la valeur de l'élasticité. À travers l'analyse des situations, nous déterminons les différentes natures des modes de transport. Les trois cas étudiés sont identiques à ceux de la section (§ 4.2.1.2)

➤ Fonction Cobb-Douglas : Modes de transport imparfaitement substituables

quand le paramètre ρ tend vers zéro : $\rho \rightarrow 0$

Lorsque ρ tend vers zéro, le coefficient d'élasticité de substitution σ est égal à l'unité. Ainsi, le taux marginal de substitution déterminé par l'équation (4.23) devient

alors le suivant : $\frac{a_i TC_i}{(1-a_i)V_i} = \frac{p_V + p_e}{p_{TC}}$ (4.32)

Ce nouveau TMS représente des préférences venant d'une fonction d'utilité de la forme Cobb-Douglas : $U_i(V_i, TC_i) = V_i^{a_i} TC_i^{1-a_i}$ impliquant la substituabilité possible entre les deux modes de transport, ainsi que leur stricte positivité.

À l'équilibre, les kilomètres parcourus en voiture et en transports collectifs pour l'agent i sont les suivants :

$$V_i^{**} = \frac{a_i (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)}{p_V + p_e} \quad (4.33a) \quad \text{et} \quad TC_i^{**} = \frac{(1-a_i)(R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)}{p_{TC}} \quad (4.33b)$$

L'équilibre, avec une contrainte environnementale, pour les N individus est alors :

$$V^{**} = \frac{1}{p_V + p_e} \sum_{i=1}^N a_i (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \quad (4.34a) \quad \text{et} \quad TC^{**} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N (1-a_i)(R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \quad (4.34b)$$

Une fois de plus, nous cherchons à déterminer les effets du prix des permis d'émissions sur le nombre de kilomètres parcourus en voiture (V^{**}) et en transports collectifs (TC^{**}).

D'après l'annexe 4.5, nous aboutissons à la relation négative suivante $\frac{\partial V^{**}}{\partial p_e} < 0$ si $p_V \bar{V}_i < R_{T_i}$. Cette relation nous indique que si le prix du permis augmente, alors le nombre de kilomètres parcourus en automobile diminuera, à condition que le pouvoir d'achat « transport » pour la voiture soit supérieur à l'allocation de permis. D'autre part, nous obtenons pour les transports collectifs une relation positive : $\frac{\partial TC^{**}}{\partial p_e} > 0$ signifiant, au contraire, qu'une augmentation du prix du permis sur le marché engendre une augmentation du nombre de kilomètres parcourus réalisé en transports collectifs.

Comme dans les cas précédents, nous relevons les mêmes impacts contraires engendrés par le prix du permis d'émissions : il augmente le coût de la voiture ($p_V + p_e$) et en même temps augmente le budget transport de l'individu ($R_{T_i} + p_e \bar{V}_i$).

Nous notons une différence significative entre le cas général de la fonction C.E.S. et le cas particulier de la forme Cobb-Douglas. La fonction Cobb-Douglas suppose la stricte positivité des deux modes de transport ($V_i > 0$ et $TC_i > 0$), c'est-à-dire que

l'individu doit utiliser non seulement sa voiture, mais aussi les transports collectifs, les modes étant présumés substituables. Cette condition concernant l'utilisation strictement positive des deux modes est restrictive. L'utilisation d'un seul mode de transport pour effectuer les déplacements domicile-travail est souvent observée.

➤ **Forme linéaire : Modes de transport parfaitement substituables**

quand le paramètre ρ tend vers l'unité : $\rho \rightarrow 1$

Dans l'hypothèse où ρ tend vers l'unité, le TMS déterminé par l'équation (4.23) devient alors le suivant : $\frac{a_i}{(1-a_i)} = \frac{p_V + p_e}{p_{TC}}$ (4.35). Cette nouvelle relation implique une fonction d'utilité de forme linéaire où les modes de transport sont considérés comme parfaitement substituables.

Une première solution du programme est déterminée lorsque les deux modes de transport sont utilisés, sous la condition : $a_i = \frac{p_V + p_e}{p_{TC} + p_V + p_e}$. En supposant que la contrainte budgétaire est saturée, la courbe d'indifférence peut se confondre, à l'équilibre, avec cette dernière. Nous obtenons alors à l'équilibre :

$$p_V V_i^{**} + p_e (V_i^{**} - \bar{V}_i) + p_{TC} TC_i^{**} = R_{T_i} \quad (4.36)$$

Cependant, deux solutions en coin se dessinent. Si $\frac{a_i}{(1-a_i)} > \frac{p_V + p_e}{p_{TC}}$, ce qui implique la condition suivante : $a_i > \frac{p_V + p_e}{p_{TC} + p_V + p_e}$, alors les transports collectifs ne sont pas utilisés. L'équilibre est déterminé par : $V_i^{**} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_V + p_e}$.

Au contraire, si $\frac{a_i}{(1-a_i)} < \frac{p_V + p_e}{p_{TC}}$, engendrant la condition suivante :

$a_i < \frac{p_V + p_e}{p_{TC} + p_V + p_e}$, l'individu utilise uniquement les TC. L'équilibre est alors le

suisant : $TC_i^{**} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_{TC}}$. Pour les N individus, nous obtenons trois situations :

Si les deux modes de transport sont utilisés :

$$p_V \sum_{i=1}^N V_i^{**} + p_e \sum_{i=1}^N (V_i^{**} - \bar{V}_i) + p_{TC} \sum_{i=1}^N TC_i^{**} = \sum_{i=1}^N R_{T_i} \quad (4.37)$$

Si la voiture seule est utilisée :

$$V^{**} = \frac{1}{p_V + p_e} \sum_{i=1}^N (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \quad (4.38a) \text{ et } TC^{**} = 0 \quad (4.38b)$$

Si les TC seuls sont utilisés : $V^{**} = 0$ (4.39a) et $TC^{**} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)$ (4.39b)

Une fois de plus, nous relevons les deux effets contradictoires du prix du permis (p_e). D'une part, il augmente le coût de la voiture ($p_V + p_e$) comme lors de la mise en place d'une taxe au kilomètre ($p_e V_i$) et d'autre part, il élève le budget transport de l'individu de la même manière que le versement d'une subvention ($p_e \bar{V}_i$).

La situation représentée par la relation (4.38) nous indique que le nombre de kilomètres parcourus en voiture à l'équilibre est décroissant avec le prix du permis d'émissions (cf. annexe 4.5) sous la condition que le pouvoir d'achat « transport » pour la voiture soit plus élevé que l'allocation de permis initiale ($\bar{V}_i < \frac{R_{T_i}}{p_V}$). La totalité du

budget transport est consacrée à l'utilisation de la voiture. La seconde solution en coin (4.39), quant à elle, montre que le nombre de kilomètres parcourus en transports collectifs, à l'équilibre, est toujours croissant avec le prix des permis d'émissions (cf. annexe 4.5). Le budget transport est également totalement consacré à l'utilisation

des TC. Ces trois situations reflètent davantage la réalité observée, dans le sens où l'individu peut combiner les deux modes de transport ou se déplacer uniquement avec l'automobile ou les TC. Toutefois, nous soulignons que la parfaite substituabilité linéaire entre les deux modes est un phénomène rare.

➤ **Forme Leontief : Modes de transport complémentaires**

Quand le paramètre ρ tend vers l'infini : $\rho \rightarrow \infty$

Lorsque l'élasticité tend vers l'infini, le TMS déterminé par l'équation (4.23) tend vers zéro. Une fonction d'utilité de la forme Leontief est alors obtenue, elle est déterminée par : $U_i(V_i, TC_i) = \text{Min}[a_i V_i^{**}; (1-a_i)TC_i^{**}]$. À l'équilibre, les quantités de kilomètres parcourus en voiture et en TC sont : $a_i V_i^{**} = (1-a_i)TC_i^{**}$ (4.40).

La forme Leontief postule que l'automobile et les transports collectifs sont considérés comme des biens complémentaires. La complémentarité des modes de transport a été analysée précisément dans la section (§ 4.2.1.2) pour la situation initiale. Le même raisonnement peut être appliqué à notre situation avec le système de PEN où, dans un premier temps, l'individu est contraint d'utiliser son véhicule pour accéder à une station de TC afin de terminer, dans un second temps, son trajet en TC.

D'après les résultats obtenus, on constate que le prix du permis d'émissions joue un rôle essentiel, puisqu'il agit sur l'efficacité du système de PEN. Cependant, l'État ne peut l'influencer qu'indirectement *via* le choix du nombre de quotas distribué. Nous réunissons les principaux résultats dans les tableaux suivants afin d'obtenir une vue d'ensemble :

TABLEAU N°4.1 : Situation d'équilibre dans le cas général de la fonction C.E.S.

Situation de référence sans régulation environnementale			
	<i>Solution intérieure</i>	<i>1^{ère} solution en coin : seule la voiture est utilisée ($\rho \rightarrow 1$)</i>	<i>2^{ème} solution en coin : seuls les TC sont utilisés ($\rho \rightarrow 1$)</i>
V^*	$V^* = \frac{1}{p_V^\sigma} \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i^\sigma R_{T_i}}{a_i p_V^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right)$	$V^{*'} = \frac{1}{p_V} \sum_{i=1}^N R_{T_i}$	$V^{**} = 0$
TC^*	$TC_i^* = \left(\frac{1-a_i}{p_{TC}} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i}}{a_i^\sigma p_V^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right)$	$TC^{*' } = 0$	$TC^{**} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N R_{T_i}$
Situation avec régulation environnementale : mise en place d'un système de PEN			
	<i>Solution intérieure</i>	<i>1^{ère} solution en coin : seule la voiture est utilisée</i>	<i>2^{ème} solution en coin : seuls les TC sont utilisés</i>
V^{**}	$V^{**} = \left(\frac{1}{p_V + p_e} \right)^\sigma \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i^\sigma (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right)$	$V^{*''} = \frac{1}{p_V + p_e} \sum_{i=1}^N R_{T_i} + p_e \bar{V}_i$	$V^{*''} = 0$
TC^{**}	$TC^{**} = \left(\frac{1}{p_{TC}} \right)^\sigma \sum_{i=1}^N (1-a_i)^\sigma \left(\frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right)$	$TC^{*''} = 0$	$TC^{*''} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N R_{T_i} + p_e \bar{V}_i$

TABLEAU N°4.2 : Situation d'équilibre concernant les cas particuliers de la fonction C.E.S.

Situation de référence sans régulation environnementale			
	Fonction Cobb-Douglas : $\rho \rightarrow 0$ $(V^* > 0 \text{ et } TC^* > 0)$	Fonction de forme linéaire : $\rho \rightarrow 1$ $(V^* \geq 0 \text{ et } TC^* \geq 0)$	Fonction Leontief : $\rho \rightarrow \infty$
V^*	$V^* = \frac{1}{p_V} \sum_{i=1}^N a_i R_{T_i}$	$p_V \sum_{i=1}^N V_i^* + p_{TC} \sum_{i=1}^N TC_i^* = \sum_{i=1}^N R_{T_i}, \text{ si } a_i = \frac{p_V}{p_{TC} + p_V}$	Les solutions d'équilibres doivent minimiser cette fonction : $U_i(V_i^*, TC_i^*) = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^N a_i V_i^*; \sum_{i=1}^N (1-a_i) TC_i^* \right]$
TC^*	$TC^* = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N (1-a_i) R_{T_i}$	ou $V^* = \frac{1}{p_V} \sum_{i=1}^N R_{T_i} \text{ et } TC^* = 0, \text{ si } a_i > \frac{p_V}{p_{TC} + p_V}$ ou $TC^* = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N R_{T_i} \text{ et } V^* = 0, \text{ si } a_i < \frac{p_V}{p_{TC} + p_V}$	
Situation avec régulation environnementale : mise en place d'un système de PEN			
	Fonction Cobb-Douglas : $\rho \rightarrow 0$ $(V^{**} > 0 \text{ et } TC^{**} > 0)$	Fonction de forme linéaire : $\rho \rightarrow 1$ $(V^{**} \geq 0 \text{ et } TC^{**} \geq 0)$	Fonction Leontief : $\rho \rightarrow \infty$
V^{**}	$V^{**} = \frac{1}{p_V + p_e} \sum_{i=1}^N a_i (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)$	$p_V \sum_{i=1}^N V_i^{**} + p_e \sum_{i=1}^N (V_i^{**} - \bar{V}_i) + p_{TC} \sum_{i=1}^N TC_i^{**} = \sum_{i=1}^N R_{T_i} \text{ si } a_i = \frac{p_V + p_e}{p_{TC} + p_V + p_e}$	Les solutions d'équilibres doivent minimiser cette fonction : $U(V_i^{**}, TC_i^{**}) = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^N a_i V_i^{**}; \sum_{i=1}^N (1-a_i) TC_i^{**} \right]$
TC^{**}	$TC^{**} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N (1-a_i) (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)$	ou $V^{**} = \frac{1}{p_V + p_e} \sum_{i=1}^N (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \text{ et } TC^{**} = 0, \text{ si } a_i > \frac{p_V + p_e}{p_{TC} + p_V + p_e}$ ou $TC^{**} = \frac{1}{p_{TC}} \sum_{i=1}^N (R_{T_i} + p_e \bar{V}_i) \text{ et } V^{**} = 0, \text{ si } a_i < \frac{p_V + p_e}{p_{TC} + p_V + p_e}$	

4.2.3. Équilibre sur le marché des permis d'émissions

Après avoir déterminé les comportements des individus concernant l'utilisation des modes de transport face à l'instauration d'un système de PEN, il nous semble fondamental d'analyser les caractéristiques du marché des PEN.

Le marché est équilibré lorsque l'offre de permis est égale à la demande de permis. En fonction de différents paramètres, nous cherchons à savoir si les individus auront un comportement de vendeur ou d'acheteur de permis sur le marché. Le paramètre a_i représente la part du revenu transport consacrée à l'utilisation de l'automobile. On a supposé que les individus ont une préférence pour la voiture, impliquant $a_i > \frac{1}{2}$. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, plus l'individu a un a_i élevé, plus il utiliserait sa voiture et, par conséquent, devrait acheter des permis d'émissions. Le revenu transport de l'individu (R_{T_i}) influence aussi les comportements d'achat et de vente de permis d'émissions. En effet, les individus préfèrent utiliser la voiture, ce qui implique qu'une augmentation du revenu entraîne une augmentation de l'utilisation de l'automobile. Toutes choses égales par ailleurs, plus l'individu a un revenu élevé, plus il devrait acheter des permis d'émissions. Ainsi, le paramètre a_i et le revenu transport (R_{T_i}) influencent les comportements d'échange de permis d'émissions sur le marché.

Afin que ce marché soit équilibré et conforme à la norme environnementale fixée par l'autorité régulatrice, le prix d'un permis d'émissions se fixe de telle sorte que les demandes de permis, c'est-à-dire les demandes de kilomètres parcourus en automobile, qui représentent les émissions totales, et la contrainte de pollution : $e = \bar{e} = \sum_{i=1}^N \bar{V}_i$,

s'annulent. L'équilibre est obtenu quand :

$$\sum_{i=1}^N V_i^{**} = \sum_{i=1}^N \bar{V}_i \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N (V_i^{**} - \bar{V}_i) = 0 \quad (4.41)$$

Cette relation (4.41) représente une des conditions nécessaires pour atteindre l'objectif environnemental souhaité et fixé par l'autorité régulatrice. La seconde condition indispensable à la réalisation de l'équilibre sur le marché vient de la condition

optimale déterminée auparavant par l'équation (4.23), à savoir $\frac{Um_{V_i}}{Um_{TC_i}} = \frac{p_V + p_e}{p_{TC}}$.

Chaque individu remplit la condition d'optimalité du programme de maximisation de l'utilité. Cette condition implique la relation suivante pour les N individus :

$$\frac{Um_{V_i}}{Um_{TC_1}} = \frac{Um_{V_2}}{Um_{TC_2}} = \dots = \frac{Um_{V_N}}{Um_{TC_N}} = \frac{p_V + p_e}{p_{TC}} \quad (4.42)$$

Cette dernière relation nous indique que l'équilibre sur le marché est obtenu lorsque les TMS de chaque individu sont non seulement égaux entre eux, mais également égaux au rapport des prix, ce qui engendre un optimum de Pareto.

D'après les conditions (4.41) et (4.42), le prix du permis d'émissions peut être déterminé en fonction du nombre de permis alloués.

De ce fait, nous considérons, dans un premier temps, le cas général de la fonction C.E.S. avec la solution intérieure où les deux modes de transport sont utilisés. En combinant les équations (4.41) et (4.25a), nous obtenons l'expression suivante :

$$p_e \approx \left(\frac{\sum_{i=1}^N \frac{a_i^\sigma (R_i + p_e \bar{V}_i)}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}}}{\sum_{i=1}^N \bar{V}_i} \right)^{\frac{1}{\sigma}} - p_V \quad (4.43)$$

La relation (4.43) ne nous permet pas d'obtenir une solution explicite du prix du permis d'émissions. Une solution itérative est nécessaire pour déterminer le prix de celui-ci.

Par ailleurs, nous analysons le cas particulier relatif à la fonction Cobb-Douglas afin d'examiner la relation entre le prix du permis des émissions et la quantité de permis allouée.

Nous déduisons des équations (4.34a) et (4.41) le prix du permis d'émissions suivant :

$$p_e = \frac{\sum_{i=1}^N a_i R_{T_i} - p_V \sum_{i=1}^N \bar{V}_i}{\sum_{i=1}^N \bar{V}_i (1-a_i)} \quad (4.44)$$

L'étude de l'équation (4.44), nous permet de déterminer l'influence du nombre de permis alloué sur le prix du permis. Nous obtenons ainsi la relation suivante : $\frac{\partial p_e}{\partial V_i} < 0$ (les calculs sont présentés en annexe 4.6). Le prix du permis d'émissions est une fonction décroissante de la quantité de kilomètres allouée. Par conséquent, si la ville décide de mener une politique environnementale plus stricte, alors elle décidera de diminuer le nombre de permis, ce qui entraînera une augmentation du prix du permis (p_e), donc une utilisation de la voiture moins élevée.

La détermination de la formation de l'équilibre sur le marché avec la fonction Cobb-Douglas nous a permis d'analyser l'impact du prix du permis d'émissions, *via* leur allocation, sur l'efficacité de la politique environnementale. Le prix du permis est une des variables clés de la réussite du système, mais le régulateur ne peut agir sur celui-ci qu'à travers le nombre de quotas alloué. Il paraît également important et nécessaire d'examiner l'influence de la mise en place de ce système sur le bien-être de la société afin de déterminer la politique optimale.

4.2.4. Effets sur le bien-être social

La mise en place d'un outil économique entraîne des modifications du bien-être collectif. C'est pourquoi les conséquences de la création d'un système de PEN appliqués aux automobilistes doivent être identifiées et analysées.

Afin d'examiner l'impact du système sur le bien-être social, nous supposons que les coûts de la mise en place de l'instrument et ceux engendrés par le contrôle de la pollution sont nuls. Nous considérons que le bien-être social se compose de l'utilité des individus et des dommages environnementaux liés à l'utilisation de l'automobile. Ainsi, nous définissons la fonction de dommage $D(e)$ telle que $D(e) = D\left(\sum_{i=1}^N \gamma \mathcal{W}_i\right)$ avec γ prenant une valeur comprise entre 0 et 1. $D(e)$ est une fonction croissante de la quantité de kilomètres parcourus en automobile. Une augmentation de V_i engendre une augmentation du dommage environnemental dans une proportion γ . La fonction de bien-être de la société s'écrit :

$$W(V_i, TC_i, \bar{V}_i) = \sum_{i=1}^N U_i(V_i, TC_i, \bar{V}_i) - D(\gamma \sum_{i=1}^N V_i) \quad (4.45)$$

Nous remplaçons, dans la fonction d'utilité de l'agent i , p_e par sa valeur d'équilibre trouvée précédemment (4.43). Nous intégrons dans la fonction de dommage la relation d'équilibre (4.41) nous indiquant que le nombre de quotas doit être égal à la quantité de kilomètres parcourus en automobile. De cette manière, nous sommes en mesure d'exprimer la fonction de bien-être social seulement en fonction de \bar{V}_i :

$$W(\bar{V}) = \sum_{i=1}^N U_i(\bar{V}_i) - D\left(\gamma \sum_{i=1}^N \bar{V}_i\right) \quad (4.46)$$

Ainsi, le régulateur maximise la fonction de bien-être social (4.46) afin de déterminer le quota optimal :

$$\frac{\partial W}{\partial \bar{V}_i} = \frac{\partial \sum_{i=1}^N U_i}{\partial \bar{V}_i} - \frac{\partial \sum_{i=1}^N D_i}{\partial \bar{V}_i} = 0 \quad (4.47)$$

Nous obtenons la relation suivante $Um_i = Dm_i$ où $Dm_i = \gamma$, ce qui implique $Um_i = \gamma$ (4.48). Cette relation nous indique que la quantité optimale de permis sur le marché est obtenue lorsque l'utilité marginale d'un kilomètre parcouru en voiture est égale au dommage marginal γ . Autrement dit, lorsqu'on met une unité supplémentaire de permis sur le marché, cela augmente l'utilité du consommateur en même temps que cela détériore l'environnement. Ces résultats sont conformes aux résultats standards de l'économie de l'environnement.

À l'issue de cette section, la modélisation d'un système de PEN appliqués aux automobilistes a été effectuée. Le modèle traite une fonction C.E.S., qui a été choisie pour son cadre général englobant de nombreuses situations. Ce travail nous a permis de mettre en évidence les impacts engendrés par la création d'un système de PEN, non seulement sur les comportements de déplacement des individus, mais aussi sur le bien-être social. Le rôle du prix du permis d'émissions s'est révélé capital pour garantir l'efficacité de l'instrument économique. Toutefois, il est à souligner que la détermination du prix du permis par le marché est dépendante de l'allocation initiale de permis réalisée par l'autorité régulatrice. Il apparaît donc essentiel de déterminer le

nombre de quotas optimal afin d'assurer l'efficacité et le bon fonctionnement du système du marché de PEN.

Pour étayer les résultats de notre modélisation, nous présentons des simulations numériques dans la section suivante.

4.3. Simulations numériques

Dans cette section, nous réalisons des simulations numériques et des tests de sensibilité afin d'illustrer les résultats de notre modèle théorique concernant le système de PEN appliqués aux automobilistes. Nos applications numériques traitent la situation intérieure de la fonction C.E.S., précédemment étudiée, où les deux modes de transport sont utilisés. Le premier cas analysé concerne deux individus avec des revenus identiques (§ 4.3.1), et l'ajout d'un troisième individu avec un revenu différent constitue le second cas exposé (§ 4.3.2).

4.3.1. Applications pour deux individus aux revenus identiques

Nous nous centrons d'abord sur les interprétations des résultats des applications numériques, puis nous réalisons des tests de sensibilité relatifs au nombre de permis distribués, au prix du permis d'émissions, ainsi qu'au coefficient d'élasticité de substitution.

4.3.1.1. Applications numériques et interprétations

Nous considérons seulement deux individus ayant des préférences a_i différentes. Nous supposons que l'agent 1 possède des préférences $a_1 = \frac{5}{6}$ et l'agent 2 $a_2 = \frac{2}{3}$. Ainsi, l'agent 1 a une préférence plus prononcée pour l'utilisation de la voiture par rapport à l'agent 2. Nous considérons également que le fonctionnement du système se déroule sur une année. Cependant, à l'instar de Raux (2007b), nous suggérons que la distribution de permis soit réalisée chaque semaine. De plus, nous supposons que le revenu hebdomadaire des individus consacré au transport est de l'ordre de 20 € et est

identique pour nos deux agents. Concernant les coûts par kilomètre parcouru, relatifs à l'automobile et aux transports collectifs, nous nous fondons sur une étude de la FNAUT⁶⁷ (2007). Cette étude indique qu'un kilomètre parcouru en voiture, en milieu urbain, coûte 0.30 € ($p_V = 0.30$) et un kilomètre parcouru en transports collectifs 0.10 € ($p_{TC} = 0.10$). Nous retenons un paramètre $\rho = 0.6$. Ce choix engendre l'inexistence de solution en coin. Ce paramètre ρ implique un coefficient d'élasticité de substitution d'une valeur $\sigma = \frac{5}{2}$. Ce coefficient étant une variable très importante de notre modèle, nous ferons des tests de sensibilité par la suite. Enfin, nous posons le dommage marginal : $\gamma = 0.25$ €. Cette valeur est donnée à titre indicatif. Néanmoins, nous considérons qu'elle ne prend pas uniquement en compte les dommages environnementaux, mais intègre d'autres types de dommages provoqués par l'utilisation de l'automobile (ex : accidents, pollution sonore, etc.). Les résultats de cette première application numérique sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU N°4.3 : Application numérique n°1 : situation sans régulation environnementale

<i>Valeurs des paramètres : $p_V = 0.30$; $p_{TC} = 0.10$; $R_{T_1} = R_{T_2} = 20$; $a_1 = \frac{5}{6}$; $a_2 = \frac{2}{3}$; $\sigma = \frac{5}{2}$</i>		
<i>À l'équilibre</i>	<i>Individu 1</i>	<i>Individu 2</i>
V_i^*	61	35
TC_i^*	17	96
Nombre total de kilomètres parcourus en voiture	$V^* = 96$	
Nombre total de kilomètres parcourus en TC	$TC^* = 113$	
Bien-être social	$W^* = 80.83$	

Ainsi, dans la situation sans régulation environnementale, à l'équilibre avec les paramètres choisis, les individus 1 et 2 parcourent respectivement 61 et 35 km en voiture ainsi que 17 et 96 km en TC⁶⁸. En outre, le nombre total de kilomètres parcourus en voiture est de 96 et celui en TC de 113, impliquant un nombre total de kilomètres parcourus de 209. Le bien-être social est alors évalué à 80.83 €.

⁶⁷ FNAUT : Fédération nationale des associations d'usagers des transports.

⁶⁸ À noter que les kilomètres parcourus des deux modes sont arrondis à l'unité.

Dans la section (§ 4.2.2.1), la relation entre les émissions de CO₂ et le nombre de kilomètres parcourus a été définie par $e_i = V_i = 130 \text{ gCO}_2$. Nous pouvons en déduire les émissions totales dues à l'utilisation de la voiture : $e_{T1} = 12\,480 \text{ gCO}_2$.

Maintenant, supposons que l'autorité régulatrice de la ville décide de diminuer ces émissions de 20% ; le montant désiré des émissions sera alors de $e_{T2} = 9\,984 \text{ gCO}_2$, ce qui équivaut à 76.8 km que nous arrondissons à 77 km. Afin de faire respecter l'objectif souhaité, l'autorité régulatrice décide d'instaurer l'instrument des permis d'émissions négociables. Nous supposons que les permis sont distribués au prorata des émissions passées. Ainsi, l'individu 1 devrait recevoir un total de 49 permis ($\bar{V}_1 = 49$), et l'individu 2 un total de 28 permis ($\bar{V}_2 = 28$). Nous déterminons le prix du permis en utilisant une solution itérative. Le principe est de construire une solution par approximation successives (calculs réalisés avec le logiciel mathematica), le prix trouvé est le suivant : $p_e = 0.1079 \text{ €}$

Ainsi, nous sommes en mesure de définir le nouvel équilibre obtenu lors de l'instauration du système de PEN, dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU N°4.4 : Application numérique n°2 : situation avec régulation environnementale

Valeurs des paramètres : $p_V = 0.30; p_{TC} = 0.10; R_{T_1} = R_{T_2} = 20; a_1 = \frac{5}{6}; a_2 = \frac{2}{3}; \sigma = \frac{5}{2}; p_e = 0.1079;$ $\bar{V}_1 = 49; \bar{V}_2 = 28$		
À l'équilibre	Individu 1	Individu 2
V_i^{**}	54	23
TC_i^{**}	32	136
Nombre total de kilomètres parcourus en voiture	$V^{**} = 77$	
Nombre total de kilomètres parcourus en TC	$TC^{**} = 168$	
Bien-être social	$W^{**} = 82.95$	

À l'issue de cette deuxième simulation, notons que l'individu 1 dépasse son quota de kilomètres à parcourir en automobile. En effet, il parcourt 54 km, alors que son quota l'autorisait à en parcourir seulement 49. Afin de respecter le système mis en place, il doit acheter des permis supplémentaires pour un montant de 0.5395 €. Au contraire,

l'individu 2 possède un surplus de permis qu'il peut vendre sur le marché et récupérer ainsi la somme de 0.5395 €. Nous soulignons que l'individu 1, qui a une plus grande préférence pour la voiture, est acheteur de permis. Cela était notre anticipation quant à l'influence du paramètre a_i sur les comportements d'échange.

Néanmoins, nous observons que le nombre total de kilomètres parcourus a augmenté. Il est passé d'une situation initiale de 209 km à 245 km quand l'autorité régulatrice met en place une contrainte environnementale. Comme nous l'avons souligné lors de la modélisation, le revenu des individus est augmenté par l'allocation de permis (comme une subvention). Ainsi, un budget plus élevé est consacré aux quantités de kilomètres parcourus (puisque'il ne peut pas être utilisé pour la consommation d'un autre bien dans le modèle) : il existe un effet revenu. Cette observation nous amène à nous interroger sur l'ajout éventuel d'une extension au modèle afin de modérer le nombre total de kilomètres parcourus. Toutefois, nous pouvons affirmer que le système de PEN est efficace puisque le bien-être social a légèrement augmenté : il est passé de 80.83 à 82.95 €, et l'objectif de pollution fixé est respecté.

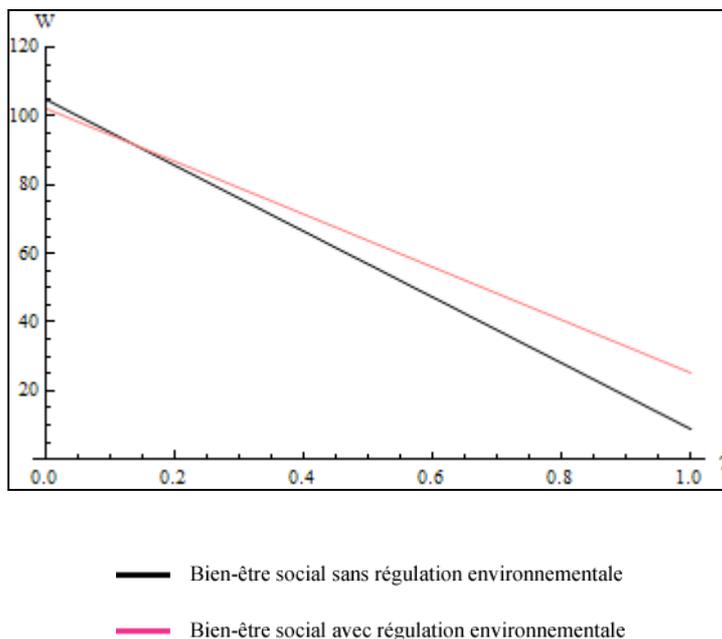
Nous synthétisons les résultats de la situation avec et sans régulation environnementale dans le tableau suivant :

TABLEAU N°4.5 : Pollution et bien-être social, pour deux individus

	Situation initiale	Situation avec PEN
Pollution : émissions en gCO_2	12 480	9 984
Bien-être social en €	80.83	82.95

Ce tableau montre que lors de l'instauration du système de PEN, la réduction des émissions est respectée et que le bien-être a légèrement augmenté. Nous réalisons un graphique permettant de visualiser le bien-être social dans les deux situations en fonction du dommage marginal.

GRAPHIQUE N°4.1 : Bien-être social et dommage marginal, pour deux individus

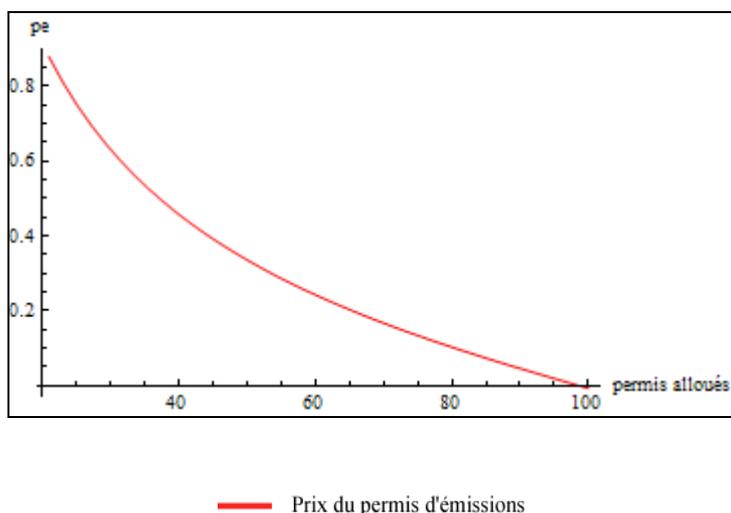


Le graphique n°4.1 montre que le bien-être social avec régulation environnementale est plus faible que celui en situation initiale, c'est-à-dire de laisser-faire, lorsque le dommage marginal est inférieur à 0.1383 €. À partir de cette valeur, le bien-être social obtenu avec le système de PEN est toujours supérieur à celui de la situation de référence. Le bien-être collectif est donc maximisé. De plus, nous observons que plus le dommage marginal est élevé, plus l'écart entre les deux courbes de bien-être s'accroît.

Afin de compléter l'analyse numérique et d'appuyer nos résultats théoriques, nous réalisons des tests de sensibilité liés aux quotas distribués, aux prix du permis et à l'élasticité de substitution.

4.3.1.2. Tests de sensibilité relatifs au nombre de permis d'émissions

Nous avons déterminé, par le modèle théorique, l'importance de l'impact de la distribution du nombre de permis sur la détermination du prix du permis d'émissions engendrant l'efficacité ou non du système de PEN. Par conséquent, avec le graphique suivant, nous illustrons l'évolution du prix du permis en fonction de la quantité de quotas allouée.

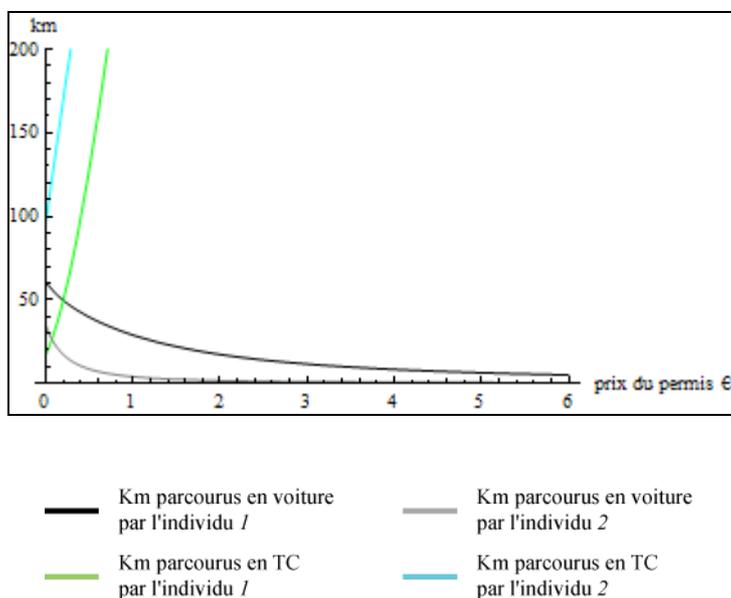
GRAPHIQUE N°4.2 : Prix du permis (p_e) et quotas distribués (\bar{V})

Sur ce graphique, nous observons que le prix du permis est bien une fonction décroissante de la quantité allouée. Par conséquent, une faible quantité de permis disponible sur le marché entraîne un prix élevé. À partir d'une certaine quantité de permis allouée, le prix du permis devient nul. Dans notre simulation, au-delà d'une quantité distribuée de 97 permis, le prix du permis est nul. La politique environnementale est alors inefficace si une trop grande quantité de permis est disponible sur le marché.

4.3.1.3. Tests de sensibilité relatifs au prix du permis d'émissions

Le prix du permis d'émissions étant une variable clé du système de marché de PEN, il est indispensable de montrer l'impact de ce paramètre sur les quantités de kilomètres parcourus. Le graphique suivant donne l'évolution des kilomètres parcourus en voiture et en TC, des deux individus, en fonction du prix du permis.

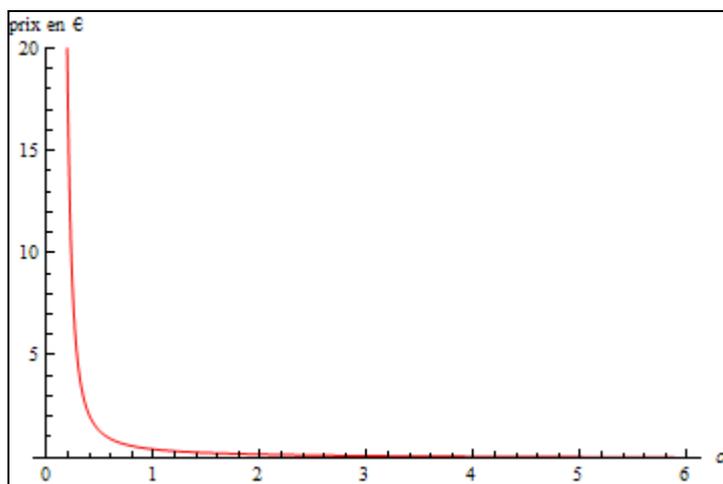
GRAPHIQUE N°4.3 : Kilomètres parcourus en voiture et en TC et prix du permis d'émissions



Sur ce graphique, nous observons que lorsque le prix du permis d'émissions appartient à l'intervalle $[0, 0.2]$, alors l'individu 1 parcourt un nombre de kilomètres en voiture supérieur ou égal à celui parcouru en TC. Au-delà d'un prix du permis de 0.2 €, il réalise plus de kilomètres en TC qu'en automobile. Soulignons que l'individu 2 utilise plus les TC que l'automobile, quel que soit le prix du permis d'émissions. La raison est que sa préférence pour la voiture est moins élevée que celle de l'individu 1. Remarquons également que l'augmentation du prix du permis freine l'utilisation de l'automobile et cela pour les deux individus. L'augmentation du prix provient d'une baisse de la quantité de permis d'émissions.

4.3.1.4. Tests de sensibilité relatifs au coefficient de l'élasticité de substitution

Comme nous l'avons déjà précisé au cours de ce chapitre, la diversité des formes obtenues par la fonction d'utilité C.E.S. vient notamment des différentes valeurs prises par le coefficient de l'élasticité de substitution σ . C'est pour cette raison que nous réalisons des tests de sensibilité sur ce paramètre afin d'illustrer nos résultats théoriques.

GRAPHIQUE N°4.4 : Prix du permis d'émissions (p_e) et élasticité de substitution (σ)

— Prix du permis d'émissions

Nous observons, sur le graphique n°4.4, un prix du permis d'émissions d'environ 0.3942 € lorsque le coefficient de l'élasticité de substitution est égal à l'unité ($\sigma = 1$). Cette situation représente une fonction d'utilité Cobb-Douglas où les deux modes de transport doivent être impérativement utilisés. Nous constatons que lorsque le coefficient d'élasticité tend vers zéro, le prix du permis tend vers l'infini. La raison est que ce cas reflète une fonction d'utilité Leontief où les modes de transport sont complémentaires. Cela implique que, quel que soit le prix du permis, les individus utiliseront toujours les deux modes. Par ailleurs, nous remarquons que le prix du permis est nul quand le coefficient de l'élasticité de substitution prend environ la valeur de 5.85. Cela représente une fonction d'utilité de la forme linéaire qui permet la parfaite substituabilité entre les modes. Le prix du permis d'émissions est réellement sensible au coefficient d'élasticité de substitution.

À l'issue de ces premières applications numériques et des tests de sensibilité effectués, les résultats théoriques du modèle se voient illustrés. Nous intégrons un individu supplémentaire n'ayant pas le même revenu afin d'analyser les conséquences sur l'équilibre du modèle.

4.3.2. Applications numériques avec trois individus à revenus différents

Comme dans la situation analysée avec deux individus (§ 4.3.1), nous effectuons, dans un premier temps, les applications numériques et les interprétons et, dans un second temps, nous exposons les tests de sensibilité relatifs à la quantité de permis distribuée, au prix du permis d'émissions et au coefficient d'élasticité de substitution.

4.3.2.1. Applications numériques et interprétations des résultats

Nous conservons les valeurs des paramètres retenues dans la première simulation. Nous ajoutons un troisième individu ayant un revenu hebdomadaire consacré au transport de 30 € ($R_{T_3} = 30$ €) et une préférence d'utilisation de la voiture représentée par le coefficient $a_3 = \frac{5}{6}$ identique à celle de l'individu 1. Les résultats de cette application numérique sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU N°4.6 : Application numérique n°3 : situation sans réglementation environnementale

Valeurs des paramètres : $p_V = 0.30$; $p_{TC} = 0.10$; $R_{T_1} = 20$; $R_{T_2} = 20$; $R_{T_3} = 30$; $a_1 = \frac{5}{6}$; $a_2 = \frac{2}{3}$; $a_3 = \frac{5}{6}$; $\sigma = \frac{5}{2}$			
À l'équilibre	Individu 1	Individu 2	Individu 3
V_i^*	61	35	91
TC_i^*	17	96	26
Nombre total de kilomètres parcourus en voiture	$V^* = 187$		
Nombre total de kilomètres parcourus en TC	$TC^* = 139$		
Bien-être social	$W^* = 136.12$		

Le nombre total de kilomètres parcourus en automobile, lors de la situation initiale, est de 187 km. Les émissions polluantes totales s'élèvent à $e_{T_3} = 24\,310$ gCO₂. Nous supposons, comme précédemment, que l'autorité régulatrice souhaite réduire les

émissions provoquées par l'automobile de 20%. La norme fixée par les autorités sera alors de $e_{T4} = 19\,448\text{ gCO}_2$, ce qui équivaut à 150 km parcourus en automobile. En effectuant une détermination des allocations de permis au prorata des émissions passées, les quotas distribués seront alors de 49 unités pour l'individu 1 ($\bar{V}_1 = 49$), de 28 unités pour l'individu 2 ($\bar{V}_2 = 28$) et de 73 unités pour l'individu 3 ($\bar{V}_3 = 73$). En appliquant de nouveau la solution itérative calculée sous le logiciel mathematica, on obtient : $p_e = 0.1481\text{ €}$. Nous présentons, dans le tableau suivant, les résultats de la simulation lorsque le système de marché de PEN est mis en place.

TABLEAU N°4.7 : Application numérique n°4 : situation avec réglementation environnementale

Valeurs des paramètres : $p_V = 0.30; p_{TC} = 0.10; R_{T_1} = 20; R_{T_2} = 20; R_{T_3} = 30; a_1 = \frac{5}{6}; a_2 = \frac{2}{3}; a_3 = \frac{5}{6}; \sigma = \frac{5}{2};$ $\bar{V}_1 = 49; \bar{V}_2 = 28; \bar{V}_3 = 73; p_e = 0.1481$			
À l'équilibre	Individu 1	Individu 2	Individu 3
V_i^{**}	52	20	78
TC_i^{**}	39	151	59
Nombre total de kilomètres parcourus en voiture	$V^{**} = 150$		
Nombre total de kilomètres parcourus en TC	$TC^{**} = 249$		
Bien-être social	$W^{**} = 139.58$		

Dans ce tableau, on observe que les individus 1 et 3 dépassent leurs quotas de kilomètres à parcourir en automobile. Par conséquent, afin de respecter la réglementation environnementale, l'individu 1 doit acheter trois permis pour un montant de 0.4443 € et l'individu 3 cinq permis pour une somme totale de 0.7405 €. Quant à l'individu 2, on remarque que tous ses permis ne sont pas utilisés. Il pourra les vendre pour 1.1848 €. Le marché est donc équilibré, l'offre de permis (individu 2) est égale à la demande (individus 1 et 3). Nous constatons que l'individu 3 a le revenu transport le plus élevé et une forte préférence pour l'automobile. Comme celui-ci est l'acheteur principal de permis, cela appuie notre anticipation sur l'influence des paramètres de revenus et de préférences sur les échanges.

Nous soulignons que le nombre total de kilomètres parcourus est supérieur à celui obtenu dans la situation sans réglementation environnementale. Le nombre total de kilomètres parcourus passe de 326 à 399 km lors de l'instauration du système de PEN. Nous constatons une fois de plus la hausse des kilomètres engendrée par l'allocation gratuite des permis.

Le bien-être collectif a légèrement augmenté lors de l'instauration de l'outil des PEN, il est passé de 136.12 à 139.58 €. Le système est alors efficace puisque la norme environnementale est respectée et le bien-être social est maximisé.

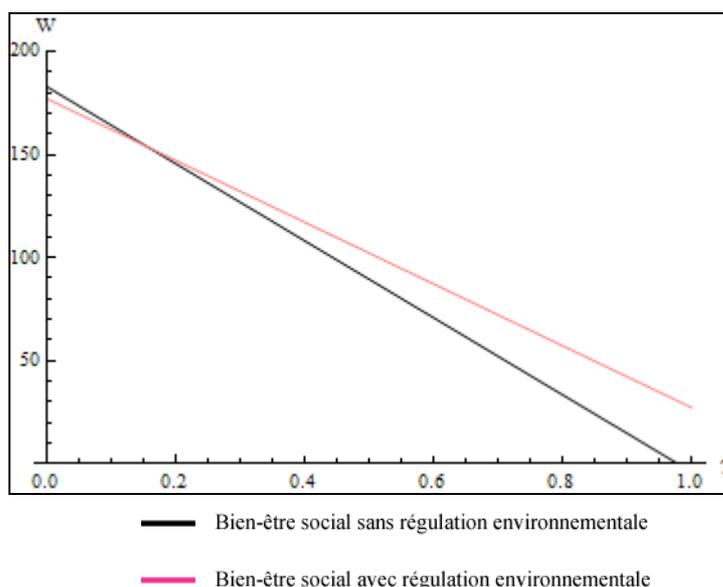
Nous synthétisons les deux situations avec ou sans politique environnementale dans le tableau suivant :

TABLEAU N°4.8 : Pollution et bien-être social, pour trois individus

	Situation initiale	Situation avec PEN
Pollution : émissions en gCO_2	24 310	19 448
Bien-être social en €	136.12	139.58

Une fois de plus, nous constatons dans le tableau n°4.8 le respect de la réduction des émissions et une légère augmentation du bien-être social lors de la mise en place du système de PEN. Nous illustrons l'évolution du bien-être social des deux situations en fonction du dommage marginal.

GRAPHIQUE N°4.5 : Bien-être social et dommage marginal, pour trois individus



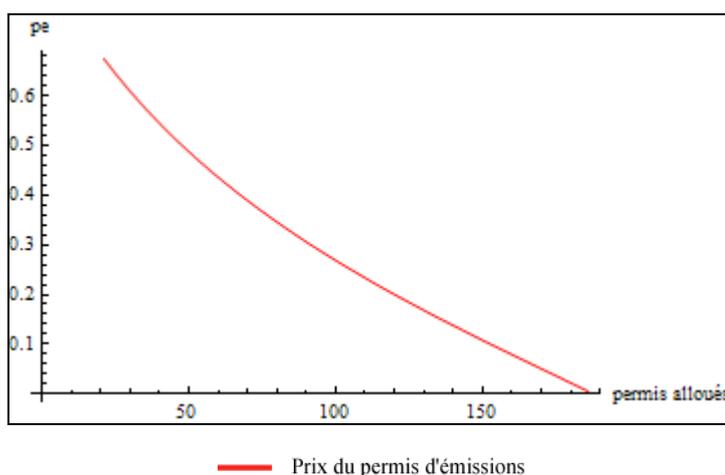
Nous observons sur le graphique n°4.5 que le bien-être social en situation de laisser-faire est supérieur à celui obtenu avec la régulation environnementale pour une valeur du dommage marginal inférieure à 0.1563 €. À partir de cette valeur $\gamma=0.1563$, le système de PEN est efficace puisqu'il maximise le bien-être social par rapport à celui sans régulation environnementale. De plus, nous remarquons que plus la valeur du dommage marginal est élevée, plus l'écart entre les deux courbes de bien-être social s'accroît.

Il est intéressant, une fois de plus, de se pencher sur l'analyse de tests de sensibilité concernant les paramètres importants du modèle : la quantité de permis, son prix et l'élasticité de substitution.

4.3.2.2. Tests de sensibilité relatifs aux permis alloués

Nous avons souligné l'importance de la quantité de permis allouée dans nos résultats théoriques. Nous examinons, par le graphique suivant, l'évolution du prix du permis en fonction de l'allocation des quotas.

GRAPHIQUE N°4.6 : Prix du permis d'émissions (p_e) et nombre de permis alloués (\bar{V})



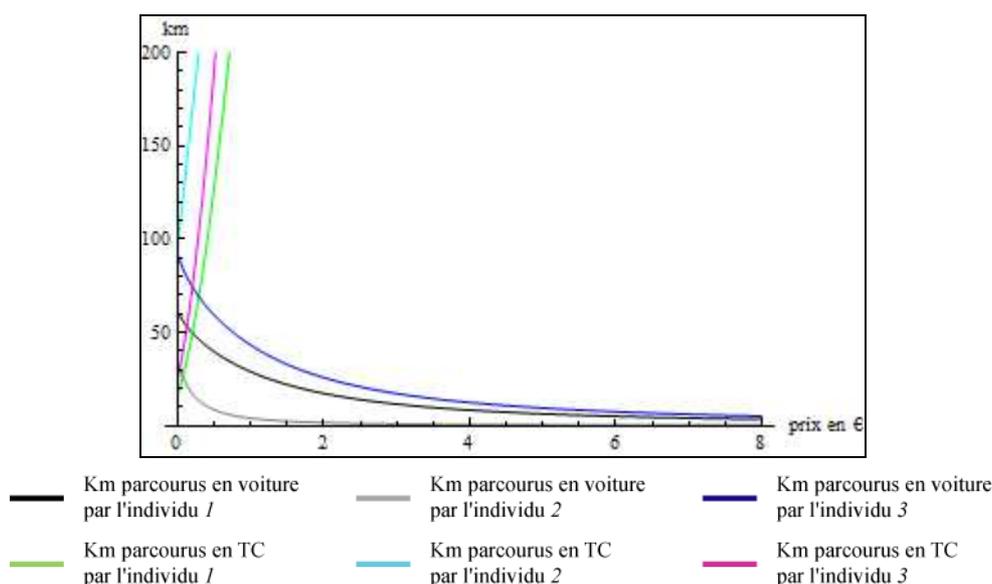
Sur le graphique n°4.6, nous observons que le prix du permis d'émissions est bien une fonction décroissante du nombre de quotas disponibles. En outre, on constate que le

prix du permis est nul lorsque le nombre de permis alloués est supérieur à 186 unités. Si l'autorité régulatrice distribue une quantité de 186 permis ou plus sur le marché, alors le système de PEN sera inefficace. Au contraire, une faible quantité de permis sur le marché entraîne une augmentation du prix du permis d'émissions, d'où une politique environnementale plus stricte.

4.3.2.3. Tests de sensibilité relatifs au prix

Comme nous l'avons effectué pour l'application numérique sur deux individus, nous proposons un graphique sur les quantités de kilomètres parcourus en fonction de l'évolution du prix du permis d'émissions avec trois individus.

GRAPHIQUE N°4.7 : Kilomètres parcourus en automobile et en TC et prix du permis (p_e)



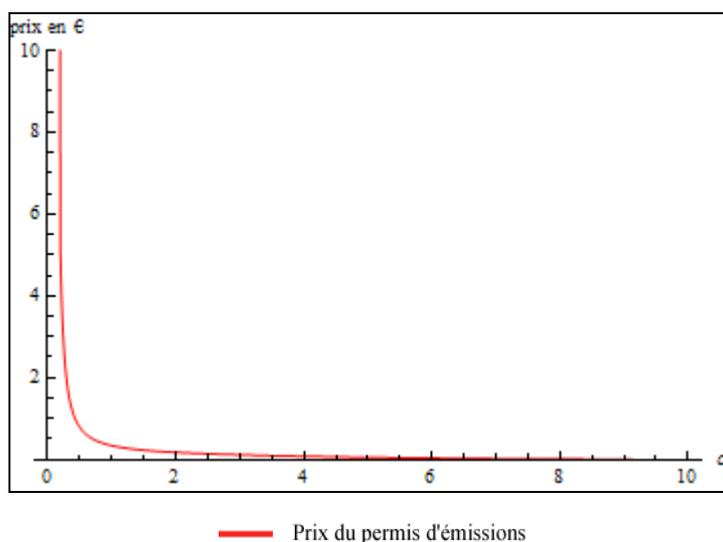
Pour les individus 1 et 3 qui ont une même préférence élevée pour la voiture, le graphique n°4.5 montre que lorsque le prix du permis est compris dans l'intervalle $[0, 0.2]$, le nombre de kilomètres parcourus en voiture est supérieur ou égal à celui parcourus en TC. Cependant, pour un prix du permis équivalant à 0.2 €, l'individu 1 réalise environ 50 kilomètres en voiture, alors que l'individu 3 en parcourt 74. La raison est que les individus ont les mêmes préférences, mais l'individu 3 a un revenu plus

élevé, impliquant un nombre de kilomètres parcourus en voiture plus élevé. Par ailleurs, pour l'individu 2, on remarque que, quel que soit le prix du permis d'émissions, il parcourt plus de kilomètres en TC qu'en automobile. Cela est dû à sa préférence moins élevée pour la voiture. Notons également que, plus le prix du permis augmente, plus l'utilisation de l'automobile se réduit et plus celle des TC augmente.

4.3.2.4. Tests de sensibilité relatifs au coefficient d'élasticité de substitution

Afin d'appuyer l'importance de l'impact du coefficient d'élasticité de substitution sur l'équilibre avec trois individus, un test de sensibilité a été effectué, et est illustré dans le graphique suivant :

GRAPHIQUE N°4.8 : Prix du permis (p_e) et élasticité de substitution (σ)



Sur le graphique n°4.8, nous constatons que lorsque le coefficient d'élasticité de substitution tend vers zéro, alors le prix de permis tend vers l'infini. Cette situation représente une fonction d'utilité de la forme Leontief qui implique la complémentarité des deux modes de transport. Il n'y a pas de substituabilité possible. Néanmoins, lorsque le coefficient d'élasticité est égal à l'unité, le prix du permis d'émissions s'élève à 0.3370 €. Ce cas reflète une fonction de la forme Cobb-Douglas, qui engendre

l'utilisation impérative des deux modes de transport. En revanche, avec un coefficient d'élasticité de substitution : $\sigma = 9.10$, le prix du permis est nul. Cela correspond à une fonction linéaire où les individus sont parfaitement indifférents aux modes de transport utilisés. Par conséquent, selon le coefficient d'élasticité de substitution, le prix du permis se modifie. Le rôle de σ est donc capital dans l'évolution du prix du permis d'émissions.

À l'issue de cette section, nous avons pu appuyer nos résultats théoriques. En effet, nous avons illustré d'une part l'importance du prix du permis d'émissions et de la quantité distribuée contribuant au bon fonctionnement et à la réussite du système de PEN et, d'autre part, le rôle capital de l'élasticité de substitution. Nous avons montré l'efficacité du système de PEN, dans la mesure où il maximise le bien-être social à partir de certaines valeurs du dommage marginal.

Nous soulignons que l'impact de l'allocation gratuite des permis engendre un effet revenu qui implique un nombre total de kilomètres parcourus plus élevé que dans la situation initiale. L'individu consacre un budget plus élevé à ses déplacements. En outre, le nombre de kilomètres parcourus en TC est augmenté puisque la contrainte environnementale est respectée. Cette constatation nous conduit à élaborer une extension à notre modèle, afin de modérer l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus entraîné par la distribution gratuite des permis. C'est l'objectif de la section suivante.

4.4. Une contrainte kilométrique et un bien composite

Nous avons constaté, théoriquement et numériquement, que l'allocation gratuite des permis constituait une augmentation du revenu des individus de $p_e \bar{V}_i$, engendrant un nombre de kilomètres parcourus plus important. Afin que ce phénomène soit évité, nous apportons à notre modèle des éléments supplémentaires : une contrainte kilométrique qui permet de tenir compte de la réalité des comportements de déplacement en ville et la consommation d'un bien composite.

4.4.1. Analyse des extensions

La contrainte kilométrique impose un nombre total de kilomètres parcourus fixé à ne pas dépasser. Elle est représentée sous la forme : $V_i + TC_i = \bar{K}_i$. De plus, nous intégrons dans la fonction d'utilité du consommateur un bien composite de consommation noté M_i , qui est un bien numéraire (son prix est alors égal à l'unité). Comme nous l'avons précisé dans la section (§ 4.2), le revenu transport du consommateur est $R_{T_i} = R_i - M_i$, où R_i est le revenu total de l'individu i et M_i correspond aux dépenses de consommation en bien composite. Dès lors, le consommateur dispose d'un nouveau programme (doublement contraint) qu'il cherche à maximiser :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max} Z = U(V_i, TC_i) + M_i \\ \text{s.c. } p_v V_i + p_e (V_i - \bar{V}_i) + p_{TC} TC_i \leq R_i - M_i \\ \text{s.c. } TC_i + V_i = \bar{K}_i \\ V_i \geq 0 \\ TC_i \geq 0 \Rightarrow (\bar{K}_i - V_i) \geq 0 \end{array} \right\} \quad (4.49)$$

Nous restons dans le cadre théorique précédemment utilisé, dans la mesure où nous reprenons la fonction d'utilité de la forme C.E.S. : $U(V_i, TC_i) = (a_i V_i^\rho + (1 - a_i) TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}}$.

Si les deux modes de transport sont utilisés, à savoir la voiture V_i et les transports collectifs TC_i , nous obtenons une solution intérieure au programme. Le Lagrangien associé est de la forme :

$$L = (a_i V_i^\rho + (1 - a_i)(\bar{K}_i - V_i)^\rho)^{\frac{1}{\rho}} + M_i - \lambda (p_v V_i + p_e (V_i - \bar{V}_i) + p_{TC} (\bar{K}_i - V_i) + M_i - R_i) \quad (4.50)$$

Ainsi, les deux conditions du premier ordre sont :

$$\begin{aligned}
 CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} &= \left(a_i V_i^{\rho-1} + (a_i - 1)(\bar{K}_i - V_i)^{\rho-1} \right) \times \left(a_i V_i^\rho + (1 - a_i)(\bar{K}_i - V_i)^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} \\
 &\quad - \lambda (p_v + p_e - p_{TC}) = 0 \\
 CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial M_i} &= 1 - \lambda = 0
 \end{aligned}$$

Suivant la deuxième condition (CPO_2), on en déduit que la contrainte budgétaire est saturée, ce qui implique la relation suivante :

$$M_i = R_i - p_v V_i - p_e (V_i - \bar{V}_i) - p_{TC} (\bar{K}_i - V_i) \quad (4.51)$$

Toujours d'après la deuxième condition (CPO_2), le multiplicateur est égal à 1, donc la première condition (CPO_1) devient :

$$\left(a_i V_i^{\rho-1} + (a_i - 1)(\bar{K}_i - V_i)^{\rho-1} \right) \times \left(a_i V_i^\rho + (1 - a_i)(\bar{K}_i - V_i)^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_v - p_e + p_{TC} = 0 \quad (4.52)$$

Toutefois, il apparaît difficile de déterminer de manière explicite le nombre de kilomètres parcourus en voiture. C'est pourquoi nous réalisons des statiques comparatives *via* l'utilisation du théorème des fonctions implicites. Par conséquent, nous posons la fonction F suivante :

$$\begin{aligned}
 F(V_i, p_e) &= \left(a_i V_i^{\rho-1} + (a_i - 1)(\bar{K}_i - V_i)^{\rho-1} \right) \times \left(a_i V_i^\rho + (1 - a_i)(\bar{K}_i - V_i)^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_v - p_e + p_{TC} = 0 \\
 &\quad (4.53)
 \end{aligned}$$

La réalisation des conditions d'application du théorème des fonctions implicites assure qu'à toute valeur de p_e est associée une valeur unique de V_i dans le voisinage d'un point vérifiant l'expression $F(V_i, p_e) = 0$, c'est-à-dire dans le voisinage d'une solution d'équilibre. Dès lors, il est possible d'écrire la fonction implicite $V_i = h(p_e)$ et d'interpréter la seule dérivée qui nous intéresse en matière de statique comparative, à savoir $\partial V_i / \partial p_e$ et dont l'existence est garantie. D'une part, nous constatons que la

fonction $F(V_i, p_e)$ possède bien des dérivées continues. D'autre part, la dérivée partielle de F par rapport à V_i est toujours positive (si $\rho > 1$), (cf. annexe 4.7), et donc non nulle.

Le théorème des fonctions implicites est présenté sous la forme suivante⁶⁹:

$$\left(\frac{dV_i}{dp_e} \right) = - \frac{\partial F / \partial p_e}{\partial F / \partial V_i} \quad (4.54)$$

Nous obtenons les relations $\frac{\partial F}{\partial p_e} = -1$ et $\frac{\partial F}{\partial V_i} > 0$ si $\rho > 1$, (cf. annexe 4.6). Nous

trouvons alors la relation suivante : $\frac{dV_i}{dp_e} < 0$ (4.55). Ainsi, une augmentation du prix du

permis d'émissions entraîne une réduction de l'utilisation de l'automobile. Cependant, nous pouvons seulement évaluer le sens de variation, et non son intensité.

En étudiant les effets engendrés par V_i sur la consommation de bien M_i , nous obtenons : $\frac{\partial M_i}{\partial V_i^*} = -p_V - p_e + p_{TC}$ (4.56). Cette relation est négative si et seulement si

$$p_{TC} < p_V + p_e.$$

Ainsi, nous concluons que si l'autorité régulatrice met en place une politique de régulation environnementale plus sévère, elle diminuera le nombre de permis alloués. Cette réduction du nombre de quotas engendre une augmentation du prix du permis d'émissions p_e . Comme nous l'avons démontré par l'équation (4.55), une augmentation du prix du permis entraîne une réduction du nombre de kilomètres parcourus en automobile. Cette diminution de la quantité de kilomètres en voiture implique une augmentation de la consommation du bien composite M_i à condition que le prix des TC soit inférieur au coût de l'utilisation de l'automobile ($p_{TC} < p_V + p_e$). Dans ce nouveau cadre d'analyse, les individus peuvent substituer des déplacements à la consommation du bien composite. Grâce à l'introduction de la contrainte kilométrique et de la consommation de M_i dans le modèle, la mise en place du système de PEN ne conduit plus à une augmentation inattendue du nombre total de kilomètres parcourus.

⁶⁹ L'expression sera exprimée en valeur absolue dans le but de l'interpréter. (cf. Ferrier, 2003)

4.4.2. Interprétations des résultats

L'introduction d'un bien composite dans la fonction d'utilité, ainsi que l'ajout d'une contrainte kilométrique fixée, ont été proposés afin d'améliorer le modèle de base. Ces deux extensions ont un double objectif : d'une part, la contrainte kilométrique permet de modérer le nombre total de kilomètres parcourus, ce qui reflète mieux les déplacements en zone urbaine. D'autre part, l'ajout de la consommation d'un bien composite montre que le revenu est utilisé dans un autre but que les déplacements. L'analyse s'est centrée sur le cas de la fonction d'utilité C.E.S. où l'on considère l'utilisation des deux modes de transport.

Cependant, le nouveau programme de maximisation ne nous a pas permis de définir précisément les quantités d'équilibre de kilomètres parcourus en voiture. Nous avons dû utiliser une fonction implicite afin de déterminer une solution au programme. La fonction implicite permet seulement d'évaluer les sens de variation et non les intensités. Toutefois, nous cherchions à savoir si dans notre nouveau cadre d'analyse, le prix du permis d'émissions avait un impact indirect sur la consommation du bien composite, *via* son influence sur l'utilisation de la voiture.

Nous avons déterminé une relation négative entre le nombre de kilomètres parcourus en automobile et le prix du permis d'émissions, sous la condition que le paramètre ρ soit supérieur à un. Cette relation négative implique la diminution du nombre de kilomètres parcourus en automobile lorsque le prix du permis d'émissions augmente. Pour que cette diminution engendre une consommation de M_i plus élevée, le coût des transports collectifs doit être inférieur au coût de l'utilisation de l'automobile. En effet, les individus vont consommer plus de M_i , mais doivent continuer à se déplacer.

Dans ce cadre d'analyse, une politique environnementale plus stricte a les impacts attendus. En agissant sur le prix du permis *via* la diminution du nombre de quotas sur le marché, l'autorité régulatrice favorise l'utilisation des TC par rapport à l'automobile et augmente la consommation en bien composite des individus sous deux conditions : $\rho > 1$ et $p_{TC} < p_V + p_e$.

Conclusion du chapitre 4

L'objectif de ce chapitre était de développer une analyse théorique relative au système de marché de PEN pour les automobilistes d'une zone urbaine.

Nous avons exposé, dans une première section (§ 4.1), plusieurs éléments et hypothèses nécessaires à la réussite de la modélisation. En effet, nous avons déterminé le nombre de kilomètres parcourus comme variable d'action, proposé une allocation gratuite des permis aux individus et présenté les possibilités technologiques de mise en place d'un tel système de marché. Ces choix sont indispensables au développement d'un modèle.

Dans une deuxième section (§ 4.2), nous avons posé les fondements de la modélisation. Dans un cadre microéconomique simple et à l'aide des outils de l'économie de l'environnement, nous avons élaboré une modélisation théorique du fonctionnement d'un marché de PEN appliqués aux automobilistes. Le modèle utilise une forme d'utilité C.E.S. afin d'analyser les différents cas possibles d'utilisation des modes de transport et la nature de leur substituabilité. Nous avons déterminé les quantités d'équilibre de kilomètres parcourus en automobile et en TC, dans le cadre de référence sans réglementation environnementale, afin que soit ensuite étudié l'impact de l'instauration du système de PEN. Ainsi, nous avons mis en évidence le rôle capital du prix du permis d'émissions et celui de la quantité de permis allouée pour la réussite ou l'échec de l'instrument. L'autorité régulatrice ne peut agir qu'indirectement sur le prix du permis *via* la quantité de quotas distribuée. Une trop grande quantité de permis disponible sur le marché entraîne un prix du permis faible, voire nul, engendrant l'inefficacité du système. Par conséquent, nous avons abouti au résultat suivant : la quantité optimale de permis sur le marché est obtenue lorsque l'utilité marginale et le dommage marginal d'un kilomètre parcouru en voiture sont égaux. Nous soulignons également le rôle important joué par l'élasticité de substitution, dans la mesure où elle détermine la nature des modes de transport (substituabilité ou complémentarité). Nous avons remarqué à plusieurs reprises des effets contradictoires du prix du permis. D'un côté, il augmente le coût de l'automobile, mais d'un autre côté, il élève le revenu

transport des individus. Une hausse de revenu consacré aux déplacements implique une augmentation du nombre total de kilomètres parcourus. Toutefois, la norme environnementale est respectée, l'outil économique a atteint son objectif premier de mobilité durable.

Dans la troisième section de ce chapitre (§ 4.3), nous avons réalisé des simulations numériques pour illustrer nos résultats théoriques. Dans un souci de simplicité, les applications numériques ont concerné, au plus, trois individus. Les résultats de ces simulations illustrent l'efficacité de l'outil des PEN dans la mesure où le bien-être social est augmenté par rapport à la situation initiale, à partir d'une certaine valeur du dommage marginal. De plus, nous avons effectué des tests de sensibilité relatifs à la quantité de permis d'émissions, au prix du permis et au coefficient d'élasticité de substitution afin de montrer leur influence dans le modèle. Lors de l'instauration du système de PEN, nous soulignons que l'augmentation du nombre total de kilomètres parcourus est également révélée numériquement.

La quatrième section (§ 4.4) a été consacrée à l'amélioration du modèle. Nous y apportons deux extensions : une contrainte kilométrique et un bien composite. Cela a permis de contrecarrer l'augmentation du nombre total de kilomètres parcourus lors de l'instauration du système de PEN. Dans ce nouveau cadre d'analyse, la substitution des déplacements à la consommation du bien composite est possible à condition que le coût des TC soit inférieur à celui de la voiture.

À l'issue de ce chapitre, nous avons montré que, non seulement l'instrument des permis d'émissions négociables peut être appliqué aux automobilistes d'une ville, mais qu'en plus, cet outil est efficace pour accéder à une mobilité durable. La modélisation amorcée au cours de ce chapitre apporte des éléments de réponses théoriques et empiriques sur le fonctionnement d'un marché de PEN en zone urbaine.

Conclusion de la deuxième partie

La mise en parallèle des modélisations théoriques relatives au péage urbain et au système de PEN, en faveur d'une mobilité durable, a été au cœur de cette deuxième partie. Bien que les deux modèles développés soient considérablement différents, nous avons montré leur efficacité et leur pertinence dans l'accès à un transport urbain durable. Il est difficile de choisir catégoriquement un instrument plutôt que l'autre. Cependant, certains éléments des modélisations présentées peuvent guider le choix du régulateur dans la mise en place d'un outil économique.

Les objectifs de réduction de la congestion urbaine ont déjà suscité de nombreuses modélisations relatives au péage urbain. Dans le chapitre 3, nous nous sommes appuyés sur ces fondements pour réaliser un modèle plus pertinent et mieux adapté à l'objectif de transport durable. Ainsi, nous avons apporté deux extensions au modèle de file d'attente classique de péage urbain. Notre contribution est composée d'une introduction du coût environnemental de l'automobile et de la mise en place d'une politique modale de redistribution des recettes du péage vers les TC. Ces deux extensions ont permis de mettre en évidence, non seulement la capacité du péage urbain à internaliser les effets externes négatifs environnementaux, mais aussi l'efficacité plus prononcée de l'outil économique lors de l'ajout d'une politique modale. Le modèle prend en compte trois sortes de péages, à savoir un péage de pointe, un péage uniforme lors des périodes de pointe et un péage uniforme, qui peuvent être complétés par la politique de redistribution des recettes vers les TC. Grâce aux résultats de la modélisation, on constate une efficacité plus prononcée du péage de pointe par rapport aux autres. Mais il est en réalité difficile d'appliquer ce type de péage. Cependant, les péages uniforme de pointe et uniforme accompagnés de la politique modale engendrent aussi les effets attendus tels que la diminution du nombre d'automobilistes et la réduction du coût social total par rapport à celui de l'équilibre. Toutefois, le choix entre les différents péages peut aussi être réalisé en fonction des valeurs du temps et des coûts fixes des TC. Ces valeurs constituent deux paramètres importants du modèle, dans la mesure où ils influencent l'efficacité de l'outil.

Le chapitre 4 a été consacré à la conception d'une modélisation du système de PEN appliqué aux automobilistes d'une zone urbaine. Étant donné le petit nombre de développements théoriques concernant cet outil, nous avons cherché à développer notre propre modèle. À l'aide des outils de la microéconomie et de l'économie de l'environnement, nous avons exposé une modélisation simple, mais nouvelle. Nous avons mis en évidence le rôle important du nombre de permis disponible sur le marché, ainsi que celui du prix du permis. Ces deux paramètres sont déterminants dans la réussite du système de PEN ; cependant, l'autorité régulatrice ne peut influencer le prix du permis d'émissions qu'à travers l'allocation du nombre de permis. Ainsi, une trop grande quantité de permis sur le marché peut entraîner une trop forte baisse du prix du permis, qui aura pour conséquence l'inefficacité de la politique environnementale instaurée. Nous soulignons l'intérêt de déterminer, en maximisant le bien-être de la société, le quota optimal de permis permettant la réussite du système. À l'issue des résultats de notre modèle, la quantité de permis optimale est obtenue lorsque l'utilité marginale d'un kilomètre parcouru en voiture est égale au dommage marginal environnemental qu'il engendre. Il est nécessaire de souligner également l'importance de la substituabilité entre les modes de transport, dans la mesure où celle-ci peut modifier l'efficacité du système.

Le travail de comparaison mené au sein de cette deuxième partie s'est axé sur l'efficacité théorique des deux instruments. Nous avons montré que le système de taxe urbaine avait non seulement la vertu de prendre en compte la pollution automobile, mais que l'accompagner d'une politique de transfert modal aboutissait à une politique optimale pour obtenir un transport durable. Nous avons également mis en avant la faisabilité d'un système de PEN pour les automobilistes. Le modèle développé montre l'efficacité de cet instrument dans la réduction de la pollution automobile urbaine et dans la maximisation du bien-être social. Cependant, à l'issue de cette deuxième partie, il nous est difficile de préconiser un instrument par rapport à l'autre. Le principal avantage du péage urbain réside dans le fait que ses modélisations théoriques sont déjà bien développées et reconnues. Cependant, nos analyses ont montré l'efficacité du système de PEN pour les automobilistes. C'est pourquoi il apparaît évident de

poursuivre les recherches sur cet instrument, et de faire connaître, auprès des régulateurs, les justifications théoriques développées pour une future mise en place.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le principal objectif de ce travail de recherche était de contribuer à la réflexion sur les politiques économiques de transport durable. Ce dernier se définit comme un transport qui ne met en danger ni la santé, ni les écosystèmes. Il respecte les besoins de mobilité sans franchir le seuil critique du stock des ressources naturelles. La réflexion menée au cours de cette thèse se concentre sur les instruments employés pour assurer une mobilité durable. L'intérêt est d'utiliser les outils développés par l'économie de l'environnement et de les appliquer au champ de l'économie des transports. Dans la mesure où, en information parfaite, le système de taxation et celui de marché des permis d'émissions négociables (PEN) sont censés donner les mêmes résultats, notre travail s'est axé sur la comparaison de ces deux outils.

Pour cela, nous avons réalisé une analyse fine des travaux théoriques et appliqués, avant de proposer le développement de modélisations appropriées à la thématique de mobilité durable. Ainsi, la première partie est composée d'un premier chapitre consacré à l'analyse théorique du péage urbain, et d'un second centré sur la comparaison, aussi bien théorique qu'appliquée, de la taxe et des permis d'émissions. La seconde partie est également constituée de deux chapitres : l'un présente une modélisation du péage urbain associé à une politique modale et le second expose un modèle de PEN pour les automobilistes d'une zone urbaine.

Par la comparaison de ces deux outils, nous avons cherché à éclairer le décideur public sur la politique de transport urbain à instaurer pour développer une mobilité durable.

Le premier chapitre dresse un bilan des travaux théoriques et appliqués sur le péage urbain. Nous avons analysé les différentes externalités engendrées par l'utilisation de l'automobile, puis montré l'efficacité du péage à les internaliser. Nous avons exposé et comparé les deux modélisations de référence de la congestion : l'approche des flux et celle de file d'attente. Une attention particulière a également été portée à l'expérience de Londres. Les principales conclusions dégagées de ce premier chapitre sont les suivantes. Premièrement, les résultats de la comparaison des deux modélisations de la congestion nous ont conduit à considérer l'approche par la file d'attente comme étant la plus appropriée, au regard de sa capacité à modéliser la circulation dans nos villes. Deuxièmement, nous avons mis en exergue l'efficacité du péage urbain, mais avons souligné le point faible des travaux théoriques et des modélisations, qui se limitent souvent au seul problème de congestion. Pourtant, l'application du péage urbain dans une optique environnementale pourrait être développée pour répondre au problème de mobilité durable. Toutefois, les analyses coûts-bénéfices réalisées sur les expériences de péage de Londres et de Stockholm montrent une certaine inefficacité économique de l'instrument. Cela peut en partie s'expliquer par le fait que ces analyses s'appuient sur des valeurs du temps estimées, donc discutables, pour évaluer les gains dus à la réduction de la congestion. Nous concluons, à ce propos, que la valeur du temps est une variable clé de la réussite du péage.

Le deuxième chapitre a mis en évidence l'efficacité théorique des deux outils. En revanche, il nous a conduits à souligner les développements théoriques peu nombreux du système de marché de PEN pour les automobilistes et leur manque d'application. Dans un cadre d'analyse théorique, nous avons confronté les avantages et les inconvénients du système de taxe et de celui de marché de PEN. Un premier élément de conclusion apparaît : il n'existe pas d'instrument plus efficace qu'un autre. Nous avons alors évoqué la piste d'un système hybride combinant les deux instruments. Ce dernier semblerait être l'outil le plus efficace, mais se révèle cependant délicat à mettre en place. Le choix d'un instrument ne peut se faire uniquement sur la base d'arguments théoriques. Nous avons alors tenté d'apporter une réponse par l'étude des différentes applications du système de PEN. Comme cet outil est beaucoup moins utilisé que la

taxe, nous nous sommes penchés sur les expériences touchant les entreprises polluantes et celles concernant le secteur du transport. Au vu de ces analyses, une conclusion déterminante pour la suite de notre thèse est apparue : le système de PEN appliqué aux automobilistes d'une ville n'a toujours pas été testé. Afin de justifier ce constat, nous avons dressé un bilan des trois principales modélisations théoriques de cet outil appliqué à l'échelle des automobilistes. Le fait que ces modèles soient peu nombreux explique en partie que l'outil n'est pas encore répandu dans les politiques de transport urbain.

À l'issue de cette première partie, il nous est apparu impossible de choisir l'outil le mieux adapté au problème de déplacements urbains. Nous avons cependant déterminé deux principales limites :

- la prise en compte du problème environnemental par le péage urbain devrait être approfondie.
- les justifications théoriques du système de PEN pour les automobilistes mériteraient d'être plus développées.

Dans la deuxième partie, nous avons tenté de combler les lacunes soulignées lors de la première partie.

Dans le troisième chapitre, nous avons proposé un modèle de péage urbain répondant mieux aux critères de mobilité durable. Pour ce faire, nous avons intégré au modèle de file d'attente classique le coût environnemental engendré par l'automobile et une politique modale favorisant l'utilisation des transports collectifs (TC). Trois sortes de péages ont été étudiées : le péage de pointe, le péage uniforme lors des périodes de pointe et le péage uniforme. Chaque péage a ensuite été associé à une politique incitative de transfert modal qui prend la forme d'une redistribution des recettes du péage vers les TC pour diminuer le tarif de ces derniers. Des simulations numériques sont venues illustrer les résultats théoriques du modèle et nous avons réalisé des tests de sensibilité relatifs aux variables capitales du modèle. Ce troisième chapitre nous a informés, d'une part, que la combinaison de chaque péage à la politique de redistribution est une réussite : cela engendre une réduction du coût social total. D'autre part, nous avons mis en évidence l'influence de la valeur du temps et des coûts fixes des

TC sur l'efficacité du péage et de la politique modale. En effet, nous avons montré qu'une valeur du temps très élevée amoindrit les effets des politiques de régulation instaurées. Au contraire, une valeur du temps relativement faible accentue l'efficacité du péage et de la politique de redistribution. Pour des coûts fixes des TC faibles, le péage de pointe est le plus efficace, alors que, pour des coûts fixes élevés, le péage uniforme se révèle être plus efficace que celui de pointe. Le principal résultat de ce chapitre est que la politique optimale est obtenue lorsque le péage, quelle que soit sa forme, est complété de la politique modale incitative.

Le quatrième et dernier chapitre est orienté vers la conception d'une modélisation d'un système de PEN appliqué aux automobilistes d'une zone urbaine. L'objectif était double : déterminer sa faisabilité d'une part, et son efficacité d'autre part. On a tout d'abord défini les hypothèses et les caractéristiques fondamentales du fonctionnement de l'outil pour ensuite se concentrer sur l'élaboration du modèle. Notre modélisation se fonde sur une fonction d'utilité de la forme C.E.S. (*Constant Elasticity of Substitution*) dépendante des déplacements en voiture et en TC. Nous avons étudié les différents cas possibles d'utilisation des modes de transport considérés et la nature de leurs substituabilités. Pour une meilleure compréhension, des simulations numériques étaient ces résultats théoriques.

Les résultats théoriques et numériques obtenus nous ont permis de mettre en avant deux variables clés dans la réussite ou l'échec du système de PEN : le prix du permis d'émissions et la quantité de permis allouée. Le système de PEN maximise le bien-être social lorsque la quantité de permis sur le marché est optimale. Cette dernière est trouvée lorsque l'utilité marginale et le dommage marginal d'un kilomètre parcouru en voiture sont égaux. Nous avons également mis en évidence le fait que l'instauration d'un système de PEN entraîne une augmentation du nombre total de kilomètres parcourus. Pour refléter au mieux les déplacements en ville, nous avons apporté des extensions au modèle initial afin de contrecarrer cet effet. Le résultat principal de ce chapitre souligne la réussite de l'outil des PEN appliqué aux automobilistes pour atteindre l'objectif de transport durable.

À l'issue de cette deuxième partie, nous avons montré par la modélisation, appuyée de simulations numériques, l'efficacité et la faisabilité des deux instruments étudiés. Les deux principales conclusions sont les suivantes :

- Le péage, par sa capacité à prendre en compte les externalités environnementales, semble répondre aux objectifs des politiques de transport urbain actuelles. Quand il est associé à une politique incitative au transfert modal, le coût total social est minimisé.
- Grâce à notre modélisation théorique, nous avons montré le fonctionnement et l'efficacité de l'outil des PEN pour les automobilistes en vue d'obtenir un transport durable à l'échelle d'une ville.

Notre contribution témoigne donc du fait que les outils de l'économie de l'environnement peuvent être appliqués à l'économie des transports. En effet, l'application de la taxe ou du système de PEN apparaît efficace dans le domaine du transport urbain. Seulement, il semble difficile d'apporter une réponse catégorique sur le choix de l'instrument le mieux adapté au développement de politique de mobilité durable.

Dans les deux premiers chapitres, la recherche de l'outil économique le plus efficace nous a menés à considérer la supériorité théorique d'un système hybride. Mais ce dernier est difficile à instaurer. Dans un tel contexte, nous avons alors mis en parallèle les différentes expérimentations des outils. Il s'est avéré que le péage urbain est un instrument largement utilisé (par exemple à Londres, Stockholm et Singapour), même si son objectif premier résidait principalement dans la réduction de la congestion urbaine. L'outil des PEN commence, quant à lui, à se diffuser dans les politiques environnementales internationales (cf. SCEQE⁷⁰). En revanche, nous avons mis en évidence ses expériences moins développées dans la problématique des transports. Le

⁷⁰ Système communautaire d'échanges de quotas d'émissions.

choix du décideur public ne peut s'appuyer sur le simple fait qu'il existe plus d'analyses théoriques ou d'expériences d'un outil par rapport à l'autre.

Notre thèse présente alors des justifications théoriques de la taxe et du marché de PEN pour les automobilistes (chapitres 3 et 4), sur lesquelles le régulateur pourra s'appuyer pour choisir l'instrument répondant le mieux à la problématique de transports durables. Nos conclusions laissent entrevoir la possibilité d'utiliser les deux instruments pour accéder à une mobilité durable.

Nous avons mis l'accent sur les différentes variables à considérer pour obtenir l'efficacité des deux outils. Tout d'abord, si le régulateur décide de mettre en place un péage urbain, il doit tenir compte de la valeur du temps, variable clé de la réussite de cet outil économique. La valeur du temps a effectivement une grande influence sur les résultats du péage, quelle que soit sa forme (pointe, uniforme de pointe, uniforme). Cependant, un problème est soulevé : la valeur du temps est difficile à estimer. La valeur des coûts fixes des TC est une seconde variable importante. En effet, le régulateur devra prendre en compte celle-ci afin d'instaurer le péage le plus efficace. Nous avons également mis en avant la complémentarité du péage et de la politique incitative modale. Si les recettes du péage sont redistribuées vers les TC, alors cela favorise le transfert modal et réduit le coût social total.

Si l'autorité régulatrice choisit d'appliquer un système de PEN pour les automobilistes de sa ville, plusieurs variables doivent aussi être prises en compte. Le prix du permis d'émissions et la quantité de permis allouée sur le marché sont les principaux éléments de la réussite du système. Or, le régulateur ne peut influencer le prix du permis qu'indirectement *via* l'allocation des permis. Une quantité trop élevée de permis entraîne un prix trop faible, ce qui engendre l'inefficacité du système de PEN. Ainsi, le décideur public devra déterminer le quota optimal de permis à distribuer. Ce dernier est difficile à déterminer, dans la mesure où la connaissance du dommage marginal environnemental est nécessaire. Les résultats ont aussi mis l'accent sur la nature de la substituabilité des modes de transport. En effet, pour assurer un bon fonctionnement, il est important de connaître la nature des modes (complémentarité ou substituabilité).

Ainsi, pour que l'outil instauré soit efficace, certaines informations sont capitales : connaissance du dommage environnemental provoqué par l'automobile, de la valeur du

temps des individus, et des coûts fixes des transports collectifs. Le besoin d'information est différent pour chaque instrument, et nécessite un travail d'estimation, d'enquêtes, etc. réalisé au préalable.

Si le travail amorcé dans cette thèse apporte des éléments de réponse théorique au décideur public quant au choix de l'outil économique, il pose dans le même temps de nouvelles questions et ouvre de nouvelles perspectives de recherche. Au-delà des modèles et extensions proposés dans les chapitres 3 et 4, plusieurs prolongements sont envisagés.

Une première perspective d'enrichissement réside dans l'approfondissement des justifications théoriques du système de marché de PEN pour les automobilistes. La modélisation de cet outil, encore relativement peu développé dans le domaine des transports urbains malgré un intérêt certain, nécessite de plus amples recherches.

Une perspective empirique est également prévue. Un travail d'estimation des dommages environnementaux provoqués par l'automobile à l'échelle d'une zone urbaine est en effet envisagé. Cette évaluation viendrait s'associer de façon complémentaire à notre recherche sur les politiques de mobilité durable.

BIBLIOGRAPHIE

ALBRECHT J. (2001), « Tradable CO₂ permits for cars and trucks », *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, pp. 179-189.

ARNOTT R., DE PALMA A. et LINDSEY R. (1990), « Economics of a bottleneck », *Journal of Urban Economics*, vol. 27, pp. 111-130.

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

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

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

BACCAÏNI B., SÉMÉCURE F., et THOMAS G. (2007), « Les déplacements domicile-travail amplifiés par la périurbanisation », INSEE première, n°1129.

BALDURSON F.M. et von der FEHR N.H.M. (2004), « Price Volatility and Risk Exposure: On Market-based Environmental Policy Instruments », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 48, pp. 682-704.

BAUMOL W.J. (1972), « On Taxation and the Control Externalities », *American Economic Review*, vol. 32, n°3, pp. 307-322.

BAUMOL W.J. et OATES W. (1988), *The theory of environmental policy*, Cambridge, Cambridge University Press, 299 p.

BAVOUX J.-J. et CHARRIER J.-B. (1994), *Transports et structuration de l'espace dans l'Union européenne*, Masson, Paris, 222 p.

BEAUMAIS O. et CHIROLEU-ASSOULINE M. (2001), *Économie de l'environnement*, Amphi Économie, Bréal, 240 p.

BERTA N. (2006), « Fondements théoriques des marchés de permis négociables : le théorème de Montgomery », *Économie Appliquée*, Les Presses de l'ISMEA, vol. 59, n°4, pp. 59-75.

BOITEUX M. (1956), « Sur la gestion des monopoles publics astreints à l'équilibre budgétaire », *Econometrica*, n°24, pp. 22-40.

BOITEUX M. (1994), *Transports : pour un meilleur choix des investissements*, Rapport au Commissariat général du Plan, 131 p.

BOITEUX M. (2001), *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, Rapport au Commissariat général du Plan, 323 p.

BONTEMS P. et ROTILLON G. (2003), *Économie de l'environnement*, Paris, Coll. « Repères », La Découverte, 118 p.

BROWNSTONE D. et SMALL K. (2005), « Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations », *Transportation Research Part A*, vol. 39, pp. 279-293.

BUTTON K. (1993), *Transport economics*, 2^e édition, Edward Elgar & Cambridge University Press, 269 p.

CAS (Conseil d'analyse stratégique) (2008a), *La valeur tutélaire du carbone*, Rapport de la Commission présidée par QUINET A., 110 p.

CAS (Conseil d'analyse stratégique) (2008b), *Péage urbain : Principes pour une loi*, Rapport réalisé par les membres du groupe de la mission « péage urbain » présidée par PAUL-DUBOIS-TAINE O., 153 p.

CCFA (Comité des constructeurs français d'automobiles) (2004), *Automobile secteur d'avenir*, disponible sur :
www.ccfa.fr/IMG/pdf/Automobile_secteur_avenir.pdf

CCFA (Comité des constructeurs français d'automobiles) (2005), *Automobile et mobilité durable*, disponible sur :
www.ccfa.fr/spip.php?article399

CCFA (Comité des constructeurs français d'automobiles) (2007), *Analyse et statistiques*, disponible sur :
www.ccfa.fr/IMG/pdf/Analyses_Statistique_2007.pdf

CE (Commission européenne) (2001), *Livre blanc : La politique des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix*, Bruxelles : CE, 121 p.

CE (Commission européenne) (2007), *Livre vert : Vers une nouvelle culture de la mobilité urbaine*, Bruxelles : CE, 26 p.

CE (Commission européenne) (2007), *Handbook on estimation of external cost in the transport sector. Internalisation measures and policies for all external cost of transport* (IMPACT), Delft : CE, 336 p.

CHIROLEU-ASSOULINE M. (2007), « Approche économique de la régulation environnementale : évaluation des politiques et choix des instruments », in *Compte-rendu de la demi-journée DRAS-Paris school of economics (PSE)*, disponible sur : <http://www.pse.ens.fr>

CHU X. (1995), « Endogeneous trip scheduling: the Henderson approach reformulated and compared with the Vickrey approach », *Journal of Urban Economics*, vol. 37, pp. 324-343.

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

CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique) (2008), *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France-Séries sectorielles et analyses étendues*, Rapport d'Inventaire National, SECTEN, disponible sur : <http://www.citepa.org/publications/SECTEN-fevrier2008.pdf>

CNT (Conseil national des transports) (2001), *L'effet de serre et les transports : les potentialités des permis d'émission négociables*, Rapport du groupe de travail présidé par BONNAFOUS A., Paris, 117 p.

CNT (Conseil national des transports) (2002), *Transport et Environnement : les politiques en Europe*, Observatoire des politiques et des stratégies de transport en Europe, dossier n°4, 95 p.

CNT (Conseil national des transports) (2008), « Informations sur les travaux du Grenelle de l'environnement », Document disponible sur :

http://www.cnt.fr/article.php?id_article=231

COASE R.H. (1960), « The problem of social cost », *Journal of Law and Economics*, vol. 3, pp. 1-44.

CMED (Commission mondiale sur l'environnement et le développement) (1987), *Notre avenir à tous*, Oxford University Press, Oxford.

CEMT (Conférence européenne des ministres des transports) (1991), « Le transport de marchandises et l'environnement », OCDE, Paris, 178 p.

CONVERY F., ELLERMAN D. et DE PERTHUIS C. (2008), *Le marché européen du carbone en action : enseignements de la première phase*, Rapport intermédiaire, p. 44, disponible sur :

http://www.aprec.net/documents/08-03-25_interim_report_fr.pdf

COURNEDE B. et GASTALDO S. (2002), « Combinaison des instruments prix et quantités dans le cas de l'effet de serre », *Économie et Prévision*, n°156, pp. 51-62.

DAFERMOS S. (1982), « The general multimodal network equilibrium problem with elastic demand », *Networks*, vol. 12, pp. 57-72.

DAGANZO C. et SHEFFI Y. (1977) « On stochastic models of traffic assignment », *Transportation Science*, vol. 11, n°3, pp. 253-274.

DAGANZO C.F. (1995), « A Pareto optimum congestion reduction scheme », *Transportation Research Part B*, vol. 29, pp. 139-154.

DALES J.H. (1968a), *Pollution, property and prices, an essay in policy making and economics*, Toronto, University of Toronto Press, 111 p.

DALES J.H. (1968b), « Land, water and ownership », *Canadian Journal of Economics*, vol. 1, pp. 797-804.

DANIELIS R. et MARCUCCI E. (2002), « Bottleneck road congestion pricing with a competing railroad service », *Transportation Research Part E*, vol. 38, pp. 379-388.

DARBÉRA R. (2002), « L'expérience californienne des quotas de voitures propres », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°41, pp. 31-51.

DE NEUFVILLE R., CONNORS S.R., FIELD F.R., MARKS D., SADOWAY D.R., et TABORS R.D. (1996), « The electric car unplugged », *Technology Review*, vol. 99, n°1, pp. 30-36.

DEFRA (Department for environment, food and rural affairs) (2008), « Synthesis report on the findings four Defra's pre-feasibility study into personal carbon trading », publié par *the Department for environment, food an rural affairs*, London, disponible sur :

www.defra.gov.uk

DE PALMA A. et ROCHAT D. (1996), « Urban congestion and commuters' behavior : the departure time context », *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*, n°3, pp. 467-488.

DE PALMA A., KHATTAK A. et GUPTA D. (1997), « Commuters' departure time decisions in Brussels », *Transportation Research Record*, vol. 1607, pp. 139- 146.

DE PALMA A. et FONTAN C. (2001), « Éléments d'analyse de la composante horaire des déplacements : le cas de la région Ile de France », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°39, pp. 55-86.

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

DE PERTHUIS C. (2008), « Le puzzle des marchés du carbone », *Pour la Science*, n°365, pp. 44-50.

DERYCKE P.H. (1997), *Le péage urbain*, Paris, Economica, 205 p.

DIDIER M. et PRUD'HOMME R. (2007), *Infrastructures de transport, mobilité et croissance*, La Documentation française, Paris, 241 p.

DUPUIT J. (1849), « De l'influence des péages sur l'utilité des voies de communication » *Annales des Ponts et Chaussées*, n°207, pp. 170-248.

ELLERMAN D. et BUCHNER B. (2008), « Over-allocation or abatement ? A preliminary analysis of the EU ETS based on the 2005-06 emissions data », *Environmental Resource Economics*, vol. 41, n°2, pp. 267-287.

FERRIER O. (2003), *Maths pour économistes : L'analyse en économie - Vol. 2 Les fonctions de plusieurs variables*, De Boeck Université, Bruxelles, 186 p.

FISHER C. et NEWELL R. (2008), « Environmental and technology policies for climate mitigation », *Journal of Environmental Economic and Management*, vol. 55, n°2, pp.142-162.

FLEMING D. (1996), « Stopping the traffic », *Country Life*, vol. 140, n°19, pp. 62-65.

FLEMING D. (2006), *Energy and the common purpose. Descending the energy staircase with Tradable energy quotas (TEQs)*, publié par *the lean Economy Connection*, 2^e édition, London, disponible sur : <http://www.teqs.net/>

FLEMING D. (2007), *Energy and the common purpose. Descending the energy staircase with Tradable energy quotas (TEQs)*, publié par *the lean Economy Connection*, 3^e édition, London, disponible sur : <http://www.teqs.net/>

FNAUT (Fédération nationale des associations d'usagers des transports) (2007), « Évolution des prix réels des carburants et des transports collectifs urbains entre 1970 et 2005 », Conférence de presse de la FNAUT du vendredi 11 mai 2007.

GLACHANT M. (2004), « Les instruments de la politique environnementale », Polycopié du cours de microéconomie de l'environnement : DEA Économie de l'Environnement et des Ressources Naturelles, Paris, CERNA.

GLACHANT M. et BUREAU B. (2006) « Un péage urbain à Paris ? Une évaluation des effets distributifs de quatre scénarios », *Recherche Transports Sécurité*, n°93, Octobre-Décembre 2006.

GODARD O. et HENRY C. (1998), « Les instruments des politiques internationales de l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables », *Fiscalité de l'environnement*, Paris, La Documentation française, collection des rapports du CAE, pp. 83-174.

GODDARD H.C. (1997), « Using tradeable permits to achieve sustainability in the world's large cities », *Environmental and Resource Economics*, vol. 10, pp. 63-99.

GODDARD H.C. (1999), « Promoting urban sustainability: the case for a tradable supplementary licence system for vehicle use », *Urban Studies*, vol. 36, n°13, pp. 2317-2331.

GOODWIN P.B. (1988), *Evidence on car and public transport demand elasticity 1980-1988*, TSU Ref. 427, Oxford, June 1988.

GOULDER L. et PARRY I. (2008), « Instrument choice in environmental policy », *Discussion Paper 07-08*, Washington DC: Resources for the Future.

GULIPALLI P.K, KALMANJE S. et KOCKELMAN K. (2005), « Credit-based congestion pricing: expert expectations and guidelines for application », presented at the 84th annual meeting of transportation research board, Washington DC, disponible sur :

http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/

HAHN R. et HESTER G. (1989), « Marketable permits: lessons for theory and practice », *Ecology Law Quarterly*, vol. 16, pp. 361-406.

HAU T.D. (1998), « Congestion pricing and road investment », in BUTTON K. et VERHOEF E., *Road pricing, Traffic Congestion and the Environment*. Aldershot: Elgar, pp. 39-78.

HCEAC (House of commons environmental audit committee) (2008), *Personal carbon trading*, 5th Report of session 2007-2008, published by authority of the House of commons, London, disponible sur :

<http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200708/cmselect/cmenvaud/565/565.pdf>

HELM D. (2005), « Economic instruments and environmental policy », *Economic and Social Review*, vol.36, n°3, pp. 205-228.

HELM D., HEPBURN C. et MASH R. (2003), « Credible carbon policy », *Oxford Review of Economic Policy*, vol.19, n°3, pp. 438-50.

HENDERSON J. (1974), « Road congestion: a reconsideration of pricing theory », *Journal of Urban Economics*, vol. 1, n°3, pp. 346-365.

HENDERSON J. (1981), « The economics of staggered work hours », *Journal of Urban Economics*, vol. 9, n°3, pp. 349-364.

HENDERSON J. (1992), « Peak shifting and cost-benefit miscalculations », *Regional Science and Urban Economics*, vol. 22, n°1, pp. 103-121.

HEPBURN C. (2006), « Regulation by prices, quantities, or both: a review of instrument choice », *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 22, n°2, pp. 226-247.

HILLMAN M. (2004), *How we can save the planet*, Publisher Penguin, 192 p.

HOEL M. et KARP L. (2001), « Taxes and quotas for a stock pollutant with multiplicative uncertainty », *Journal of public Economics*, vol. 82, n°1, pp. 91-114.

HOEL M. et KARP L. (2002), « Taxes versus quotas for a stock pollutant », *Resource and Energy Economics*, vol. 24, n°4, pp. 367-384.

INFRAS/IWW (2000), *External costs of transport-accident, environmental and congestion costs of transport in western Europe*, Zurich/Karlsruhe/Paris: the International union of railways (UIC), 305 p.

INFRAS/IWW (2004), *Les coûts externes des transports. Étude d'actualisation, document de synthèse*, Zurich/Karlsruhe/Paris: the International union of railways (UIC), 18 p.

KAPLOW L. et SHAVELL S. (2002), « On the superiority of corrective taxes to quantity regulation », *American Law and Economics Review*, vol. 4, n°1, pp. 1-17.

KAUFMANN V. et GUIDEZ J.M. (1996), « Les citoyens face à l'automobile - Les déterminants du choix modal », Rapport du FIER n°19, Paris, Fonds d'intervention pour les études et recherches, 188 p.

KERR S. et MARÉ D. (1998), « Transaction costs and tradable permit markets: The United States lead phae-down », *Working paper, Motu Economic Research*, Wellington.

KLEIN B., CRAWFORD R. et ALCHIAN A. (1978), « Vertical integration, appropriable rents and the competitive contracting process », *Journal of Law and Economics*, vol. 21, n°2, pp. 297-326.

KOCKELMAN K.M. et KALMANJE S. (2005), « Credit-based congestion pricing: a proposed policy and the public's response », *Transportation Research Part A*, vol. 39, pp. 671-690.

LAM T. et SMALL K. (2001), « The value of time and reliability: measurement from value pricing experiment », *Transportation Research Part E*, vol. 37, pp. 231-251.

LE FIGARO (2008), « Paris : le péage urbain s'invite dans la campagne », *Le Figaro* du 9 janvier 2008.

LES ÉCHOS (2006), « Un péage urbain à Paris à l'étude par la Direction régionale de l'équipement », *Les Échos*, n°19798 du 21 novembre 2006, p. 6.

LINDSEY R. et VERHOEF E. (1999), « Congestion modelling ». *Working paper*, Tinbergen Institute.

LINDSEY R. et VERHOEF E. (2001), « Traffic congestion and congestion pricing », in BUTTON K. et HENSHER D.A. (eds), *Handbook of transport systems and traffic control*, Elsevier Science, pp. 77-105.

LORIUS C. (1999), « Comptes rendus de l'académie des sciences : l'effet de serre certitudes et incertitudes », Actes de la conférence-débat du 2 février 1998 à l'Académie des sciences, série 2, tome 328, n°4, Elsevier.

MALUEG D.A. (1990), « Welfare consequences of emission credit trading programs », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 19, pp. 66-77.

MARCADON J., AUPHAN É., BARRÉ A. et CHESNAIS M. (1997), *Les transports*, A. Colin, Paris, 215 p.

MARLOT G. (2002), *Efficacité et acceptabilité de la régulation - Du péage optimal aux permis de circuler négociables*, Thèse de doctorat, Sciences économiques, Université Lumière Lyon 2, 370 p.

MEDD (Ministère de l'écologie et du développement durable) (2006), *Mobilité, transport et environnement*, Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement, La Documentation française, 405 p.

MILLIMAN S.R. et PRINCE R. (1989), « Firm incentives to promote technological change in pollution control », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 17, pp. 202-207.

MIRABEL F. (1996), *Énergie, transports et externalités : comportements et politiques optimales de localisation et de déplacement dans l'espace urbain*, Thèse de doctorat de sciences économiques, université de Montpellier 1, 653 p.

MOHRING H. et HARWITZ M. (1962), *Highway benefits: an analytical framework*, Northwestern University Press, 209 p.

MONTGOMERY W.D. (1972), « Markets in licenses and efficient pollution control programs », *Journal of Economic Theory*, vol. 5, n°3, pp. 395-418.

MÜLLER B., MICHAELSOWA A. et VROLIJK C. (2001), *Rejecting Kyoto : a study of proposed alternatives to the Kyoto protocol*, Climate strategies report, London, disponible sur :

www.climate-strategies.org/

NAGURNEY A. (2000), « Alternative pollution permit systems for transportation networks based on origin/destination pairs and paths », *Transportation Research Part D*, vol. 5, pp. 37-58.

NAGURNEY A. et ZHANG D. (2001), « Dynamics of transportation pollution permit system with stability analysis and computation », *Transportation Research Part D*, vol. 6, pp. 243-268.

NAGURNEY A., RAMANUJAM P. et DHANDA K.K. (1998), « A multimodal traffic network equilibrium model with emission pollution permits: compliance versus non-compliance », *Transportation Research Part D*, vol. 3, pp. 349-374.

NAKAMURA K. et KOCKELMAN K.M. (2002), « Congestion pricing and road space rationing: an application to the San Francisco Bay Bridge corridor » *Transportation Research Part A*, vol. 36, pp. 403-417.

NEWELL R. et PIZER W. (2003), « Regulating stock externalities under uncertainty », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 45, pp. 416-432.

NOLAND R.B. et SMALL K.A. (1995), « Travel time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes », *Transportation Research Record*, vol. 1493, pp. 150-158.

NOLAND R.B., SMALL K.A., KOSKENOJA P.M. et CHU X. (1998), « Simulating travel reliability », *Regional Science and Urban Economics*, vol. 28, pp. 535-564.

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) (1997), *Vers des transports durables. La conférence de Vancouver*, Les conférences de l'OCDE, Vancouver, Colombie-Britannique, du 24 au 27 mars 1996.

ORTUZAR J., HENSHER D. A. et JARA-DIAZ S. R. (1998), *Travel behaviour research: updating the state of play*, Oxford, Pergamon, Elsevier, 554 p.

PHILIBERT C. (2002), « Prix versus quantités : plafonner les coûts pour aller plus loin », in *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, La Documentation française, rapport du Conseil d'analyse économique, n°39, pp. 201-215.

PIGOU A.C. (1920), *The Economics of Welfare*. London, MacMillan.

PRATLONG F. (2005), « Environmental regulation incidences towards international oligopolies: pollution taxes vs emission permits », *Economics Bulletin*, vol. 17, n°6, pp.1-10.

PRUD'HOMME R. (2007), « Le prix du carbone », Octobre 2007, disponible sur : www.rprudhomme.com/resources/Art+2007+Prix+CO2.pdf

PRUD'HOMME R. et BOCAREJO J.P. (2005a), « The London congestion charge: a tentative economic appraisal », *Transport Policy*, vol.12, n°3, pp. 279-287.

PRUD'HOMME R. et BOCAJERO J.P. (2005b), « L'expérience du péage urbain de Londres », *Transports*, n°430, pp. 73-81.

PRUD'HOMME R. et KOPP P. (2007), « Le péage de Stockholm : évaluation et enseignements », *Transports*, n°443, pp. 346-359.

QUINET E. (1998), *Principes d'économie des transports*, Economica, Paris, 419 p.

RAUX C. (2002), « The use of transferable permits in the transport sector », in OECD (ed.), *Implementing Domestic Tradable Permits. Recent Developments and Future Challenges*, Paris, OECD.

RAUX C. (2005), « À propos de l'article « L'expérience du péage urbain de Londres » », *Transports*, n°431, pp. 174-178.

RAUX C. (2007a), *Les permis négociables dans le secteur des transports*, La Documentation française, collection Transports Recherche Innovation, Paris, 98 p.

RAUX C. (2007b), « Les droits à circuler échangeables : une alternative pertinente et réaliste au péage urbain ? », *Document de travail*, LET.

RAUX C. et SOUCHE S. (2004), « The acceptability of urban road pricing », *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 38, n°2, pp. 191-216.

RAUX C. et MARLOT G. (2005), « A system of tradable CO₂ permits applied to fuel consumption by motorists », *Transport Policy*, vol. 12, pp. 255-265.

REQUATE T. (1995), « Incentives to adopt new technologies under different pollution control policies », *International Tax and Public Finance*, vol. 2, pp. 293-315.

REQUATE T. (2005), « Dynamic incentives by environmental policy instruments-a survey », *Ecological Economics*, vol. 54, pp. 175-195.

REYMOND M. (2005), *La tarification de la congestion automobile : Acceptabilité sociale et redistribution des recettes du péage*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Montpellier, université Montpellier 1, 346 p.

ROBERTS M.J. et SPENCE M. (1976), « Effluent charges and licences under uncertainty », *Journal of Public Economics*, vol. 5, pp. 193-208.

ROBERTS S. et THUMIM J. (2006), *A rough guide to individual carbon trading: the ideas, the issues and the next steps*, Centre for sustainable energy, Report to DEFRA.

ROSENDHAL K.E. (2008), « Incentives and prices in an emissions trading scheme with updating », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 56, n°1, pp. 69-82.

ROTHENGATTER W. (1993), « Externalities of transport », in POLAK J. and HEERTJE A. (eds), *European Transport Economics*, Blackwell, Oxford, pp. 81-129.

SARTZETAKIS E.S. (1997), « Tradeable emission permits regulations in the presence of imperfectly competitive product markets: welfare implications », *Environmental and Resource Economics*, vol. 9, pp. 65-81.

SCHWARTZ S. (2006), « Marchés des permis de pollution et concurrence imparfaite », *Revue Française d'Économie*, vol. 20, n°3, pp.183-225.

SDRIF (Schéma directeur de la région Île-de-France) (2003), « Le coût des nuisances dues au transport de voyageurs », *Mobilité et transport en Île-de-France - État des lieux*, disponible sur :
http://www.sdrif.com/IMG/pdf/1.Cout_nuisances_dues_transp.pdf

SERROU B. (1995), *La protection des riverains contre le bruit des transports terrestres*, Rapport au Premier Ministre, 60 p.

SITES INTERNET :

www.ademe.fr

www.bluenext.eu

www.certu.fr

www.ineris.fr

www.securiteroutiere.gouv.fr

<http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l24045b.htm>

SMALL K. (1982), « The scheduling of consumer activities », *American Economic Review*, vol. 72, n°3, pp. 467-479.

SMALL K. (1992), « Urban transportation economics », *Fundamentals of Pure and Applied Economics*, vol. 51, Harwood Academic Publishers, 185 p.

SMALL K. et CHU X. (2003), « Hypercongestion », *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 37, pp. 319-352.

SMALL K. et VERHOEF E. (2007), *The economics of urban transportation*, Routledge, London, 276 p.

STARKEY R. et ANDERSON K. (2005), *Domestic tradeable quotas: a policy instrument for reducing greenhouse gas emissions from energy use*, Tyndall Centre Technical Report 39, p. 57, disponible sur :

http://www.tyndall.ac.uk/research/theme2/summary_t3_22.shtml

STAVINS R. (1995), « Transaction costs and tradeable permits », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 29, pp. 133-148.

STAVINS R. (1996), « Correlated uncertainty and policy instrument choice », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 30, pp. 218-232.

STAVINS R. (2003), « Experience with market-based environmental policy instruments », in MÄLER K.G et VINCENT J., *Handbook of environmental economics*, vol. 1: Environmental degradation and institutional oral responses, Elsevier, pp. 355-435.

STRASZHEIM M. (1979), « Assessing the social cost of urban transportation technologies », in MIESZKOWSKI P. et STRASZHEIM M. (Eds), *Current issues in urban economics*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD., pp. 196-232.

TABUCHI T. (1993) « Bottleneck congestion and modal split », *Journal of Urban Economics*, vol. 34, pp. 414-431.

TfL (Transport for London) (2006), « Transport 2025: Transport challenges for a growing city », in *Travel and performance*, disponible sur : www.tfl.gov.uk

TfL (Transport for London) (2007), « London travel report: 2007 data » in *Travel and performance*, disponible sur : www.tfl.gov.uk

UNITE (Unification of accounts and marginal costs for transport efficiency) (2001), *Valuation conventions for UNITE*, Funded by 5th framework RTD programme ITS, University of Leeds, 35 p.

UNITE (Unification of accounts and marginal costs for transport efficiency) (2003), *Final report for publication*, Funded by 5th framework RTD programme, 61 p.

VARIAN H.R. (2006), *Introduction à la microéconomie*, 6^e édition, De Boeck, Paris, 824 p.

VERHOEF E. (2001), « An integrated dynamic model of road traffic congestion based on simple car-following theory: exploring hypercongestion », *Journal of Urban Economics*, vol. 49, pp. 505-542.

VERHOEF E. (2003), « Inside the queue: hypercongestion and road pricing in a continuous time-continuous place model of traffic congestion », *Journal of Urban Economics*, vol. 54, pp. 531-565.

VERHOEF E. et NIJKAMP P. et RIETVELD P. (1997), « Tradeable permits: their potential in the regulation of road transport externalities », *Environment and Planning Part B: Planning and Design*, vol. 24, pp. 527-548.

VICKREY W. (1963), « Pricing in urban and suburban transport », *American Economic Review: Papers and Proceedings*, vol. 53, n°2, pp. 452-465.

VICKREY W. (1969), « Congestion theory and transport investment », *American Economic Review*, vol. 59, pp. 251-60.

VIVIER J. (2001), « Millennium cities database for sustainable mobility : analyses and recommendations », UITP, Brussels.

WALTERS A.A. (1961), « The theory and measurement of private and social cost of highway congestion », *Econometrica*, vol. 29, n°4, pp. 676-699.

WANG Q. (1994), « Cost savings of using a marketable permit system for regulating light duty vehicle emissions », *Transport Policy*, vol. 1, n°4, p. 221-232.

WARDROP J.G. (1952), « Some theoretical aspects of road traffic research », *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, vol. 2, n°1, pp. 325-378.

WEITZMAN M. (1974), « Prices vs quantities », *Review of Economic Studies*, vol. 41, n°4, pp. 477- 491.

ANNEXES

ANNEXE 1.1

➤ Détermination de l'équation (1.20)

Nous possédons l'équation suivante :

$$\int_{t_1'}^{t_2'} A^E(t') dt = N \Rightarrow \int_{t_1'}^{t^*} K \left[\frac{\beta}{\alpha L} (t' - t_1') \right]^{\frac{1}{\gamma}} dt + \int_{t^*}^{t_2'} K \left[\frac{v}{\alpha L} (t_2' - t') \right]^{\frac{1}{\gamma}} dt = N.$$

En calculant les intégrales, on aboutit à :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\beta}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{\gamma}} K \frac{\gamma}{1+\gamma} \left[(t' - t_1')^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} \right]_{t_1'}^{t^*} - \left(\frac{v}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{\gamma}} K \frac{\gamma}{1+\gamma} \left[(t_2' - t')^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} \right]_{t^*}^{t_2'} = N \\ \Rightarrow & \left(\frac{1}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{\gamma}} K \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \left(\beta^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t_1')^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} + v^{\frac{1}{\gamma}} (t_2' - t^*)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} \right) = N \quad (1.20) \end{aligned}$$

➤ Détermination des équations (1.21) et (1.22)

Lorsque l'on remplace $(t^* - t_1')$ par $\frac{v}{\beta}(t_2' - t^*)$ dans la relation (1.20), on obtient :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{\gamma}} K \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \left[\beta^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{v}{\beta} (t_2' - t^*) \right)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} + v^{\frac{1}{\gamma}} (t_2' - t^*)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} \right] = N \\ \Rightarrow & (t_2' - t^*)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} = \frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right) \frac{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}} \beta}{v^{\frac{1}{\gamma}} (v + \beta)} \Rightarrow (t_2' - t^*) = \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right) \frac{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}} \beta}{v^{\frac{1}{\gamma}} (v + \beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \\ \Rightarrow & (t_2' - t^*) = \frac{\alpha}{v} \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right) \frac{(L)^{\frac{1}{\gamma}} \beta v}{\alpha (v + \beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (1.22) \end{aligned}$$

De même, lorsque l'on remplace $(t_2 - t^*)$ par $\frac{\beta}{v}(t^* - t_1)$ dans la relation (1.20), on obtient :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\alpha L}\right)^{\frac{1}{\gamma}} K \left(\frac{\gamma}{1+\gamma}\right) \left[\beta^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} + v^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{\beta}{v} (t^* - t_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}\right) \right] = N \\ \Rightarrow (t^* - t_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} &= \frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right) \frac{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}} \beta}{\beta^{\frac{1}{\gamma}} (v+\beta)} \Rightarrow (t^* - t_1) = \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right) \frac{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}} \beta}{\beta^{\frac{1}{\gamma}} (v+\beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \\ \Rightarrow (t^* - t_1) &= \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{N}{K} \left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right) \frac{(L)^{\frac{1}{\gamma}} \beta v}{\alpha (v+\beta)} \right]^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (1.23) \end{aligned}$$

ANNEXE 1.2

➤ Calcul du coût de congestion à l'équilibre : la démonstration est tirée de
Mirabel (1996)

$$CTC^E = \int_{t_1}^{t^*} \alpha A(t') \left(\frac{L}{V(t')} - \frac{L}{V_{\max}} \right) dt' + \int_{t^*}^{t_2} \alpha A(t') \left(\frac{L}{V(t')} - \frac{L}{V_{\max}} \right) dt'$$

On combine cette équation avec la relation (1.11) qui donne $\frac{L}{V(t')}$ en fonction de

$A(t')$ et on obtient :

$$CTC^E = \int_{t_1}^{t^*} A(t') \left[\alpha L \left(\frac{A(t')}{K} \right)^\gamma \right] dt' + \int_{t^*}^{t_2} A(t') \left[\alpha L \left(\frac{A(t')}{K} \right)^\gamma \right] dt'$$

$$\Rightarrow CTC^E = \frac{\alpha L}{K^\gamma} \left[\int_{t_1}^{t^*} A(t')^{\gamma+1} dt' + \int_{t^*}^{t_2} A(t')^{\gamma+1} dt' \right] \quad \text{(a)}$$

On intègre dans (a) l'expression des différents taux d'arrivée des automobilistes à l'équilibre : $A^{E'}(t')$: équations (1.17) et (1.19) :

$$CTC^E = \frac{\alpha L (K^{\gamma+1})}{K^\gamma} \left[\int_{t_1}^{t^*} \left(\frac{\beta (t' - t_1)}{\alpha L} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} dt' + \int_{t^*}^{t_2} \left(\frac{v (t_2 - t')}{\alpha L} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} dt' \right]$$

$$\Rightarrow CTC^E = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \left(\beta^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \frac{\gamma}{2\gamma+1} \left[(t' - t_1)^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}} \right]_{t_1}^{t^*} + v^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \frac{\gamma}{2\gamma+1} \left[(t_2 - t')^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}} \right]_{t^*}^{t_2} \right)$$

$$\Rightarrow CTC^E = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma}{2\gamma+1} \left(\beta^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} (t^* - t_1)^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}} + v^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} (t_2 - t^*)^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}} \right) \quad \text{(b)}$$

La dernière étape, afin de trouver le coût de congestion, consiste à intégrer dans la relation (b) les horaires d'équilibre (1.24) et (1.25) déterminés précédemment :

$$CTC^E = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma}{2\gamma+1} \left(\beta^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \left(\frac{\psi\alpha}{\beta} \right)^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}} + v^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \left(\frac{\psi\alpha}{\alpha} \right)^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}} \right) = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma}{2\gamma+1} \left(\frac{(\psi\alpha)^{\frac{2\gamma+1}{\gamma}}}{\delta} \right) = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma}{2\gamma+1} \left((\psi\alpha)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right) \frac{\psi\alpha}{\delta}$$

Si l'on remplace ψ par la valeur $\psi = \left(\frac{N}{K} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\delta}{\alpha} L^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}}$ seulement dans l'expression

$$(\psi)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}, \text{ on obtient : } CTC^{E'} = \frac{\gamma K (\alpha)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}{(2\gamma+1)(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \left(\frac{N}{K} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\delta}{\alpha} L^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \frac{\psi\alpha}{\delta} = \alpha N \psi \frac{1+\gamma}{1+2\gamma}$$

➤ Calcul du coût total horaire à l'équilibre $CTH^{E'}$, les démonstrations sont tirées de Mirabel (1996)

$$CTH^{E'} = \int_{t_1}^{t^*} \beta A(t') (t^* - t') dt' + \int_{t^*}^{t_2} v A(t') (t' - t^*) dt'$$

$$\Rightarrow CTH^{E'} = \beta K \int_{t_1}^{t^*} \left(\frac{\beta}{\alpha L} (t' - t_1) \right)^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t') dt' + v K \int_{t^*}^{t_2} \left(\frac{v}{\alpha L} (t_2 - t') \right)^{\frac{1}{\gamma}} (t' - t^*) dt'$$

$$\Rightarrow CTH^{E'} = \frac{\beta^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \int_{t_1}^{t^*} (t' - t_1)^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t') dt' + \frac{v^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \int_{t^*}^{t_2} (t_2 - t')^{\frac{1}{\gamma}} (t' - t^*) dt' = \frac{\beta^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} I_1 + \frac{v^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} I_2$$

(c)

Pour calculer I_1 et I_2 , on va utiliser une intégration par parties, c'est-à-dire :

Pour $I_1 = \int_{t_1}^{t^*} (t' - t_1)^{\frac{1}{\gamma}} (t^* - t') dt'$ on pose :

$$u(t') = (t^* - t') \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial t'} = u' = -1$$

$$\frac{\partial v}{\partial t'} = v' = (t' - t_1)^{\frac{1}{\gamma}} \Rightarrow v(t') = \frac{\gamma}{1+\gamma} (t' - t_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}$$

En appliquant la formule d'intégration par parties : $I_1 = uv' dt' = [uv]_{t_1}^{t^*} - \int_{t_1}^{t^*} u' v dt'$

$$I_1 = \left[\frac{\gamma}{1+\gamma} (t' - t_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} (t^* - t') \right]_{t_1}^{t^*} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \int_{t_1}^{t^*} (t' - t_1)^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} dt' = 0 + \frac{\gamma}{1+\gamma} \frac{\gamma}{1+2\gamma} \left[(t' - t_1)^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}} \right]_{t_1}^{t^*} = \frac{\gamma^2}{(1+\gamma)(1+2\gamma)} (t^* - t_1)^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}}$$

Pour $I_2 = \int_{t^*}^{t_2} (t_2 - t')^{\frac{1}{\gamma}} (t' - t^*) dt'$, on pose :

$$u(t') = (t' - t^*) \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial t'} = u' = 1$$

$$\frac{\partial v}{\partial t'} = v' = (t_2 - t')^{\frac{1}{\gamma}} \Rightarrow v(t') = -\frac{\gamma^2}{1+\gamma} (t_2 - t')^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}$$

En appliquant la même formule que pour I_1 , on obtient :

$$I_2 = \left[-\frac{\gamma}{1+\gamma} (t' - t^*) (t_2 - t')^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} \right]_{t^*}^{t_2} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \int_{t^*}^{t_2} (t_2 - t')^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} dt' = 0 + \frac{\gamma^2}{(1+\gamma)(1+2\gamma)} (t_2 - t^*)^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}}$$

Donc, en remplaçant dans I_1 et I_2 par leur valeur dans l'équation (c), on obtient :

$$CTH^{E'} = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma^2}{(1+\gamma)(1+2\gamma)} \left(\beta^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} (t^* - t_1)^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}} + v^{\frac{1+\gamma}{\gamma}} (t_2 - t^*)^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}} \right) = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma^2}{(1+\gamma)(1+2\gamma)} \frac{\alpha^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}} \psi^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}}{\delta}$$

Comme dans le calcul du coût de congestion, on remplace ψ par la valeur

$$\psi = \left(\frac{N}{K} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\delta}{\alpha} L^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \text{ seulement dans l'expression } (\psi)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}, \text{ et on arrive au résultat}$$

suivant :

$$CTH^{E'} = \frac{K}{(\alpha L)^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\gamma^2}{(1+\gamma)(1+2\gamma)} \frac{\alpha^{\frac{1+2\gamma}{\gamma}} \psi}{\delta} \left(\frac{N}{K} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\delta}{\alpha} L^{\frac{1}{\gamma}} \right)$$

$$\Rightarrow CTH^{E'} = \alpha N \psi \frac{\gamma}{1+2\gamma}$$

ANNEXE 1.3

➤ Les horaires t_1, \tilde{t} et t_2 pour déterminer la situation d'équilibre du trafic

Afin de trouver les horaires t_1, \tilde{t} et t_2 , nous avons effectués les calculs suivants :

On applique l'équation (1.58) au temps \tilde{t} :

$$D(\tilde{t}) = \int_{t_1}^{\tilde{t}} r(u) du - K(\tilde{t} - t_1) = \int_{t_1}^{\tilde{t}} \left(K + \frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} \right) du - K(\tilde{t} - t_1)$$

$$\Rightarrow D(\tilde{t}) = (\tilde{t} - t_1) \left(K + \frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} \right) - K(\tilde{t} - t_1) \Rightarrow D(\tilde{t}) = (\tilde{t} - t_1) \frac{\beta K}{\alpha - \beta}$$

D'après la relation (1.57), le temps de déplacement d'un individu quittant son domicile en \tilde{t} :

$$T^v(\tilde{t}) = \frac{D(\tilde{t})}{K} = (\tilde{t} - t_1) \frac{\beta}{(\alpha + \beta)}$$

$$\text{D'après la relation (1.61) : } \tilde{t} = t^* - T^v(\tilde{t}) = t^* - (\tilde{t} - t_1) \frac{\beta}{(\alpha - \beta)} \Rightarrow (\tilde{t} - t_1) = (t^* - \tilde{t}) \frac{\alpha - \beta}{\beta}$$

(d)

Si l'on remplace $(\tilde{t} - t_1)$ dans l'équation (1.73), on a :

$$(t^* - \tilde{t}) \frac{\alpha - \beta}{\beta} \left(\frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} \right) = (t_2 - \tilde{t}) \left(\frac{vK}{(\alpha + v)} \right) \Rightarrow (t_2 - \tilde{t}) = (t^* - \tilde{t}) \frac{\alpha + v}{v} \quad \text{(e)}$$

En mettant (d) et (e) dans la relation (1.71), on obtient \tilde{t} :

$$(t^* - \tilde{t}) \frac{\alpha - \beta}{\beta} \left(K + \frac{\beta K}{(\alpha - \beta)} \right) + \left(K - \frac{vK}{(\alpha + v)} \right) \frac{\alpha + v}{v} (t^* - \tilde{t}) = N$$

$$\tilde{t} = t^* - \frac{\beta v}{\alpha(\beta + v)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad \text{(1.72)}$$

$$\text{En utilisant (d) et (1.74), on a : } t_1 = t^* - \frac{v}{(\beta + v)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad \text{(1.75)}$$

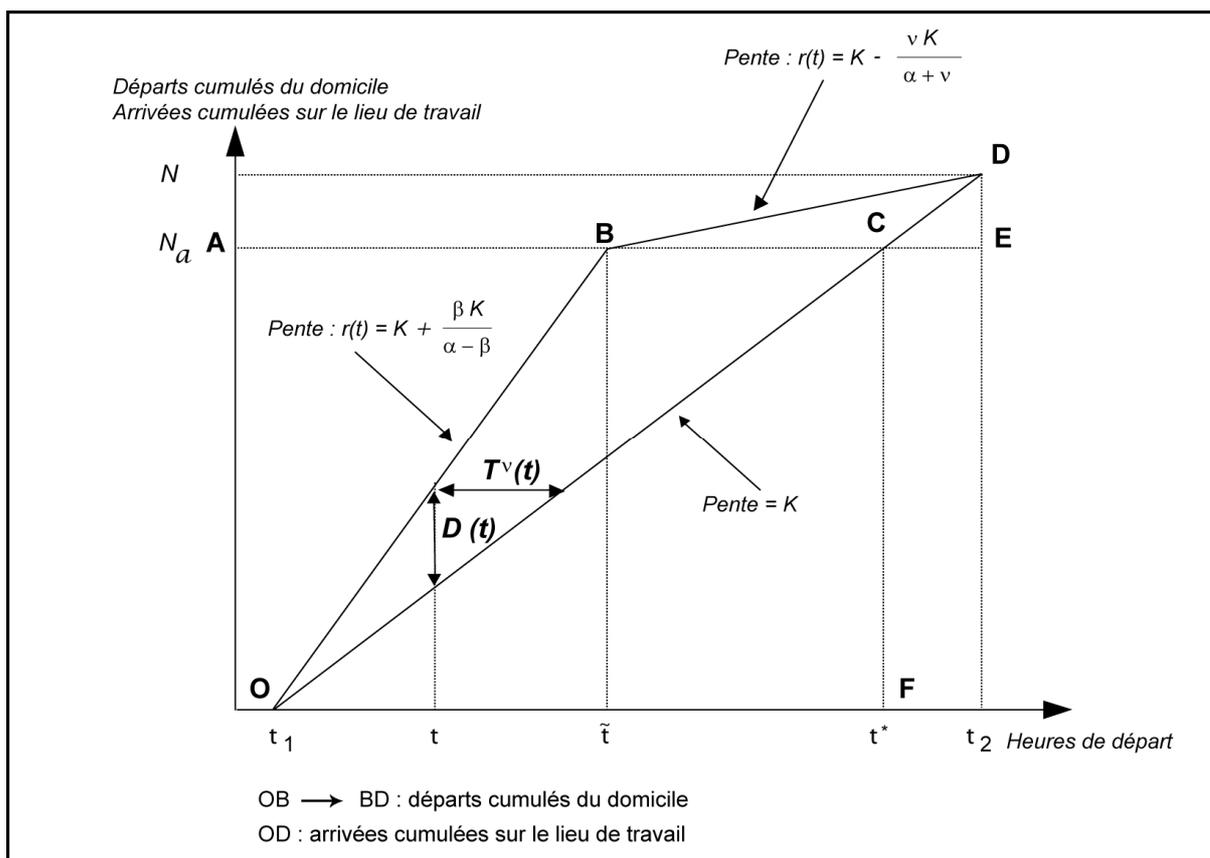
$$\text{En utilisant (e) et (1.74), on a : } t_2 = t^* + \frac{\beta}{(\beta + v)} \left(\frac{N}{K} \right) \quad \text{(1.76)}$$

ANNEXE 1.4

➤ Calcul des différents coûts dans le modèle de file d'attente d'Arnott et al.

(Démonstration reprise de Mirabel (1996))

FIGURE N°A1.4 : Représentation du modèle de file d'attente



➤ Le calcul des coûts horaires (coût d'avance et coût de retard)

Le temps total qui est perdu par les usagers arrivant en avance sur le lieu de travail correspond à l'aire OCF multipliée par β (le coût unitaire d'avance).

$$\text{Aire OCF} = \frac{OF * FC}{2} = \frac{(t^* - t_1) N_a}{2} \text{ avec } N_a \text{ le nombre d'individus qui arrivent en}$$

avance sur le lieu de travail.

Le temps total des usagers qui arrivent en retard (après t^*) sur le lieu de travail correspond à l'aire CDE multipliée par v (le coût unitaire de retard).

$$\text{Aire CDE} = \frac{CE * ED}{2} = \frac{(t_2 - t^*)(N - N_a)}{2}$$

Donc, le coût total horaire subi par tous les usagers est :

$$CTH^E = \frac{\beta(t^* - t_1)Na + v(t_2 - t^*)(N - Na)}{2},$$

Or, dans le triangle OCF, on observe que $Na = (t^* - t_1)(\text{pente de OC}) = (t^* - t_1)K$

Et dans le triangle CDE, on observe que : $(N - Na) = (t_2 - t^*)(\text{pente de OC}) = (t_2 - t^*)K$

$$\text{D'où } CTH^E = \frac{\beta(t^* - t_1)^2 K + v(t_2 - t^*)^2 K}{2}$$

On remplace t_1, t_2 et t^* par leur valeur et on trouve :

$$CTH^E = \frac{\beta v}{2(\beta + v)} \left(\frac{N^2}{K} \right)$$

➤ Le calcul du coût d'attente (de congestion) dans les embouteillages

Si l'on regarde le graphique, l'aire OBD donne le coût total d'attente. Mais on peut poser directement :

$CTC^E = CT^E(t) - CTH^E(t)$, cela signifie : le coût total de congestion est égal au coût total du trajet moins le coût total horaire.

$$CTC^E = \frac{\beta v}{\beta + v} \left(\frac{N^2}{K} \right) - \frac{\beta v}{2(\beta + v)} \left(\frac{N^2}{K} \right) \Rightarrow$$

$$\boxed{CTC^E = \frac{\beta v}{2(\beta + v)} \left(\frac{N^2}{K} \right)}$$

ANNEXE 1.5

➤ Comparaison des différents péages selon Danielis et Marcucci (2002)

Pour comparer les différents péages, on relâche deux hypothèses du modèle de référence : N et K sont variables.

➤ On suppose la fonction d'offre de déplacements suivante :

$$p^j(N, K) = CM^j + \tau^j \quad \text{avec } j = E, P, U, ct$$

où j représente les différentes situations :

E : situation d'équilibre

P : situation avec péage de pointe

U : situation avec péage uniforme

ct : situation avec péage uniforme durant les périodes de pointe

On obtient :

$$\begin{aligned} \tau^j &= CM^j \text{ et } CM^j = \frac{\Gamma^j \delta N}{K} \\ \Rightarrow p^j(N, K) &= \frac{2\Gamma^j \delta N}{K} \end{aligned} \quad \text{(f)}$$

$$\text{avec } \Gamma^U = 1; \Gamma^P = \Gamma^E = \frac{1}{2} \text{ et } \Gamma^{ct} = \frac{1}{4} \left[3 - \frac{(v - \alpha)\beta}{(\beta + v)(\alpha + v)} \right]$$

On pose une fonction de demande de déplacements :

$$N = N(p) \text{ avec } \frac{\partial N}{\partial p} < 0 \quad \text{(g)}$$

Les équations (f) et (g) impliquent la relation suivante :

$$p^U(K) > p^{ct}(K) > p^E(K) = p^P(K) \quad \text{(h)}$$

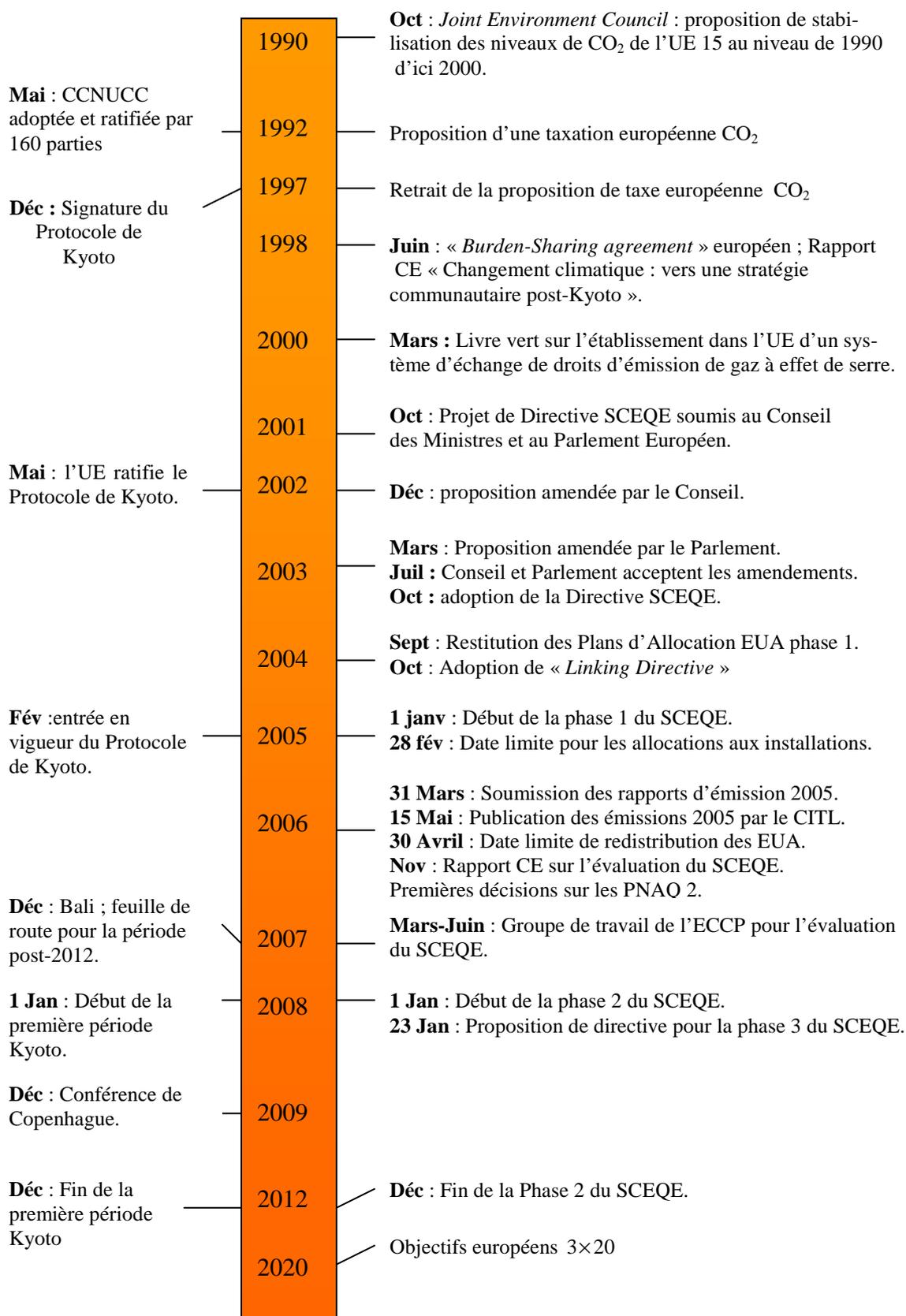
Cela donne :

$$N^U(K) < N^{ct}(K) < N^E(K) = N^P(K) \quad \text{(i)}$$

Le prix du trajet avec péage uniforme est le plus élevé. Le prix du trajet sans péage est identique à celui du péage de pointe. Le niveau du trafic ne diminue pas avec le péage de pointe.

ANNEXE 2.1

FIGURE N°A2.1 : Chronologie de la mise en place du SCEQE



Source : Mission Climat de la Caisse des dépôts, 2008

ANNEXE 3.1

Calcul de la stabilité

Péage de pointe :

Suite à l'égalisation des coûts de déplacements en $(T+1)$, on obtient une équation

$$\text{récurrente non linéaire d'ordre 1 : } \frac{\delta(N - N_{B,(T+1)}^P)}{K} = c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^P} - \frac{\delta(N - N_{B,(T)}^P)^2}{2KN_{B,(T+1)}^P}$$

Si la solution converge vers une répartition modale d'équilibre (N_A^P, N_B^P) , elle vérifie : $-\delta(N_B^P)^2 - 2cKN_B^P - 2FK + \delta N^2 = 0$. En résolvant le polynôme en N_B^P , on obtient l'équilibre modal **(3.13a)**.

➤ Calcul de la stabilité

On exprime $N_{B,(T+1)}^P$ en fonction de $N_{B,(T)}^P$, ce qui engendre la relation suivante :

$$N_{B,(T+1)}^P = \frac{\delta N - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cK\delta N + 3\delta^2N^2 - 4\delta^2NN_{B,(T)}^P + 2\delta^2(N_{B,(T)}^P)^2 - 4FK\delta}}{2\delta},$$

On pose $x_{T+1} = f(x)$ ce qui implique :

$$f(x) = \frac{\delta N - cK + \sqrt{c^2K^2 - 2cK\delta N + 3\delta^2N^2 - 4\delta^2Nx + 2\delta^2x^2 - 4FK\delta}}{2\delta};$$

La stabilité globale est vérifiée si et seulement si la dérivée : $f'(x) \leq 1$.

$$\text{En posant : } J(x) = c^2K^2 - 2cK\delta N + 3\delta^2N^2 - 4\delta^2Nx + 2\delta^2x^2 - 4FK\delta$$

$$\Rightarrow J(x) = (\delta N - cK)^2 + 2\delta^2(N - x)^2 - 4\delta FK$$

Avec $2\delta^2(N - x)^2 > 0$ et si $N > \frac{\sqrt{4\delta FK} + cK}{\delta}$ alors : $\sqrt{J(x)} > 0$;

On trouve $f'(x) = -\frac{\delta(N - x)}{\sqrt{J(x)}} \leq 0$, car $N > x$ et donc $f'(x) \leq 1$. La stabilité globale est vérifiée.

Péage uniforme lors des périodes de pointe :

Suite à l'égalisation des coûts de déplacements en $(T+1)$, on obtient ainsi une équation

$$\text{récurrente non linéaire d'ordre 1 : } \frac{2\varphi\delta(N - N_{B,(T+1)}^{ct})}{K} = c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^{ct}} - \frac{\delta\varphi(N - N_{B,(T)}^{ct})^2}{KN_{B,(T+1)}^{ct}}$$

Si la solution converge vers une répartition modale d'équilibre (N_A^{ct}, N_B^{ct}) , elle vérifie : $-\delta\varphi(N_B^{ct})^2 - cKN_B^{ct} - FK + \delta\varphi N^2 = 0$. En résolvant le polynôme en N_B^{ct} , on obtient l'équilibre modal **(3.23a)**.

➤ Calcul de la stabilité

On exprime $N_{B,(T+1)}^{ct}$ en fonction de $N_{B,(T)}^{ct}$, ce qui engendre la relation suivante :

$$N_{B,(T+1)}^{ct} = \frac{2\varphi\delta N - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cK\varphi\delta N + 12\varphi^2\delta^2N^2 - 16\varphi^2\delta^2NN_{B,(T)}^{ct} + 8\varphi^2\delta^2(N_{B,(T)}^{ct})^2 - 8FK\varphi\delta}}{4\varphi\delta}$$

On pose $x_{T+1} = f(x)$ ce qui implique :

$$f(x) = \frac{2\varphi\delta N - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cK\varphi\delta N + 12\varphi^2\delta^2N^2 - 16\varphi^2\delta^2Nx + 8\varphi^2\delta^2x^2 - 8FK\varphi\delta}}{4\varphi\delta} ;$$

La stabilité globale est vérifiée si et seulement si la dérivée : $f'(x) \leq 1$.

En posant : $J(x) = c^2K^2 - 4cK\varphi\delta N + 12\varphi^2\delta^2N^2 - 16\varphi^2\delta^2Nx + 8\varphi^2\delta^2x^2 - 8FK\varphi\delta$, on a

$$\sqrt{J(x)} > 0 \text{ si } N > \sqrt{\frac{2FK}{\delta\varphi} + \frac{cK}{2\delta\varphi}} ;$$

On trouve $f'(x) = -\frac{2\varphi\delta(N-x)}{\sqrt{J(x)}} \leq 0$ car $N > x$ et donc $f'(x) \leq 1$. La stabilité globale est vérifiée.

Péage uniforme:

Suite à l'égalisation des coûts de déplacements en $(T+1)$, on obtient une équation

$$\text{récurrente non linéaire d'ordre 1 : } \frac{2\delta(N - N_{B,(T+1)}^U)}{K} = c + \frac{F}{N_{B,(T+1)}^U} - \frac{\delta(N - N_{B,(T)}^U)^2}{KN_{B,(T+1)}^U}$$

Si la solution converge vers une répartition modale d'équilibre (N_A^U, N_B^U) , elle vérifie : $-\delta(N_B^U)^2 - cKN_B^U - FK + \delta N^2 = 0$. En résolvant le polynôme en N_B^U , on obtient l'équilibre modal **(3.32a)**.

➤ Calcul de la stabilité

On exprime $N_{B,(T+1)}^U$ en fonction de $N_{B,(T)}^U$, ce qui engendre la relation suivante :

$$N_{B,(T+1)}^U = \frac{2\delta N - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cK\delta N + 12\delta^2N^2 - 16\delta^2NN_{B,(T)}^U + 8\delta^2(N_{B,(T)}^U)^2 - 8FK\delta}}{4\delta} ,$$

On pose $x_{T+1} = f(x)$ ce qui implique :

$$f(x) = \frac{2\delta N - cK + \sqrt{c^2K^2 - 4cK\delta N + 12\delta^2N^2 - 16\delta^2Nx + 8\delta^2x^2 - 8FK\delta}}{4\delta} ;$$

La stabilité globale est vérifiée si et seulement si la dérivée : $f'(x) \leq 1$.

En posant : $J(x) = c^2K^2 - 4cK\delta N + 12\delta^2N^2 - 16\delta^2Nx + 8\delta^2x^2 - 8FK\delta$, on a

$$\sqrt{J(x)} > 0 \text{ si } N > \sqrt{\frac{2FK}{\delta} + \frac{cK}{2\delta}} ;$$

On trouve $f'(x) = -\frac{2\delta(N-x)}{\sqrt{J(x)}} \leq 0$ car $N > x$ et donc $f'(x) \leq 1$. La stabilité globale est

vérifiée.

ANNEXE 3.2

- Démonstration de $\eta_A^p > \eta_A^{p'}$: la part d'automobilistes en situation de péage de pointe est plus élevée que celle avec péage de pointe et politique modale

Les valeurs obtenues sont :

$$\eta_A^p = \frac{1}{2} + \frac{ck}{2N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_A^{p'} = 1 + \frac{ck}{N} - \sqrt{\frac{c^2k^2}{N^2} + 1 - \frac{2Fk}{N^2}}$$

On utilise le développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

On peut écrire η_A^p et $\eta_A^{p'}$ comme suit :

$$\eta_A^p = \frac{1}{2} + \frac{ck}{2N} - \left[\frac{1}{4} - \frac{2ck}{4N} + \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} + \frac{ck}{2N} - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{2ck}{N} + \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{4Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{avec } \varepsilon = -\frac{2ck}{N} + \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{4Fk}{N^2}$$

$$\eta_A^{p'} = 1 + \frac{ck}{N} - \left[1 + \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{2Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec } \varepsilon = \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{2Fk}{N^2}$$

Suivant toujours la condition n°1 où $N \geq ck$ et ajoutant $N \geq Fk$

On applique le développement limité : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ avec $(Fk, ck \ll 1)$

On obtient alors :

$$\eta_A^p = \frac{ck}{2N} + \frac{ck}{2N} - \frac{c^2k^2}{4N^2} + \frac{Fk}{N^2} = \frac{ck}{N} + \frac{Fk}{N^2} - \frac{c^2k^2}{4N^2}$$

$$\eta_A^{p'} = \frac{ck}{N} - \frac{c^2k^2}{2N^2} + \frac{Fk}{N^2}$$

$$\text{Ce qui implique : } \eta_A^p - \eta_A^{p'} = \frac{c^2k^2}{4N^2} > 0$$

- Démonstration de $\eta_B^p < \eta_B^{p'}$: la part des usagers des TC en situation de péage de pointe est plus faible que celle avec péage de pointe et redistribution des recettes vers les TC

Les valeurs obtenues sont :

$$\eta_B^p = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_B^{p'} = -\frac{ck}{N} + \sqrt{\frac{c^2k^2}{N^2} + 1 - \frac{2Fk}{N^2}}$$

On utilise le développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

On peut écrire η_B^p et $\eta_B^{p'}$ comme suit :

$$\eta_B^p = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \left[\frac{1}{4} - \frac{2ck}{4N} + \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{2ck}{N} + \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{4Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{avec } \varepsilon = -\frac{2ck}{N} + \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{4Fk}{N^2}$$

$$\eta_B^{p'} = -\frac{ck}{N} + \left[1 + \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{2Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec } \varepsilon = \frac{c^2k^2}{N^2} - \frac{2Fk}{N^2}$$

Suivant toujours la condition n°1 où $N \geq ck$ et ajoutant $N \geq Fk$, on applique le développement limité : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ avec $(Fk, ck \ll 1)$

$$\text{On obtient alors : } \eta_B^p = 1 - \frac{ck}{N} - \frac{Fk}{N^2} + \frac{c^2k^2}{4N^2}$$

$$\eta_B^{p'} = -\frac{ck}{N} + 1 + \frac{c^2k^2}{2N^2} - \frac{Fk}{N^2}$$

$$\text{Ce qui implique : } \eta_B^p - \eta_B^{p'} = -\frac{c^2k^2}{N^2} < 0$$

ANNEXE 3.3

- Démonstration de $\eta_A^{ct} > \eta_A^{ct'}$: la part d'automobilistes en situation de péage uniforme lors des périodes de pointe est plus élevée que celle avec politique modale

Les valeurs obtenues sont :

$$\eta_A^{ct} = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4\varphi N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi N^2}} \text{ et } \eta_A^{ct'} = 1 + \frac{ck}{2\varphi N} - \sqrt{\frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2} + 1}$$

On utilise le développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

On peut écrire η_A^{ct} et $\eta_A^{ct'}$ comme suit :

$$\eta_A^{ct} = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4\varphi N} - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{ck}{\varphi N} + \frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{2Fk}{\varphi N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ avec } \varepsilon = \frac{ck}{\varphi N} + \frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{2Fk}{\varphi N^2}$$

$$\eta_A^{ct'} = 1 + \frac{ck}{2\varphi N} - \left[1 + \frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ avec } \varepsilon = \frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2}$$

Suivant toujours la condition n°1 où $N \geq ck$ et ajoutant $N \geq Fk$, on applique le développement limité : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ avec $(Fk, ck \ll 1)$

On obtient alors :

$$\eta_A^{ct} = \frac{ck}{2\varphi N} + \frac{Fk}{2\varphi N^2} - \frac{c^2k^2}{16\varphi^2N^2}$$

$$\eta_A^{ct'} = \frac{ck}{2\varphi N} - \frac{c^2k^2}{8\varphi^2N^2} + \frac{Fk}{2\varphi N^2}$$

Ce qui implique : $\eta_A^{ct} - \eta_A^{ct'} = \frac{c^2k^2}{16\varphi^2N^2} > 0$

- Démonstration de $\eta_B^{ct} < \eta_B^{ct'}$: la part des usagers des TC en situation de péage uniforme lors des périodes de pointe est plus faible que celle avec redistribution des recettes vers les TC

Les valeurs obtenues sont :

$$\eta_B^{ct} = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_B^{ct'} = -\frac{ck}{2\varphi N} + \sqrt{\frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2} + 1}$$

On utilise le développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \simeq 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

On peut écrire η_B^{ct} et $\eta_B^{ct'}$ comme suit :

$$\eta_B^{ct} = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N} + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{ck}{\varphi N} + \frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{2Fk}{\varphi N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{ck}{\varphi N} + \frac{c^2k^2}{4\varphi^2N^2} - \frac{2Fk}{\varphi N^2}$$

$$\eta_B^{ct'} = -\frac{ck}{2\varphi N} + \left[1 + \frac{c^2k^2}{4\varphi N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{c^2k^2}{4\varphi N^2} - \frac{Fk}{\varphi N^2}$$

Suivant toujours la condition n°1 où $N \geq ck$ et ajoutant $N \geq Fk$, on applique le développement limité : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \simeq 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ avec $(Fk, ck \ll 1)$

On obtient alors :

$$\eta_B^{ct} = 1 - \frac{ck}{2\varphi N} - \frac{Fk}{2\varphi N^2} + \frac{c^2k^2}{16\varphi N^2} \quad \text{et} \quad \eta_B^{ct'} = -\frac{ck}{2\varphi N} + 1 + \frac{c^2k^2}{8\varphi^2N^2} - \frac{Fk}{2\varphi N^2} \quad \text{et cela implique :}$$

$$\eta_B^{ct} - \eta_B^{ct'} = -\frac{c^2k^2}{16\varphi^2N^2} < 0$$

ANNEXE 3.4

- Démonstration de $\eta_A^U > \eta_A^{U'}$: la part d'automobilistes en situation de péage uniforme est plus élevée que celle avec péage uniforme et politique modale

Les valeurs obtenues sont :

$$\eta_A^U = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4N}\right)^2 - \frac{kF}{2N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_A^{U'} = 1 + \frac{ck}{2N} - \sqrt{\frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2} + 1}$$

On utilise le développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

On peut écrire η_A^U et $\eta_A^{U'}$ comme suit :

$$\eta_A^U = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4N} - \left[\frac{1}{4} - \frac{ck}{4N} + \frac{c^2k^2}{16N^2} - \frac{2Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4N} - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{ck}{N} + \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{2Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{avec } \varepsilon = \frac{ck}{N} + \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{2Fk}{N^2}$$

$$\eta_A^{U'} = 1 + \frac{ck}{2N} - \left[1 + \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec } \varepsilon = \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2}$$

Suivant toujours la condition n°1 où $N \geq ck$ et ajoutant $N \geq Fk$, on applique le développement limité : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ avec $(Fk, ck \ll 1)$

$$\text{On obtient alors : } \eta_A^U = \frac{ck}{2N} + \frac{Fk}{2N^2} - \frac{c^2k^2}{16N^2}$$

$$\eta_A^{U'} = \frac{ck}{2N} - \frac{c^2k^2}{8N^2} + \frac{Fk}{2N^2}$$

$$\text{Ce qui implique : } \eta_A^U - \eta_A^{U'} = \frac{c^2k^2}{16N^2} > 0$$

- Démonstration de $\eta_B^U < \eta_B^{U'}$: la part des usagers des TC en situation de péage uniforme est plus faible que celle avec péage uniforme et redistribution des recettes vers les TC

Les valeurs obtenues sont :

$$\eta_B^U = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4N}\right)^2 - \frac{kF}{2N^2}} \text{ et } \eta_B^{U'} = -\frac{ck}{2N} + \sqrt{\frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{N^2}} + 1$$

On utilise le développement limité suivant : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

On peut écrire η_B^U et $\eta_B^{U'}$ comme suit :

$$\eta_B^U = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4N} + \left[\frac{1}{4} - \frac{ck}{4N} + \frac{c^2k^2}{16N^2} - \frac{Fk}{2N^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4N} + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{ck}{2N} + \frac{c^2k^2}{8N^2} - \frac{Fk}{N^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{avec } \varepsilon = \frac{ck}{2N} + \frac{c^2k^2}{8N^2} - \frac{Fk}{N^2}$$

$$\eta_B^{U'} = -\frac{ck}{2N} + \left[1 + \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{2N^2} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ avec } \varepsilon = \frac{c^2k^2}{4N^2} - \frac{Fk}{2N^2}$$

Suivant toujours la condition n°1 où $N \geq ck$ et ajoutant $N \geq Fk$

On applique le développement limité : $(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ avec $(Fk, ck \ll 1)$

$$\text{On obtient alors : } \eta_B^U = 1 - \frac{ck}{2N} - \frac{Fk}{2N^2} + \frac{c^2k^2}{16N^2}$$

$$\eta_B^{U'} = -\frac{ck}{2N} + 1 + \frac{c^2k^2}{8N^2} - \frac{Fk}{2N^2}$$

$$\text{Ce qui implique : } \eta_B^U - \eta_B^{U'} = -\frac{c^2k^2}{16N^2} < 0$$

ANNEXE 3.5

➤ Présentation des principales études concernant la valeur du temps

TABLEAU N°A3.4 : Estimations de la valeur du temps

<i>Auteurs</i>	<i>Type de déplacement/ Taille de l'échantillon/ Mode de transport/Lieu</i>	<i>Modèle utilisé</i>	<i>Résultats</i>
Small (1982)	Domicile-Travail, le matin N=527 Voiture Particulière San Francisco	Modèle Logit	$\frac{\beta}{\alpha} = 0,61$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 2,40$
De Palma et Rochat (1996)	Domicile-Travail, le matin N=651 VP Genève	Calculs statistiques	$\frac{\beta}{\alpha} = 0,327$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 2,69$
Noland et Small (1995)	Domicile-Travail, le matin N=543 VP Los Angeles	Modèle Logit	$\frac{\beta}{\alpha} = 0,97$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 1,31$
De Palma, Khattak et Gupta (1997)	Domicile-Travail, le matin N=1218 VP Bruxelles Pr. Révélées (R) Pr. Déclarée (D)	Calculs Statistiques	R : $\frac{\beta}{\alpha} = 0,38$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 1,03$ D : $\frac{\beta}{\alpha} = 0,41$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 1,23$
Noland <i>et al.</i> (1998)	Domicile-Travail, le matin N=543 VP Los Angeles	Modèle Logit (1 et 2)	1 : $\frac{\beta}{\alpha} = 2,36$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 5,46$ 2 : $\frac{\beta}{\alpha} = 0,88$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 1,23$
De Palma et Fontan (2001)	Tous modes-Tous motifs, le matin N=290 Ile-de-France	Calculs statistiques	$\frac{\beta}{\alpha} = 0,36$ et $\frac{\nu}{\alpha} = 1,77$

Pour une revue de la littérature complète et détaillée sur les estimations de la valeur du temps, se référer à De Palma et Fontan (2001).

ANNEXE 3.6

- Expressions analytiques des limites des différents coûts sociaux totaux et parts modales lorsque la valeur du temps (α) tend vers l'infini.

Le paramètre relatif au coût temporel (d'avance et de retard), dans nos expressions analytiques des parts modales et des coûts sociaux totaux, est δ . Ce paramètre est défini comme suit : $\delta = \frac{\beta v}{\beta + v}$, avec dans notre modèle $\beta = 0.5\alpha$ et $v = 2.5\alpha$.

Quand la valeur du temps α tend vers l'infini, la limite du paramètre δ est égale à l'infini :

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \delta = \infty$$

On peut alors déterminer les limites des différents coûts et des parts modales quand la valeur du temps tend vers l'infini. Nous soulignons que dans toutes les expressions analytiques qui suivent, on a posé $k = \frac{K}{\delta}$.

- Limite du coût social total à l'équilibre sans péage :

La part des usagers des TC (η_B^E) est la suivante :

$$\eta_B^E = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}}$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de la part des usagers des TC (η_B^E) est égale à l'unité : $\lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_B^E = 1$

Le coût social total est le suivant :

$$CST^E = cN + \frac{F}{\eta_B^E} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{2} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{2} \right)^2 - Fk}$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite du coût social total est :

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^E = cN + F}$$

➤ Limites du coût social total avec péage de pointe et avec péage de pointe associé à la politique de redistribution des recettes :

La part des usagers des TC (η_B^P) et celle des automobilistes (η_A^P) à la période T sont les suivantes :

$$\eta_B^P = \frac{1}{2} - \frac{ck}{2N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_A^P = \frac{1}{2} + \frac{ck}{2N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{2N}\right)^2 - \frac{Fk}{N^2}}$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de η_B^P est égale à l'unité, et celle de η_A^P est égale à zéro :

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_B^P = 1 \quad \text{et} \quad \lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_A^P = 0$$

La part des usagers des TC (η_B^P) et celle des automobilistes (η_A^P) sont toutes deux présentes dans le coût social total avec péage de pointe, dont l'expression est la suivante :

$$CST^P = cN + \frac{F}{\eta_B^P} - \frac{(\eta_A^P)^2 N^2}{2k} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{2} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{2} \right)^2 - Fk}$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de CST^P est égale à $cN + F$:

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^P = cN + F}$$

L'expression du coût social total avec le péage de pointe et la redistribution des recettes est :

$$CST^{P'} = cN + \frac{N^2}{k} + C_E (N + ck) - \sqrt{c^2 k^2 + N^2 - 2Fk} \left(\frac{N}{k} + C_E \right)$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de $CST^{P'}$ est également : $cN + F$

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^{P'} = cN + F}$$

Si l'on remplace c , N et F respectivement par 1.94, 24 100 et 6 174, alors on trouve une limite des coûts sociaux totaux de 52 928 €.

➤ Limites du coût social avec péage uniforme de pointe et avec péage uniforme de pointe accompagné de la redistribution des recettes :

La part des usagers des TC (η_B^{ct}) et celle des automobilistes (η_A^{ct}) à la période T sont les suivantes :

$$\eta_B^{ct} = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_A^{ct} = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4\varphi N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4\varphi N}\right)^2 - \frac{kF}{2\varphi N^2}} ;$$

Le paramètre φ est défini comme suit : $\varphi = \frac{1}{4} \left[3 - \frac{(v-\alpha)\beta}{(\beta+v)(\alpha+v)} \right]$ avec dans notre modèle $\beta = 0.5\alpha$ et $v = 2.5\alpha$. Le paramètre φ est alors égal à 0.7321.

Ainsi, quand δ tend vers l'infini, alors la limite de la part des usagers des TC est égale à l'unité et celle des automobilistes est égale à zéro:

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_B^{ct} = 1 \quad \text{et} \quad \lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_A^{ct} = 0$$

L'expression du coût social total à la période T est la suivante :

$$CST^{ct} = cN + \frac{F}{\eta_B^{ct}} - \frac{\varphi(\eta_A^{ct})^2 N^2}{k} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{4\varphi} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{4\varphi} \right)^2 - \frac{kF}{2\varphi}} ;$$

Alors, quand δ tend vers l'infini, la limite de CST^{ct} est encore une fois de :

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^{ct} = cN + F}$$

Le coût social total avec le péage uniforme de pointe associé à la redistribution des recettes est la suivante :

$$CST^{ct'} = N(c + C_E) + \frac{2\varphi N^2}{k} + \frac{ckC_E}{2\varphi} - \sqrt{c^2 k^2 - 4\varphi Fk + 4\varphi^2 N^2} \left(\frac{N}{k} + \frac{C_E}{2\varphi} \right)$$

Quand δ tend vers l'infini, la limite de $CST^{ct'}$ est aussi égale à $cN + F$:

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^{ct'} = cN + F}$$

En remplaçant c , N et F par nos valeurs des simulations, on trouve une limite des coûts sociaux totaux de 52 928 €.

➤ Limites du coût social total avec péage uniforme et avec péage uniforme associé à la politique de redistribution des recettes :

La part des usagers des TC (η_B^U) et celle des automobilistes (η_A^U) à la période T sont les suivantes :

$$\eta_B^U = \frac{1}{2} - \frac{ck}{4N} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4N}\right)^2 - \frac{kF}{2N^2}} \quad \text{et} \quad \eta_A^U = \frac{1}{2} + \frac{ck}{4N} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{ck}{4N}\right)^2 - \frac{kF}{2N^2}}$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de η_B^U est égale à l'unité et celle de η_A^U est égale à zéro :

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_B^U = 1 \quad \text{et} \quad \lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_A^U = 0$$

La part des usagers des TC (η_B^U) et celle des automobilistes (η_A^U) sont toutes deux présentes dans l'expression du coût social total avec péage uniforme :

$$CST^U = cN + \frac{F}{\eta_B^U} - \frac{(\eta_A^U)^2 N^2}{k} + C_E \left(\frac{N}{2} + \frac{ck}{4} \right) - C_E \sqrt{\left(\frac{N}{2} - \frac{ck}{4} \right)^2 - \frac{kF}{2}}$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de CST^U est égale à $cN + F$:

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^U = cN + F}$$

L'expression du coût social total avec le péage uniforme et la redistribution des recettes est la suivante :

$$CST^{U'} = N(c + C_E) + \frac{2N^2}{k} + C_E \frac{ck}{2} - \sqrt{c^2 k^2 - 4kF + 4N^2} \left(\frac{N}{k} + \frac{C_E}{2} \right)$$

Quand δ tend vers l'infini, alors la limite de $CST^{U'}$ est également : $cN + F$

$$\boxed{\lim_{\delta \rightarrow \infty} CST^{U'} = cN + F}$$

Si l'on remplace c , N et F respectivement par 1.94, 24 100 et 6 174, alors on trouve une limite des coûts sociaux totaux de 52 928 €.

ANNEXE 4.1

➤ Démonstration de la valeur du coefficient de l'élasticité de substitution : σ

Une fonction C.E.S. de type $U_i(V_i, TC_i) = (a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}}$, est caractérisée par une élasticité constante $\sigma = \frac{1}{1-\rho}$ qui s'exprime aussi sous la forme :

$$\sigma = \frac{\partial(TC_i/V_i)}{\partial TMS} \times \frac{TMS}{TC_i/V_i}.$$

Pour vérifier cette relation, nous calculons dans un premier temps le TMS de la fonction U_i : $TMS = \frac{Um_{V_i}}{Um_{TC_i}} \Rightarrow TMS = \frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1}$; on en déduit la relation

suivante :
$$\frac{TC_i}{V_i} = \left(\frac{a_i}{1-a_i} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \times TMS^{\frac{1}{1-\rho}}$$

En appliquant la relation : $\sigma = \frac{\partial(TC_i/V_i)}{\partial TMS} \times \frac{TMS}{TC_i/V_i}$ avec nos résultats, nous

trouvons :

$$\sigma = \frac{1}{1-\rho} \left(\frac{a_i}{1-a_i} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \times TMS^{\frac{1}{1-\rho}-1} \times \frac{\left(\frac{a_i}{1-a_i} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} \right)}{(TC_i/V_i)} ; \quad \text{après simplification, nous}$$

obtenons :

$$\sigma = \frac{1}{1-\rho}$$

ANNEXE 4.2

➤ Calculs des conditions de premier ordre relatives au cas n°1

Soit le Lagrangien suivant : $L = [a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho]^\frac{1}{\rho} - \lambda(p_v V_i + p_{TC} TC_i - R_i)$ (4.2)

Les conditions du premier ordre sont :

$$CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} = 0 \Leftrightarrow a_i V_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_v \lambda = 0$$

$$CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial TC_i} = 0 \Leftrightarrow (1-a_i)TC_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_{TC} \lambda = 0$$

Grâce à ces deux conditions, nous obtenons :

$$\frac{a_i V_i^{\rho-1}}{(1-a_i)TC_i^{\rho-1}} = \frac{p_v}{p_{TC}} \text{ d'où } TMS = \frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} = \frac{p_v}{p_{TC}} \quad (4.3)$$

➤ Calculs des conditions de premier ordre relatives au cas n°2

Soit le Lagrangien suivant :

$$L = [a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho]^\frac{1}{\rho} - \lambda(p_v V_i + p_{TC} TC_i - R_i) + \mu_{TC} TC_i \quad (4.2)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} = 0 \Leftrightarrow a_i V_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_v \lambda = 0$$

$$\Rightarrow \frac{a_i V_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1}}{p_v} = \lambda$$

$$CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial TC_i} = 0 \Leftrightarrow (1-a_i)TC_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_{TC} \lambda + \mu_{TC} = 0$$

avec $\mu_{TC} > 0$

On a alors : $\mu_{TC} = -(1-a_i)TC_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} + p_{TC} \lambda > 0$; on remplace

λ par son expression et on obtient le TMS suivant :

$$\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} > \frac{p_V}{p_{TC}} \quad (4.6)$$

➤ Calculs des conditions de premier ordre relatives au cas n°3

Le Lagrangien est représenté par :

$$L = \left[a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} - \lambda (p_V V_i + p_{TC} TC_i - R_{T_i}) + \mu_V V_i \quad (4.2)$$

Les conditions du premier ordre associées sont :

$$CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} = 0 \Leftrightarrow a_i V_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_V \lambda + \mu_V = 0$$

avec $\mu_V > 0$

$$CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial TC_i} = 0 \Leftrightarrow (1-a_i) TC_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_{TC} \lambda = 0$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{(1-a_i) TC_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1}}{p_{TC}}$$

On a alors : $\mu_V = -(a_i) V_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} + p_V \lambda > 0$; on remplace λ par

son expression et on obtient :

$$\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} < \frac{p_V}{p_{TC}} \quad (4.9)$$

ANNEXE 4.3

Situation sans régulation environnementale

- Cas n°1 : signes des dérivées des quantités d'équilibre par rapport au revenu transport (R_i) et aux prix des modes (p_V) et (p_{TC})

$$\frac{\partial V_i^*}{\partial R_i} = \left(\frac{a_i}{p_V} \right)^\sigma \frac{1}{a_i p_V^{1-\sigma} + (1-a_i) p_{TC}^{1-\sigma}} > 0$$

$$\frac{\partial TC_i^*}{\partial R_i} = \left(\frac{1-a_i}{p_{TC}} \right)^\sigma \frac{1}{a_i p_V^{1-\sigma} + (1-a_i) p_{TC}^{1-\sigma}} > 0$$

$$\frac{\partial V_i^*}{\partial p_V} = - \frac{a_i^\sigma R_i (a_i^\sigma + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma} p_V^{\sigma-1} \sigma)}{(a_i^\sigma p_V + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma} p_V^\sigma)^2} < 0 \text{ avec } \sigma > 0$$

$$\frac{\partial TC_i^*}{\partial p_{TC}} = - \frac{(1-a_i)^\sigma R_i ((1-a_i)^\sigma + a_i^\sigma p_{TC}^{\sigma-1} p_V^{1-\sigma} \sigma)}{((1-a_i)^\sigma p_{TC} + a_i^\sigma p_{TC}^\sigma p_V^{1-\sigma})^2} < 0 \text{ avec } \sigma > 0$$

- Cas n°2 : signes des dérivées de (V_i^*) par rapport au revenu transport (R_i) et au prix de l'automobile (p_V)

$$\frac{\partial V_i^*}{\partial R_i} = \frac{1}{p_V} > 0 \text{ avec } p_V > 0$$

$$\frac{\partial V_i^*}{\partial p_V} = - \frac{R_i}{p_V^2} < 0 \text{ avec } p_V > 0$$

- Cas n°3 : signes des dérivées de (TC_i^{**}) par rapport au revenu transport (R_i) et au prix des TC (p_{TC})

$$\frac{\partial TC_i^{**}}{\partial R_i} = \frac{1}{p_{TC}} > 0 \text{ avec } p_{TC} > 0$$

$$\frac{\partial TC_i^{**}}{\partial p_{TC}} = -\frac{R_{T_i}}{p_{TC}^2} < 0 \text{ avec } p_{TC} > 0$$

➤ Cas de la fonction Cobb-Douglas : signes des dérivées des quantités d'équilibre par rapport au revenu transport (R_{T_i}) et aux prix des modes (p_V) et (p_{TC})

$$\frac{\partial V_i^*}{\partial R_{T_i}} = \frac{a_i}{p_V} > 0 \text{ avec } p_V > 0 \text{ et } \frac{\partial V_i^*}{\partial p_V} = -\frac{a_i R_{T_i}}{p_V^2} < 0 \text{ avec } p_V > 0$$

$$\frac{\partial TC_i^*}{\partial R_{T_i}} = \frac{(1-a_i)}{p_{TC}} > 0 \text{ avec } p_{TC} > 0, \text{ et } \frac{\partial TC_i^{**}}{\partial p_{TC}} = -\frac{(1-a_i)R_{T_i}}{p_{TC}^2} < 0 \text{ avec } p_{TC} > 0$$

ANNEXE 4.4

➤ Calculs des conditions de premier ordre relatives au cas n°4

Soit le programme suivant :

$$L = \left[a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} - \lambda \left(p_v V_i + p_e (V_i - \bar{V}_i) + p_{TC} TC_i - R_{T_i} \right) \quad (4.22)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} = 0 \Leftrightarrow a_i V_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - (p_v + p_e) \lambda = 0$$

$$CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial TC_i} = 0 \Leftrightarrow (1-a_i) TC_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_{TC} \lambda = 0$$

Grâce à ces deux conditions, nous obtenons :

$$\frac{a_i V_i^{\rho-1}}{(1-a_i) TC_i^{\rho-1}} = \frac{p_v + p_e}{p_{TC}} \text{ d'où } TMS = \frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} = \frac{p_v + p_e}{p_{TC}} \quad (4.23)$$

➤ Calculs des conditions de premier ordre relatives au cas n°5 et détermination des conditions d'existence de la solution en coin :

Soit le Lagrangien suivant :

$$L = \left[a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} - \lambda \left(p_v V_i + p_{TC} TC_i - R_{T_i} \right) + \mu_{TC} TC_i \quad (4.22)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} = 0 \Leftrightarrow a_i V_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - (p_v + p_e) \lambda = 0$$

$$\Rightarrow \frac{a_i V_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1}}{p_v + p_e} = \lambda$$

$$CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial TC_i} = 0 \Leftrightarrow (1-a_i) TC_i^{\rho-1} \times \left(a_i V_i^\rho + (1-a_i) TC_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_{TC} \lambda + \mu_{TC} = 0$$

avec $\mu_{TC} > 0$

On a alors : $\mu_{TC} = -(1-a_i)TC_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} + p_{TC}\lambda > 0$; on remplace λ par son expression et on obtient :

$$\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} > \frac{p_V + p_e}{p_{TC}} \quad (4.26)$$

➤ Calculs des conditions de premier ordre relatives au cas n°6 et détermination des conditions d'existence de la solution en coin

Le Lagrangien est représenté par :

$$L = \left[a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} - \lambda \left(p_V V_i + p_e (V_i - \bar{V}_i) + p_{TC} TC_i - R_i \right) + \mu_V V_i \quad (4.22)$$

Les conditions du premier ordre associées sont :

$$CPO_1 : \frac{\partial L}{\partial V_i} = 0 \Leftrightarrow a_i V_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} - (p_V + p_e)\lambda + \mu_V = 0$$

avec $\mu_V > 0$

$$CPO_2 : \frac{\partial L}{\partial TC_i} = 0 \Leftrightarrow (1-a_i)TC_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} - p_{TC}\lambda = 0$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{(1-a_i)TC_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1}}{p_{TC}}$$

On a alors : $\mu_V = -(a_i) V_i^{\rho-1} \times (a_i V_i^\rho + (1-a_i)TC_i^\rho)^{\frac{1}{\rho}-1} + (p_V + p_e)\lambda > 0$; on remplace λ par son expression et on obtient :

$$\frac{a_i}{(1-a_i)} \left(\frac{V_i}{TC_i} \right)^{\rho-1} < \frac{p_V + p_e}{p_{TC}} \quad (4.29)$$

ANNEXE 4.5

Situation avec régulation environnementale

➤ Cas n°4 : détermination des effets du prix du permis d'émissions p_e sur les quantités d'équilibre

Soit $V_i^{**} = \left(\frac{a_i}{p_V + p_e} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right)$, nous développons cette

fonction pour trouver $V_i^{**} = \frac{a_i^\sigma R_{T_i} + a_i^\sigma p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e) + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma} (p_V + p_e)^\sigma}$

Cette relation est de la forme $\left(\frac{u}{v} \right)$, donc la dérivée par rapport à p_e est

$$\left(\frac{u}{v} \right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$$

avec

$$u(p_e) = a_i^\sigma R_{T_i} + a_i^\sigma p_e \bar{V}_i \Rightarrow u'(p_e) = a_i^\sigma \bar{V}_i$$

$$v(p_e) = a_i^\sigma p_V + a_i^\sigma p_e + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma} (p_V + p_e)^\sigma \Rightarrow v'(p_e) = a_i^\sigma + \sigma(1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma} (p_V + p_e)^{\sigma-1}$$

D'où

$$\frac{\partial V_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{a_i^\sigma p_{TC}^\sigma \left(a_i^\sigma p_{TC}^\sigma (p_e + p_V) (p_V \bar{V}_i - R_{T_i}) - (1-a_i)^\sigma p_{TC} (p_e + p_V)^\sigma (\sigma R_{T_i} - p_e \bar{V}_i - p_V \bar{V}_i + p_e \sigma \bar{V}_i) \right)}{(p_e + p_V) \left(a_i^\sigma p_{TC}^\sigma (p_e + p_V) + (1-a_i)^\sigma p_{TC} (p_e + p_V)^\sigma \right)^2}$$

Si $R_{T_i} > p_V \bar{V}_i$, alors on a $\frac{\partial V_i^{**}}{\partial p_e} < 0$, ce qui engendre $\frac{\partial V_i^{**}}{\partial p_e} < 0$

Soit $TC_i^{**} = \left(\frac{1-a_i}{p_{TC}} \right)^\sigma \left(\frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}^{1-\sigma}} \right)$, nous développons cette

fonction afin de trouver une forme $\left(\frac{u}{v} \right)$, ce qui donne

$$TC_i^{**} = \left(\frac{(1-a_i)^\sigma R_{T_i} + (1-a_i)^\sigma p_e \bar{V}_i}{p_{TC}^\sigma a_i^\sigma (p_V + p_e)^{1-\sigma} + (1-a_i)^\sigma p_{TC}} \right)$$

D'où

$$\frac{\partial TC_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{(1-a_i)^\sigma (p_e + p_v)^\sigma \left((1-a_i)^\sigma \bar{V}_i p_{TC} (p_e + p_v)^\sigma + a_i^\sigma p_{TC}^\sigma (\sigma R_{T_i} - R_{T_i}) + \bar{V}_i (p_v + p_e \sigma) \right)}{\left(a_i^\sigma p_{TC}^\sigma (p_e + p_v) + (1-a_i)^\sigma p_{TC} (p_e + p_v)^\sigma \right)^2}$$

On a $\frac{\partial TC_i^{**}}{\partial p_e} > 0$, ce qui implique $\frac{\partial TC^{**}}{\partial p_e} > 0$.

➤ Cas n°5 : détermination des effets du prix du permis d'émissions p_e sur la quantité d'équilibre V_i^{**}

Soit $V_i^{**} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_v + p_e}$, alors la dérivée de V_i^{**} par rapport à p_e est la suivante :

$$\frac{\partial V_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{p_v \bar{V}_i - R_{T_i}}{(p_v + p_e)^2} < 0 \text{ si } p_v \bar{V}_i < R_{T_i}$$

➤ Cas n°6 : détermination des effets du prix du permis d'émissions p_e sur la quantité d'équilibre TC_i^{***}

Soit $TC_i^{***} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_{TC}}$, alors la dérivée de TC_i^{***} par rapport à p_e est la suivante :

$$\frac{\partial TC_i^{***}}{\partial p_e} = \frac{\bar{V}_i}{p_{TC}} > 0 \text{ avec } p_{TC} > 0$$

➤ Cas de la fonction Cobb-Douglas : détermination des effets du prix du permis d'émissions p_e sur les quantités d'équilibre (V_i^{**}) et (TC_i^{**})

Soit $V_i^{**} = \frac{a_i(R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)}{p_V + p_e}$, alors la dérivée de (V_i^{**}) par rapport au prix p_e est la

$$\text{suivante : } \frac{\partial V_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{a_i(p_V \bar{V}_i - R_{T_i})}{(p_V + p_e)^2} < 0 \text{ si } p_V \bar{V}_i < R_{T_i}$$

Soit $TC_i^{**} = \frac{(1-a_i)(R_{T_i} + p_e \bar{V}_i)}{p_{TC}}$, alors la dérivée de (TC_i^{**}) par rapport à p_e est la

$$\text{suivante : } \frac{\partial TC_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{(1-a_i)\bar{V}_i}{p_{TC}} > 0 \text{ si } p_{TC} > 0$$

➤ Cas de la fonction linéaire : détermination des effets du prix du permis d'émissions p_e sur les quantités d'équilibre (V_i^{**}) et (TC_i^{**})

Soit $V_i^{**} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_V + p_e}$, alors la dérivée de (V_i^{**}) par rapport au prix p_e est la suivante :

$$\frac{\partial V_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{(p_V \bar{V}_i - R_{T_i})}{(p_V + p_e)^2} < 0 \text{ si } p_V \bar{V}_i < R_{T_i}$$

Soit $TC_i^{**} = \frac{R_{T_i} + p_e \bar{V}_i}{p_{TC}}$, alors la dérivée de (TC_i^{**}) par rapport à p_e est la suivante :

$$\frac{\partial TC_i^{**}}{\partial p_e} = \frac{\bar{V}_i}{p_{TC}} > 0 \text{ si } p_{TC} > 0$$

ANNEXE 4.6

➤ Détermination des effets de la quantité de permis d'émissions sur le prix du permis du marché : cas particulier où $\rho \rightarrow 0$: fonction Cobb-Douglas

$$\text{Soit } p_e = \frac{\sum_{i=1}^N a_i R_{T_i} - p_v \sum_{i=1}^N \bar{V}_i}{\sum_{i=1}^N \bar{V}_i (1 - a_i)} \quad (4.44)$$

En prenant la relation $\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$ et en dérivant par rapport à \bar{V}_i , nous

$$\text{obtenons : } \frac{\partial p_e}{\partial \bar{V}_i} = \frac{-N p_v \sum_{i=1}^N (1 - a_i) \bar{V}_i + \left(\sum_{i=1}^N (1 - a_i)\right) \left(p_v \sum_{i=1}^N \bar{V}_i - \sum_{i=1}^N a_i R_{T_i}\right)}{\left(\sum_{i=1}^N (1 - a_i) \bar{V}_i\right)^2} < 0 \text{ sachant que}$$

$$N > 0 \text{ et } 0 < a_i < 1 \text{ et avec } \sum_{i=1}^N a_i R_{T_i} \geq p_v \sum_{i=1}^N \bar{V}_i$$

ANNEXE 4.7

➤ Cas général de la fonction C.ES. : détermination du signe de la dérivée

$$\frac{\partial F}{\partial V_i} = - \frac{(a_i - 1) a_i \bar{K}_i^2 (\bar{K}_i - V_i)^{\rho-2} V_i^{\rho-2} \left((1 - a_i) (\bar{K}_i - V_i)^\rho + a_i V_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} (\rho - 1)}{\left((\bar{K}_i - V_i)^\rho + a_i \left(-(\bar{K}_i - V_i)^\rho + V_i^\rho \right) \right)^2} > 0 \text{ si } \rho > 1$$

Liste des encadrés

ENCADRÉ N°2.1 : Les deux systèmes de fonctionnement de marché des permis d'émissions.....	80
ENCADRÉ N°2.2 : Principales hypothèses et résultats du modèle de Daganzo (1995).....	106
ENCADRÉ N°3.1 : Méthodologie appliquée.....	138

Liste des figures

FIGURE N°1.1 : Trois types de méthodes pour évaluer la valeur de la vie humaine.....	28
FIGURE N°3.1 : Analyse des politiques de report modal.....	130
FIGURE N°A1.4 : Représentation du modèle de file d'attente.....	281
FIGURE N°A2.1 : Chronologie de la mise en place du SCEQE.....	284

Liste des graphiques

GRAPHIQUE N°1.1 : La répartition des emplois dans le secteur automobile.....	24
GRAPHIQUE N°1.2 : La répartition du bruit des transports.....	26
GRAPHIQUE N°1.3 : Responsabilité des accidents de circulation.....	28
GRAPHIQUE N°1.4 : Évolution des principaux polluants primaires de l'automobile.....	30
GRAPHIQUE N°1.5 : Évolution des émissions de CO2 des principaux secteurs.....	31
GRAPHIQUE N°1.6 : Diagramme issu des données de l'ingénierie.....	35
GRAPHIQUE N°1.7 : Relation offre-demande de déplacements.....	37
GRAPHIQUE N°1.8 : Relation coût de déplacement-demande.....	38
GRAPHIQUE N°1.9 : Détermination de la taxe.....	39
GRAPHIQUE N°1.10 : Détermination de la taxe de congestion et environnementale.....	41
GRAPHIQUE N°1.11 : Évolution du nombre de personnes (en milliers) entrant dans la zone à l'heure de pointe de la matinée en voiture et en bus.....	67
GRAPHIQUE N°1.12 : Répartition des modes de transport à Londres.....	67
GRAPHIQUE N°2.1 : Efficacité des instruments selon les résultats de Weitzman (1974).....	82
GRAPHIQUE N°2.2 : Les industries européennes sous quotas selon leur activité.....	91
GRAPHIQUE N°2.3 : Évolution du prix de la tonne de CO2 sur la période 2005-2007 (phase 1) et sur la deuxième période (février 2008 à aujourd'hui).....	93
GRAPHIQUES N°3.1 : Situation d'équilibre en fonction de la valeur du temps.....	157
GRAPHIQUE N°3.2 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur du temps.....	158
GRAPHIQUE N°3.3 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur du temps.....	159
GRAPHIQUE N°3.4 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur du temps.....	160
GRAPHIQUES N°3.5 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur du temps.....	161
GRAPHIQUE N°3.6 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur du temps.....	162
GRAPHIQUE N°3.7 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur du temps.....	163
GRAPHIQUE N°3.8 : Coût social total pour chaque situation de péage en fonction de la valeur du temps.....	164
GRAPHIQUE N°3.9 : Coût social total, à la période T+1, en fonction de la valeur du temps.....	165
GRAPHIQUES N°3.10 : Situation d'équilibre en fonction de la valeur des coûts fixes.....	168
GRAPHIQUE N°3.11 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur des coûts fixes.....	170
GRAPHIQUE N°3.12 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur des coûts fixes.....	171
GRAPHIQUE N°3.13 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur des coûts fixes.....	172
GRAPHIQUE N°3.14 : Coût social total, en T et en T+1, en fonction de la valeur des coûts fixes.....	173
GRAPHIQUE N°3.15 : Parts des automobilistes et des usagers des TC en fonction de la valeur des coûts fixes.....	174

GRAPHIQUE N°3.16 : Coût social total en fonction de la valeur des coûts fixes.....	175
GRAPHIQUE N°3.17 : Coûts sociaux totaux en fonction de la valeur des coûts fixes pour la période T176	
GRAPHIQUE N°3.18 : Coûts sociaux totaux à la période T+1 en fonction de la valeur des coûts fixes	177
GRAPHIQUE N°4.1 : Bien-être social et dommage marginal, pour deux individus	224
GRAPHIQUE N°4.2 : Prix du permis (p_e) et quotas distribués (\bar{V}).....	225
GRAPHIQUE N°4.3 : Kilomètres parcourus en voiture et en TC et prix du permis d'émissions.....	226
GRAPHIQUE N°4.4 : Prix du permis d'émissions (p_e) et élasticité de substitution (σ).....	227
GRAPHIQUE N°4.5 : Bien-être social et dommage marginal, pour trois individus	230
GRAPHIQUE N°4.6 : Prix du permis d'émissions (p_e) et nombre de permis alloué (\bar{V}).....	231
GRAPHIQUE N°4.7 : Kilomètres parcourus en automobile et en TC et prix du permis (p_e)	232
GRAPHIQUE N°4.8 : Prix du permis (p_e) et élasticité de substitution (σ)	233

Liste des tableaux

TABLEAU N°1.1 : Dépréciation des valeurs immobilières en fonction des niveaux d'exposition au bruit27	
TABLEAU N°1.2 : Équations du modèle de flux de Chu (1995).....	45
TABLEAU N°1.3 : Détermination des horaires d'équilibre sans péage	47
TABLEAU N°1.4 : À l'équilibre	48
TABLEAU N°1.5 : Les différents coûts de déplacement à l'équilibre.....	49
TABLEAU N°1.6 : Les horaires de déplacements avec péage	51
TABLEAU N°1.7 : À l'optimum.....	53
TABLEAU N°1.8 : Les différents coûts à l'optimum.....	53
TABLEAU N°1.9 : Équations de base du modèle d'Arnott et al.....	57
TABLEAU N°1.10 : Les différentes situations de l'heure de pointe.....	59
TABLEAU N°1.11 : À l'équilibre	60
TABLEAU N°1.12 : Les différents coûts de déplacement à l'équilibre.....	60
TABLEAU N°1.13 : À l'optimum.....	62
TABLEAU N°1.14 : Le péage sous différentes formes	63
TABLEAU N°1.15 : Description des quatre scénarii : définition, trafic concerné et niveau de péage permettant une diminution du trafic automobile régulier de 20%	70
TABLEAU N°2.1 : Le fonctionnement des trois systèmes de marché de permis individuel	100
TABLEAU N°3.1 : Valeurs du coût de la pollution engendrée par l'automobile pour l'année 2000 (unité : euro/100 véhicules par kilomètre).....	127
TABLEAU N°3.2 : Caractéristiques principales du modèle avec partage modal et coût environnemental	134
TABLEAU N°3.3 : Résultats.....	148
TABLEAU N°3.4 : Application numérique n°1 avec comme valeur du temps : $\alpha = 9.5$ €/h.....	154
TABLEAU N°3.5 : Application numérique n°2 avec comme valeur du temps : $\alpha = 3.43$ €/h.....	155
TABLEAU N°3.6 : Application numérique n°3 avec comme valeur des coûts fixes des TC : $F = 21\ 500$ €	166
TABLEAU N°4.1 : Situation d'équilibre dans le cas général de la fonction C.E.S.....	214
TABLEAU N°4.2 : Situation d'équilibre concernant les cas particuliers de la fonction C.E.S	215
TABLEAU N°4.3 : Application numérique n°1 : situation sans régulation environnementale	221
TABLEAU N°4.4 : Application numérique n°2 : situation avec régulation environnementale.....	222
TABLEAU N°4.5 : Pollution et bien-être social, pour deux individus	223
TABLEAU N°4.6 : Application numérique n°3 : situation sans réglementation environnementale.....	228
TABLEAU N°4.7 : Application numérique n°4 : situation avec réglementation environnementale	229
TABLEAU N°4.8 : Pollution et bien-être social, pour trois individus.....	230
TABLEAU N°A3.4 : Estimations de la valeur du temps	291

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
-----------------------------------	----------

PREMIÈRE PARTIE :	
ENSEIGNEMENTS ET RÉINTERPRÉTATION DES OUTILS DE	
RÉGULATION ENVIRONNEMENTALE APPLIQUÉS AUX TRANSPORTS..	11

CHAPITRE 1 :

LE PÉAGE URBAIN	19
1.1. Les différentes externalités des transports.....	22
1.1.1. Les externalités positives des transports.....	22
1.1.1.1. Les effets positifs induits par la mobilité.....	22
1.1.1.2. Les bienfaits de l'activité du secteur de l'automobile	24
1.1.2. Les nuisances de l'automobile.....	25
1.1.2.1. Le bruit	26
1.1.2.2. Les accidents de la circulation.....	27
1.1.2.3. La congestion.....	29
1.1.2.4. La pollution et l'effet de serre	30
1.2. L'interprétation économique du phénomène de congestion et la prise en	
compte du problème environnemental	33
1.2.1. Détermination graphique de la congestion	33
1.2.2. Les enseignements de la courbe débit-vitesse	35
1.2.3. Le coût de congestion de déplacement	37
1.2.4. L'intégration de la question environnementale dans les modèles classiques	
.....	40
1.3. Deux modélisations de références de la congestion : l'approche par les flux et	
l'approche par les files d'attente.....	43
1.3.1. Le modèle temporel de flux.....	43
1.3.1. Les principales caractéristiques	44
1.3.2. Détermination de l'équilibre de congestion dans un modèle de flux ...	46
1.3.3. Détermination de l'optimum social	49
1.3.2. Le modèle de file d'attente ou goulot d'étranglement.....	54
1.3.2.1. Caractéristiques principales du modèle	54
1.3.2.2. Détermination de l'équilibre de congestion.....	58
1.3.2.3. L'optimum social.....	61
1.3.3. Comparaison, apports et limites des modèles.....	64
1.4. Mise en lumière de l'efficacité du péage urbain à travers les résultats d'études	
empiriques	65
1.4.1. Londres : échec ou réussite ?.....	65
1.4.2. À quand le péage parisien ?.....	69

CHAPITRE 2 :

TAXE VERSUS PERMIS D'ÉMISSIONS NÉGOCIABLES.....	75
2.1. Le choix théorique entre la taxe et les permis d'émissions négociables	78

2.1.1. Prémisses et fonctionnement d'un marché de droits à polluer ou permis d'émissions négociables	78
2.1.2. Efficacité et incertitudes	81
2.1.3. Les entraves au fonctionnement de la politique de régulation	84
2.1.4. La mise en place de l'instrument.....	85
2.1.5. L'instrument économique comme instrument politique.....	86
2.1.6. Le système hybride : la solution ?	87
2.2. Applications des permis d'émissions négociables : vers une décentralisation totale	89
2.2.1. Le Système communautaire d'échanges de quotas d'émissions	89
2.2.1.1. Les principales étapes du fonctionnement.....	90
2.2.1.2. Les résultats de la période 2005-2007	92
2.2.2. Les différents systèmes de marchés appliqués au secteur des transports .	94
2.2.2.1. Le programme <i>Corporate average fuel economy</i> (CAFE).....	94
2.2.2.2. Le programme <i>Zero emission vehicle</i> (ZEV)	96
2.2.2.3. Un système de permis pour la suppression du plomb dans l'essence	97
2.2.3. La carte carbone individuelle	99
2.2.4. Le programme écopoint en Autriche	102
2.3. La rareté de la modélisation des systèmes de marché de permis appliqués aux automobilistes.....	104
2.3.1. Le modèle précurseur de système hybride et ses extensions.....	105
2.3.2. Modèle hybride appliqué à la consommation de carburant des automobilistes.....	107
2.3.3. Le modèle décentralisé pour les automobilistes de la ville de Mexico ..	109
2.3.4. Apports et limites de la modélisation théorique du système de PEN par rapport à celui de la taxation.....	110

**DEUXIÈME PARTIE :
EXTENSIONS ET DÉVELOPPEMENTS DE MODÉLISATION POUR UNE
MOBILITÉ DURABLE 117**

CHAPITRE 3 :
MODÉLISATION DU PÉAGE URBAIN ASSOCIÉ À UNE POLITIQUE MODALE :
PRISE EN COMPTE DES COÛTS ENVIRONNEMENTAUX..... 123

3.1. Les extensions apportées	126
3.1.1. L'ajout des externalités environnementales	126
3.1.2. L'ajout d'une politique modale	128
3.1.2.1. La complémentarité des politiques modales.....	128
3.1.2.2. La nature des différentes politiques modales	129
3.2. Le modèle du péage urbain avec le coût environnemental et la mise en place d'une politique modale incitative	131
3.2.1. Modèle bimodal comprenant le coût environnemental	132
3.2.1.1. Les principales caractéristiques du modèle	132
3.2.1.2. Détermination de l'équilibre modal.....	135
3.2.2. L'ajout d'une politique modale incitative et l'optimum social	137
3.2.2.1. Le péage de pointe.....	138
3.2.2.2. Le péage uniforme de pointe (<i>coarse toll</i>).....	141
3.2.2.3. Le péage uniforme	144

3.2.3. Les politiques optimales	149
3.2.3.1. Situation avec péage de pointe	150
3.2.3.2. Situation avec péage uniforme lors des périodes de pointe.....	150
3.2.3.3. Situation avec péage uniforme	151
3.3. Simulations numériques	152
3.3.1. Tests de sensibilité relatifs à la valeur du temps	153
3.3.1.1. La situation d'équilibre initiale	156
3.3.1.2. La situation avec un péage de pointe.....	158
3.3.1.3. La situation avec péage uniforme lors des périodes de pointe	160
3.3.1.4. La situation avec péage uniforme.....	161
3.3.1.5. Comparaison générale	164
3.3.2. Tests de sensibilités relatifs aux coûts fixes des TC.....	166
3.3.2.1. La situation d'équilibre initiale	168
3.3.2.2. La situation avec le péage de pointe.....	169
3.3.2.3. La situation avec le péage uniforme lors des périodes de pointe	171
3.3.2.4. La situation avec le péage uniforme	173
3.3.2.5. Comparaison générale	176

CHAPITRE 4 :

MISE EN PERSPECTIVE D'UNE MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE PEN POUR LES AUTOMOBILISTES.....

4.1. Principales hypothèses et caractéristiques du fonctionnement du système de PEN appliqué aux automobilistes.....	186
4.1.1. La cible et identification de la variable d'action	186
4.1.2. L'allocation des permis d'émissions	188
4.1.3. Technologie de contrôle et mise en place.....	189
4.2. Le modèle	190
4.2.1. L'équilibre sans régulation environnementale	191
4.2.1.1. Analyse des équilibres possibles entre les modes	193
4.2.1.2. La substituabilité des modes de transport.....	197
4.2.2. L'équilibre avec régulation environnementale.....	201
4.2.2.1. La relation entre les émissions polluantes et l'utilisation de l'automobile.....	201
4.2.2.2. La maximisation de l'utilité avec un système de PEN.....	202
4.2.2.3. Analyse des équilibres possibles entre les modes	203
4.2.2.4. La substituabilité des modes de transport.....	209
4.2.3. Équilibre sur le marché des permis d'émissions	216
4.2.4. Effets sur le bien-être social	218
4.3. Simulations numériques	220
4.3.1. Applications pour deux individus aux revenus identiques	220
4.3.1.1. Applications numériques et interprétations	220
4.3.1.2. Tests de sensibilité relatifs au nombre de permis d'émissions.....	224
4.3.1.3. Tests de sensibilité relatifs au prix du permis d'émissions	225
4.3.1.4. Tests de sensibilité relatifs au coefficient de l'élasticité de substitution	226
4.3.2. Applications numériques avec trois individus à revenus différents	228
4.3.2.1. Applications numériques et interprétations des résultats	228
4.3.2.2. Tests de sensibilité relatifs aux permis alloués.....	231

4.3.2.3. Tests de sensibilité relatifs au prix	232
4.3.2.4. Tests de sensibilité relatifs au coefficient d'élasticité de substitution	233
4.4. Une contrainte kilométrique et un bien composite.....	234
4.4.1. Analyse des extensions.....	235
4.4.2. Interprétations des résultats	238
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	245
BIBLIOGRAPHIE	253
ANNEXES	273
Liste des encadrés	311
Liste des figures	311
Liste des graphiques	311
Liste des tableaux	312
TABLE DES MATIÈRES	313