



HAL
open science

Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains : une plate-forme de modélisation

Charles Raux, Michaël Sdika, Vincent Hermemier

► To cite this version:

Charles Raux, Michaël Sdika, Vincent Hermemier. Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains : une plate-forme de modélisation. 2003. halshs-00093625

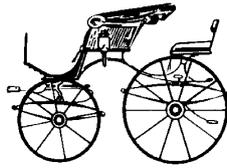
HAL Id: halshs-00093625

<https://shs.hal.science/halshs-00093625>

Submitted on 18 Jan 2007

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.



Laboratoire d'Economie des Transports
(CNRS, Université Lumière-Lyon 2, ENTPE)

Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains : une plate-forme de modélisation

Recherche réalisée pour le compte de la DRAST

Décision de subvention n° 00 MT 61

Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du
Tourisme et de la Mer

Rapport final

Décembre 2003

(version finale. 30.12.03)

Auteurs :

Charles RAUX (ingénieur de recherche CNRS, responsable de la recherche)

Michaël SDIKA

Vincent HERMENIER

LABORATOIRE D'ECONOMIE DES TRANSPORTS
(UMR 5593 CNRS)

A L'UNIVERSITE LUMIERE-LYON 2 :	A L'ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT :
LET ISH 14, avenue Berthelot 69363 LYON Cedex 07 Téléphone +33 (0) 4 72 72 64 03 Télécopie +33 (0) 4 72 72 64 48	LET ENTPE rue Maurice Audin 69518 VAULX-EN-VELIN Cedex Téléphone +33 (0) 4 72 04 70 46 Télécopie +33 (0) 4 72 04 70 92

Sommaire

INTRODUCTION.....	7
1. LE PROJET, LA PROBLÉMATIQUE	9
2. ETAT DE L'ART	11
3. MÉTHODOLOGIE	14
4. L'ARCHITECTURE GLOBALE.....	16
5. LE MODÈLE DE RÉGULATION DE L'OFFRE EN TRANSPORTS COLLECTIFS	30
6. LE MODÈLE CONJOINT D'AFFECTATION ET D'HEURE DE DÉPART	37
7. LE MODÈLE DE RÉPARTITION MODALE « PRIX-TEMPS ».....	54
8. LE COUPLAGE ENTRE LA RÉPARTITION MODALE ET LE CHOIX D'HEURE DE DÉPART	99
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	119
BIBLIOGRAPHIE	123
ANNEXES	127

Résumé

Ce rapport rend compte de travaux de développement d'une architecture de modèles reposant sur une approche de dynamique des systèmes et une approche économétrique. Ce système de modèles a vocation à simuler les effets à moyen et long terme de politiques de déplacements de personnes en milieu urbain, dans une optique de mobilité durable.

L'approche économétrique traditionnelle des comportements de déplacements rencontre plusieurs limites, essentiellement parce que les données disponibles (enquêtes de comportements observés) ne traduisent que l'état final qui apparaît comme un équilibre (vu de manière agrégée) : tous les jours en permanence x% des places de stationnement sont occupées, il y a une pointe de trafic entre telle heure et telle heure, etc. Avec ces données traduisant une demande exprimée, la modélisation économétrique essaie de reproduire tant bien que mal cet équilibre final.

Or, l'analyse des comportements de mobilité montre que cette stabilité vue d'une manière agrégée recouvre une grande variabilité des comportements individuels. De plus, ces changements de comportement en réponse à des stimulus divers ne se font pas instantanément mais avec retard : un navetteur habitué à aller au travail en voiture et à se garer gratuitement sur la voirie publique, devra s'adapter quand les possibilités de stationnement et de circulation se dégradent fortement (par exemple lors de la mise en place de lignes de tramway). Et cette phase d'adaptation passera par plusieurs stades (depuis le changement de l'heure de déplacement jusqu'à l'abandon de la voiture pour ce type de déplacement et même peut-être un changement de lieu de travail ou de domicile) correspondant à des horizons différents. Le pendant de ces constats se trouve dans les valeurs d'élasticités empiriquement calculées, différentes entre le court et le long terme. Pour cela, il importe de développer des approches dynamiques de la modélisation des comportements.

Dans la modélisation traditionnelle à quatre étapes, des rétroactions existent théoriquement mais sont souvent ignorées à cause de la lourdeur des calculs et de la complexité que cela entraîne. Or la prise en compte de la multiplicité de ces rétroactions est nécessaire si l'on veut modéliser correctement l'évolution du système de déplacements urbains. En outre, les relations entre variables sont souvent non linéaires ou du moins leur linéarité ne devrait pas être imposée par des nécessités de simplification analytique. A ce titre la simulation peut être une alternative aux limites de la résolution analytique. Ces considérations - interaction entre boucles de rétroaction, complexité des mécanismes de réaction, délais dans ces réactions, non linéarité entre variables - justifient l'utilisation d'outils de simulation de la dynamique des systèmes.

L'approche proposée consiste à construire des systèmes de modèles intégrant à la fois les techniques de simulation issues de l'approche de dynamique de systèmes et les différentes « briques » élémentaires de modèles économétriques.

Nous avons donc développé une plate-forme méthodologique de simulation des déplacements urbains, en dépassant une opposition stérile entre approche économétrique quantitative détaillée et approche qualitative de dynamique des systèmes. En bref il s'agit de mettre des équations économétriques dans les boucles de rétroaction et d'éviter, partout là où cela est possible, des approches purement qualitatives.

Nous avons tout d'abord élaboré et décrit une architecture d'ensemble du système de déplacements urbains et de ses interrelations avec le système socio-démographique et le

système de localisations. Pour le bloc « transport » nous avons détaillé les ensembles de rétroactions d'une part pour la voiture particulière, d'autre part pour les transports collectifs.

Ont notamment été identifiées un certain nombre de boucles de rétroaction (R pour les positives ou B pour les négatives) qui sont, pour la voiture particulière

- la boucle R2 : « toujours plus loin en voiture »,
- la boucle B5 : « la congestion comme frein à l'étalement urbain »,
- la boucle B6 : « l'accroissement de capacité comme solution à la congestion »,
- la boucle B7 : « la régulation par la congestion »,

et pour les transports collectifs

- la boucle B8 : « la réduction des coûts d'exploitation »
- la boucle B9 : « la hausse des recettes »
- la boucle R1 : « l'autodégradation financière des TC »
- la boucle R3 : « la congestion dégrade l'offre des TC ».

Enfin, nous avons spécifié le traitement de l'évolution de la demande sur la base de segments de déplacements définis par une origine-destination, une activité, un mode de déplacement et une heure donnés. Les transitions entre segments se font par des modèles de changement relatif respectivement, à l'heure, au mode ou à la destination du déplacement. Certains de ces modèles restent encore à élaborer.

Nous avons ensuite construit une maquette d'un modèle de régulation financière de l'offre en transports collectifs et testé ce modèle à partir de données d'entrée fictives. Ce modèle permet de simuler le mécanisme des boucles R1 (auto-dégradation financière des TC), B8 (réduction des coûts d'exploitation) et B9 (hausse des recettes). Nous avons montré comment, sous certaines conditions de restriction financière, le système pouvait s'effondrer.

Le modèle de choix d'heure de départ que nous proposons est couplé à l'affectation sur les itinéraires et a pour caractéristiques :

- d'intégrer une représentation plus réaliste de la formation de la congestion sur un axe routier, à travers la formation de files d'attente, sur la base d'un modèle de goulot ;
- de combiner ce modèle de goulot avec un algorithme de recherche de plus court chemin (en temps généralisé) pour calculer l'affectation du trafic sur le réseau et les temps de parcours correspondant ;
- d'« endogénéiser » le choix de l'heure de départ, par rapport à une heure d'arrivée préférée, en intégrant les coûts d'arrivée en avance ou en retard.

Ce modèle offre des pistes pour simuler, en combinaison avec le modèle de choix modal, plusieurs paradoxes de la congestion comme par exemple le paradoxe de Downs-Thomson à l'origine de la conjecture de Mogridge.

Le modèle de répartition modale, quant à lui, découle de principes théoriques micro-économiques et est fondé pour l'essentiel sur les déterminants du prix et du temps. Le noyau central du modèle, un modèle prix-temps, a été calibré sur la base des comportements observés en 1994-1995 sur l'agglomération lyonnaise et permet notamment, en s'appuyant sur des classes de distance, de s'affranchir d'un zonage ad hoc. Il s'appuie également sur des classes de vitesse de la voiture particulière et vitesse des transports collectifs : cela autorise une bonne transférabilité du modèle à d'autres agglomérations. Le test du modèle en simulation a permis d'en valider la cohérence interne.

L'analyse des comportements observés et des caractéristiques de l'offre de transport a permis également de définir une méthode de modélisation de la répartition modale qui :

- distingue les populations en fonction de la disponibilité réelle d'une voiture particulière au moment du déplacement ;
- traite séparément les destinations avec stationnement payant ou gratuit ;
- traite séparément la marche à pied en fonction des classes de distance.

Enfin, le couplage entre le modèle de répartition modale et celui du choix d'heure de départ et d'affectation sur les réseaux a été réalisé. Les tests sur des configurations simplifiées d'offre et de demande ont permis de valider le comportement du modèle face à des situations de congestion et aux évolutions de la motorisation. Ce modèle montre comment, sous certaines hypothèses, la montée de la congestion favorise les transports collectifs, alors qu'inversement, une augmentation de capacité routière permet à la voiture particulière de conserver ses avantages par rapport aux transports collectifs.

En conclusion nous présentons les perspectives de poursuite de ce travail.

Introduction

Ce rapport rend compte de travaux de développement d'une architecture de modèles reposant sur une approche de dynamique des systèmes et une approche économétrique. Cette recherche se situe dans le cadre d'un projet plus vaste visant le développement d'outils de simulation pour la mesure des effets à long terme de politiques de déplacements en milieu urbain, dans une optique de mobilité durable. Cette approche économétrique vise à articuler les évolutions comportementales, les transformations des localisations des activités et de l'espace urbain, les tendances socio-démographiques et la nature de l'offre de transport.

Ce projet a été initié en réponse à l'appel d'offre du Predit 2 sur la « Modélisation des flux de transport » en 1999. Mais cette proposition a des racines qui remontent à des discussions au début des années 90 autour de la question de la modélisation stratégique, avec les modèles Quinquin développés au LET (cf. infra). Wladimir Koltchanov (actuellement à ATN) nous avait alors vivement conseillé de nous intéresser à la dynamique des systèmes pour aborder la modélisation de l'interaction entre offre et demande et de la concurrence entre voiture particulière et transports collectifs pour la capacité de voirie existante. En parallèle à quelques explorations de cette approche, nous avons également développé le modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise en collaboration avec SEMALY (1997). Dans ce type de modèle conventionnel à 4 étapes, a été intégrée une approche pas à pas (année après année), qui représentait une première, mais fort imparfaite, tentative de prise en compte de la dynamique du système de transports.

Parallèlement l'approche de dynamique des systèmes a été appliquée au transport de marchandises avec le modèle Simtrans par Michel Karsky et Patrice Salini (1999).

La recherche que nous présentons ici a vu sa décision de subvention notifiée par la DRAST en décembre 2000, pour une durée de 18 mois. Une prolongation de six mois a ensuite été accordée, décalant la fin de réalisation à décembre 2002.

En outre, en parallèle à cette recherche, la DRAST a également subventionné le développement d'un modèle de « simulation de scénarios d'évolution prospective de la mobilité urbaine à 20 ans », MobiSim, développé par ATN et appliqué à Lyon (2002). Ce modèle est différent de celui présenté ici, car à plus long terme.

Comme nous le verrons, le produit final n'apparaît certes pas aussi abouti que le précédent modèle. Ce que nous présentons ici rassemble une architecture conceptuelle et quelques briques de modèles qui ont été validés sur le plan théorique, et économétrique quand les données ad hoc étaient disponibles. Le bouclage de quelques uns de ces modèles est également présenté. Nous montrons aussi à travers quelques exemples les potentialités de ce type de modèles. Bien qu'il reste du chemin à parcourir pour aboutir à l'intégration complète de modèles validés sur le plan économétrique, nous pensons que la direction choisie est la bonne, comme nous allons nous efforcer de le démontrer au lecteur.

Le projet a été mené sous la responsabilité de Charles Raux (CNRS-LET). Il a bénéficié des contributions de : Michaël Sdika, ingénieur de l'ENSEEIH de Toulouse et DEA de l'ENSIMAG de Grenoble, qui a adapté les modèles de goulot, d'affectation sur itinéraires et de choix d'heure de départ et écrit les procédures correspondantes en langage C ; Vincent Hermenier, élève ingénieur de l'INSA de Rouen qui a analysé les données de l'enquête-déplacements de Lyon et calé le modèle de répartition modale.

Le plan du rapport est le suivant. Dans les trois premières sections sont présentés successivement la problématique, l'état de l'art sur la question, et la méthodologie de cette recherche. La quatrième section est dévolue à l'architecture conceptuelle du système de modèles. Ensuite sont présentés successivement les briques de modèles : en section 5 un modèle de régulation de l'offre en transports collectifs, où comment la régulation financière peut faire effondrer le système de transports collectifs ; en section 6 un modèle d'affectation sur les itinéraires et de choix d'heure de départ, reposant sur un modèle de goulot ; en section 7 un modèle de répartition modale « prix-temps ». Le couplage entre le modèle de répartition modale et le modèle de choix d'heure de départ est exposé en section 8, avant la conclusion finale.

1. Le projet, la problématique

L'approche économétrique traditionnelle des comportements de déplacements rencontre plusieurs limites, essentiellement parce que les données disponibles (enquêtes de comportements observés) ne traduisent que l'état final qui apparaît comme un équilibre (vu de manière agrégée) : tous les jours en permanence $x\%$ des places sont occupées, il y a une pointe de trafic entre telle heure et telle heure, etc. Avec ces données traduisant une demande exprimée, la modélisation économétrique essaie de reproduire tant bien que mal cet équilibre final.

Or l'analyse des comportements de mobilité montre que cette stabilité vue d'une manière agrégée recouvre une grande variabilité des comportements individuels (cf. par exemple Cairns et alii, 1998) : une proportion significative d'individus ne vont pas toujours au même endroit, n'ont pas toujours les mêmes activités, donc ne font pas le même nombre de déplacements chaque jour, passent d'un mode à l'autre au cours de la semaine, etc.

Les réactions au changement du contexte des déplacements (offre, réglementation et prix) se caractérisent par un grand éventail de possibilités :

- changement de l'heure du déplacement,
- réorganisation des chaînes de déplacements,
- changement de destination,
- changement de mode,
- abandon du déplacement, etc.

Ces changements de comportement ne se font pas instantanément mais avec retard : un navetteur habitué à aller au travail en voiture et à se garer gratuitement sur la voirie publique, devra s'adapter quand les possibilités de stationnement et de circulation se dégradent fortement (par exemple lors de la mise en place de lignes de tramway). Et cette phase d'adaptation passera par plusieurs stades (depuis le changement de l'heure de déplacement jusqu'à l'abandon de la voiture pour ce type de déplacement et même peut-être un changement de lieu de travail ou de domicile) correspondant à des horizons différents. Le pendant de ces constats se trouve dans les valeurs d'élasticités empiriquement calculées, différentes entre le court et le long terme (Goodwin, 1992).

Dans un papier de 1998, Goodwin annonce « la fin de l'équilibre ». Il critique l'« article de foi » des tenants de l'équilibre, tout en reconnaissant que cette hypothèse est rendue nécessaire par le besoin de cohérence d'utilisation des modèles quand on compare des politiques alternatives (Ortuzar et Willumsen, 1994). Malheureusement tout porte à croire qu'au moment où les comportements sont observés, ceux-ci bien souvent ne sont pas en équilibre avec les facteurs qui les influencent (qu'il s'agisse de l'offre de transport ou des revenus), d'où il découle que les relations qui sont calées sont biaisées, que ces dernières ne peuvent valablement être utilisées pour décrire des équilibres différents qui seraient atteints avec des valeurs différentes des facteurs, et qu'en outre les bilans socio-économiques sont biaisés. Il s'agit certes d'une situation inconfortable puisque l'utilisation cohérente des modèles pour la prise de décision exige un cadre d'équilibre général.

Au-delà de ce constat pessimiste, il reste que, si l'on veut pouvoir dire des choses pertinentes en matière d'inertie des comportements, de résistances au renversement des tendances de long terme par diverses mesures de politiques de transport ou d'aménagement urbain, ou du délai

d'impact de ces mesures et de leur séquence, il importe de développer des approches dynamiques de la modélisation des comportements. Dans ces approches, on retrouvera les notions d'équilibre (ou de déséquilibre) mais comme résultant de processus de rétroaction.

Sur le plan méthodologique cela a deux conséquences, la nécessité de travailler sur des données longitudinales (panels ou pseudo-panels), d'une part, et la formalisation dynamique des modèles (systèmes d'équations différentielles), d'autre part.

2. Etat de l'art

L'analyse des panels est relativement bien établie en transports surtout à l'étranger si l'on considère qu'un numéro spécial de *Transportation Research* en faisait le point en 1990 (Kitamura, 1990). Depuis de nombreux travaux ont été effectués sur la question (Golob et al, 1997).

En France cette approche des panels est semble-t-il peu développée, si l'on excepte les travaux de l'Inrets (travaux de J.-L. Madre, J. Armoogum et C. Gallez) qui ont d'abord porté sur la motorisation puis sur la mobilité. Ce peu d'application en matière de comportements de déplacements peut s'expliquer par la relative absence de données de panels.

Cependant l'accumulation d'enquêtes menées selon le même standard sur les mêmes terrains (enquêtes-ménages en province, EGT en région parisienne, recensements en ce qui concerne le domicile-travail) permet d'envisager l'application des méthodes de pseudo-panels (Gardes). Alors que les panels consistent à travailler sur des enquêtes successives ou continues auprès des mêmes personnes, les pseudo-panels reposent sur des enquêtes successives semblables, mais avec des enquêtés différents, réputés cependant semblables car sélectionnés sur les mêmes critères.

Dans la modélisation traditionnelle à étapes (le plus souvent au nombre de quatre, génération, distribution spatiale, choix modal et affectation sur les réseaux), des rétroactions existent théoriquement mais sont souvent ignorées à cause de la lourdeur des calculs et de la complexité que cela entraîne (Stopher et al, 1996). Or la prise en compte de la multiplicité de ces rétroactions est nécessaire si l'on veut modéliser correctement l'évolution du système de déplacements urbains.

En outre, les relations entre variables sont souvent non linéaires ou du moins leur linéarité ne devrait pas être imposée par des nécessités de simplification analytique. A ce titre la simulation peut être une alternative aux limites de la résolution analytique.

Ces considérations - interaction entre boucles de rétroaction, complexité des mécanismes de réaction, délais dans ces réactions, non linéarité entre variables - militent pour l'utilisation d'outils de simulation de la dynamique des systèmes.

La modélisation de dynamique des systèmes urbains a connu un engouement il y a plus de 20 ans avec les travaux de Forrester. Elle a été largement utilisée en transports, surtout dans des contextes agrégés de long terme, pour des scénarios économiques de cadrage de la prévision des déplacements ou la modélisation de l'interaction entre transport et usage des sols (pour un survey voir Abbas et Bell, 1994). Elle a toutefois du mal à trouver sa place à côté de la démarche économétrique classique, qui produit des résultats statistiques détaillés et a pour elle de disposer de méthodes statistiques éprouvées et surtout des critères de validation associés.

Or la nécessaire articulation des évolutions comportementales, des transformations des localisations des activités et de l'espace urbain, des tendances socio-démographiques et de l'offre de transport, pousse à une complexification croissante des modèles existants. La maîtrise de cette complexité semble de plus en plus difficile. La sensibilité des résultats aux multiples paramètres d'un système de modèles à 4 étapes, à la spécification de chacun des modèles, et aux mécanismes de rétroaction, semble quasi impossible à explorer systématiquement, mais seulement par une série de tests empiriques (cf. par exemple Raux, 1998). L'approche de dynamique de systèmes (et notamment les logiciels qui la mettent en

œuvre, comme Vensim ou Matlab/Simulink) permet de mettre en œuvre rapidement des tests sur la structure des modèles pour répondre aux questions du type « si le modèle prédictif est spécifié ainsi, comment évoluent les prévisions au cours du temps ? ».

Plus récemment l'approche de dynamique des systèmes a été de nouveau mise en œuvre dans plusieurs projets de modélisation en France ou à l'étranger.

A l'étranger, la principale application est le projet ASTRA (*Assessment of Transport Strategies*) financé par la DG VII, dans le cadre du 4^{ème} PCRD sur la période 1998-2000. Le projet ASTRA était dirigé par l'équipe de W. Rothengatter (IWW) à Karlsruhe. Pour l'essentiel le projet consistait à relier des modèles conventionnels de macro-économie, d'environnement, d'économie régionale et de transports (modèles à 4 étapes, passagers et marchandises) au sein d'une plate-forme de dynamique des systèmes. L'équilibre étant réalisé de manière conventionnelle au sein de chacun des sous-modèles, la dynamique d'ensemble s'opère à travers les liaisons entre ces sous-modèles. Il nous semble quelque peu contradictoire de postuler un équilibre au sein de chacun des sous-systèmes et d'admettre un fonctionnement dynamique dans les liaisons entre sous-systèmes. Comme nous le verrons, notre ambition est de concevoir des modèles complètement dynamiques quitte à remettre en cause les architectures conventionnelles comme le modèle à 4 étapes.

Pour ce qui est de la France nous avons déjà évoqué les modèles Simtrans appliqué au transport de marchandises (Karsky, Salini, 1999) et Mobisim (ATN, 2002).

Citons également comme autres sources, les travaux de Goodwin (1984, 1992) sur l'inertie des comportements ainsi que l'analyse systémique développée par Marc Wiel (1999).

Enfin, plusieurs modèles se situant à la rencontre de la modélisation stratégique et de la dynamique du système de transport ont été développés au LET, notamment pour ce qui concerne les déplacements urbains :

- le modèle QuinQuin (1985-1992),
- le modèle stratégique développé à Lyon (1996-1997) conjointement avec la SEMALY puis « exporté » à Grenoble et Bordeaux,
- une recherche sur la modélisation des contraintes de stationnement (1999-2000).

La série des modèles stratégiques de simulation du besoin de financement des transports publics, dénommés QuinQuin, développés par Bonnafous (1985), Bouf (1985, 1989) et Tabourin (1988, 1989) formalise le jeu combiné de : (a) la croissance des revenus et ses conséquences sur la motorisation et les déplacements en voiture particulière, (b) l'attractivité relative de clientèle entre voiture particulière et transports collectifs. Cette compétition se joue dans une situation de concurrence pour la voirie où les transports collectifs de surface souffrent de la congestion. Appliqué sur Lyon, le modèle QuinQuin permet de tester diverses politiques de gestion des réseaux de transport et de voirie ainsi que de la demande (Raux et Tabourin, 1992).

Le modèle stratégique de déplacements urbains développé conjointement par la SEMALY et le LET sur l'agglomération lyonnaise (Semaly et Let, 1997) vise à simuler à l'échelle d'une agglomération les conséquences de politiques variées de transports, dans des contextes contrastés et non maîtrisés de développement urbain, économique et socio-démographique. A la différence de la vision agrégée de QuinQuin, ce modèle stratégique repose sur une structure conventionnelle à 4 étapes et un découpage spatial de l'agglomération. Il intègre néanmoins des rétroactions explicites et un cheminement pas-à-pas. La recherche de régularités de comportements à l'échelle de la dizaine d'années s'est faite sur la base de l'analyse des trois enquêtes ménages réalisées à Lyon en 1976-77, 1985-86 et 1994-95 (Raux et al, 1997).

L'analyse de la sensibilité du modèle stratégique lyonnais à diverses valeurs de paramètres d'entrée et spécifications des sous-modèles (Raux, 1998) a montré la nécessité

1. d'explorer des mécanismes séquentiels de décision différents de ceux actuellement appliqués (étapes de distribution spatiale et de choix modal),
2. de reprendre plus généralement les modèles de distribution et de partage modal sous forme différentielle, où les valeurs à l'année n sont estimées en fonction des valeurs des années précédentes et des variations d'offre et de demande au cours du temps : cela afin d'être mieux en cohérence avec l'approche pas-à-pas et afin de surmonter la difficulté de prédire correctement les flux de zone à zone ou les parts modales à partir des seules caractéristiques d'offre et de demande explicitement spécifiées, sans tenir compte de l'histoire du système.

Enfin une recherche récente sur la modélisation des contraintes de stationnement (SEMALY, LET, 2000) s'attache à décrire les relations complexes de cause à effet qui régissent ces phénomènes liés au stationnement. Ces relations ont été traduites dans une maquette de modèle afin de donner un exemple de module stationnement pouvant s'insérer dans un modèle global de politique de déplacements. Toutefois la complexité des rétroactions identifiées plaide pour une approche de dynamique des systèmes, qui n'a pu être qu'esquissée dans le cadre de cette recherche.

3. Méthodologie

Ce projet de recherche consiste donc à développer une plate-forme de simulation des déplacements urbains, en dépassant une opposition stérile entre approche économétrique quantitative détaillée et approche qualitative de dynamique des systèmes. Il vise à construire des systèmes de modèles intégrant à la fois les techniques de simulation issues de l'approche de dynamique de systèmes et les différentes « briques » élémentaires de modèles économétriques (socio-démographiques, motorisation, mobilité, localisations d'activités, choix modal, etc.).

Cette démarche suppose de mener en parallèle l'organisation conceptuelle des différents mécanismes de rétroaction, l'élaboration et le calage de briques de modèles ainsi que leur intégration dans l'architecture du système. En bref il s'agit de mettre des équations économétriques dans les boucles de rétroaction, et d'éviter partout là où cela est possible des approches purement qualitatives.

Le terrain privilégié est celui de l'agglomération lyonnaise, compte-tenu de la facilité d'accès aux données et des connaissances accumulées par l'équipe sur ce terrain. Les données relatives aux déplacements sont assez riches, 3 enquêtes-ménages (1976, 1986, 1995), les recensements et les enquêtes cordons.

Le champ spatial est celui de l'agglomération, l'horizon temporel est le moyen terme (10 ans et plus).

Cependant, étant donné l'horizon du modèle et son niveau d'agrégation, l'offre routière et de transports collectifs sera représentée sous forme d'une offre globale de zone à zone, comme dans le modèle stratégique de Lyon. Par contre les interactions temporelles entre offre et demande seront considérées (effets d'étalement de la pointe, cf. par exemple Berthier, 1998).

La construction du système de modèles vise à croiser les effets

- de contexte socio-économique (croissance des revenus),
- socio-démographiques (vieillesse, étapes dans le cycle de vie),
- de localisation interne à l'agglomération,
- d'offre de transport distinguée selon les différentes liaisons.

L'architecture du système de modèles est elle-même objet de la recherche.

C'est pourquoi la démarche a été décomposée en trois grandes phases.

La première phase consiste à élaborer une architecture conceptuelle des différents sous-systèmes élémentaires qui correspondront à autant de modèles. Cette étape est évidemment nécessaire pour permettre de bien séparer les sous-systèmes et faciliter ensuite leur modélisation isolée : bien entendu, avec cette architecture, on spécifie également les liens qu'entretiennent entre eux ces différents sous-systèmes, autrement dit les liens de causalité et rétroactions. Cette phase consiste pour l'essentiel en une description verbale du système.

La deuxième phase consiste à construire les différentes briques de modèles. Comme on le verra, nous avons eu à développer de nouveaux modèles, les modèles existants se révélant inadaptés à l'approche dynamique du problème. Pour chacun de ces modèles des exercices de simulation ont été menés afin de les valider de manière interne.

Enfin, la troisième phase consiste à intégrer progressivement ces briques de modèles. Cette opération de bouclage peut nécessiter des retours sur l'architecture. Là encore, des exercices de simulation sous différentes hypothèses du contexte exogène permettent de valider ces intégrations.

Comme on le verra, cette démarche n'a pu être menée dans son intégralité, puisque seules quelques briques ont été construites, quelques bouclages menés à terme. A l'évidence, nous avons sous-estimé les difficultés de la tâche.

Le plan du rapport suit donc le déroulement de cette méthode. Nous présentons d'abord l'architecture conceptuelle, puis une à une les briques qui ont été développées et les bouclages qui ont été opérés. Cependant il nous faut auparavant expliquer et justifier le choix du logiciel de simulation Vensim.

Choix du logiciel

A l'origine nous pensions utiliser Scilab, logiciel libre développé par l'INRIA, compatible avec Matlab, et qui dispose d'un module Scicos de dynamique des systèmes. Auparavant nous avons déjà commencé à travailler avec Vensim, logiciel commercial spécialisé développé par une société américaine.

Scilab a l'avantage de la flexibilité totale d'utilisation puisqu'il s'agit d'un environnement de calcul scientifique dialoguant essentiellement par ligne de commande. Les autres avantages sont que la manipulation des vecteurs est assez aisée et qu'il existe depuis peu une boîte à outils transport (modèles d'affectation). La contrepartie est que l'interface graphique sous Scicos nous a semblé particulièrement difficile à utiliser. Nous n'avons pas pu (ou su) mettre au point un mode de paramétrage aisé des entrées ou sorties des simulations, ni mettre en œuvre un mode exécutable.

A l'opposé Vensim offre une interface graphique particulièrement conviviale. Il nous a paru beaucoup plus facile de modifier de manière interactive les paramètres ou équations du modèle et de lancer immédiatement une simulation. Il est possible d'alléger la représentation graphique du modèle au moyen de plusieurs vues séparées. La création d'une version exécutable du modèle, ne nécessitant pas Vensim, est également possible. L'inconvénient majeur réside dans la manipulation des vecteurs qui est possible mais pas de manière aussi élégante que dans un environnement de calcul scientifique comme Scilab. En outre, l'interfaçage avec des programmes externes (exemples de routines C) est assez ardu à mettre en place.

Nous avons donc finalement choisi Vensim pour sa facilité d'utilisation dans la phase de mise au point des modèles sous forme de prototypes. Cela n'exclut pas de revenir ensuite à Scilab dans une étape éventuelle de production d'un logiciel mais cela nécessiterait une assistance des développeurs de l'INRIA.

4. L'architecture globale

Nous présentons les frontières du système et son architecture d'ensemble. Puis nous développons les deux blocs conceptuels de l'offre de transport et de la demande sur lesquels portera l'essentiel des efforts.

4.1. Les frontières du système

Nous considérons comme exogènes au système :

- La croissance économique qui s'applique à l'agglomération : pour le moment on ne considère pas de rétroaction à long terme de la performance du transport sur la performance économique de l'agglomération comme dans le modèle Astra¹.
- L'évolution démographique générale de la population.
- Les migrations externes de population (immigration, émigration) de l'agglomération².

Par contre les localisations internes à l'agglomération sont considérées comme endogènes.

4.2. Architecture d'ensemble

L'architecture d'ensemble repose sur différents blocs liés entre eux par des *relations d'influence* (cf. Figure 1).

¹ On peut aussi envisager de séparer les revenus disponibles (régulation nationale) et le niveau d'emploi (qui lui dépendrait de la vitalité de l'agglomération), le produit des deux donnant la richesse globale et l'intensité du transport.

² Bien que probablement dépendantes de l'attractivité de l'agglomération.

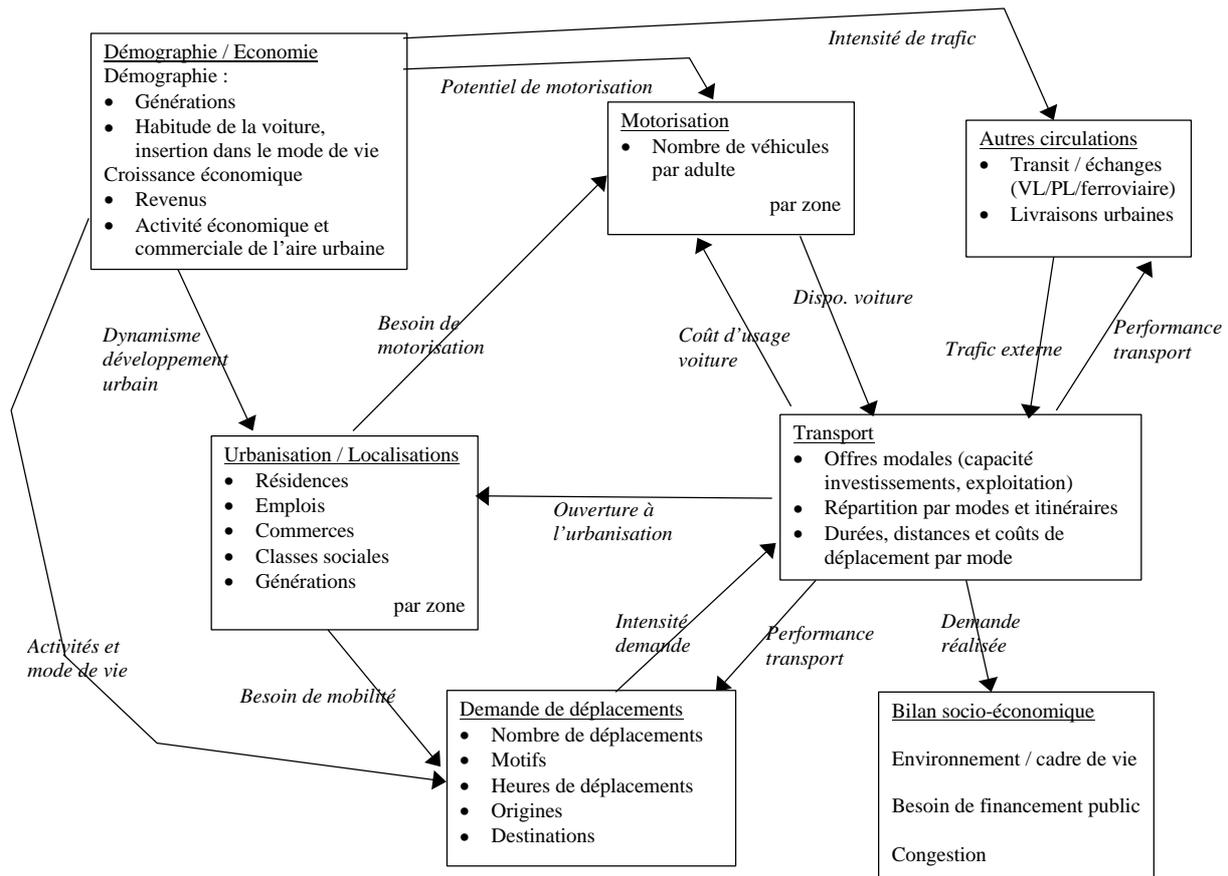


Figure 1 : Architecture d'ensemble

Démographie / Croissance économique :

C'est le seul ensemble de variables exogènes. Il recouvre les effets liés à l'évolution démographique (transitions entre générations, migrations), l'évolution des modes de vie (types d'activités), l'insertion de la voiture dans ces modes de vie, ainsi que la croissance économique et ses conséquences sur les revenus des ménages et l'activité économique et commerciale de l'aire urbaine.

Motorisation :

Il s'agit de l'équipement en voitures, rattaché aux *individus* (afin de faire le lien avec la demande de déplacements). Cette motorisation résulte de trois effets :

- un effet *potentiel de motorisation* (provenant du bloc Démographie / Economie) découlant de l'évolution des générations et des revenus disponibles ;
- un effet *besoin de motorisation* (Urbanisation / Localisations) découlant des localisations résidentielles, plus ou moins éloignées des autres lieux d'activités et amenant un besoin d'équipement en voiture particulière si les offres alternatives ne sont pas concurrentielles,
- et un effet *coût d'usage de la voiture* (Transport) qui rend compte de l'attractivité de ce mode (selon les liaisons pratiquées) et peut accélérer ou freiner l'équipement en voiture particulière.

Urbanisation / Localisations :

Cet ensemble regroupe les localisations par zone des résidences(avec une spéciation par générations et classes sociales), ainsi que des emplois et des commerces.

Il est influencé par le *dynamisme du développement urbain* (provenant du bloc Démographie / Economie) découlant de la croissance économique et démographique, qui va accélérer ou freiner l'urbanisation, le renouvellement des logements, les mutations résidentielles, le développement des zones d'activités économiques et commerciales.

Il est également influencé par l'*ouverture à l'urbanisation* (Transport) du fait de l'offre de transport améliorée ou non : cette dernière influe sur l'attractivité des différentes zones.

Demande de déplacements :

Cette demande s'exprime en termes de types d'activités à réaliser, de nombres de déplacements, de leurs heures de réalisation et de leurs origines et destinations. Elle résulte de trois effets :

- l'effet *activités et modes de vie* (types d'activités souhaitées ou induites, ex. travail /loisirs et leur rythmes temporels, bloc Démographie / Economie),
- l'effet *besoin de mobilité* résultant des localisations de ces activités (Urbanisation / Localisations),
- et l'effet *performance du transport* (Transport) qui modifie l'expression de cette demande en termes de nombre de déplacements, leurs heures, etc.

Autres circulations :

Cet ensemble comprend les trafics venant de l'extérieur de l'agglomération (transit et échange), routiers (VL et PL) et ferroviaires, et entrant en conflit avec les déplacements locaux sur les réseaux de voirie et ferré de l'agglomération. Il comprend également les livraisons urbaines de marchandises.

Les niveaux de ces trafics sont considérés comme exogènes car dépendant de la conjoncture économique (*intensité de trafic*). Seules les heures de réalisation de ces circulations et leur affectation sur les réseaux vont dépendre des conditions locales de trafic.

Transport

On y trouve les offres des différents modes (prix, temps), les coûts de leur production (investissement, exploitation), les répartitions de la demande entre les modes et sur les réseaux, ainsi que les conditions de déplacements qui en découlent (durées, distances et coûts d'usage des modes). Cet ensemble reçoit comme input

- *l'intensité de la demande* de déplacements,
- la *disponibilité en voitures* qui permet aux individus d'« auto-produire » leur propre mobilité, et
- le *trafic externe* qui entre en concurrence avec les déplacements locaux pour l'occupation des réseaux de voirie et ferrés..

4.2.1 Bilan socio-économique

Cet ensemble est un output du système et comprend les éléments du bilan socio-économique servant au diagnostic du caractère durable du système de déplacements urbains. Ces éléments sont relatifs à l'environnement, au besoin de financement public et à la congestion, et pourront être évalués en termes de mesures de surplus.

Environnement / cadre de vie : il regroupe les impacts sur l'environnement (pollution, bruit, accidents, effets de coupure des infrastructures, effet de serre) découlant de l'existence des infrastructures de transport et de la *demande réalisée* sur les réseaux de transport.

Besoin de financement public : il s'agit du financement requis pour l'investissement et l'exploitation des réseaux et services de transports (publics et privés).

Congestion : c'est la performance du transport mesurée en temps passé en déplacements et en coût de ces déplacements pour les usagers. De ces résultats pourront être déduites des mesures de l'équité des politiques mises en œuvre pour différents groupes sociaux ou zones de l'agglomération.

4.3. Le bloc Transport

Après une vue d'ensemble de ce bloc « Transport » nous en détaillons les aspects par mode, à savoir la route et la voiture particulière d'une part, les transports collectifs d'autre part.

4.3.1 Vue d'ensemble

Le bloc transport confronte une *offre* déclinée selon différents modes de transport et une demande issue du bloc Demande de déplacements. En fonction de l'offre la demande sera *répartie entre les modes et sur les réseaux*. Il en découle des *durées et des coûts de déplacements* qui viennent rétroagir sur la *performance* des modes et donc, d'une part sur leurs conditions d'offre, d'autre part sur la demande de déplacements.

L'offre modale est distinguée selon trois principaux modes, modes de proximité (MP, marche à pied et vélo), transports collectifs (TC) et voiture particulière (VP) (cf. Figure 2).

L'offre en voiture particulière comprend trois composantes :

- Une composante d'offre de voirie déclinée en capacité offerte (fonction des investissements et de l'entretien, ainsi que du partage de voirie), tarification d'usage (péages) et vitesse effective (fonction de la capacité, des flux, de la réglementation sur les vitesses et son application effective).
- Une composante de prix et fiscalité liés à l'usage des véhicules en général, à travers les prix d'achats et d'entretien des véhicules (la réglementation sur les véhicules influe sur ces coûts), les prix du carburant (marché du pétrole et raffineurs) et la fiscalité du carburant (gouvernement).
- Une composante liée au stationnement visant le véhicule immobile, à travers le stock de places offertes, les prix, ainsi que le contrôle et la répression du stationnement illicite.

L'offre en transports collectifs comprend deux composantes :

- Une composante d'offre déclinée en capacité de transport, fréquences et vitesses (fonction de la charge sur le réseau de voirie pour les véhicules de transports collectifs non protégés et du partage de voirie).
- Une composante tarifaire.

L'offre en modes de proximité se caractérise essentiellement en termes de sécurité des déplacements (protection par rapport aux modes motorisés) et du confort de déplacement lié aux aménagements des pistes cyclables ou des trottoirs.

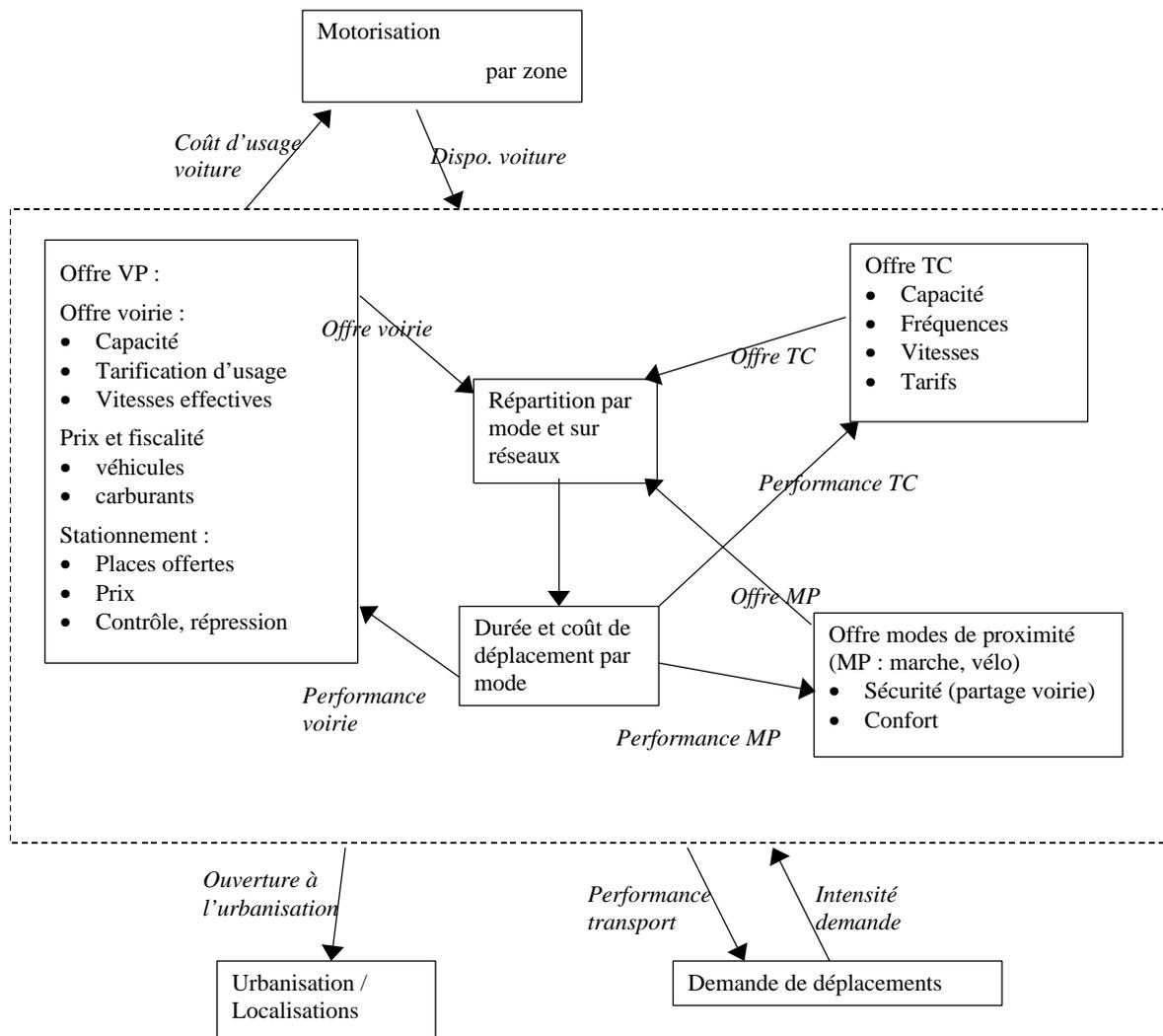


Figure 2 : Le bloc Transport

4.3.2 Route et voiture particulière

Nous détaillons ci-après le modèle verbal et l'architecture, en distinguant les aspects « durée de déplacement » et les aspects « coûts monétaires ». Les aspects liés au stationnement ne sont pas détaillés pour le moment, bien qu'ils soient fondamentaux, comme nous le verrons, dans le choix modal.

4.3.2.1 Les aspects « durée de déplacement »

Une augmentation de la congestion (découlant de l'augmentation de la charge de véhicules sur la voirie, à capacité donnée) fait diminuer la vitesse générale et donc augmenter les temps de déplacements : elle réduit l'attractivité de la voiture particulière (cf. Figure 3).

L'augmentation de capacité de la voirie routière, toutes choses égales par ailleurs, réduit, par l'augmentation de la vitesse générale et le gain de temps qu'elle apporte, le coût généralisé d'usage de la voiture particulière. Elle en augmente l'attrait.

L'attractivité de la voiture particulière est fonction du coût généralisé d'usage de ce mode, combinant coûts monétaires et durée des déplacements. Plus cette attractivité est forte, plus elle incite à l'usage et à l'équipement en voiture particulière.

L'augmentation de capacité de la voirie routière augmente la taille des espaces à portée de déplacement dans un temps donné. Elle induit à terme (avec délai) une urbanisation de ces espaces, d'où d'une part une attractivité supplémentaire de la voiture particulière (car les transports collectifs sont inadaptés dans ces espaces) et un allongement des distances parcourues.

En résumé il apparaît trois sources parallèles de l'augmentation du volume de trafic en voiture particulière (véhicules-kilomètres parcourus) :

- le transfert modal vers la voiture particulière (depuis les autres modes dont les transports collectifs),
- l'augmentation ex nihilo du nombre de déplacements en voiture particulière,
- L'allongement des distances de déplacements.

In fine le nombre de déplacements de voitures particulières dépendra du taux d'occupation des véhicules.

La congestion croissante induit une pression sociale et politique à l'accroissement de capacité de voirie, lequel prend forme effectivement avec un certain délai. Cette pression dépend du degré d'acceptation de la congestion.

Dans la capacité de voirie totale, la capacité dévolue à la voiture particulière peut être modulée en fonction du degré de protection des transports collectifs routiers (partage de voirie, priorités aux feux).

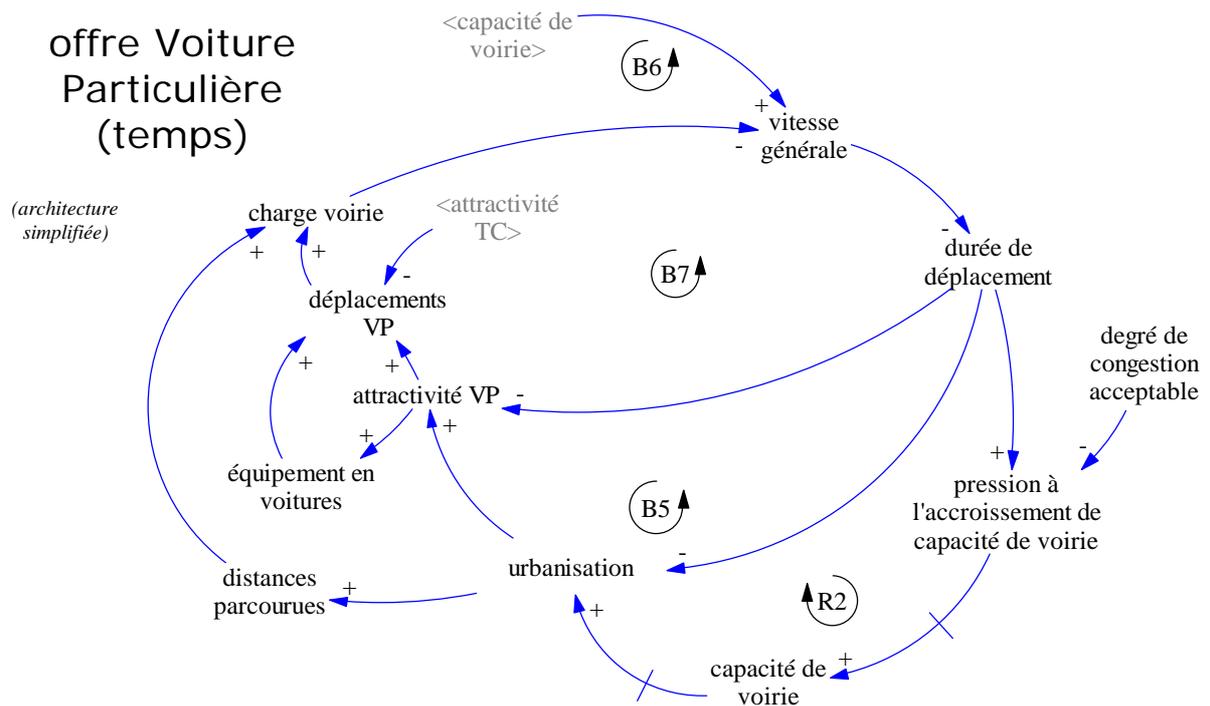


Figure 3 : Vue du module d'offre de circulation en voiture particulière (aspect temps)³

Boucle R2 : toujours plus loin en voiture

C'est la boucle de l'étalement urbain. L'augmentation de la capacité de voirie permet d'aller plus vite donc plus loin, et ouvre de nouveaux espaces à l'urbanisation : la population et les emplois s'y installent (avec retard). Cela renforce l'attractivité de la voiture donc l'intérêt de s'équiper en voitures, d'où les circulations supplémentaires. D'où la baisse de vitesse, la pression à l'accroissement de capacité et sa réalisation effective...

Boucle B5 : la congestion comme frein à l'étalement urbain

L'ouverture de nouveaux espaces à l'urbanisation provoque une hausse de la motorisation et des circulations automobiles car les transports collectifs y sont peu pertinents. Cela provoque une montée de la congestion qui ralentit la propension à aller toujours plus loin.

Boucle B6 : l'accroissement de capacité comme solution à la congestion

La pression à l'accroissement de capacité et sa réalisation effective entraînent une augmentation des vitesses, une baisse de la congestion, donc une baisse de cette pression.

Boucle B7 : la régulation par la congestion

L'augmentation de la vitesse attire de nouveaux déplacements en voiture particulière, d'où une augmentation de la charge de la voirie, d'où une baisse de la vitesse.

³ les flèches indiquent l'influence d'une variable sur une autre avec un signe + pour une variation allant dans le même sens, - sinon.

Interface :

Avec le module des transports collectifs :

- par l'attractivité TC qui influence le niveau des déplacements VP.
- par le degré de protection de la vitesse TC qui influence la capacité de voirie disponible VP.

Avec le module urbanisation : l'augmentation de capacité de voirie accroît la « zone de chalandise » de la voiture et pousse (avec retard bien sûr) à l'urbanisation de nouveaux espaces.

Avec le bloc de demande : demande globale de déplacements.

Inputs principaux :

Ce sont la vitesse à vide, la courbe vitesse-débit, le taux d'occupation des voitures particulières, et le degré de congestion acceptable.

4.3.2.2 *Les aspects « coûts monétaires »*

Une tarification d'usage de la voirie routière (péages), toutes choses égales par ailleurs, augmente le coût d'usage de la voiture particulière.

Une hausse des prix d'achats des véhicules (coût fixe) réduit l'attractivité de la voiture particulière. Mais une baisse du rapport coût kilométrique d'usage / coût d'achat incite à une utilisation plus intensive.

L'évolution des cours du pétrole (marché mondial) de même que la fiscalité des carburants (décision gouvernementale) influent sur les coûts d'usage des véhicules.

Le prix du stationnement à destination influe également sur le coût du déplacement en voiture particulière.

offre Voiture Particulière (prix)

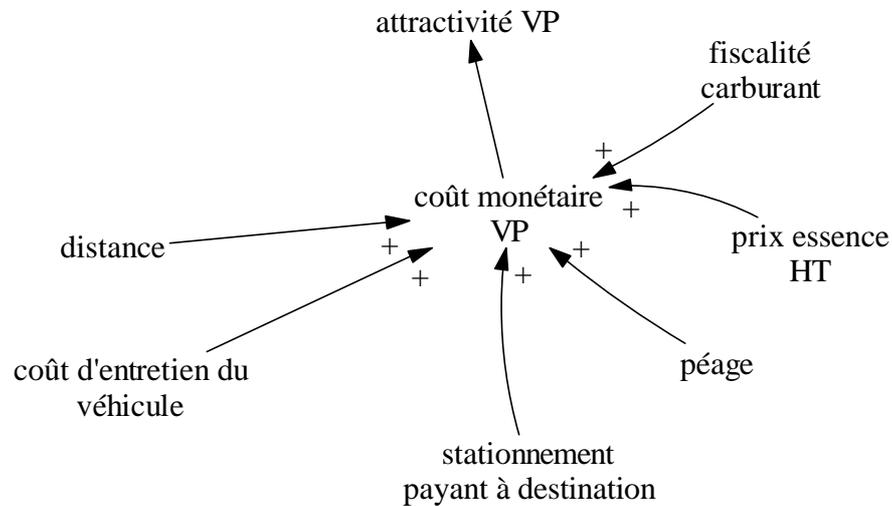


Figure 4 : Vue du module d'offre de circulation en voiture particulière (aspect prix)

Interface :

Vers le module voiture particulière par le coût du déplacement en voiture particulière.

Inputs principaux :

Coût d'achat du véhicule, coût d'entretien, stationnement payant à destination, péages, prix du carburant (HT), taxes sur le carburant.

4.3.3 Transports collectifs :

Attractivité

L'attractivité relative des transports collectifs dépend du temps de déplacement en transports collectifs et des tarifs. Ce temps global de déplacement sera décomposé ensuite en temps d'accès (densité des arrêts), temps d'attente (fréquence), temps de parcours (fonction de la vitesse commerciale des bus), temps d'interconnexion (fréquences et densité des arrêts).

La hausse ou la baisse de l'attractivité relative des transports collectifs provoque une hausse ou une baisse de leur clientèle (déplacements TC). Une hausse de la clientèle TC peut aussi faire baisser la vitesse commerciale (durées des montées et descentes).

Vitesse

Une augmentation de la congestion automobile (baisse de la vitesse générale) fait baisser la vitesse des bus.

A contrario, une amélioration de la protection du réseau (priorités aux feux, voies réservées, etc.) accroît la vitesse des bus.

Une baisse de la vitesse des bus provoque une augmentation des coûts d'exploitation (il faut plus de véhicules et de chauffeurs pour produire la même offre).

Accès et fréquences

Une augmentation des fréquences réduit la durée d'attente mais risque d'augmenter la congestion des véhicules de transports collectifs (notamment sur les voies réservées).

Une augmentation des points d'arrêt réduit la durée d'accès au réseau mais diminue la vitesse commerciale des bus.

Une augmentation des fréquences et des points d'arrêt réduit la durée de correspondance.

Aspects financiers

La hausse ou la baisse des tarifs fait augmenter ou diminuer les recettes.

La croissance économique fait accélérer ou ralentir le produit du versement-transport.

Les recettes (+), le versement-transport (+), les annuités de remboursement d'emprunts (-) et les coûts d'exploitation (-) se conjuguent pour faire varier le déficit.

La hausse du déficit induit une pression à la hausse des tarifs, à la baisse des coûts d'exploitation, à la baisse de l'offre, à la hausse du taux de versement-transport.

Seuls certains de ces mécanismes sont repris dans la Figure 5 ci-après, qui représente l'offre de transports collectifs. Cette architecture a été volontairement simplifiée pour ne retenir que les mécanismes internes à l'offre en transports collectifs jugés fondamentaux.

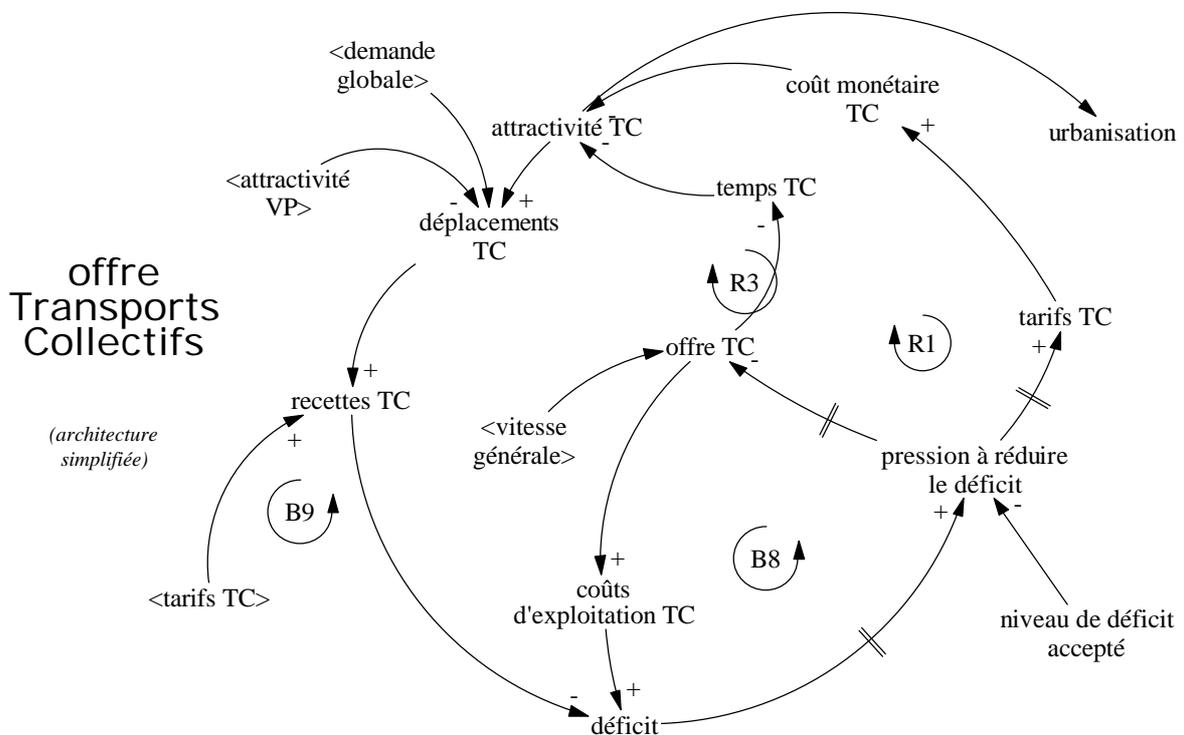


Figure 5 : Le modèle TC0 d'offre en transports collectifs (architecture simplifiée)

4.3.3.1 *Les principales boucles de rétroaction dans la sphère des transports collectifs*

Boucle B8 : la réduction des coûts d'exploitation

Une manière de réduire le déficit est de réduire les coûts d'exploitation en diminuant l'offre (services, arrêts).

Boucle B9 : la hausse des recettes

Une autre manière de réduire le déficit est d'augmenter les recettes en augmentant les tarifs.

Boucle R1 : l'autodégradation financière des TC

La baisse d'attractivité des TC provoque une baisse de clientèle, d'où une perte de recettes, donc une hausse du déficit d'exploitation. Pour contrebalancer cette hausse, deux types de réponse sont apportées, soit une hausse des tarifs, soit une diminution de l'offre à travers la baisse des fréquences ou la suppression des arrêts. Dans les deux cas cela réduit l'attractivité des TC donc fait baisser la clientèle.

Cependant, cette boucle peut aussi bien jouer dans le sens d'une auto-amélioration des TC : une hausse de la clientèle TC augmente les recettes, diminue le déficit, permet de contenir la hausse des tarifs et d'augmenter l'offre, d'où une amélioration de l'attractivité des TC et in fine une augmentation de clientèle. Tout dépend, d'une part du niveau de déficit accepté, d'autre part de la concurrence externe de la voiture particulière (cf. R3).

Boucle R3 : la congestion dégrade l'offre des TC

L'augmentation de la circulation fait baisser la vitesse générale et dégrade plus fortement la vitesse des TC, d'où baisse de l'attractivité des TC et renforcement de celle de la VP. De ce fait la circulation automobile augmente.

Cette boucle ne joue que dans la mesure où les TC sont insuffisamment protégés de la circulation générale : le mode ferré lourd (métro, RER) ne subit pas cette congestion. Cependant, le fonctionnement d'ensemble du réseau TC (chaînes de déplacements en TC) est dépendant du fonctionnement des TC de surface, ne bénéficiant en général que d'une protection limitée.

R1 et R3 sont différentes, R1 est un bouclage interne aux TC, R3 est un bouclage externe aux TC par la concurrence VP/TC par la vitesse.

4.3.3.2 *Interface*

Avec le module voiture particulière :

- par l'attractivité VP qui influence le niveau des déplacements TC.
- par la vitesse générale de la circulation qui influence la vitesse commerciale des TC.

Avec le module urbanisation : une nouvelle offre (par exemple ferroviaire à longue distance, ou plus locale sur des friches urbaines) peut, par le biais du coût généralisé TC, pousser (avec retard bien sûr) à l'urbanisation de nouveaux espaces ou à la densification des espaces urbains actuels.

Avec le modèle de demande : demande globale de déplacements.

4.3.3.3 Inputs principaux

Ce sont le niveau de déficit accepté et le rythme de la croissance économique.

4.4. Le bloc Demande

Nous privilégions comme unité d'analyse les déplacements plutôt que l'individu. En effet, ces déplacements sont marqués dans l'espace, dans lequel l'offre est typée également : cette dernière n'est pas la même au centre qu'en banlieue. C'est une manière de tenir compte du fait que les déplacements (besoin de mobilité) ne se font pas dans les mêmes conditions selon les lieux où on se trouve et où on désire aller, indépendamment des caractéristiques socio-économiques de ceux qui les réalisent. On explicite donc les situations de choix de mode, de destination, etc. sur les déplacements. Ces derniers sont typés par motif ce qui est une manière de réintroduire des caractéristiques socio-économiques.

En outre, ces caractéristiques socio-économiques peuvent être introduites zone par zone en termes de distribution de revenus (donc de valeurs du temps) ou d'équipement en voitures par exemple : le ratio nombre de voitures dans les ménages d'actifs / nombre d'actifs donne une indication des conditions de choix modal pour le domicile-travail. On peut ensuite avoir un stock de voitures disponibles (voitures possédées – voitures prises pour le travail) pour d'autres déplacements. Ces stocks peuvent varier dans le temps.

C'est une approche par *segments* de déplacements qui est privilégiée : chaque segment est défini comme un ensemble de déplacements ayant une origine-destination, une activité, un mode et une heure donnés. Les valeurs initiales sont celles observées par enquête ou extrapolées en année de base du modèle.

Les transitions entre segments se font ensuite par (cf. Figure 6)

- changement de mode, du fait d'un surplus entre le gain de temps et la différence de coût de déplacement (modèle prix-temps avec distribution des valeurs du temps) ; ce basculement entre modes suppose pour les déplacements concernés d'être en situation de choix (ex pour la voiture particulière, être équipé et avoir la disponibilité instantanée d'une voiture particulière) ; les coûts à considérer sont les coûts marginaux (ex celui d'un déplacement en voiture particulière quand on a acquis et entretenu celle-ci, coût marginal éventuellement nul pour un abonné en transports collectifs) ;
- changement d'heure, du fait d'un différentiel entre le coût du déshorage (arrivée en avance ou en retard) et la différence de coût de déplacement (modèle type prix-temps avec distribution des valeurs du coût du déshorage) ;
- changement de destination, du fait d'un différentiel entre le gain apporté par la nouvelle destination et la différence de coût de déplacement ;
- en outre, le segment peut s'accroître du fait d'une induction « pure » de mobilité en raison d'un différentiel croissant entre l'attractivité de l'activité et le coût du déplacement.

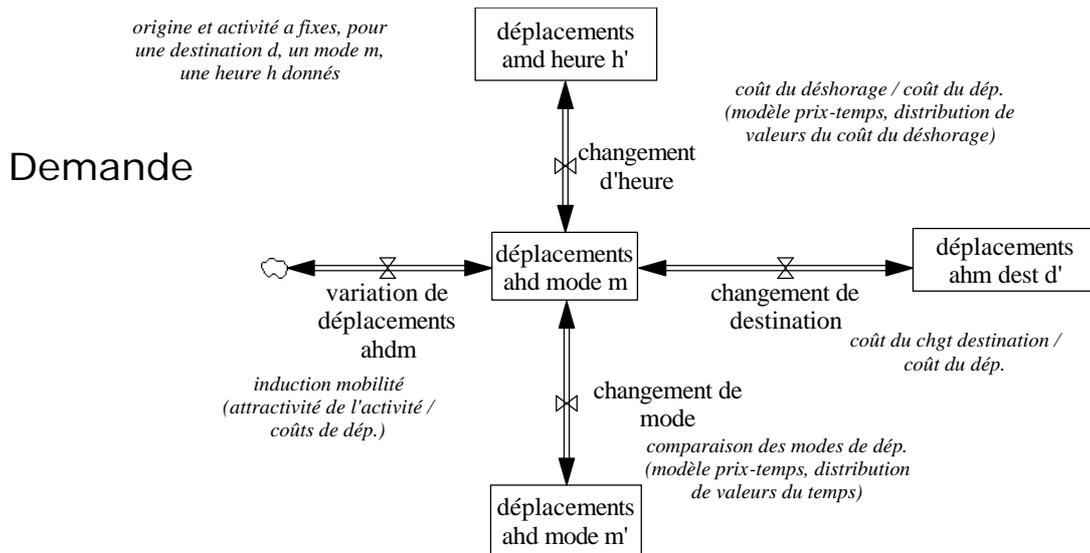


Figure 6 : Les mouvements entre segments de demande

L'induction est de deux types :

- une induction « pure » de mobilité (augmentation du nombre de déplacements),
- une induction de volume de trafic (en véhicules-kilomètres parcourus, provenant du changement de destination).

En résumé, le passage d'un segment à l'autre se fait sous l'effet de variations

- de population (population résidant à l'origine, motifs),
- de coût monétaire ou de durée des déplacements,
- d'attractivité des destinations pour l'activité en question.

Bien entendu les changements se font avec délai : par exemple la croissance des revenus induira après un certain délai une hausse de la motorisation (décision d'équipement des ménages) puis un basculement des transports collectifs sur la voiture particulière. De même une modification des conditions de concurrence (coût et vitesse) entre modes de transport demande du temps pour être prise en compte par les individus puis encore du temps pour se traduire en changements d'habitudes de déplacements.

4.5. Conclusion

Nous avons donc élaboré sur le plan conceptuel une architecture d'ensemble du système de déplacements urbains et ses interrelations avec les aspects socio-démographiques et le système de localisations. Pour le bloc « transport » nous avons détaillé les ensembles de rétroactions d'une part pour la voiture particulière, d'autre part pour les transports collectifs.

Nous avons notamment identifié un certain nombre de boucles de rétroaction qui sont, pour la voiture particulière

- la boucle R2 : toujours plus loin en voiture
- la boucle B5 : la congestion comme frein à l'étalement urbain
- la boucle B6 : l'accroissement de capacité comme solution à la congestion
- la boucle B7 : la régulation par la congestion

et pour les transports collectifs

- la boucle B8 : la réduction des coûts d'exploitation

- la boucle B9 : la hausse des recettes
- la boucle R1 : l'autodégradation financière des TC
- la boucle R3 : la congestion dégrade l'offre des TC.

Enfin, nous avons spécifié comment traiter l'évolution de la demande par segments de déplacements définis par une origine-destination, une activité, un mode et une heure donnés. Les transitions entre segments se font par des modèles de changement respectivement d'heure, de mode et de destination, à élaborer.

5. Le modèle de régulation de l'offre en transports collectifs

Nous partons du modèle d'offre 'TCO' reposant sur une architecture simplifiée et représentant les diverses boucles fondamentales du système de transports collectifs.

5.1. Hypothèses

Ce modèle est alors spécifié, dans un cadre hypothétique particulier qui va servir à le tester de manière autonome.

Le modèle est affranchi des contraintes de capacité du système routier : on suppose que les temps de parcours et les coûts monétaires de la voiture particulière sont constants ; autrement dit les mouvements de clientèle entre transports collectifs et voiture particulière n'ont pas d'impact sur la congestion routière. Cette hypothèse sera levée ultérieurement en activant le mécanisme de congestion en réponse aux variations de la demande de transport en voiture particulière.

On assimile l'attractivité au coût généralisé.

En outre, la demande totale, qui se répartit entre voiture particulière et transports collectifs, est supposée constante.

Enfin, on suppose que les auteurs de ces déplacements sont en situation de choix entre voiture particulière et transports collectifs, c'est-à-dire qu'une voiture particulière leur est disponible. Cette hypothèse pourra être ultérieurement modifiée en considérant différents univers de choix (ou de non-choix).

Le système représenté est celui pour une activité, une OD (origine-destination) et une période horaire données.

Ultérieurement le stock total de déplacements TC sera l'agrégation de différents stocks correspondant à différentes catégories de déplacements : pour une catégorie donnée la variation de déplacements TC est positive ou négative, mais le poids relatif du stock de la catégorie jouera, donc le résultat sur le stock total peut être très variable.

5.2. Structure et spécification du modèle

La structure du modèle est donnée en Figure 7, tandis que les équations sont données en annexe.

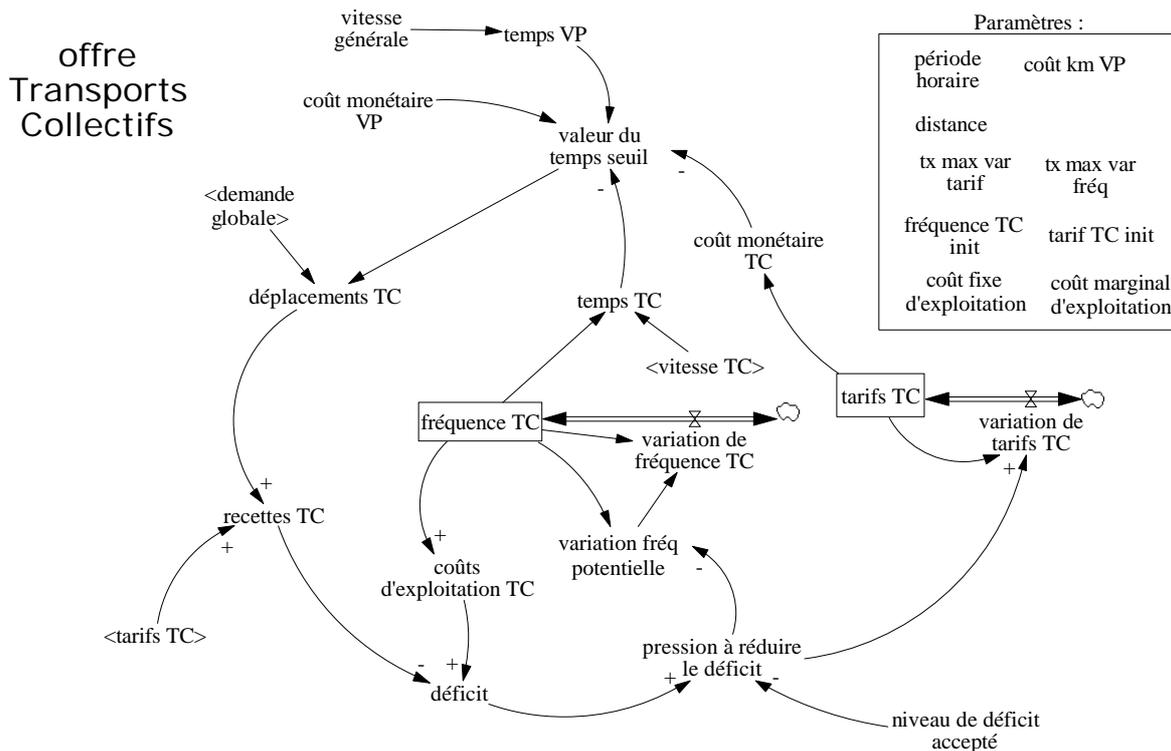


Figure 7 : Le modèle TC2

Dans ce modèle, la fréquence ne s'ajuste pas directement à la demande exprimée (les « déplacements TC ») mais subit l'influence de la pression à réduire le déficit. Ce sont donc à la fois les recettes (qui découlent de la demande exprimée) et le niveau de déficit accepté qui influent conjointement sur le niveau de l'offre TC (fréquence et tarif).

Le pas temporel du modèle est l'année, c'est-à-dire que le niveau de déficit agit sur la pression à réduire ce déficit, et donc les fréquences et les tarifs, à intervalle annuel.

En haut à droite sont regroupés un certain nombre de paramètres du modèle, constants dans le cadre de ce modèle particulier (une OD particulière, donc distance fixe) et qui servent aux calculs intermédiaires.

La « fréquence TC » est représentée par une variable d'état (stock) alimentée par la « variation de fréquence TC ». On considère que la fréquence TC de l'année n sera fonction de celle de l'année $n-1$ par variation en pourcentage de cette dernière. La « variation de fréquence potentielle » est une variable intermédiaire pour faire en sorte que la fréquence ne dépasse pas une borne physique (ici un véhicule à la minute maximum). Le temps de déplacement TC se déduit directement de la fréquence avec un temps de parcours constant (vitesse constante selon notre hypothèse de départ) et en supposant une arrivée aléatoire aux arrêts de bus (d'où un temps d'attente inverse de la fréquence).

Les « tarifs TC » sont également représentés par une variable d'état qui varie en fonction du niveau de l'année précédente.

La « pression à réduire le déficit » est modélisée comme une valeur qui croît linéairement selon l'écart relatif au « niveau de déficit accepté ». Cette pression est positive si le déficit est inférieur (supérieur en valeur absolue) au déficit accepté, négative sinon. Si la pression est positive, les fréquences baissent et les tarifs augmentent, et inversement si la pression est négative. Cette pression est bornée en valeur absolue à 1.

En outre, les variations de fréquences et de tarifs sont bornées (respectivement 10% et 5% par an). Le taux de variation effectif est le résultat de la multiplication du taux maximum et de la « pression à réduire le déficit ».

Le « déplacements TC » sont calculé à l'aide d'un modèle prix-temps déterministe et une distribution de valeurs du temps⁴. Pour le moment nous avons supposé une distribution de valeurs du temps uniforme, de 0 à 20€/par heure. La médiane se situe à 10€, pas très éloignée des valeurs du temps mesurées empiriquement (cf. TRACE, 1998).

Ici la variation de valeur du temps seuil permet de déterminer la part des déplacements qui changeront de mode.

5.3. Valeurs des paramètres

Pour tester le modèle, des valeurs aussi proches que possible de la réalité et surtout compatibles entre elles ont été retenues, certaines restant toutefois arbitraires. La compatibilité des données entre elles permet de démarrer la simulation sur une situation de quasi équilibre :

- coût km VP : 0,3 €
- vitesse générale : 25 km/h
- distance : 6 km (soit un temps VP de 14,4 mn)
- coût fixe d'exploitation TC : 200 €(frais de structure)
- coût marginal d'exploitation TC : 75 €(coût de sortie d'un bus supplémentaire)
- demande globale : 3000 déplacements
- fréquence TC init : 10 véhicules TC / h
- niveau de déficit accepté : -350 €
- tarif TC init : 1,2 €
- temps de parcours TC : 20 mn

5.4. Sensibilité au niveau de déficit accepté

La sensibilité du système au niveau de déficit accepté peut être évaluée avec l'aide de l'option SyntheSim et la fonction Show Behavior de Vensim qui montre en direct le comportement des différentes variables au cours du temps quand on fait varier un paramètre d'entrée.

On vérifie ainsi que pour un niveau de déficit accepté inférieur (supérieur en valeur absolue) au déficit d'équilibre pérenne, l'offre en transports collectifs (fréquences et tarifs) augmente jusqu'à atteindre ce niveau de déficit accepté.

Voici par exemple les principaux résultats pour un niveau de déficit accepté de -800 €(cf. Figure 8)⁵.

⁴ La justification et le détail du modèle prix-temps seront présentés en section 7 infra.

⁵ Le nombre de périodes (années) adopté pourra apparaître irréaliste : il n'a d'autre utilité que de tester le comportement du modèle quant à la stabilité des résultats sur la longue période.

La pression à réduire le déficit est initialement négative (puisque en valeur absolue le déficit accepté est supérieur au déficit initial).

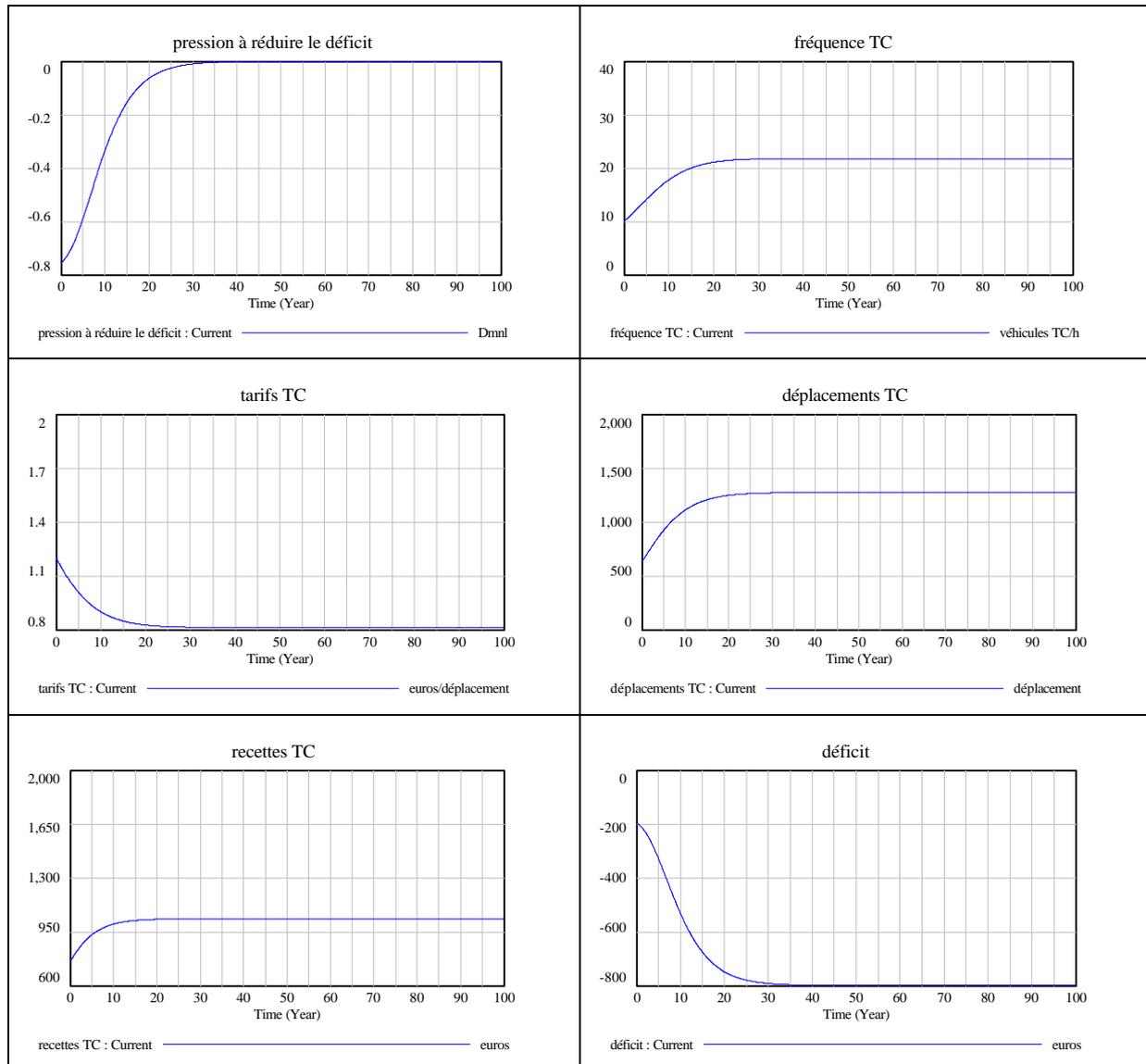


Figure 8

De ce fait la fréquence augmente et les tarifs diminuent, la demande en transports collectifs augmente, d'où les recettes, jusqu'à ce que le déficit atteigne la valeur acceptée. La pression à réduire le déficit de négative devient nulle et plus aucun ajustement ne s'effectue sur les fréquences et les tarifs.

Le temps de déplacement TC passe à 21 mn du fait de l'augmentation des fréquences des bus (plus de 21 véh/h), les tarifs à 0,80 € et, du fait de cette attractivité accrue des transports collectifs, le seuil de valeur du temps pour le basculement des transports collectifs à la voiture particulière passe à 8,59 € contre 4,18 € initialement.

A l'opposé, quand on fait décroître le niveau de déficit accepté, le système s'effondre. Il suffit d'établir ce niveau à -185 € pour voir les déplacements TC réduits à zéro au bout de cinquante cinq périodes (cf. Figure 9).

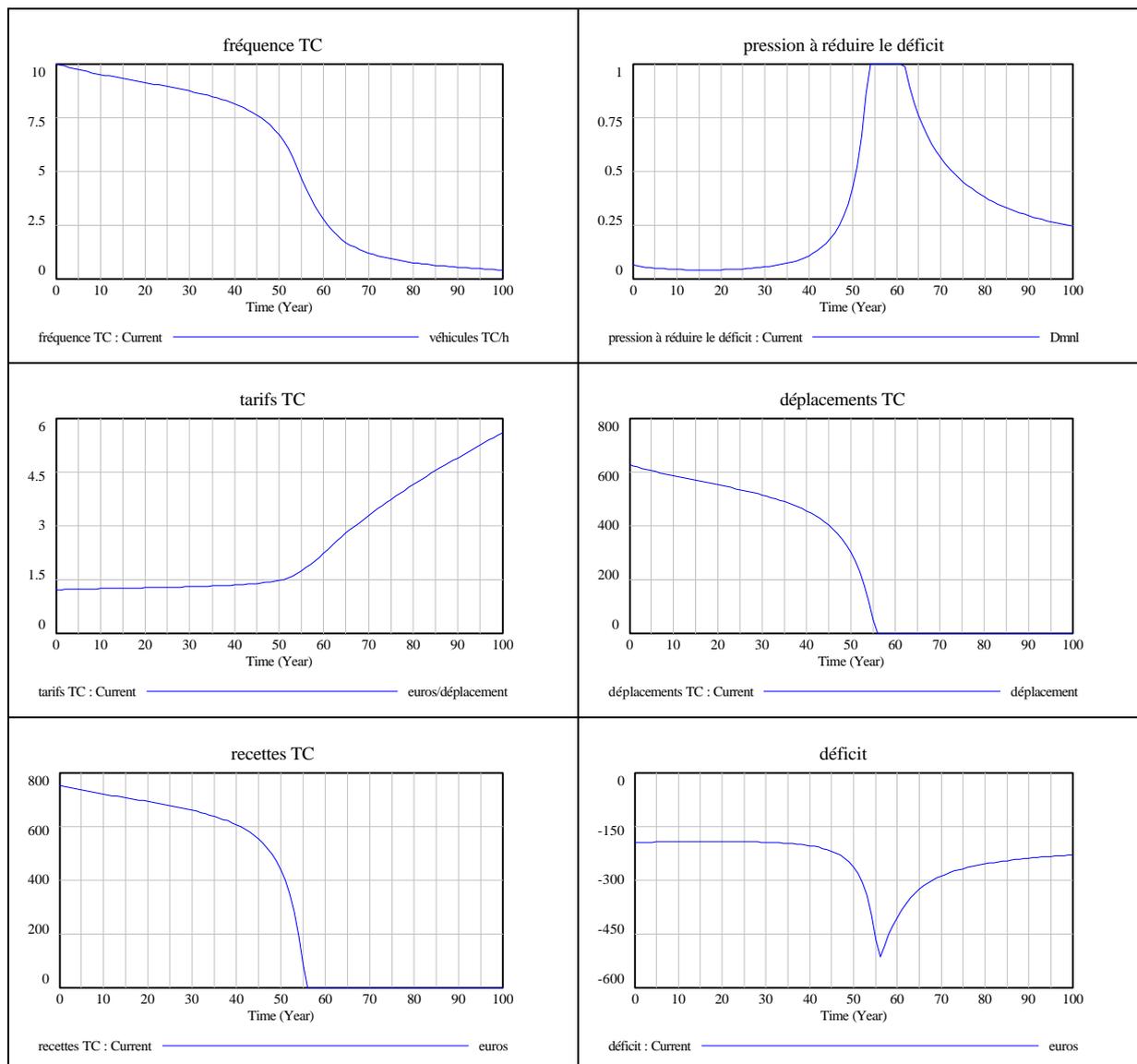


Figure 9

La pression à réduire le déficit est positive au départ, donc la fréquence baisse et le tarif augmente : de ce fait le déficit diminue (en valeur absolue) et par conséquent la pression à réduire le déficit diminue légèrement. Mais du fait de la dégradation de l'offre (fréquence et tarif) la demande de déplacements TC diminue, donc les recettes, d'où le déficit commence de nouveau à se creuser : la pression à réduire le déficit augmente donc (au bout de 15 périodes), l'offre se dégrade, la demande chute et le déficit plonge jusqu'à un maximum au bout de cinquante cinq périodes. A ce moment la pression à réduire le déficit atteint également son maximum, tandis que la demande devient nulle : tous les déplacements se sont reportés sur la voiture particulière avec un temps TC moyen de 27 mn (fréquence de 4,2 bus à l'heure), un tarif TC de 1,82 € et une valeur du temps seuil devenue négative : en effet, les TC sont plus chers et plus lents que la voiture particulière (coût VP de 1,8 € et temps VP de 14,4 mn).

Comme la pression à réduire le déficit est toujours positive, la fréquence diminue encore, réduisant les coûts d'exploitation. Comme les recettes sont nulles, cette réduction des fréquences et donc des coûts d'exploitation s'opère jusqu'à ce que le déficit se rapproche du niveau accepté. A la fin, 0,4 bus à l'heure tournent à vide ! Ceci parce que tout le monde a le

choix de passer sur la voiture particulière, ce qui n'est pas le cas dans un autre cadre d'hypothèse d'univers de choix.

Une simulation du modèle sur 500 périodes permet de vérifier que le système converge bien vers un état stable de déficit (cf. Figure 10) avec une fréquence de 0,4 bus à l'heure.

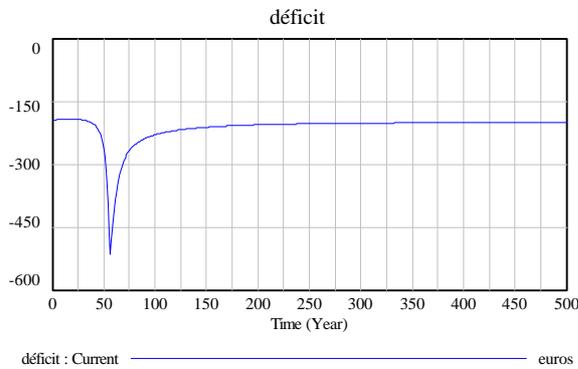


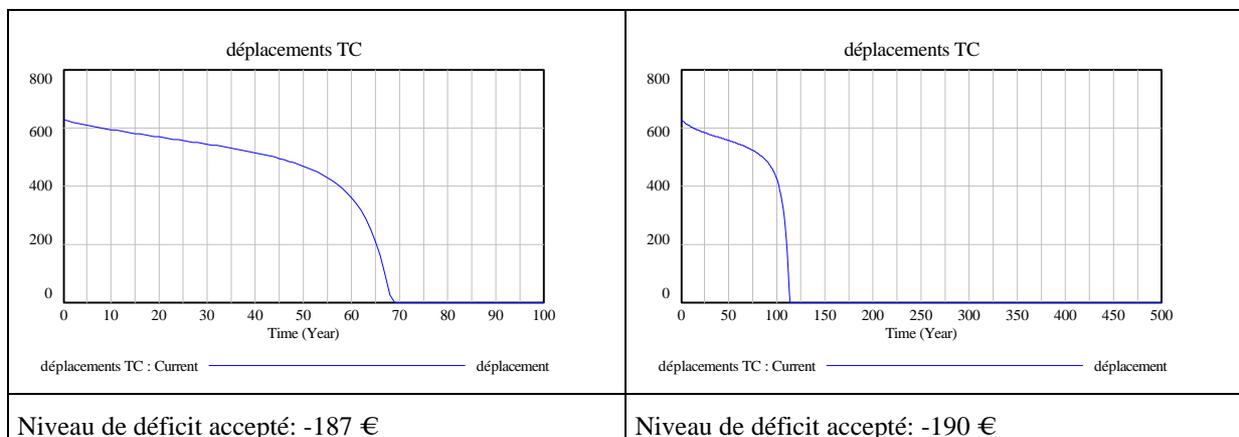
Figure 10

Quelle est la valeur du déficit accepté qui fait passer le système d'offre en transports collectifs d'une position stable et pérenne à l'effondrement ?

Pour répondre à cette question il faut faire varier le niveau de déficit accepté tout en poussant le temps final du modèle à des valeurs extrêmes pour détecter les évolutions à long terme de variations en apparence très faibles.

Avec une valeur de déficit accepté de -187€ l'effondrement se produit au bout de 68 périodes (cf. Figure 11). Avec une valeur de déficit accepté de -190 € cela se produit au bout de 113 périodes. Pour -192 € l'effondrement est à la 320^e période. Ce déficit de -192 € semble d'ailleurs être la valeur seuil de basculement, car à -193 € on ne décèle pas d'effondrement du système même au bout de 5000 périodes.

Cela montre que le système d'offre TC tel que modélisé s'effondre tôt ou tard quand le niveau de déficit accepté est inférieur au déficit d'équilibre pérenne (dont la valeur effective dépend des paramètres techniques et économiques retenus). Plus l'écart entre déficit accepté et déficit pérenne sera élevé, plus tôt interviendra l'effondrement.



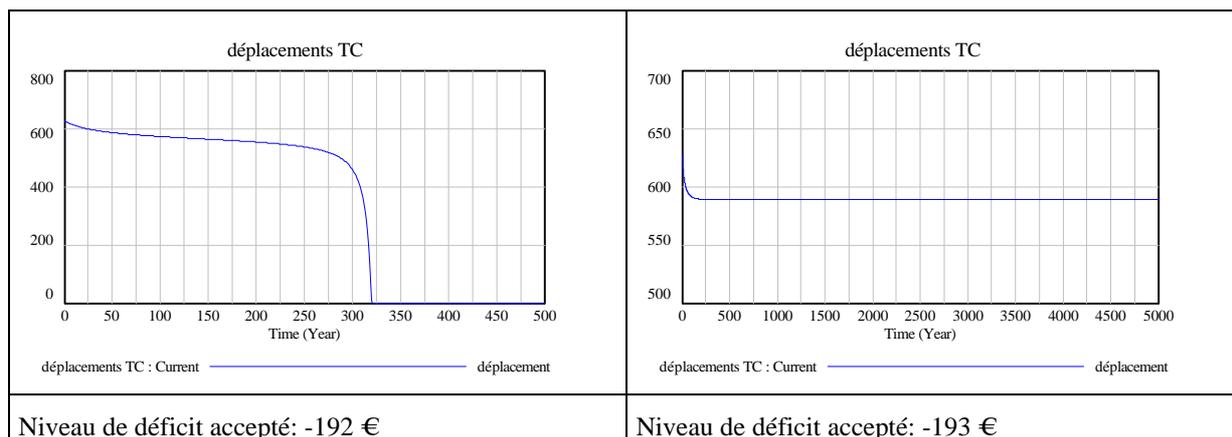


Figure 11

5.5. Conclusion

En résumé, ce modèle permet de simuler le mécanisme des boucles R1 (auto-dégradation financière des TC), B8 (réduction des coûts d'exploitation) et B9 (hausse des recettes). Il reste toutefois à considérer des valeurs de paramètres plus réalistes, calées sur les observations.

La suite des travaux consiste donc :

- à enrichir le modèle d'offre 'TC1' pour le rendre plus réaliste, par exemple en introduisant la densité d'arrêts, le taux de remplissage des véhicules, un modèle d'arrivée aux arrêts fonction des fréquences, en introduisant également un module de gestion de la dette qui a un impact sur la capacité de financement dans le cadre du niveau de déficit accepté ;
- à introduire l'interaction entre voiture particulière et transports collectifs par la congestion qui aura un impact à la fois sur la vitesse commerciale des véhicules de transports collectifs et la vitesse des véhicules particuliers ;
- à décliner selon des OD multiples ce modèle élaboré pour une liaison origine-destination (OD) donnée.

6. Le modèle conjoint d'affectation et d'heure de départ

Nous commençons par exposer la représentation de la congestion que nous avons adoptée afin de pouvoir restituer la dynamique de sa formation. Ensuite nous présentons brièvement le modèle d'affectation, dont l'algorithme de recherche des plus courts chemins est repris pour l'essentiel du modèle stratégique de Lyon, mais adapté ici au modèle de goulot. Enfin nous développons le modèle de choix d'heure de départ, intégrant les concepts de coût de retard et d'avance : des exemples de fonctionnement de ce modèle sont donnés.

6.1. Représentation de la congestion

Plusieurs problèmes sont posés par une courbe débit/vitesse classique dans le cadre de notre modèle :

- elle ne modélise pas ce qui se passe quand la charge excède la capacité, or le débit à l'équilibre n'excède pas le débit maximum du fait de la régulation via le choix de l'heure de départ (cf. pour une illustration, Berthier, 1998) ;
- ce type de courbe permet le calcul de la vitesse à partir de la quantité de véhicules en circulation, alors que la donnée dont nous disposons est la demande, c'est-à-dire le nombre de véhicules *voulant* entrer sur la route ;
- une courbe débit-vitesse statique donne le temps moyen de parcours d'un arc en fonction d'une occupation moyenne dans le temps, alors que l'on cherche à mieux représenter la dynamique de formation de la congestion.

La représentation de la capacité de voirie routière par un goulot nous semble donc particulièrement pertinente pour représenter la formation des files d'attente donc la génération des retards. Le modèle de goulot ou de file d'attente a été développé à l'origine par Vickrey (1969). L'analyse économique d'un modèle de goulot simple a été effectuée par Arnott et alii (1993).

Cependant, dans le cas qui nous préoccupe, nous avons affaire à un réseau de voirie, donc de goulots : la solution analytique de l'économie d'un tel réseau n'a pas été effectuée et semble ne pouvoir se faire que de manière empirique par simulation. C'est pourquoi nous partons d'un modèle de goulot simple décrit dans Small (1992), modèle qui sera étendu à l'ensemble du réseau.

Comme dans le modèle stratégique de Lyon, l'offre de voirie est représentée de manière agrégée sur la base d'un découpage en zones et d'un réseau d'arcs : un arc unique décrit la capacité de passage entre deux zones pour lesquelles il existe au moins une liaison routière directe, arc dont la capacité est la somme des capacités des voies routières reliant les deux zones.

Dans notre application, à la différence du modèle stratégique de Lyon, chaque arc (lien direct existant entre une zone i et une zone j) est donc considéré comme un goulot d'une capacité égale à la capacité de l'arc et dont le temps de passage libre est fonction de la longueur de l'arc.

6.1.1 Le modèle de formation de la queue sur un arc et une période horaire

Selon Small (1992, pp. 72 et suivantes) le modèle s'écrit :

$Va(t)$, la demande à passer sur l'arc à t (flot entrant)

$Vb(t)$, le flot sortant de l'arc

$N(t)$, le nombre de personnes dans la queue à t

$Td(t)$, temps passé dans la queue en y entrant à t

Vk la capacité du goulot.

Hypothèses :

- On considère un seul arc avec une capacité I
- Le premier entré sur l'arc est le premier sorti.
- Le flot sortant dépend de la congestion, il est donné par :

$$Vb(t) = \begin{cases} Va(t) & \text{si } Va(t) < Vk \text{ et } N(t) = 0 \\ Vk & \text{sinon} \end{cases}$$

La dynamique de la queue est donnée par l'équation différentielle :

$$\dot{N}(t) = Va(t) - Vb(t) .$$

Résolution :

Soit tq l'instant du début de la congestion et tq' celui de la fin de la congestion. On a :

$$N(t) = \int_{tq}^t [Va(u) - Vk] du , \quad \text{et}$$

$$N(tq') = \int_{tq}^{tq'} [Va(u) - Vk] du = 0 .$$

Le temps d'attente dans la queue pour quelqu'un entrant à t (et qui doit donc attendre que tous ceux avant lui soient passés) est alors donné par :

$$\forall t \in [tq, tq'] \quad Td(t) = \frac{N(t)}{Vk} = \int_{tq}^t \frac{Va(u) - Vk}{Vk} du .$$

Si la demande est une constante $Va(t) = Va > Vk$, alors :

$$\forall t \in [tq, tq'] \quad Td(t) = \frac{N(t)}{Vk} = \frac{Va - Vk}{Vk} (t - tq)$$

Il s'ensuit que pour une période de temps dt durant laquelle s'exprime une demande Va , le temps d'attente (délai) moyen est, en supposant le goulot vide avant la période dt ,

$$\bar{T}_D = 0 \quad \text{si } Va \leq V_K$$

$$\bar{T}_D = \frac{1}{2} \left(\frac{V_a}{V_K} - 1 \right) dt \quad \text{si } V_a > V_K$$

Le temps de parcours total = temps d'attente + temps de passage libre à travers le goulot.

S'il y a congestion, une file d'attente se formera, qui ne sera pas forcément résorbée à la période horaire suivante.

6.1.2 Extension du modèle en considérant plusieurs périodes horaires

Pour généraliser ce modèle à plusieurs périodes horaires (plusieurs groupes de véhicules partant à différentes heures de départ), on tient donc compte du fait qu'il subsiste ou non une congestion découlant de la période horaire précédente.

On fait maintenant l'hypothèse que la demande est une fonction constante par morceaux, c'est à dire que l'on peut discrétiser l'intervalle de temps en périodes horaires telles que :

$$\forall t \in [t_i, t_{i+1}] \quad Va(t) = Va_i.$$

On veut calculer pour chaque période horaire le temps moyen d'attente dans la queue

$$\bar{Td}_i = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} Td(t) dt.$$

Ce qui donne l'algorithme suivant.

S'il ne reste pas de congestion de la période horaire précédente. ($N(t_i) = 0$)

Deux cas se présentent :

- Si $Va_i \geq V_k$, le parcours sera congestionné pendant toute le période horaire donc :

$$\begin{aligned} Vb &= V_k \\ Td(t) &= \left(\frac{Va_i}{V_k} - 1 \right) (t - t_i) \\ \bar{Td}_i &= \frac{1}{2} \left(\frac{Va_i}{V_k} - 1 \right) (t_{i+1} - t_i) \end{aligned}$$

- Si $Va_i < V_k$, il n'y aura pas de congestion pendant la période horaire, donc :

$$\begin{aligned} Vb &= Va_i \\ Td(t) &= 0 \\ \bar{Td}_i &= 0 \end{aligned}$$

S'il reste de la congestion de la période horaire précédente. ($N(t_i) \neq 0$)

L'arc, au début de la période horaire, sera alors nécessairement sujet à la congestion. Durant cet intervalle de temps, la taille de la queue est donnée par :

$$N(t) = N(t_i) + (Va_i - V_k)(t - t_i)$$

On doit encore distinguer deux sous cas :

$$N(t) = N(t_i) + (Va_i - V_k)(t_{i+1} - t_i)$$

- Si $N(t_i) + (Va_i - Vk)(t_{i+1} - t_i) > 0$: l'arc reste congestionné pendant toute la période horaire et on a :

$$Vb =$$

$$Td(t) = Td(t_i) + \left(\frac{Va}{Vk} - 1 \right) (t - t_i)$$

$$\overline{Td}_i = Td(t_i) + \frac{1}{2} \left(\frac{Va}{Vk} - 1 \right) (t_{i+1} - t_i)$$

- Sinon la queue est totalement vide à partir de $\bar{t}_i < t_{i+1}$:

$$\bar{t}_i = t_i + \frac{N(t_i)}{Vk - Va_i}$$

$$Vb(t) = \begin{cases} Vk & \text{si } t_i < t < \bar{t}_i \\ Va_i & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Td(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t_i < t < \bar{t}_i \\ Td(t_i) + \left(\frac{Va}{Vk} - 1 \right) (t - t_i) & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\overline{Td}_i = \frac{[N(t_i)]^2}{2Vk(Vk - Va_i)(t_{i+1} - t_i)}$$

On pourra donc, pour chaque heure de départ hd , calculer un temps de déplacement d'une zone i vers une zone j en fonction du trafic présent sur le réseau. L'état de la congestion à l'heure hd dépend des départs aux hd précédentes si les véhicules correspondants sont encore en circulation.

La journée est donc découpée en périodes horaires, de durée constante (ici dt), repérées chacune par l'heure de début de la période hd . Les déplacements d'une période horaire hd sont tous ceux qui partent entre hd et $hd+dt$.

6.2. Affectation sur le réseau

Le modèle d'affectation sur le réseau routier est adapté de celui utilisé pour le modèle stratégique de l'agglomération lyonnaise (Lichère, 1997). Il opère une affectation du trafic en 5 tranches avec recherche d'itinéraire et affectation au plus court chemin à chaque itération.

La différence est qu'ici, au lieu d'utiliser une courbe débit-vitesse statique, nous utilisons le modèle de goulot précédemment exposé.

Soit l'algorithme général suivant :

Pour le mode voiture particulière,

Pour chaque tranche de trafic :

Exploration des itinéraires et calcul des plus courts chemins (algorithme de Ford)

Affectation aux plus courts chemins

Recalcul des temps de parcours (à l'aide du modèle de goulot)

Pour le mode transports collectifs,

Le résultat de cet algorithme consiste en des temps de parcours pour chaque mode, pour chaque couple origine-destination ij et pour chaque classe d'heure de départ (ou période horaire) hd .

A ce temps de parcours est ajouté, pour le mode voiture particulière, un temps d'accès à la voiture et au réseau primaire des arcs routiers (et un temps depuis le réseau primaire jusqu'à la place de stationnement et depuis cette place jusqu'à la destination finale), soit au total 12 mn, comme dans le modèle stratégique de Lyon. Pour le mode transports collectifs sont également pris en compte les temps d'accès au réseau, avec leurs coefficients de pénibilité, tels que décrits dans l'offre du réseau de transports collectifs.

6.3. Choix de l'heure de départ

Nous exposons dans un premier temps le programme d'optimisation micro-économique à la base du choix de l'heure de départ par l'utilisateur d'un mode quelconque. Nous en déduisons l'algorithme de résolution de ce programme puis montrons dans un exemple l'effet de la congestion sur la répartition d'un ensemble de déplacements par heure de départ.

6.3.1 Principe

En adaptant la formulation proposée par de Palma et Marchal (2001), le coût généralisé d'usage du mode m à la période horaire h s'écrit (pour un itinéraire donné)

$$C_{g_{mh}}(t) = aT_{mh}(t) + b \max[(hap - \Delta) - (t + T_{mh}(t)), 0] + g \max[(T_{mh}(t) + t) - (hap + \Delta), 0] + C_{mh}$$

où $T_{mh}(t)$ représente le temps de parcours à l'heure de départ t ,

a le coût unitaire du temps de parcours (valeur du temps classique),

b le coût unitaire du temps d'arrivée en avance,

hap l'heure d'arrivée préférée, avec Δ la période de battement autorisée en plus ou en moins,

g le coût unitaire du temps d'arrivée en retard,

C_{mh} le coût monétaire d'usage du mode m à la période horaire h .

Hypothèse :

L'utilisateur des transports (VP ou TC) cherche à minimiser son coût généralisé de déplacement en combinant le coût du temps de parcours et le coût du retard ou de l'avance.

C'est cette formule qui est utilisée dans le calcul du choix de l'heure de départ (cf. infra).

⁶ Le temps de parcours du tram dépend également des vitesses routières car le réseau du tram n'est pas totalement protégé du fait des attentes aux carrefours.

6.3.1.1 Quelles valeurs ?

Small (1982) cité par Berthier (1998) donne $\mathbf{b} = \mathbf{g} = \mathbf{a}/2$

De Palma et Fontan (enquête MADDIF, 2000) donnent pour la région parisienne

$$\mathbf{a} = 12,96 \text{ euros/h}$$

$$\mathbf{b} = 8,61 \text{ euros/h}$$

$$\mathbf{g} = 30,22 \text{ euros/h}$$

et $\Delta = 10 \text{ mn.}$

Hypothèse :

En l'absence de mesures sur Lyon, et sachant que nous considérons une distribution de valeurs du temps pour la répartition modale, nous retenons en première approximation des valeurs unitaires du coût du retard et de l'avance proportionnelles à la valeur du temps de parcours. Il semble raisonnable de considérer que le coût du retard est plus élevé que celui de l'avance. Nous retenons

- un coût de l'avance moitié moindre de la valeur du temps de parcours
- un coût du retard double de la valeur du temps de parcours
- une période de battement autorisée de +/- 10 mn.

6.3.1.2 Lien avec le modèle de répartition modale

Nous retenons pour \mathbf{a} la distribution de valeurs du temps calibrée pour la répartition modale, et

$$\mathbf{b} = k_b \mathbf{a} \text{ avec } k_b = 1/2 \text{ et } \mathbf{g} = k_g \mathbf{a} \text{ avec } k_g = 2$$

Pour la comparaison entre deux modes m et m' on écrira

- la composante du coût du retard du mode $m = k_g \max[(T_{mh}(t) + t) - (hap + \Delta), 0]$
- la composante du coût de l'avance du mode $m = k_b \max[(hap - \Delta) - (t + T_{mh}(t)), 0]$

Soit l'une de ces composantes soit l'autre est nulle, soit les deux le sont (arrivée à l'heure c'est-à-dire dans la plage $[hap - \Delta, hap + \Delta]$).

Donc la composante de coût de décalage horaire⁷ Cd_m d'un mode m peut s'écrire comme la somme de ces deux composantes,

soit $Cd_{mh}(t) = k_b \max[(hap - \Delta) - (t + T_{mh}(t)), 0] + k_g \max[(T_{mh}(t) + t) - (hap + \Delta), 0]$. D'où

$$Cg_{mh}(t) = \mathbf{a}(T_{mh}(t) + Cd_{mh}(t)) + C_{mh}$$

La valeur du temps \mathbf{a} qui égalise les coûts généralisés de chacun des deux modes m et m' est telle que

⁷ Appelée aussi parfois coût de « déshorage ».

$$\mathbf{a}(T_{mh}(t) + Cd_{mh}(t)) + C_{mh} = \mathbf{a}(T_{m'h}(t) + Cd_{m'h}(t)) + C_{m'h}, \text{ d'où}$$

$$\mathbf{a} = \frac{C_{m'h} - C_{mh}}{T_{mh}(t) - T_{m'h}(t) + Cd_{mh}(t) - Cd_{m'h}(t)}$$

Ce sont ces formulations qui sont appliquées dans le modèle de répartition modale (cf. infra).

6.3.2 Algorithme du choix d'heure de départ de plus court chemin

Le calcul de la structure de répartition des flux selon l'heure de départ s'effectue via un certain nombre d'itérations au travers desquelles l'agent cherche à réduire le coût généralisé de son déplacement, pour une activité à destination, une heure d'arrivée préférée et un mode de transport donnés. Chaque itération consiste, pour une heure de départ donnée, à calculer les temps de parcours minimum pour chaque mode et pour chaque couple origine/destination (OD). Puis, pour chaque mode, les usagers changent d'heure de départ si cela peut faire baisser leur coût généralisé.

ChoixHD :

```

    Pour un nombre donné d'itérations
      Affectation et calcul des temps pcc (VP et TC)
      Pour chaque activité
        Changement HD(VP)
        Changement HD(TC)
  
```

La routine « Changement HD » consiste à comparer - pour chaque OD et *chaque heure d'arrivée préférée* - le coût généralisé correspondant à une heure de départ donnée, avec le coût généralisé en partant avant ou après. Si à une autre heure de départ le coût est plus faible, une part des usagers migreront vers la période horaire plus avantageuse.

ChangementHD :

```

    Pour chaque OD
      Pour chaque hap
        Pour chaque h (heure de départ)
          Transfert(h)
        Fin pour
      Fin pour
    Fin pour
  
```

Transfert(h)

Pour $h' < h$ en partant de h

dès que h' tel que $\text{coût}(h') < \text{coût}(h)$ alors

$x\%$ d'usagers partant à h se décalent à h'
sortie de Transfert

Pour $h' > h$ en partant de h

dès que h' tel que $\text{coût}(h') < \text{coût}(h)$ alors

$x\%$ d'usagers partant à h se décalent à h'
sortie de Transfert

où x représente la proportion d'usagers qui changeront effectivement d'heure de départ parmi ceux qui peuvent faire baisser leur coût généralisé.

Hypothèse :

La répartition des déplacements par heure de départ résulte d'un processus d'apprentissage où un petit nombre d'usagers cherchent à changer d'heure de départ à chaque étape (ou jour). La recherche d'une meilleure heure de départ se fait en essayant de partir de plus en plus tôt jusqu'à pouvoir réduire le coût généralisé ; si aucune solution n'a été trouvée on cherche à partir plus tard. En outre, le changement ne s'opère que si le gain est suffisant.

Empiriquement nous avons retenu 5 itérations et une proportion x égale à 0,01. Ce qui fait qu'au bout d'une semaine, au plus 5% des agents sont susceptibles d'avoir changé d'heure de départ. Le gain minimum sur le coût généralisé est de 20%.

6.4. Exemples d'effet de la congestion sur l'étalement de la pointe

Afin d'illustrer l'effet de la congestion sur l'étalement de la pointe, dans les exemples qui suivent nous ne considérons que la demande de déplacements en voiture particulière. En effet, l'interaction avec le choix de mode n'intervient pas dans le cadre de ce sous-modèle.

Les données de ces exemples sont les suivantes :

durée d'une période horaire = 15 mn

nombre de périodes horaires = 5

début de la 1ère période horaire = 7h00

Seules deux zones sont retenues, ce qui donne quatre liaisons à définir (deux interzones - dans chaque sens- et deux intrazones).

Offre routière :

nb zones intra : 2

nb zones global : 2

capacités (uvp/h):

15000 10000

10000 15000

distances (km) :

2 7

7 2

vitesse à vide (km/h) :

40	60
60	40

péage :

0	0
0	0

Dans les deux exemples on ne considère que des demandes s'exprimant pour aller de la zone 1 vers la zone 2, à l'exclusion de toute autre.

Plusieurs niveaux de demande sont testés, de 2.000 à 13.000 déplacements (par période de 15 mn). Comme la capacité de 1 vers 2 est de 10.000 uvp/h et que la période horaire est de 15mn, la congestion se manifesterà dès que la demande dépassera 2.500 déplacements par période de 15mn (en supposant une personne par véhicule).

Dans le premier exemple, toute la demande est supposée se placer initialement sur la dernière période horaire de départ avec une heure d'arrivée préférée égale à cette même période horaire, soit la cinquième (*ha5*) (cf. Figure 12).

Le haut de la Figure 13 montre la répartition horaire finale des heures de départ pour les différents niveaux de demande, tandis que le bas donne les temps de parcours correspondant. Les valeurs chiffrées sont données dans le Tableau 1 et le Tableau 2.

Compte tenu de la capacité limitée à 2.500 uvp/15 mn, on constate que

- pour une demande de 2.000 déplacements, toute celle-ci se décale vers la période horaire précédant l'heure d'arrivée préférée, soit *hd4*.
- les autres demandes se répartissent sur plusieurs périodes horaires précédant *ha5* : certains arriveront en avance, d'autres arriveront en retard (rappelons que le temps de battement est de +/- 10 mn).
- pour chaque demande, le maximum de déplacements partent de plus en plus tôt selon le niveau de cette demande, ce qui s'explique par les temps de parcours correspondant.
- pour une demande de 13.000 déplacements, pratiquement tous les déplacements partent à la première période horaire (le plus tôt possible dans les limites de notre exemple) avec un temps de parcours de 50 mn environ, c'est-à-dire dans la plage horaire visée (avec le battement autorisé de 10 mn). Ceux qui partiraient à l'heure de départ suivante (15 mn plus tard) mettraient 73 mn, à cause de la file d'attente créée par ceux partant à la période précédente.

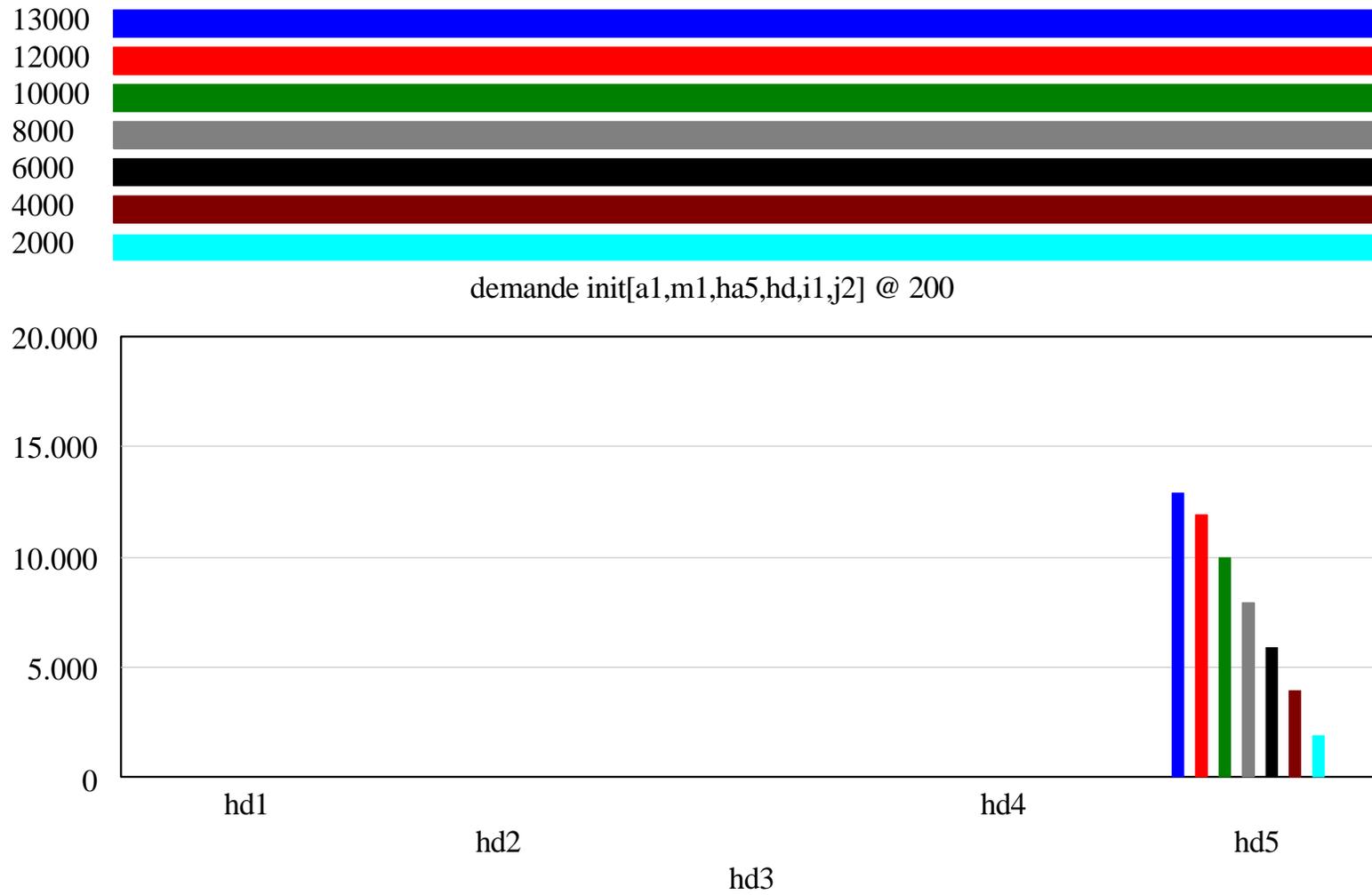


Figure 12 : Répartition initiale des déplacements en heure de départ hd5 pour plusieurs niveaux de demande

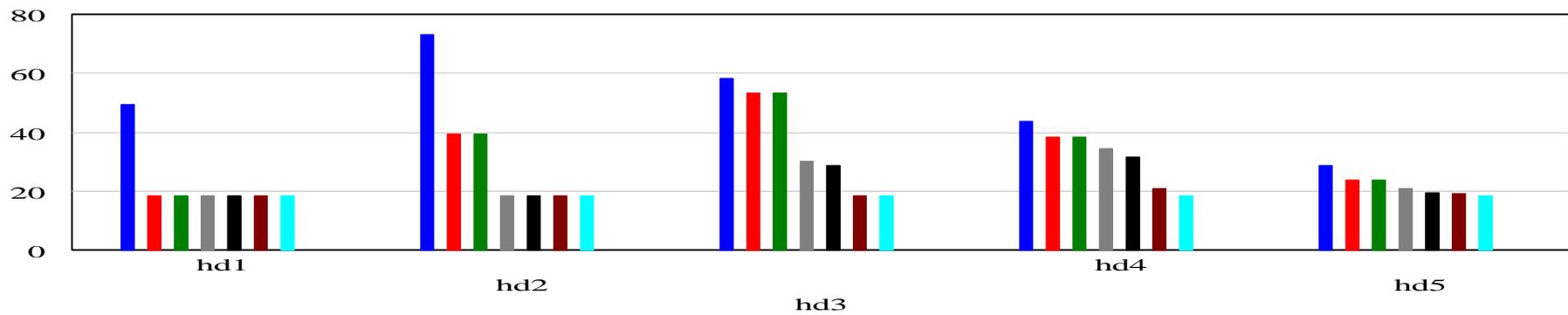
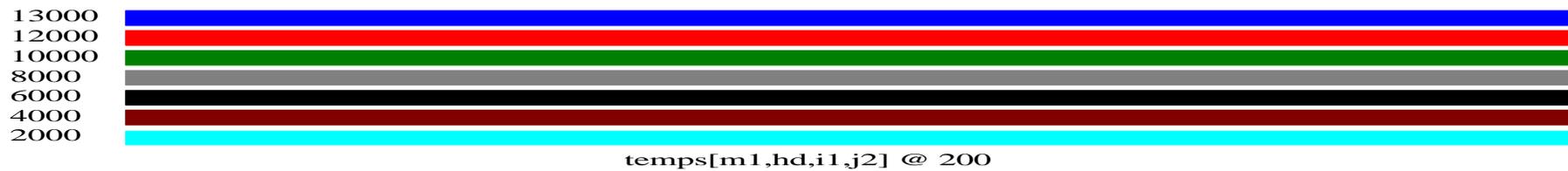
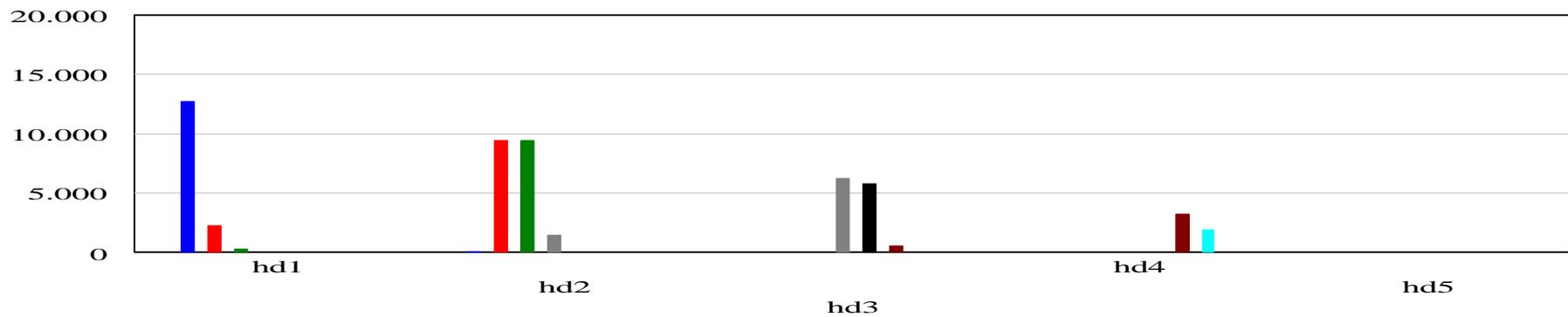
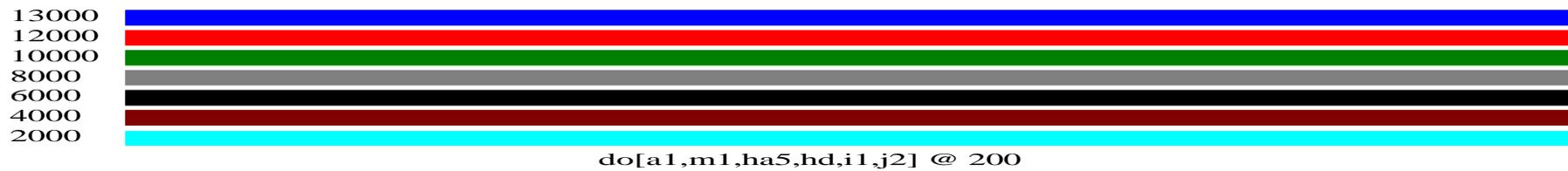


Figure 13 : Répartition finale des déplacements pour plusieurs niveaux de demande

"do[activité,mode,ha,hd,orig,dest]"	13000	12000	10000	8000	6000	4000	2000
[a1,m1,ha5,hd1,i1,j2]	12763	2383	380	0	0	0	0
[a1,m1,ha5,hd2,i1,j2]	90	9470	9473	1536	0	0	0
[a1,m1,ha5,hd3,i1,j2]	49	49	49	6366	5902	660	0
[a1,m1,ha5,hd4,i1,j2]	49	49	49	49	49	3291	1951
[a1,m1,ha5,hd5,i1,j2]	49	49	49	49	49	49	49

a1 = activité 1, m1 = mode 1, ha5 = heure d'arrivée préférée en 5^{ème} période, hd1 à 5 = différentes heures de départ

Tableau 1 : Répartition finale des déplacements pour plusieurs niveaux de demande

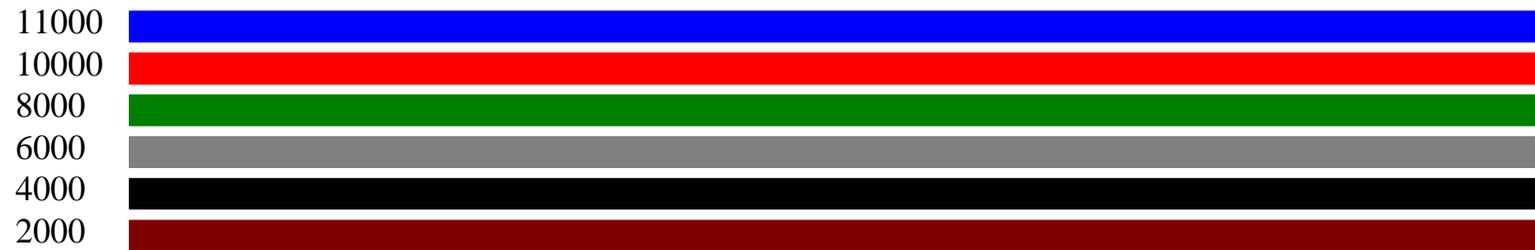
"temps[mode,hd,orig,dest]"	13000	12000	10000	8000	6000	4000	2000
[m1,hd1,i1,j2]	50	19	19	19	19	19	19
[m1,hd2,i1,j2]	73	40	40	19	19	19	19
[m1,hd3,i1,j2]	59	53	53	31	29	19	19
[m1,hd4,i1,j2]	44	39	39	35	32	21	19
[m1,hd5,i1,j2]	29	24	24	21	20	20	19

Tableau 2 : Temps de déplacements pour plusieurs niveaux de demande

A titre de démonstration, dans l'exemple suivant toute la demande initiale se porte sur la première période horaire de départ avec un heure d'arrivée préférée égale à la dernière période horaire, soit la cinquième (*ha5*) (cf. Figure 14). Comme précédemment, plusieurs niveaux de demande sont testés et les résultats correspondants sont donnés dans la Figure 15.

On constate qu'effectivement (cf. haut de la Figure 15) les heures de départ des déplacements se répartissent de manière optimisée par rapport à l'heure d'arrivée préférée, comme on pouvait s'y attendre, et selon une structure de répartition proche de celle de l'exemple précédent, quoiqu'à partir d'une situation initiale différente.

La structure finale est proche mais pas identique, ce qui s'explique tout à fait par l'algorithme de recherche d'heure de départ qui part d'une situation initiale donnée pour chercher par tâtonnement (plus tôt puis plus tard) une solution meilleure. En bref, le résultat dépend de la situation initiale. Cela est justifié par notre hypothèse de processus d'apprentissage.



demande init[a1,m1,ha5,hd,i1,j2] @ 200

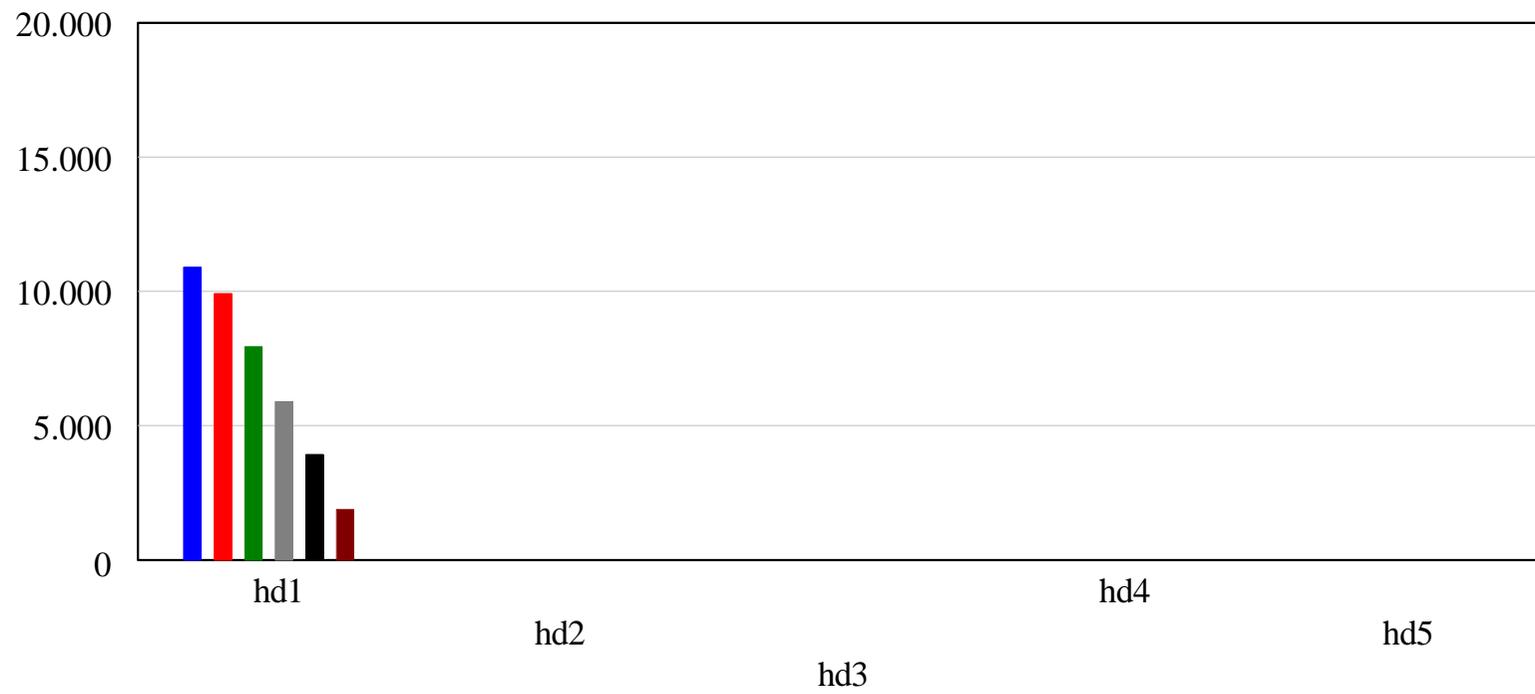
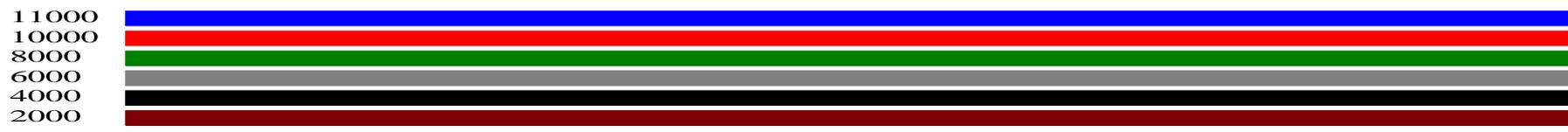
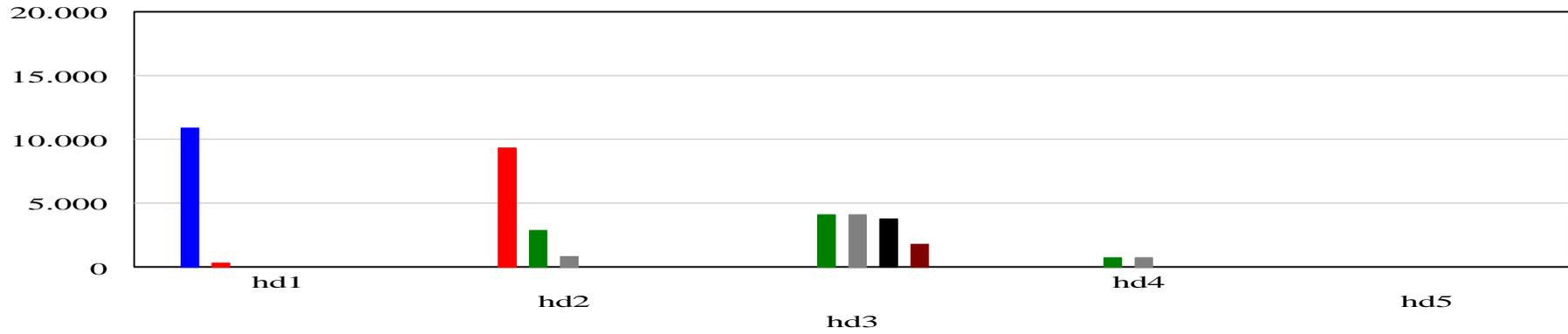


Figure 14 : Répartition initiale des déplacements en heure de départ hd1 pour plusieurs niveaux de demande



do[a1,m1,ha5,hd,i1,j2] @ 200



temps[m1,hd,i1,j2] @ 200

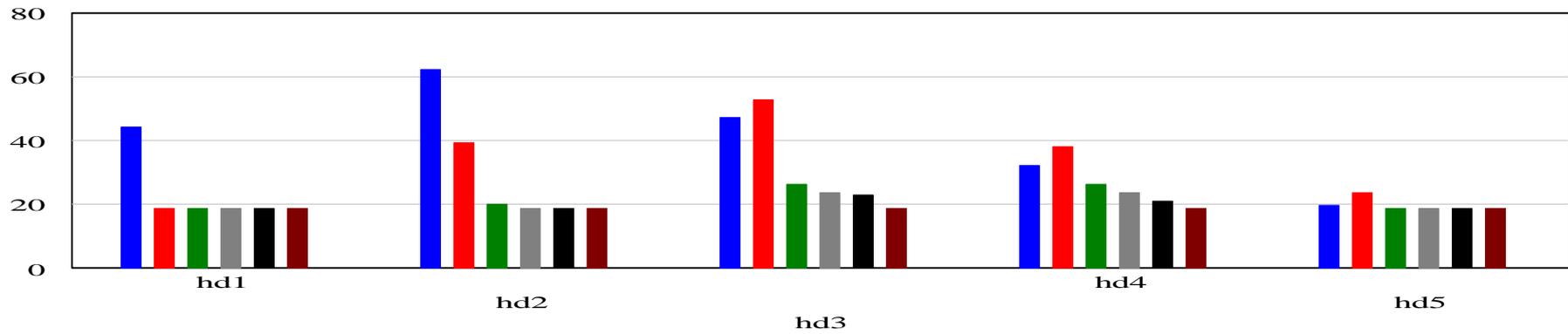


Figure 15 : Répartition finale des déplacements pour plusieurs niveaux de demande

Enfin, troisième exemple, nous testons l'effet de l'augmentation de la capacité en présence d'une demande excessive.

La demande initiale est de 12.000 déplacements partant à *hd1* désirant arriver à l'heure *ha5*. On fait varier la capacité de 10.000 jusqu'à 30.000 uvp/h. Les résultats sont illustrés dans la Figure 16 et les chiffres dans le Tableau 3 et le Tableau 4.

Pour une capacité de 10.000 uvp/h toute la demande se concentre en *hd1* et arrivera légèrement en avance. Pour une capacité de 12.000 uvp/h la contrainte de capacité est légèrement relâchée: une partie arrive en avance (559 partant en *hd1*), les suivants arrivent à l'heure (11.343 partant en *hd2*), une minorité partant en *hd3* et *hd4* (98 déplacements) arrivent en retard. Avec des capacités plus élevées (14.000, 16.000, 18.000 puis 20.000 uvp/h), la demande se décale progressivement vers *hd3*, une part de plus en plus nombreuse de la demande arrivera à l'heure, une part moindre en retard, et une part allant en diminuant arrivera en avance.

Ce phénomène de concentration se renforce pour des capacités plus élevées (25.000 puis 30.000 uvp/h). La demande part pour l'essentiel en *hd3*, le temps de parcours étant de 23 mn, et arrivera à l'heure d'arrivée préférée (compte tenu de la plage acceptée de battement de 10 mn en plus ou en moins.) Un départ en *hd4* est indifférent par rapport à l'objectif de minimisation du coût généralisé du déplacement, ce qui explique que la demande ne bascule pas sur *hd4*.

Cet exemple montre donc comment, à mesure que l'on augmente la capacité, la demande se rapproche de l'heure d'arrivée préférée tout en se concentrant dans le temps.

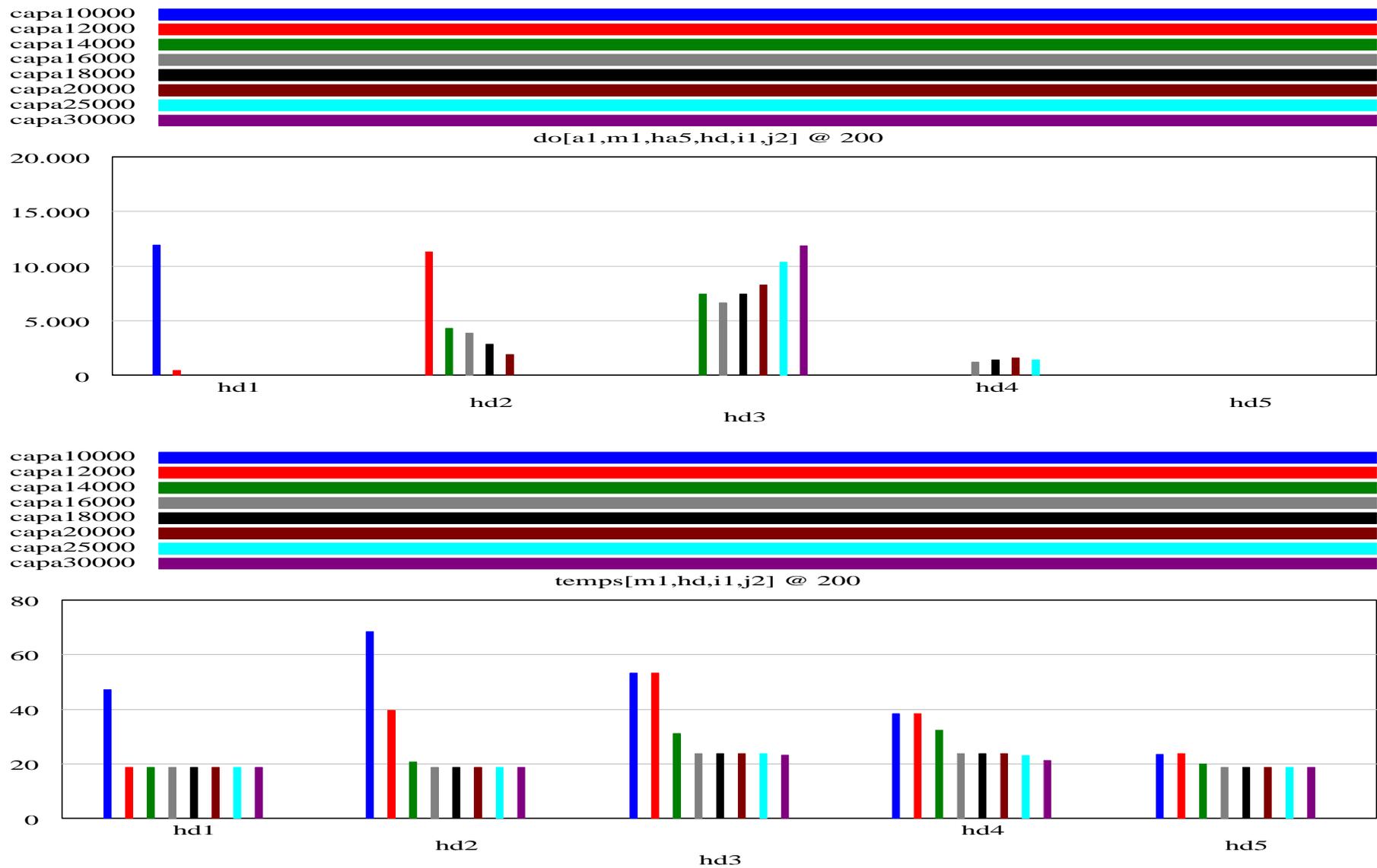


Figure 16 : Répartition finale des heures de départ de 12.000 déplacements désirant arriver en ha5 pour plusieurs niveaux de capacité

capacité	10000	12000	14000	16000	18000	20000	25000	30000
déplacements :								
hd1	12000	559	49	49	49	49	49	49
hd2	0	11343	4398	3962	2947	1958	49	49
hd3	0	49	7504	6687	7501	8342	10423	11902
hd4	0	49	49	1302	1503	1651	1479	0
hd5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3 : Répartition finale des heures de départ de 12.000 déplacements désirant arriver en ha5 pour plusieurs niveaux de capacité

capacité :	10000	12000	14000	16000	18000	20000	25000	30000
temps :								
hd1	48	19	19	19	19	19	19	19
hd2	69	40	21	19	19	19	19	19
hd3	54	53	31	24	24	24	24	23
hd4	39	39	33	24	24	24	23	22
hd5	24	24	20	19	19	19	19	19

Tableau 4 : Temps de déplacements pour 12.000 déplacements désirant arriver en ha5 pour plusieurs niveaux de capacité

6.5. Conclusion

Nous avons donc construit un modèle qui :

- intègre une représentation plus réaliste de la formation de la congestion sur un axe routier, à travers la formation de files d'attente, sur la base d'un modèle de goulot ;
- combine ce modèle de goulot avec un algorithme de recherche de plus court chemin (en temps généralisé) pour calculer l'affectation du trafic sur le réseau et les temps de parcours correspondant ;
- permet d'« endogénéiser » le choix de l'heure de départ, par rapport à une heure d'arrivée préférée, en intégrant les coûts d'arrivée en avance ou en retard.

Ainsi ce modèle offre des pistes pour simuler, en combinaison avec le modèle de choix modal, plusieurs « paradoxes » de la congestion comme par exemple le paradoxe de Downs-Thomson à l'origine de la conjecture de Mogridge.

Toutefois, pour passer à des applications concrètes sur une agglomération, il resterait à mieux calibrer les paramètres, notamment les valeurs de coût d'arrivée en avance ou en retard, très probablement variables selon les activités concernées.

7. Le modèle de répartition modale « prix-temps »

Le modèle de répartition modale repose pour l'essentiel comme nous allons le voir, sur un modèle prix-temps. La logique d'exposé de cette partie reflète celle de la construction du modèle. Avant de construire le modèle de dynamique de système de la répartition modale, nous avons explicité les mécanismes de choix de mode.

C'est pourquoi nous présentons, dans une première section, les raisons d'ordre théorique du choix du modèle prix-temps. Dans une deuxième section nous élaborons pour l'essentiel les paramètres d'offre de transport, à partir des observations de l'enquête déplacements auprès des ménages de Lyon (1995). A partir de cette approche théorique et empirique nous définissons en troisième section une méthode de modélisation de la répartition modale. En quatrième section sont exposés les résultats du calibrage des différents sous-modèles. Enfin le modèle de simulation dynamique écrit sous Vensim et les résultats des tests de validation interne sont présentés dans la dernière section.

7.1. Quel type de spécification retenir ?

Pour modéliser la répartition des déplacements entre modes de transport nous avons le choix entre plusieurs types de modèles : approche agrégée ou désagrégée, degré de finesse de la représentation de l'offre et de la demande, quels déterminants privilégier et quelle forme fonctionnelle pour la spécification, etc.

Nous avons l'expérience du modèle stratégique de déplacements appliqué à l'agglomération lyonnaise (1997). Dans ce modèle à quatre étapes, la répartition modale était calibrée par un modèle logit agrégé calculant la part du mode transports collectifs dans les déplacements motorisés entre deux zones quelconques (sur la base d'un découpage de l'agglomération en 25 zones). La formule utilisée reposait en grande partie sur des tâtonnements empiriques cherchant à intégrer à la fois l'effet de l'équipement des ménages en automobiles, de la concurrence entre modes en termes de temps de parcours et de coûts d'usage sur la liaison entre les deux zones, et d'une approximation des difficultés de stationnement par la densité d'habitat et d'emploi dans la zone de destination.

Nous souhaitons revenir à une formulation plus simple et plus robuste dans sa spécification et ses déterminants tout en intégrant mieux la variabilité des comportements individuels, côté demande, et des conditions de déplacement, côté offre.

Revenir à quelque chose de plus simple et robuste pour une simulation à moyen voire long terme des déplacements, implique de relier plus fermement la spécification du modèle à la théorie micro-économique dont l'application peut être résumée ainsi : le transport est une demande dérivée de la demande de réalisation d'activités à des heures et en des lieux donnés ; il lui est associé un coût donc une désutilité qui doit être mise en rapport avec l'utilité de l'activité permise par le déplacement ; les déterminants de base que sont le prix et le temps se combinent en un coût généralisé que le consommateur cherche à minimiser. En outre nous cherchons à intégrer également les ressources dont dispose le consommateur et qui façonnent son univers de choix et que nous désignerons comme « l'effet revenu » (sur la théorie micro-économique voir Mougeot (1989) et Mas-Colell et al (1995)).

Mieux intégrer la variabilité des situations tant du côté de la demande que du côté de l'offre nous amène, en lien avec la théorie micro-économique à nous tourner d'abord vers la réponse a priori évidente que constituent les modèles d'utilité aléatoire de choix discret.

7.1.1 Les limites de la spécification des modèles de choix discret

Les modèles de choix discret sont basés sur un substrat théorique leur conférant une relative consistance.

Première hypothèse : à chaque option de choix est associée une utilité reflétant le niveau de satisfaction qu'apporte à l'individu le choix de cette option. L'individu choisit l'option qui lui confère la plus grande utilité.

Deuxième hypothèse, cette utilité est supposée aléatoire. Il en découle un modèle probabiliste de choix de telle ou telle option.

Pour le choix modal on écrira la probabilité de choix du mode m par l'individu k

$$P_{mk} = \Pr(U_{km} > U_{km'}, \forall m' \neq m)$$

où U_{km} représente l'utilité aléatoire relative au mode m pour l'individu k .

Par commodité statistique on pose deux autres hypothèses.

Troisième hypothèse, la spécification de l'utilité est additive, c'est-à-dire

$$U_{km} = V_{km} + \mathbf{e}_{km}$$

où V_{km} est la composante déterministe de l'utilité et \mathbf{e}_{km} la composante aléatoire.

$$\text{En outre } V_{km} = \sum_l \mathbf{b}_l x_{lkm}$$

avec x_{lkm} caractéristiques du mode m pour l'individu k et \mathbf{b}_l paramètres à estimer.

Une *quatrième hypothèse* concerne la distribution des termes d'erreur \mathbf{e} qui aboutit soit au modèle logit (distribution de Weibull), soit au modèle probit (distribution normale). Le modèle logit est de loin le plus utilisé étant donné sa plus grande facilité de calibrage que dans le cas du modèle probit.

En l'état, ce type de modèle pose deux grandes difficultés, l'une relative à la prise en compte des données socio-économiques individuelles comme le revenu, l'autre au problème de mesure de l'univers de choix des individus.

7.1.1.1 La difficulté de prise en compte de l'effet-revenu

Comme l'explique Jara-Diaz (1998) cette simplicité du modèle a un coût, à savoir que le revenu ne peut intervenir dans une spécification linéaire additive du choix : le choix est indépendant du revenu. En effet la comparaison de deux options (dans un choix binaire par exemple) se fera sur la base de la *différence* entre les composantes déterministes des utilités individuelles, différence dans laquelle la composante du revenu de l'individu disparaîtra.

Cela apparaît particulièrement peu pertinent si l'on désire représenter correctement les comportements de choix de mode face à des options de coûts très différents, notamment si l'on considère l'importance grandissante donnée à la tarification de la circulation automobile (stationnement, péages).

Jara-Diaz et Videla (1989) ont proposé une spécification additionnelle à base d'expansion de Taylor pour réintroduire l'effet du revenu dans le choix du mode. Cette réintroduction du revenu dans la spécification d'utilité des modèles de choix discrets n'est cependant pas sans poser des problèmes d'interprétation (Viton, 1985).

De Palma et Fontan (2001) ont également proposé un modèle logit à effet-revenu, sur la base d'une spécification de l'utilité non plus linéaire mais logarithmique. Ce type de modèle permet de prendre en compte le fait qu'en général les usagers les plus riches ont tendance à prendre le mode le plus coûteux. Ce modèle n'apparaît toutefois pas meilleur en termes d'ajustement qu'un modèle logit linéaire classique, même s'il permet de mettre en évidence des valeurs du temps différentes entre usagers de la voiture particulière et usagers des transports collectifs. Un autre intérêt est de montrer que la distribution des valeurs du temps suit approximativement une loi log-normale. En outre, les auteurs montrent qu'à l'inverse de la prise en compte de l'effet revenu, l'hypothèse de distribution des paramètres \mathbf{b} dans la population (modèle du type « mixed logit ») n'apporte pas grande différence avec un modèle logit classique.

7.1.1.2 Le degré de désagrégation de l'analyse de la demande

En fait, le débat entre modèles de choix discrets (donc plutôt désagrégés) et modèles de choix continus (donc plutôt agrégés) est un faux débat si l'on considère le problème de la mesure des caractéristiques d'offre : en théorie on doit mesurer les caractéristiques de coûts et de temps de déplacement (sans compter les autres déterminants éventuels du déplacement) telles que perçues par l'individu qui effectue ce déplacement. En pratique le degré de finesse requis est trop coûteux en acquisition de données, voire inaccessible : on mesurera le temps et le coût (ou la distance pour la voiture particulière) moyennés à partir d'une aire géographique (zone) que l'on déterminera aussi petite que possible pour éviter la dispersion des valeurs réelles autour de ces moyennes.

L'utilité relative au choix du mode m par l'individu k sur la liaison i,j s'écrit

$$V_{ijkm} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 t_{ijkm} + \mathbf{b}_2 c_{ijkm} + \sum_l \mathbf{b}_l x_{lk}$$

où t_{ijk} représente les caractéristiques de temps pour les différents modes m pour la liaison entre i et j perçues par l'individu k , c_{ijk} les caractéristiques de coût correspondantes et x_{lk} les caractéristiques socio-économiques de l'individu. Avec une spécification d'utilité additive, ces caractéristiques socio-économiques n'ont pas lieu d'être (cf. supra).

Avec le regroupement zonal nécessaire pour représenter l'offre, les coûts et temps sont identiques pour tous les individus sur la liaison i,j et on a

$$V_{ijkm} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 t_{ijm} + \mathbf{b}_2 c_{ijm} = V_{ijm}$$

L'utilité du mode m ne dépend pas des caractéristiques individuelles de k .

Par exemple la probabilité de choix du mode 1 dans un ensemble de choix binaire avec une hypothèse de modèle logit s'écrit

$$P_1 = \frac{1}{1 + \exp(V_2 - V_1)} = \text{constante pour la liaison } i,j \text{ considérée.}$$

Il en résulte qu'il sera équivalent de calibrer le modèle à partir des réponses individuelles P_{ijk} ou à partir de la réponse moyenne P_{ij} du paquet de déplacements de la liaison i,j .

En résumé, le degré de désagrégation d'analyse de la demande (comportements individuels) est déterminé par le degré de désagrégation de l'offre (coûts et temps de parcours offerts).

7.1.2 Le choix du modèle prix-temps

Face à la relative inadéquation des modèles de choix discret par rapport à nos desiderata, une alternative est-elle possible ?

Nous souhaitons notamment appliquer un principe de parcimonie :

- prendre en compte explicitement les caractéristiques socio-économiques individuelles et notamment un effet-revenu ;
- nous en tenir à des paramètres d'offre a priori essentiels comme le coût/prix du déplacement et le temps passé ;
- tout en maintenant une relative simplicité dans la spécification et le calibrage statistique du modèle.

Une réponse possible est le modèle « prix-temps » (cf. Encadré 1 et annexe page 139). Le modèle repose sur l'hypothèse que le choix d'un individu entre deux modes de transport s'effectue en fonction de la valeur que celui-ci attribue à son temps, et des caractéristiques de coût et de temps de transport de chacun des modes.

Encadré 1 : le modèle prix-temps

Le modèle prix-temps suppose que l'utilisateur compare le coût généralisé offert par chaque mode (ou plus généralement chaque alternative) et choisit l'alternative de moindre coût. Ce coût généralisé pour l'alternative j et l'individu i s'écrit $c_{ij} + v_i t_{ij}$ où c_{ij} est le coût monétaire d'usage de l'alternative j par i , v_i la valeur du temps de l'individu i et t_{ij} le temps de déplacement offert à i par l'alternative j .

Par exemple face à deux modes 1 et 2, l'individu choisira le mode 1 si $c_{i1} + v_i t_{i1} < c_{i2} + v_i t_{i2}$ (cf. Figure 17) ou encore si sa valeur du temps v_i est telle que $v_i > (c_{i1} - c_{i2}) / (t_{i2} - t_{i1})$, valeur positive si le mode 1 est plus coûteux et plus rapide que le mode 2.

Avec une distribution de valeurs du temps il suffit de connaître cette valeur de seuil pour déterminer la part des déplacements qui se feront selon le mode 1 (cf. Figure 18).

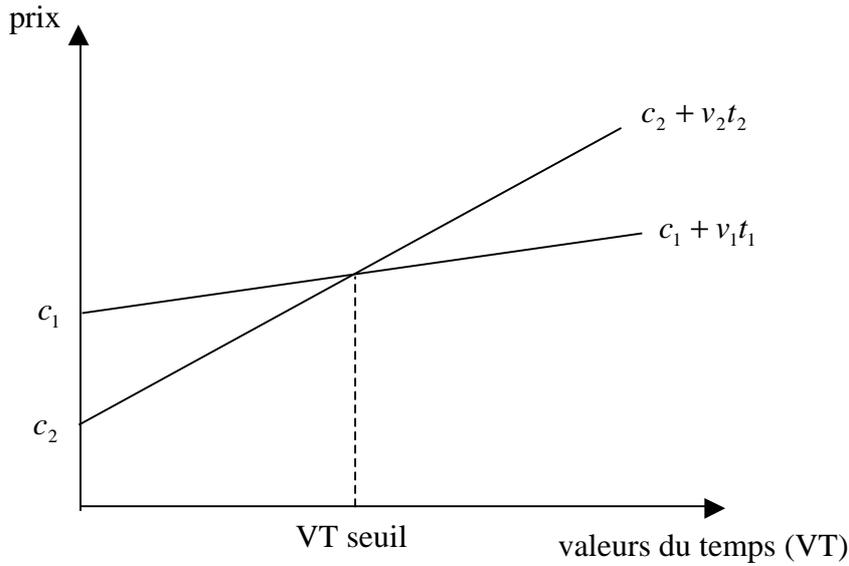


Figure 17: Variations de coûts généralisés de deux modes avec coût monétaire et durées de déplacement données

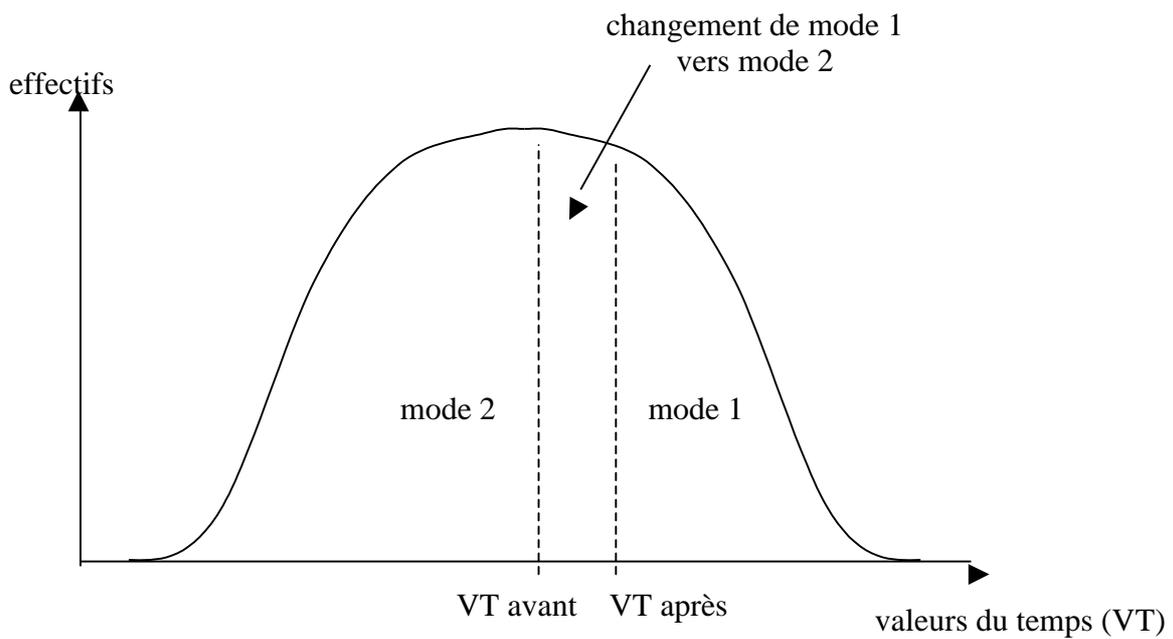


Figure 18 : Exemple de répartition modale sur une distribution de valeurs du temps

Ce modèle prend en compte le cadre théorique général de maximisation de l'utilité du consommateur, ce dernier choisissant le mode de plus faible coût généralisé. Le modèle intègre indirectement l'effet-revenu par le biais de la distribution des valeurs du temps.

Il a été appliqué largement et avec succès aux transports interurbains, notamment pour la modélisation du partage modal entre avion et train, mais, à notre connaissance, pas sous cette forme à l'urbain.

Cependant, l'hypothèse centrale de distribution log-normale des valeurs du temps en milieu urbain est confortée par les résultats d'autres études (par exemple, pour les plus récentes, de Palma et Fontan, 2001 ; Segonne, 2001). Cela justifie le choix de ce type de modèle pour notre application.

7.2. La constitution des bases de données de demande et d'offre

Le développement du modèle s'appuie sur les données disponibles en matière de comportements de déplacements, à savoir les enquêtes « déplacements auprès des ménages » réalisées dans l'agglomération lyonnaise. L'analyse a été faite au départ sur l'enquête la plus récente, celle réalisée en 1994-1995.

On trouvera en annexe (page 131) quelques résultats de base concernant la demande, essentiellement en ce qui concerne

- l'effet « cycle de vie » sur les possibilités de choix du mode de déplacement : cet effet est appréhendé ici avec l'âge,
- l'effet « revenu » pour illustrer le recours à la voiture, et
- l'effet « distance » comme première approche des conditions d'offre.

Le reste de la section expose les données concernant l'offre.

Dans le modèle que nous construisons, nous séparons l'aspect possession d'une voiture (traité en amont de la répartition modale) de son usage effectif. Le modèle de répartition modale entre voiture particulière et un autre mode sera calibré sur l'échantillon des déplacements effectués par des individus en situation de choix, c'est-à-dire ayant une voiture à disposition (cf. infra pour ce dernier calcul).

Hypothèse : le coût d'usage de la voiture particulière est le coût marginal égal au coût en carburant augmenté d'éventuels frais de stationnement et de péage routier. Le coût d'entretien est supposé ne pas influencer sur la décision d'utiliser ou non la voiture dans le cadre des déplacements quotidiens.

Les distances sont calculées entre centroïdes de zones, tantôt sur la base du zonage en 25 zones, tantôt sur la base du zonage plus fin (en 317 zones).

Les temps sont calculés à partir des vitesses moyennes de zone à zone données par le modèle stratégique, sur la base d'un découpage en 25 zones : ces vitesses avaient été calculées à l'origine par un modèle d'affectation ad hoc afin de rendre compte de manière exhaustive de l'offre routière (voiture particulière) et en transports collectifs dans la situation de 1995. Cette situation correspond aux comportements observés par l'enquête ménages de 1995. En effet la reconstitution des vitesses de zone à zone sur la base des comportements de déplacements observés ne peut être exhaustive compte tenu du nombre parfois trop faible de déplacements enquêtés quand ils sont ventilés par origines et destinations.

7.2.1 Coût kilométrique en carburant de la voiture particulière

Ce coût kilométrique est calculé à partir de la composition du parc et de la consommation moyenne de chaque catégorie de véhicule, essence ou diesel (cf. Tableau 5).

1995	Essence	Diesel
Pourcentage du parc	74	26
Conso Moyenne (pour 100km)	8,49	6,67
Prix au litre (F)	5,84	3,85

Tableau 5 : Composition du parc de véhicules et consommation moyenne

$$c_{km} = \frac{8.49 \times 5.84 \times 0.74 + 6.67 \times 3.85 \times 0.26}{100 \times 6.55957} \approx 0.066 \text{ €}$$

On obtient donc un coût moyen au kilomètre (carburant) de 0,066€ soit 0,43F₉₅.

Ce facteur est appliqué aux distances de déplacements.

7.2.2 Temps de déplacements en voiture particulière

Dans le cadre d'un découpage en 25 zones, ces temps sont issus directement du modèle stratégique : ils ont été calculés à partir des vitesses données par le modèle d'affectation, appliquées aux distances entre centres de zone. En outre, sont ajoutés à ces temps un temps terminal forfaitaire de 12 mn à pied (trajet initial d'accès au véhicule et trajet final du véhicule à la destination finale).

Dans le cadre d'un découpage fin, ces temps sont recalculés en appliquant à la distance rectilinéaire, calculée sur la base du zonage fin, la vitesse apparente donnée par le modèle stratégique (donc incluant les temps des trajets terminaux).

7.2.3 Coûts monétaires des transports collectifs

Les coûts monétaires des transports collectifs sont calculés sur la base des tarifs pratiqués. Ils ont été calculés à l'origine, dans le cadre du modèle stratégique, sur la base de la recette moyenne par déplacement pour les zones 1 à 14, soit un coût forfaitaire de 0,66€ et par moyenne pondérée entre les tarifs TCL, SNCF et combinés sur les autres zones, soit un coût forfaitaire de 1,07€(cf. annexe).

7.2.4 Temps de déplacements en transports collectifs

Dans le cadre d'un découpage en 25 zones, ces temps sont issus directement du modèle stratégique : ils ont été calculés à partir des itinéraires en transports collectifs et des vitesses des différents modes de transports collectifs (bus, en site protégé ou non, métro). En outre, il s'agit d'un temps généralisé intégrant les pénalités d'accès (temps d'accès multiplié par 2) et d'attente (multiplié par 1,8), puis normé (division par 1,8) pour assurer un temps pénibilisé moyen égal au temps pur moyen. Ainsi ces pénalités permettent de différencier les composantes du temps passé avec les transports collectifs tout en maintenant sa comparabilité avec le temps de déplacement en voiture particulière.

Dans le cadre d'un découpage fin, ces temps sont recalculés en appliquant à la distance rectilinéaire, calculée sur la base du zonage fin, la vitesse apparente donnée par le modèle stratégique (donc incluant les pénalités des différents temps du déplacement par les transports collectifs).

7.2.5 Temps de déplacements en marche à pied

Pour ces temps nous avons appliqué une vitesse moyenne de 5 km/h à la distance parcourue par chaque déplacement en marche à pied. Ceci nous a permis d'obtenir une bonne approximation du temps de parcours effectif.

7.2.6 Le rôle joué par le stationnement payant

Les comportements observés en matière de stationnement dans l'Enquête Ménages de 1995 montrent que le stationnement payant ne concerne que 20% des déplacements en voiture particulière à destination de l'hypercentre (18% pour le travail). Dans le reste de l'agglomération cette part du stationnement payant chute à moins de 1% (3% pour le travail dans Lyon-Villeurbanne et entre 0 et 1% dans les autres zones).

La variable coût du stationnement tel que reportée dans l'enquête permet de donner des ordres de grandeur de ce coût : sur la centaine d'automobilistes déclarant payer pour leur travail, 75 paient selon le temps de stationnement avec des valeurs allant de 2 FF à 80 FF avec un mode statistique à 10 FF, une médiane de 12 FF et une moyenne de 15,8 FF ; 22 automobilistes paient sous forme d'abonnement mensuel revenant en moyenne à 20 FF par jour mais là encore avec une grande variabilité. Ce tarif coïncide avec celui du tarif longue durée sur voirie, d'environ 20 FF pour 8 heures de stationnement.

Nous avons retenu pour les déplacements en voiture particulière où s'applique le stationnement payant, un coût journalier de 20F, soit 3,05€

7.2.7 L'état de la concurrence en 1995 entre transports collectifs et voiture particulière

Cette concurrence est ici résumée en termes de temps (les transports collectifs sont en général plus lents sauf sur certaines liaisons hypercentrales en site protégé, cf. annexe) et de coût : compte tenu du fait que nous limitons le coût d'usage de la voiture particulière au coût en carburant et au stationnement payant, la comparaison avec la tarification forfaitaire des transports collectifs est largement au détriment de ceux-ci *lorsqu'il n'y a pas de paiement du stationnement* (cf. Figure 19).

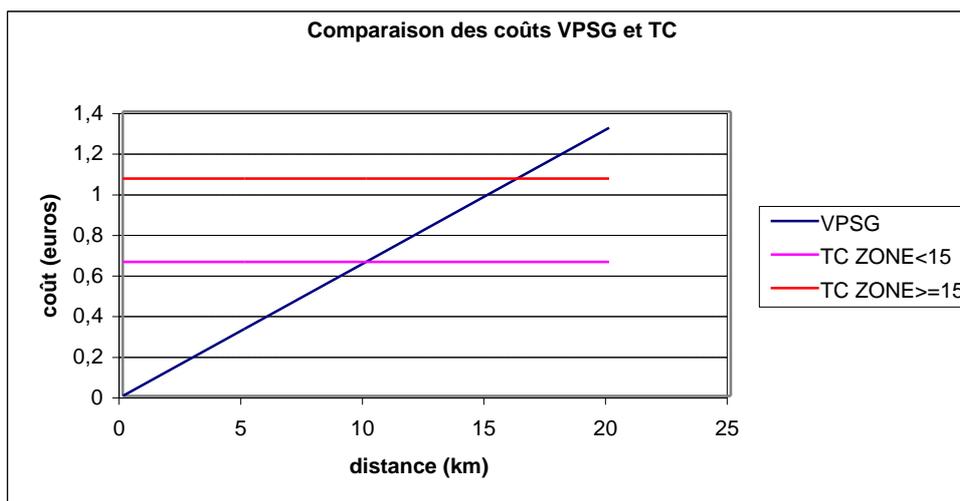


Figure 19 : Comparaison des coûts de la voiture particulière avec stationnement gratuit (VPSG) et des transports collectifs

Nous voyons que pour que les TC soient compétitifs *sur le plan du coût monétaire*, il faut faire plus de 10 kilomètres entre deux zones centrales (zones de numéro 1 à 15) et plus de 17 kilomètres pour les autres zones (pour les tarifs, se référer à l'annexe).

Or, comme le montrent le Tableau 18 et la Figure 74, 89% des déplacements ont une longueur de moins de 10km et 96% de moins de 15km.

Cependant, en tenant compte des durées de déplacements la situation de concurrence peut être inversée si les transports collectifs sont plus rapides que la voiture particulière : ce sera le cas essentiellement pour les liaisons centrales avec des transports collectifs en site propre ou protégé de la congestion routière.

Il faudra donc tenir compte de ce contexte particulier dans la modélisation de la répartition modale entre voiture particulière (+ stationnement payant ou non) et transports collectifs.

7.3. Méthode de modélisation de la répartition modale

Cette méthode consiste à

1. segmenter les populations statistiques de déplacements en fonction des possibilités de choix de mode des personnes qui effectuent ces déplacements
2. traiter spécifiquement le cas du stationnement payant (cf. motivation supra)
3. élaborer des modèles séparés pour chacun de ces segments

7.3.1 Détermination des populations étudiées

7.3.1.1 Population en situation de choix de la voiture particulière

Cette population en situation de choix est constituée des déplacements qui

- sont réalisés effectivement en voiture conducteur (VPCOND)
- ou réalisés en transports collectifs ou en marche à pied et pour lesquels les personnes qui les réalisent possèdent le permis de conduire et une voiture était disponible (non utilisée par un autre membre du ménage, NOVEHUTIL inférieur à NBVPDISPO)

Voici la requête SQL correspondante :

```
SELECT *
FROM "TMP.DB"
WHERE MODESYNT = 'VPCOND'
OR ( ( MODETRIPS = 'TC' OR MODETRIPS = 'MAP' ) AND NBVPDISPO > NOVEHUTIL AND
PERMIS = 1 )
```

MODETRIPS et MODESYNT sont deux variables qui décrivent le mode de transport utilisé pour chaque déplacement. MODETRIPS est une version agrégée de MODESYNT. NBVPDISPO correspond au nombre de véhicules à disposition du ménage auquel appartient l'individu qui a effectué le déplacement. NOVEHUTIL correspond au nombre de véhicules différents impliqués lors de déplacements au cours de la journée. PERMIS est une variable qui vaut 1 si l'individu est titulaire du permis de conduire.

7.3.1.2 *Population sans voiture particulière disponible*

Cette population a le choix entre transports collectifs (ou passager d'une voiture) et marche à pied. C'est donc tout le reste de l'échantillon non concerné par la possibilité de choix décrite précédemment.

7.3.2 Le traitement du stationnement

Le fait que le stationnement payant ne concerne pour l'essentiel que les déplacements à destination de l'hypercentre, implique de segmenter les déplacements selon que la destination est considérée à stationnement payant ou non.

Cela revient à considérer non plus un mode « voiture particulière » mais deux modes, l'un dénommé « voiture particulière et stationnement payant » (VP SP) et l'autre « voiture particulière et stationnement gratuit » (VP SG).

7.3.3 Modèles séparés

Des considérations précédents il s'ensuit que :

- une séparation sera d'abord effectuée selon que le choix de la voiture particulière est possible ou non ;
- pour ceux qui ont la possibilité de choix de la voiture, la séparation se fera ensuite entre destination avec stationnement payant et destination avec stationnement gratuit ;
- ensuite le partage se fait d'abord entre voiture particulière et les autres modes (cf. infra) puis pour ces derniers entre transports collectifs et marche à pied ;

- pour ceux qui n'ont pas le choix de la voiture, le partage se fait entre transports collectifs et marche à pied.

Cette démarche est résumée dans le graphique suivant (cf. Figure 20).

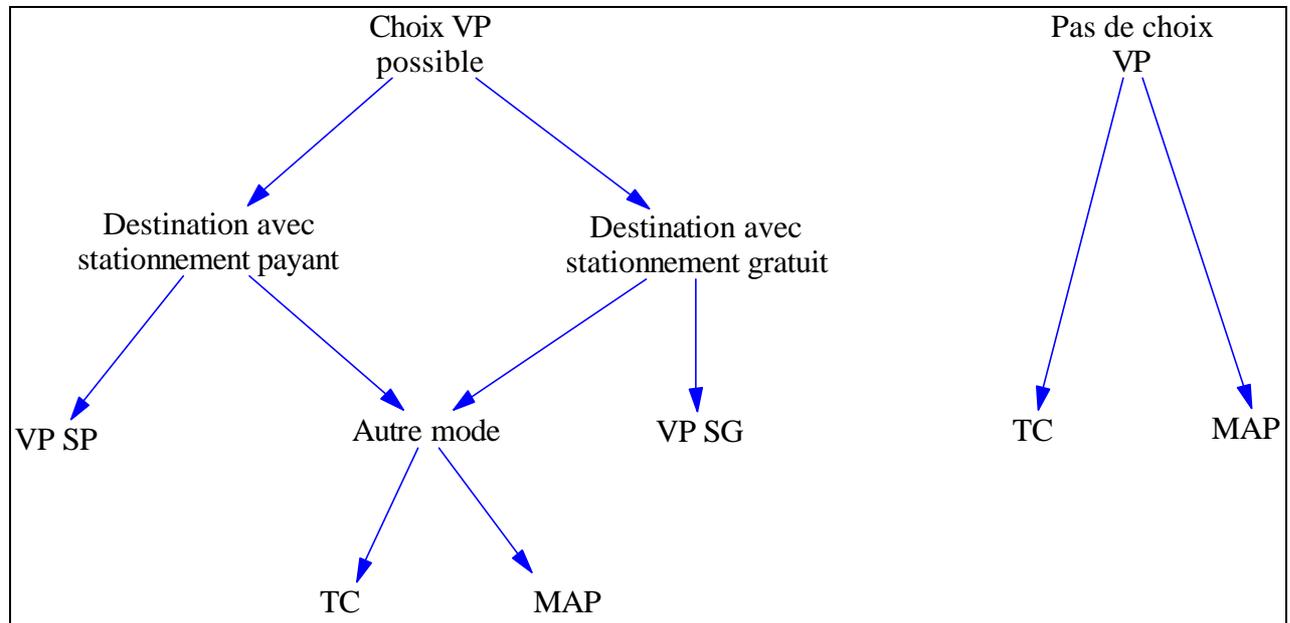


Figure 20 : Schéma de décomposition des modèles

Il reste donc à calibrer par un modèle économétrique le mécanisme de choix entre les modes.

7.4. Les résultats obtenus

Les premières tentatives ont été menées sur la base d'un découpage classique en zones : ces tentatives ont mené à une impasse du fait des limites inhérentes aux données disponibles (cf. Encadré 2). L'approche a ensuite consisté à s'affranchir du zonage pour travailler sur des classes de distances et de vitesses.

Un modèle de choix modal doit être suffisamment général par rapport au contexte local des offres des différents modes et par rapport aux caractéristiques de la demande (situation socio-économique, motifs, heures, etc.) pour garantir sa robustesse d'application. Néanmoins, nous avons choisi dans un premier temps d'aborder le choix modal pour les navettes *domicile-travail* : il s'agit d'une mobilité récurrente, avec des contraintes fortes du point de vue des destinations et des heures de déplacements ; en cela elle se distingue des autres motifs comme les achats ou les loisirs.

Encadré 2 : L'impasse du découpage selon un zonage traditionnel

Le regroupement des déplacements observés par zones origines et destinations découle de la nécessité d'attribuer à ces déplacements un contexte d'offre : en effet, ce contexte d'offre ne peut être décrit que sur la base d'un zonage minimal (cf. section 1). Par ce zonage, est faite implicitement l'hypothèse que ce découpage spatial représente de manière homogène le contexte de choix de déplacement : distance et temps moyens de parcours entre zones, conditions moyennes d'accès aux réseaux depuis le lieu de départ dans la zone i , conditions moyennes d'arrivée au lieu final dans la zone j .

En outre, se rajoute un critère d'ordre statistique, à savoir disposer d'un nombre suffisant d'observations pour chaque flux i,j considéré. Sachant qu'environ 40.000 déplacements ont été enquêtés en 1995 et qu'un découpage en 25 zones implique une matrice de 625 flux, et que l'on considère les motifs de déplacements séparément, les effectifs de chaque case de la matrice deviennent vite très faibles voire nuls.

Nous avons fixé empiriquement le seuil du nombre de déplacements observés à 15, voire 10 dans certains cas, en dessous duquel ce nombre d'observations était jugé insuffisant pour représenter de manière fiable le partage modal pour un flux i,j donné.

Avec ce seuil, pour l'alternative TC / MAP, on ne dispose que de 4 flux analysables.

Pour l'alternative VP SP / Autre mode, on ne dispose que de 5 flux analysables.

Cette approche aboutit à une impasse, puisqu'une agrégation spatiale permettrait de retrouver plus de flux analysables mais en réduisant la qualité des données : en effet, la dispersion autour des valeurs moyennes des différents critères d'offre (temps et coûts) devient inacceptable.

7.4.1 Un découpage par classes de distances et de vitesses

Pour contourner ces difficultés, nous avons choisi d'abandonner le zonage traditionnel et de passer à un découpage en classes de distances et de vitesses. Il s'agit là de regrouper les déplacements observés selon les combinaisons de classes de distance et de vitesse des différents modes.

Un premier travail a donc consisté à créer empiriquement ces catégories combinant distance, vitesse des transports collectifs (VTC) et vitesse de la voiture particulière (VVP). La vitesse de la marche à pied est supposée constante (5 km/h).

La recherche de ces classes s'est faite à l'aide des méthodes de classification de kmeans et ascendante hiérarchique. La formation des classes se faisant initialement au hasard, nous avons fait une première classification kmeans avec 100 classes. Ensuite nous avons traité les barycentres de ces classes à l'aide de l'algorithme cah (classification ascendante hiérarchique). A l'étude des résultats de cette cah, il est apparu que 6 classes étaient suffisantes. Nous avons donc ensuite relancé l'algorithme kmeans avec comme points initiaux les 6 points obtenus pour obtenir 6 classes.

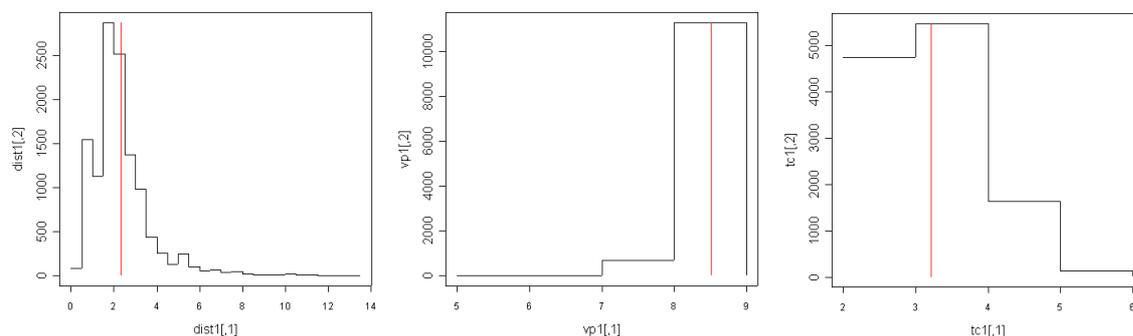
Les classes obtenues ont les propriétés suivantes :

	E[d]	s [d]	E[vvp]	s [vvp]	E[vtc]	s [vtc]
classe 1	2.337607	1.431755	8.509621	0.2450223	3.209530	0.5167536
classe 2	1.116407	0.716369	8.072653	0.6169165	5.017739	0.8107173
classe 3	11.093416	2.562787	19.121113	4.0914630	14.593617	2.8111979
classe 4	17.265164	4.596267	29.197831	5.6142201	16.064921	3.5077716
classe 5	4.478619	2.050533	12.699778	3.0522107	9.856869	1.9107852
classe 6	5.977377	2.314466	21.497686	3.4042821	10.654915	1.8734841

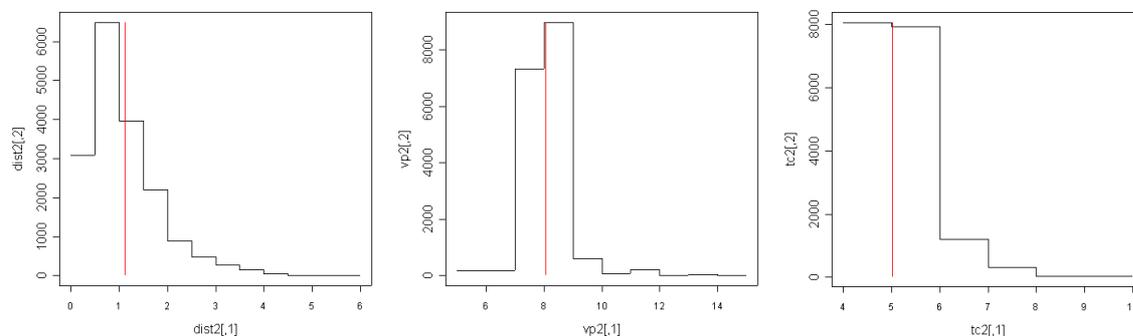
Tableau 6

Les graphiques suivants représentent dans l'ordre les répartitions des distances rectilignes, des vitesses VP et des vitesses TC. La droite rouge représente la valeur moyenne.

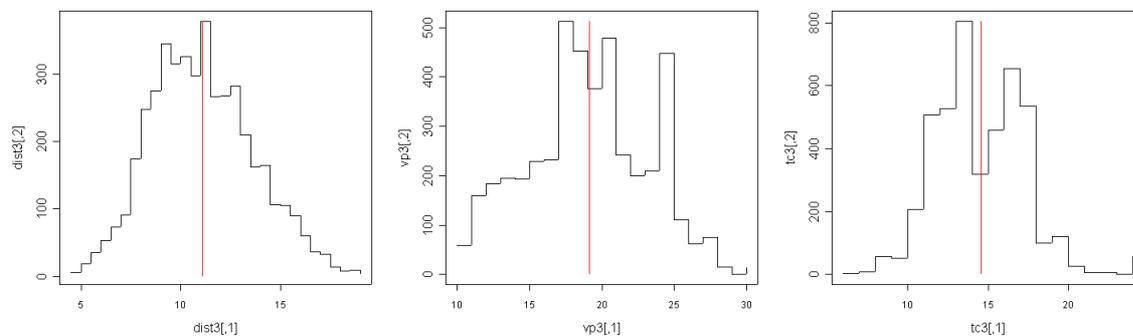
- classe 1



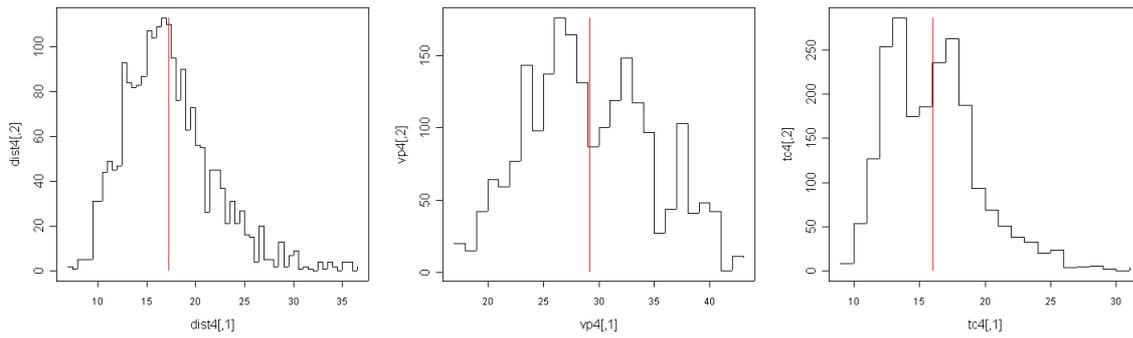
- classe 2



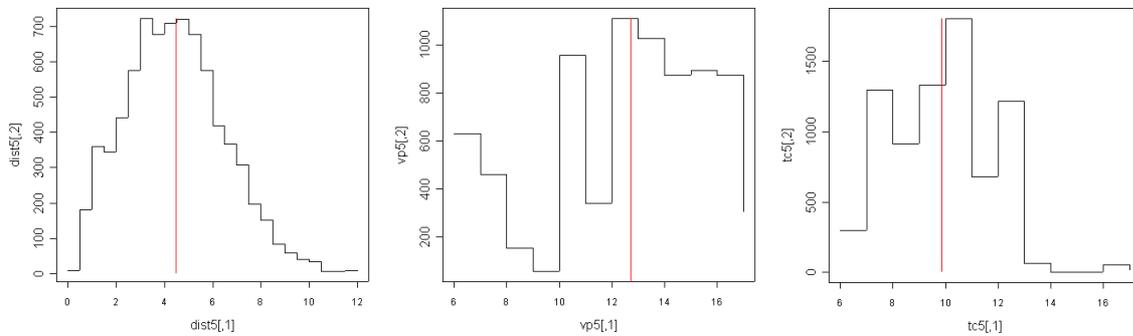
- classe 3



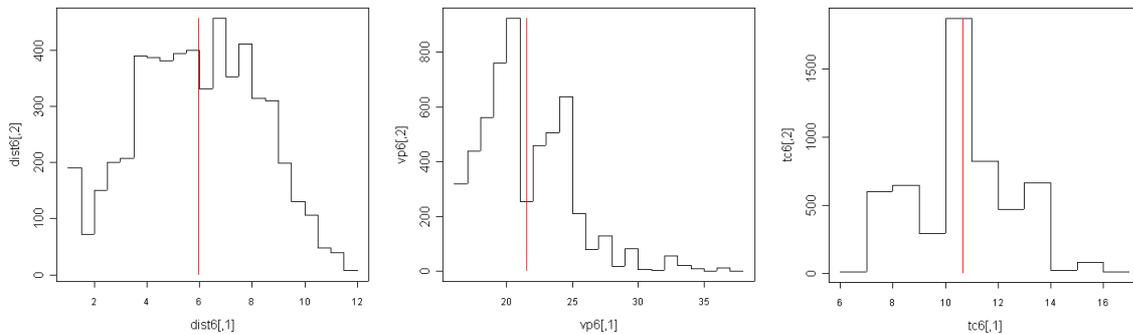
- classe 4



- classe 5



- classe 6



Malheureusement, ces graphiques ne font pas réellement ressortir de classes dans le sens que nous recherchons. En effet il n'y a pas véritable homogénéité des distances ou des vitesses pour chaque classe.

Néanmoins l'examen de ces distributions intra-classes nous permet de déterminer les classes de vitesse suivantes :

VVP	(0,6] (6,10] (10,20] (20,30] (30,40] (40,99]
VTC	(2,4] (4,6] (6,10] (10,15] (15,20] (20,30] (30,99]

Tableau 7

Les « boîtes à moustaches » de Tukey permettent de représenter la distribution des distances selon ces classes de vitesses VP et TC (cf. Figure 21). En haut des cadres est notée la classe de vitesse TC, en ordonnée la classe de vitesse VP et en abscisse la distance.

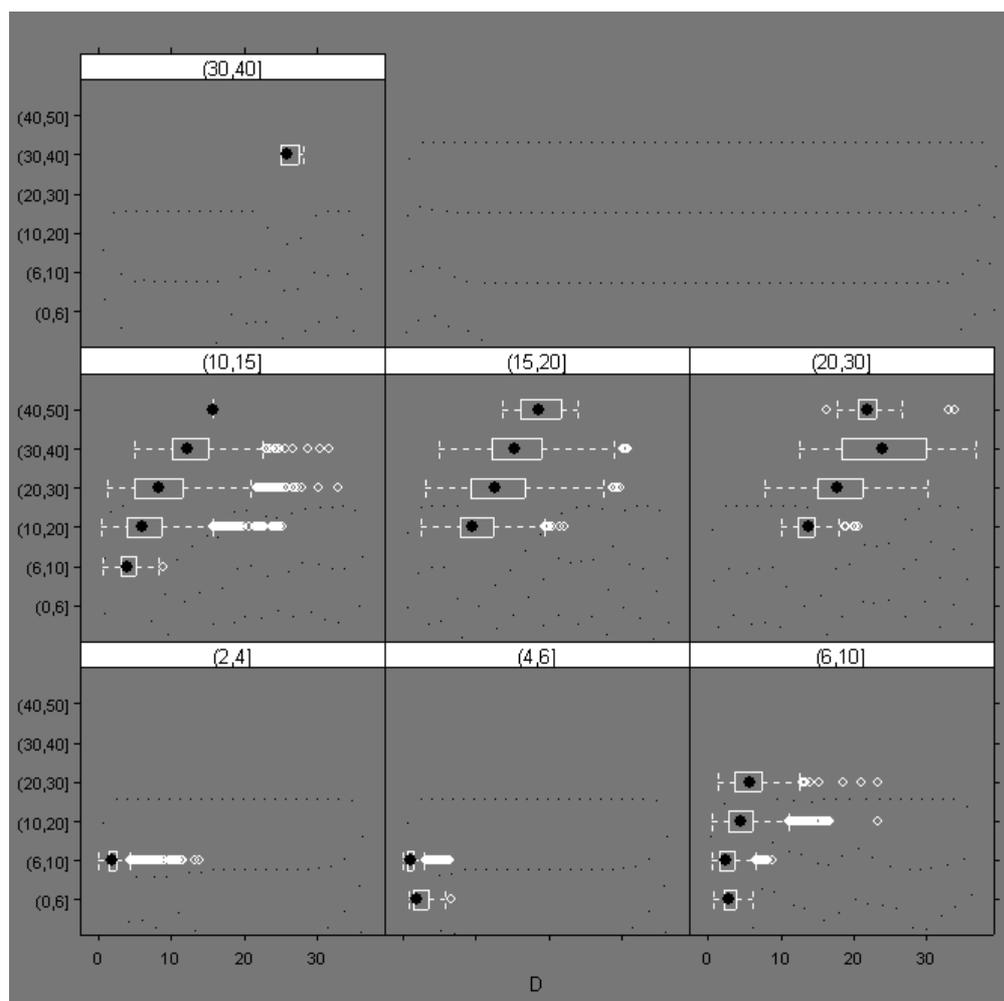


Figure 21

Ce graphique montre notamment que les faibles vitesses des transports collectifs sont liées à de faibles distances de parcours. En outre, selon les combinaisons de vitesses il peut exister de grandes variations dans les distances parcourues.

Nous avons donc choisi un découpage des distances parcourues assez fin au départ (pas de 1 km) pour mieux représenter la concurrence entre marche à pied (pour les plus faibles distances), voiture particulière et transports collectifs. Puis ce pas devient plus grossier au-delà de 5 km.

D	(0,1] (1,2] (2,3] (3,4] (4,5] (5,10] (10,15] (15,20] (20,25] (25,30] (30,99]
---	--

Les distances et vitesses appliquées aux déplacements sont les valeurs centrales des classes auxquelles ils appartiennent.

7.4.2 Les déplacements en situation de choix de la voiture

En ne retenant que les classes de poids statistique suffisant ($N > 15$) on obtient le tableau de données suivant (cf. Tableau 8).

No	CD	CVVP	CVTC	COND	PASS	TC	MAP	TOT	%COND	%PASS	%TC	%MAP	D	VVP	VTC	TVP	CVP	TTC	CTC	TMAP	HiTC	HiMAP	LnHi	Ui
1	(0,1]	(6,10]	(2,4]	22			3	25	88%	0%	0%	12%	0,5	8,0	3,0	3,8	0,0	10,0	0,7	6	0,00	0,880	-0,13	1,1750
2	(0,1]	(6,10]	(4,6]	43		1	14	58	74%	0%	2%	24%	0,5	8,0	5,0	3,8	0,0	6,0	0,7	6	0,00	0,880	-0,13	0,6476
3	(1,2]	(6,10]	(2,4]	120	3		14	137	88%	2%	0%	10%	1,5	8,0	3,0	11,3	0,1	30,0	0,7	18	0,00	0,880	-0,13	1,1548
4	(1,2]	(6,10]	(4,6]	87	2		12	101	86%	2%	0%	12%	1,5	8,0	5,0	11,3	0,1	18,0	0,7	18	0,00	0,880	-0,13	1,0866
5	(2,3]	(6,10]	(2,4]	135	3	2	12	152	89%	2%	1%	8%	2,5	8,0	3,0	18,8	0,2	50,0	0,7	30	0,00	0,880	-0,13	1,2168
6	(2,3]	(6,10]	(4,6]	80	1		1	82	98%	1%	0%	1%	2,5	8,0	5,0	18,8	0,2	30,0	0,7	30	0,00	0,880	-0,13	1,9705
7	(3,4]	(6,10]	(2,4]	70			3	73	96%	0%	0%	4%	3,5	8,0	3,0	26,3	0,2	70,0	0,7	42	0,00	0,880	-0,13	1,7381
8	(3,4]	(6,10]	(4,6]	38		2	1	41	93%	0%	5%	2%	3,5	8,0	5,0	26,3	0,2	42,0	0,7	42	0,00	0,880	-0,13	1,4526
9	(5,10]	(10,20]	(6,10]	158	3	2	3	166	95%	2%	1%	2%	7,5	15,0	8,0	30,0	0,5	56,3	0,7	90	0,00	0,495	-0,70	1,6626
10	(5,10]	(10,20]	(15,20]	24		2		26	92%	0%	8%	0%	7,5	15,0	17,5	30,0	0,5	25,7	0,7	90	2,25	0,495	0,81	1,4261
11	(5,10]	(20,30]	(10,15]	176	5	3	1	185	95%	3%	2%	1%	7,5	25,0	12,5	18,0	0,5	36,0	0,7	90	0,00	0,413	-0,89	1,6581
12	(10,15]	(10,20]	(10,15]	34			1	35	97%	0%	0%	3%	12,5	15,0	12,5	50,0	0,8	60,0	0,7	150	1,02	0,495	0,02	1,9022
13	(10,15]	(20,30]	(10,15]	114		3	2	119	96%	0%	3%	2%	12,5	25,0	12,5	30,0	0,8	60,0	0,7	150	0,34	0,413	-0,89	1,7277
14	(15,20]	(20,30]	(10,15]	29		1		30	97%	0%	3%	0%	17,5	25,0	12,5	42,0	1,2	84,0	0,7	210	0,71	0,413	-0,34	1,8339
15	(20,25]	(20,30]	(15,20]	22	1	1		24	92%	4%	4%	0%	22,5	25,0	17,5	54,0	1,5	77,1	0,7	270	2,15	0,413	0,77	1,3830
16	(5,10]	(10,20]	(10,15]	7		18	1	26	27%	0%	69%	4%	7,5	15,0	12,5	30,0	3,5	36,0	0,7	90	28,88	3,544	3,36	-0,6151
17	(2,3]	(6,10]	(4,10]	3		20	3	26	12%	0%	77%	12%	2,5	8,0	7,0	18,8	3,2	21,4	0,7	30	57,31	17,141	4,05	-1,1984
18	(3,4]	(6,20]	(6,15]	6		12	2	20	30%	0%	60%	10%	3,5	13,0	10,0	16,2	3,3	21,0	0,7	42	32,49	7,614	3,48	-0,5244

Tableau 8 :

CD, CVVP et CVTC sont les catégories de distance (D), vitesse VP (VVP) et vitesse TC (VTC). COND (voiture conducteur), PASS (voiture passager), TC (transports collectifs) et MAP (marche à pied) sont les nombres respectifs de déplacements observés selon les modes correspondants. TOT est le nombre total de déplacements dans la classe. CTC et CVP sont les coûts en euros des modes TC et VP. TTC, TVP, TMAP sont les durées des déplacements, calculées à partir des valeurs centrales des classes.

HiTC et HiMAP sont les h_i respectifs des modes TC et MAP (valeurs du temps d'indifférence entre le mode et la voiture particulière, cf. annexe page 139). Au mode voiture particulière est opposé le mode ayant le h_i le plus grand. U_i est calculé à partir de la part modale du mode ayant le h_i le plus grand.

7.4.2.1 Un premier modèle général

Les cas VPSG (15 premières observations dans le Tableau 8) et VPSP (trois dernières observations) sont regroupés pour la régression linéaire. Du fait du faible nombre d'observations de VPSP, deux d'entre elles (n° 17 et 18) sont le produit du regroupement de classes adjacentes afin de disposer d'un plus grand nombre de classes (cf. le détail de ces observations Tableau 19 en annexe page 146).

En outre, compte tenu de l'analyse faite des coûts de stationnement déclarés (cf. supra) ce dernier a été fixé à une valeur moyenne forfaitaire de 20 FF (soit 3,05 €), correspondant à l'hypothèse d'un stationnement de 8 h pour la journée de travail, pour chacune de ces 3 observations. Ce coût vient s'ajouter au coût kilométrique de la voiture.

Si l'on place les points sur un graphique l'on obtient :

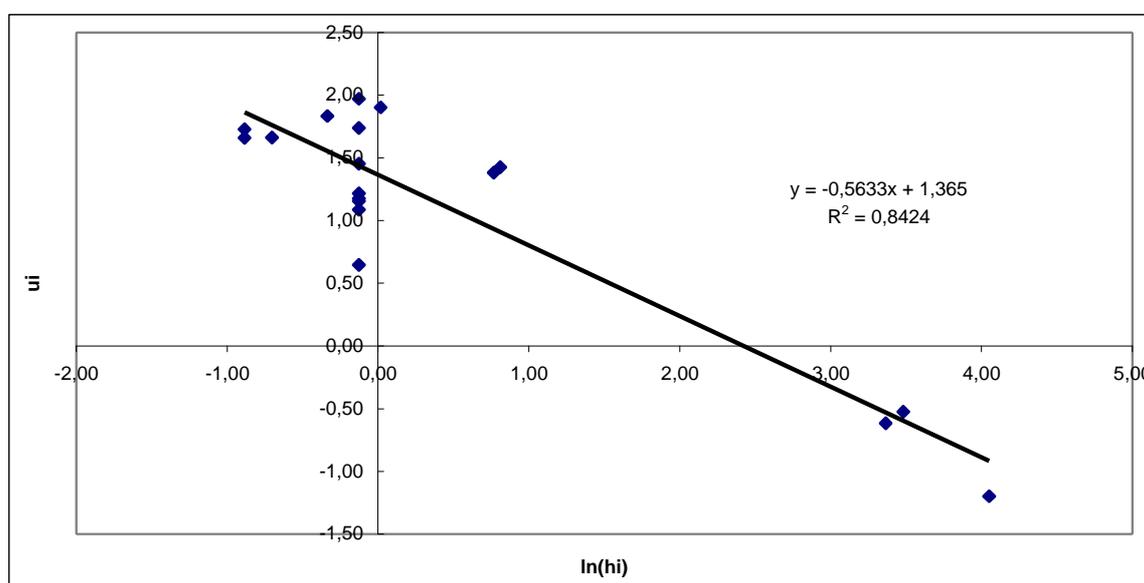


Figure 22 : Graphe des observations et droite de régression

On peut s'interroger sur la distribution des observations, notamment la ligne quasi-verticale de points correspondant à l'abscisse $-0,13 (\ln(h_i))$: c'est le seuil d'indifférence de la valeur du temps de la marche à pied comme alternative à la voiture, soit 0,88 €/h ; les transports

collectifs n'interviennent pas dans le choix car à la fois plus lents et plus coûteux que la voiture particulière (cf. supra) ; cette valeur unique découle de ce que ces 8 observations (premières lignes du Tableau 8) correspondent à une même classe de vitesse de la voiture particulière soit entre 6 et 10 km/h (donc une moyenne de 8 km/h). Cette valeur du temps seuil est calculée comme

$$\frac{(c_{vp} - c_{MAP})}{(t_{MAP} - t_{VP})} = \frac{(d * c_{VPu})}{(d * v_{MAP} - d * v_{VP})} = \frac{c_{VPu}}{(v_{MAP} - v_{VP})}$$

où d est la distance, c_{MAP} le coût monétaire de la marche à pied considéré comme nul, c_{VPu} le coût unitaire kilométrique d'usage de la voiture, v_{MAP} la vitesse de la marche à pied (constante 5 km/h) et v_{VP} la vitesse de la voiture particulière. Pour une classe donnée de vitesse de la voiture particulière cette valeur du temps seuil est donc constante.

Pour ce jeu d'observations l'ordonnée u_i varie entre 0,65 et 1,97, c'est-à-dire que la part modale de la voiture particulière varie entre 74% et 98%. Cela indique l'erreur minimale que l'on commettra avec le modèle en comparant la voiture particulière à la marche à pied (pour ces distances inférieures à 4 km). Cela indique également qu'il sera nécessaire d'apporter des améliorations dans la représentation des termes coûts et temps de l'alternative entre marche à pied et voiture particulière.

La régression linéaire de u_i sur $\ln(h_i)$ sous R nous donne (Figure 23) :

```

> ll<-lm(UI~LNHI)
> summary(ll)

Call:
lm(formula = UI ~ LNHI)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.78944 -0.25159 -0.09206  0.29548  0.54661

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.36503    0.09454  14.439 1.35e-10 ***
LNHI        -0.56330    0.06090  -9.249 8.05e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3814 on 16 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.8424,    Adjusted R-squared:  0.8326
F-statistic: 85.54 on 1 and 16 DF,  p-value: 8.048e-08

> confint(ll)
                2.5 %      97.5 %
(Intercept)  1.1646213  1.5654390
LNHI        -0.6924085 -0.4341868
>

```

Figure 23 : Modèle I

La statistique du F avec une probabilité critique de $8,05 \text{ e-}08$ indique que le modèle I est significatif. L'effet de $\ln(h_i)$, correspondant à la valeur du temps seuil, sur u_i , part modale, est également significatif (avec une probabilité critique identique).

En utilisant les relations du modèle prix-temps (cf. annexe), on trouve

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \frac{1,3650}{0,5633} = 2,423 \\ \mathbf{s} = \frac{1}{0,5633} = 1,775 \end{array} \right. \quad \text{Modèle I}$$

Ceci nous donne par conséquent une valeur médiane du temps de

$$e^m = e^{2,423} = 11,28 \text{ €}$$

et une moyenne $\mathbf{m} = \exp(m + \mathbf{s}^2 / 2) = 54,54 \text{ €}$

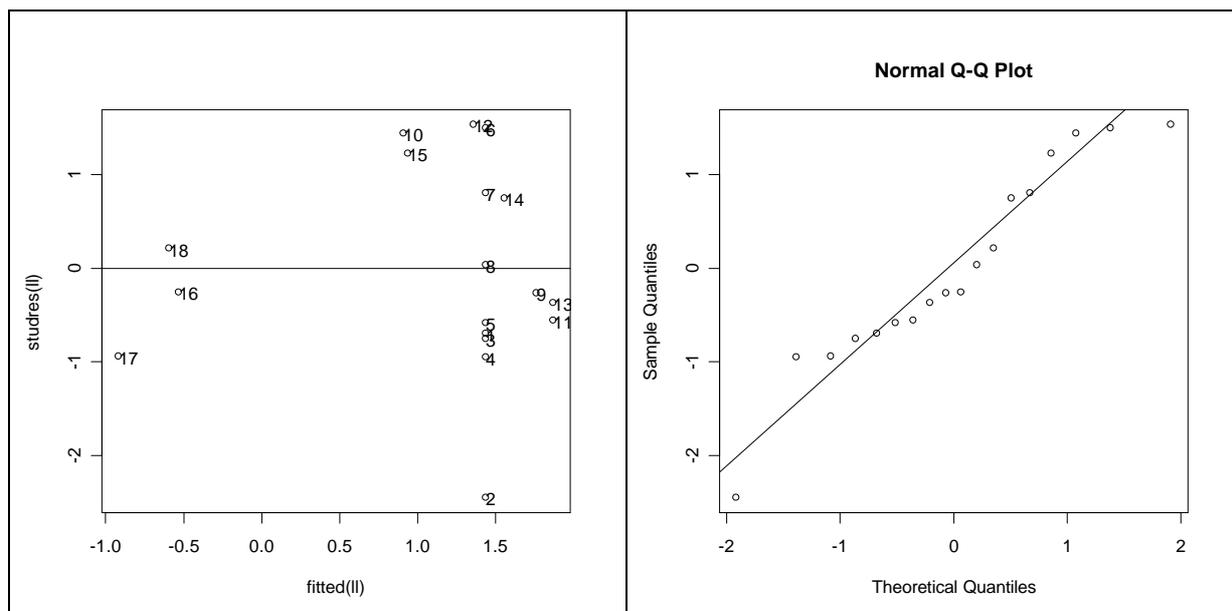


Figure 24 : Graphiques de diagnostics de la régression du modèle I

Le graphique des quantiles des résidus « studentisés »⁸ (Venables et Ripley, 1999) par rapport à une distribution normale montre une distribution des résidus acceptable (cf. Figure 24, graphique de droite).

Le contrôle des observations peut être effectué visuellement sur la Figure 22 où l'on voit que les trois dernières observations (n° 16, 17, 18) ont un effet de levier important. Un contrôle sous R, en évaluant l'effet levier (distance à la moyenne des x) (cf. Figure 25), permet de confirmer que ces trois observations ont un effet de levier supérieur à la moyenne ($((p + 1)/n)$). Cependant, comme l'indique la Figure 24 (partie gauche), parmi ces observations seule la n°17 a un résidu important. Au total c'est cette observation qui a une influence forte sur la régression comme le confirme la distance de Cook (combinant effet de levier et ampleur du résidu, et prise ici supérieure à $4/n$).

⁸ Comme les résidus standards, ils sont normés, mais la version « studentisée » est ajustée en ignorant le point courant (aussi appelés « jackknifed »).

```

> ll.hat<-lm.influence(ll)$hat
> cbind(dat,lev=ll.hat)[ll.hat>2/18,]
      lev
16 0.2674837
17 0.3801967
18 0.2851468

> cc<-cooks.distance(ll,lm.influence(ll))
> cc[cc>4/18]
17
0.2723602

```

Figure 25 : Diagnostics sur les résidus du modèle I

On serait donc tenté de réestimer le modèle en excluant cette observation 17. Cependant, on rentre là dans une spirale de tests qui aboutissent à supprimer une à une ces trois observations ayant un effet de levier important : ce dernier ne résulte après tout que de la prise en compte du coût du stationnement (20 FF soit 3,05 €par jour) qui vient s'ajouter au coût kilométrique de la voiture et a pour résultat cet écart important entre les observations avec stationnement payant et celles avec stationnement gratuit sur l'axe des abscisses ($\ln(h_i)$).

7.4.2.2 *Un deuxième modèle traitant séparément la marche à pied*

Par contre il semble plus important de revenir sur les observations où la concurrence s'opère a priori entre marche à pied et voiture particulière : il s'agit des observations n°1 à 9, 11 et 13, celles pour lesquelles la valeur du temps seuil h_i de la marche à pied est supérieure à celle des transports collectifs (plus lents et plus chers que la voiture pour les observations 1 à 9 et 11, ou pas assez compétitifs en temps et coût par rapport à la marche à pied pour l'observation 13). Cependant, l'hypothèse de comparaison avec la marche à pied pour des distances kilométriques élevées n'a pas grand sens. Si l'on se réfère à la Figure 74 page 136 on voit que la part de la marche à pied n'est significative que pour les distances inférieures ou égales à 4 km.

Il vaut donc mieux restreindre l'alternative marche à pied / voiture particulière aux distances inférieures à 4 km : cette alternative doit être modélisée voire extrapolée séparément, comme l'indique la critique que nous avons faite (cf. supra) de la représentation de cette alternative en termes de coût et de temps.

On peut ensuite restreindre le modèle prix-temps à l'alternative transports collectifs / voiture particulière, soit le jeu d'observations 10, 12 et 14 à 18 (en grisé dans le Tableau 8).

Soit le graphique suivant

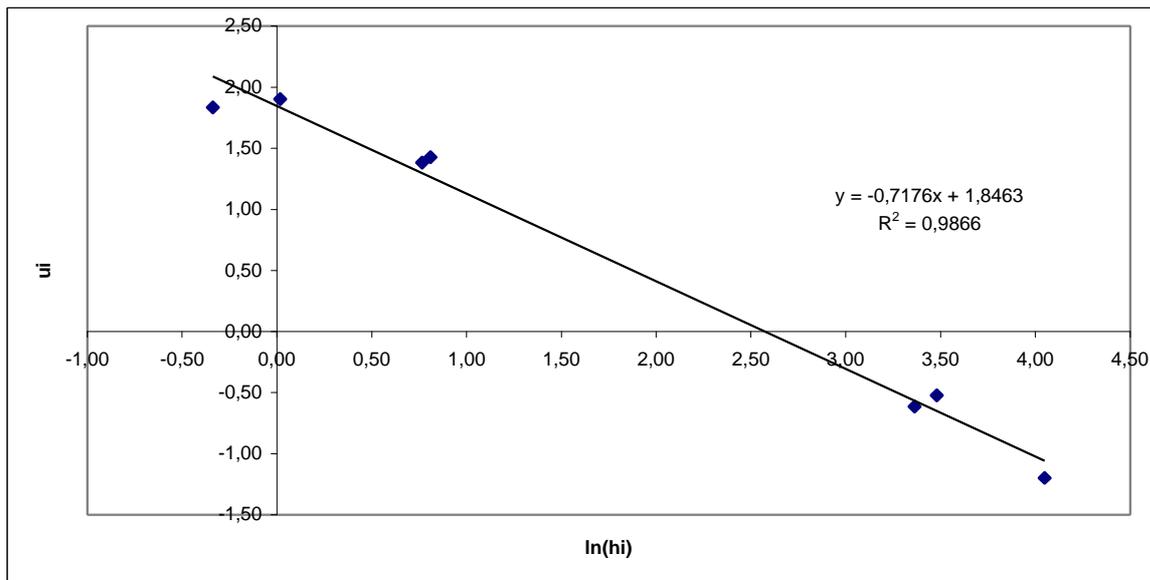


Figure 26 :

La régression sous R donne

```
> l14<-lm(UI~LNHI,dat[-c(1:9,11,13),])
+ )
> summary(l14)

Call:
lm(formula = UI ~ LNHI, data = dat[-c(1:9, 11, 13), ])

Residuals:
    10     12     14     15     16     17     18 
0.16082  0.06790 -0.25462  0.08614 -0.04793 -0.13956  0.12725

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.84632     0.09075   20.34 5.31e-06 ***
LNHI        -0.71760     0.03742  -19.18 7.11e-06 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1677 on 5 degrees of freedom
Multiple R-Squared:  0.9866,    Adjusted R-squared:  0.9839 
F-statistic: 367.8 on 1 and 5 DF,  p-value: 7.11e-06

> confint(l14)

            2.5 %      97.5 %
(Intercept)  1.6130309  2.0796164
LNHI        -0.8137853 -0.6214053
```

Figure 27 : Modèle II

La qualité de la régression est hautement améliorée et les paramètres sont les suivants

$m = 2,573$, $s = 1,39$, $méd = 13,1$, $m = 34,6$

modèle II

Si nous traçons la loi log-normale correspondante aux paramètres obtenus, nous avons :

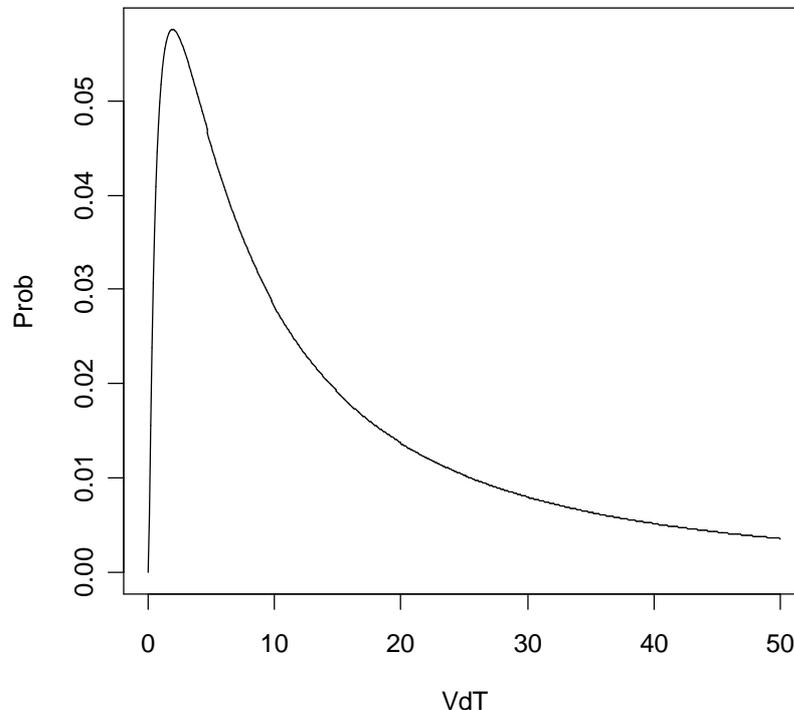


Figure 28 : Densité de la loi lognormale Modèle II ($m=2.573$, $s =1.39$)

Une valeur du temps médiane de 13,1 €/h (environ 86 FF/h) et moyenne de l'ordre de 35 €/h (plus de 230 FF/h) sont d'ordre de grandeur respectivement moins élevé et plus élevé que les valeurs du temps trouvées par de Palma et Fontan (2001) pour une distribution log-normale des valeurs du temps pour des utilisateurs de la voiture particulière et des transports collectifs en Ile-de-France. Cela dénote pour notre distribution des valeurs du temps, une distribution plus asymétrique, à la fois plus concentrée sur les faibles valeurs et plus étirée vers les fortes valeurs (cf. Figure 28).

Le projet européen TRACE (1998) recense également des valeurs du temps européennes, tournant autour de 5 à 8 ECU/h (ou €1998) pour les navetteurs domicile-travail en voiture. Cependant il s'agit de valeurs issues de modèles aux spécifications différentes.

D'une manière générale on ne peut pas en toute rigueur comparer des valeurs issues de modèles aux spécifications différentes.

Enfin la comparaison des prédictions du modèle avec les observations permet de compléter le diagnostic du modèle. L'erreur relative calculée est la suivante (cf. Tableau 9)

(Dép VP modèle – Dép VP enquête)

Dép total

Cette expression donne l'erreur commise en affectant de manière erronée des déplacements à la voiture particulière relativement au nombre total de déplacements. Il s'agit donc d'une erreur de répartition modale.

No	Dép. VPCOND enquête	Dép. TOTAL	Dép. VPCOND modèle	Erreur/TOTAL
1	22	25	24	8%
2	43	58	56	22%
3	120	137	133	9%
4	87	101	98	11%
5	135	152	148	9%
6	80	82	80	0%
7	70	73	71	1%
8	38	41	40	5%
9	158	166	164	4%
10	24	26	23	-4%
11	176	185	184	4%
12	34	35	34	0%
13	114	119	118	3%
14	29	30	29	0%
15	22	24	22	0%
16	7	26	7	0%
17	3	26	4	4%
18	6	20	5	-5%

Tableau 9 : Comparaison observations / Modèle II

Ce tableau montre que l'erreur des prédictions sur le partage modal transports collectifs / voiture particulière (lignes 10, 12 et 14 à 18) est inférieur à $\pm 5\%$. C'est également le cas pour les autres observations qui n'ont pas été incluses dans le calage du modèle, sauf pour les observations 1 à 5 sur le partage entre marche à pied et voiture particulière : il s'agit des déplacements de moins de 3 km pour lesquels, comme nous l'avons dit, la répartition entre marche à pied et voiture particulière doit être affinée.

7.4.2.3 Une meilleure prise en compte de la marche à pied

On reconsidère cette fois-ci les déplacements sur les classes de distances de moins de 4 km. Sur d'aussi courtes distances les incertitudes de mesure des distances réelles (reconstituées ici à partir d'un découpage en zones) et des temps de parcours, que ce soit en marche à pied ou par un mode motorisé, ont un impact encore plus fort sur toute tentative de modélisation.

On peut d'abord observer la part des déplacements effectués en marche à pied selon la distance, indépendamment des conditions de concurrence de la voiture particulière (dans nos données observées les transports collectifs n'interviennent pas sur ces distances car à la fois plus lents et plus chers que la voiture).

En regroupant nos observations précédentes selon les classes de distance, on obtient le Tableau 10.

CD	CVVP	COND	PASS	TC	MAP	TOT	%MAP	D
(0,1]	(6,10]	65		1	17	83	20%	0,5
(1,2]	(6,10]	207	5		26	238	11%	1,5
(2,3]	(6,10]	218	4	22	16	260	6%	2,5
(3,4]	(6,20]	114		14	6	134	4%	3,5

Tableau 10 : Part de la marche à pied selon les classes de distance

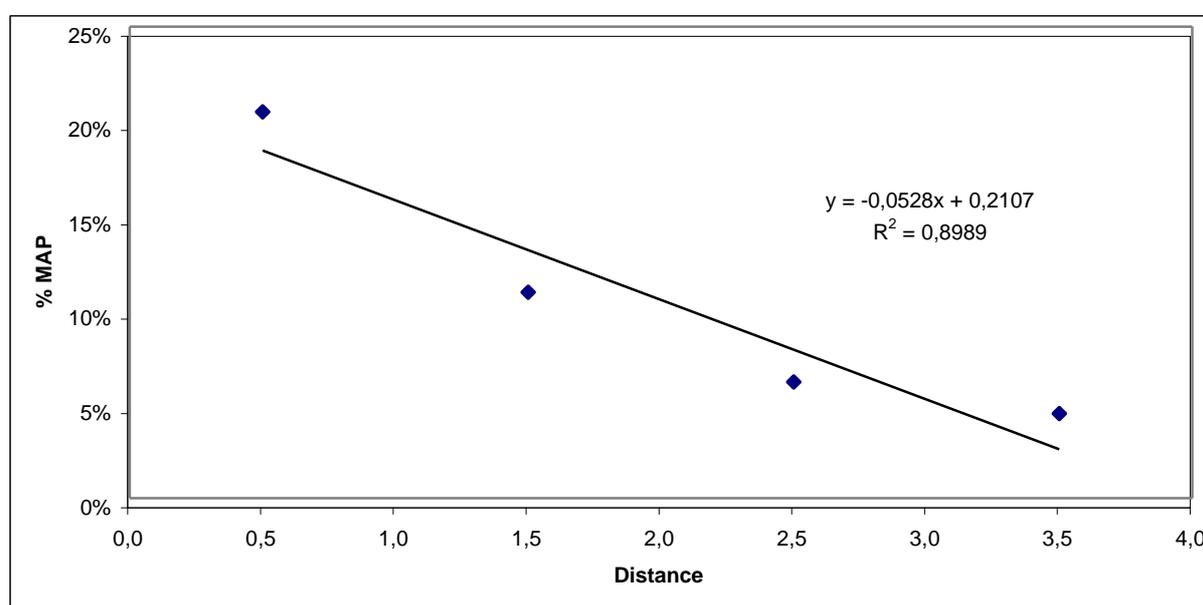


Figure 29 : Part de la marche à pied en fonction de la distance moyenne de déplacement

Cette allure des observations suggère donc un modèle linéaire simple de décroissance de la part de la marche à pied selon la distance. Il serait illusoire d'affiner le modèle avec une formulation non linéaire, compte tenu de l'incertitude qui pèse sur les données.

L'hypothèse que nous adoptons est que à moins de 4 km, la part de la marche à pied est indépendante des conditions de concurrence des autres modes (rappelons que nous étudions pour l'instant la mobilité domicile-travail de ceux qui ont le choix de la voiture particulière) et ne dépend que de la distance. Elle s'annule au-delà de 4 km.

Le modèle II bis finalement retenu est le suivant :

- en deçà de 4 km la part des déplacements en marche à pied est calculée sur le nombre total de déplacements selon le modèle $P_{map} = -0,053 * dist + 0,21$
- on en déduit le nombre total de déplacements motorisés
- dans ce total de déplacements motorisés on applique le modèle prix-temps (modèle II) pour déduire les parts respectives de la voiture particulière et des transports collectifs.

Ce qui donne le tableau suivant

No	D	Dép. VPCOND enquête	Dép. TC enquête	Dép. MAP enquête	Dép. TOTAL	Modèle MAP	ER MAP / TOTAL	Modèle motorisés	Modèle pxtps VP	ER VP / TOTAL	Modèle TC	ER TC / TOTAL
1	0,5	22		3	25	5	6%	20	20	-6%	0	0%
2	0,5	43	1	14	58	11	-6%	47	47	8%	0	-2%
3	1,5	120		14	137	18	3%	119	119	-1%	0	0%
4	1,5	87		12	101	13	1%	88	88	1%	0	0%
5	2,5	135	2	12	152	12	0%	140	140	3%	0	-1%
6	2,5	80		1	82	6	7%	76	76	-5%	0	0%
7	3,5	70		3	73	2	-2%	71	71	2%	0	0%
8	3,5	38	2	1	41	1	0%	40	40	5%	0	-5%
9	7,5	158	2	3	166			166	166	5%	0	-1%
10	7,5	24	2		26			26	23	-4%	3	4%
11	7,5	176	3	1	185			185	185	5%	0	-2%
12	12,5	34		1	35			35	34	0%	1	3%
13	12,5	114	3	2	119			119	118	3%	1	-2%
14	17,5	29	1		30			30	29	0%	1	0%
15	22,5	22	1		24			24	22	0%	2	4%
16	7,5	7	18	1	26			26	7	0%	19	4%
17	2,5	3	20	3	26	2	-4%	24	3	0%	21	4%
18	3,5	6	12	2	20	0	-8%	20	5	-5%	15	13%

Tableau 11 : Comparaison observations / modèle II bis

On voit donc que les erreurs sont acceptables : entre -8% et +6% pour la marche à pied, entre -5% et +8% pour la voiture particulière, entre et -5% et +13% pour les transports collectifs.

Le schéma de modélisation est modifié (cf. Figure 30).

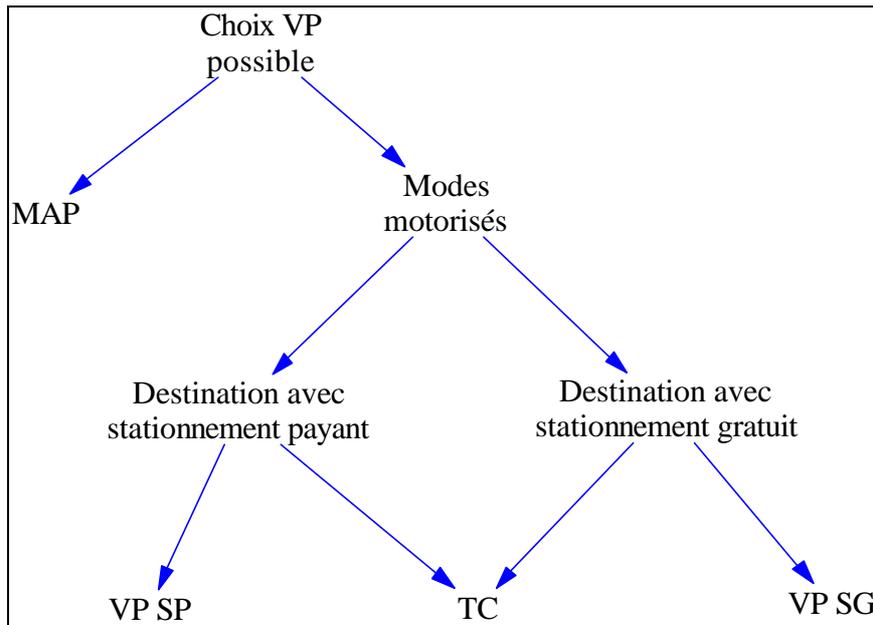


Figure 30 : Schéma de modélisation modifié

7.4.3 Les déplacements en situation de non-choix de la voiture particulière

En ce qui concerne les déplacements effectués par les personnes qui n'ont pas le choix de la voiture particulière (cf. Tableau 12), le choix se réduit à la marche à pied, les transports collectifs et la voiture comme passager.

La démarche adoptée concernant la marche à pied est similaire à celle concernant les autres types de déplacements : on cale un modèle de régression simple sur la part de la marche à pied pour les déplacements de moins de 4 km (soit les lignes 1 à 7 du Tableau 12, cf. Figure 31).

No	CD	CVVP	CVTC	VPPA SS	TC	TOT - MAP	%TOT - MAP	% VPPA SS	%TC	MAP	AUTR ES	TOT	%VPA SS	%TC	%MAP	%AUT RES	D	VVP	VTC	TVP	CVP	TTC	CTC	TMAP
1	(0,1]	(6,10]	(2,4]	2	1	3	20%	67%	33%	12	0	15	13%	7%	80%	0%	0,5	8,0	3,0	4	0,0	10	0,7	6
2	(0,1]	(6,10]	(4,6]	2	5	7	6%	29%	71%	117	3	127	2%	4%	92%	2%	0,5	8,0	5,0	4	0,0	6	0,7	6
3	(1,2]	(6,10]	(2,4]	16	2	18	32%	89%	11%	34	4	56	29%	4%	61%	7%	1,5	8,0	3,0	11	0,0	30	0,7	18
4	(1,2]	(6,10]	(4,6]	14	11	25	25%	56%	44%	70	6	101	14%	11%	69%	6%	1,5	8,0	5,0	11	0,0	18	0,7	18
5	(2,3]	(6,10]	(2,4]	13	2	15	33%	87%	13%	20	10	45	29%	4%	44%	22%	2,5	8,0	3,0	19	0,0	50	0,7	30
6	(2,3]	(6,10]	(4,6]	6	9	15	48%	40%	60%	14	2	31	19%	29%	45%	6%	2,5	8,0	5,0	19	0,0	30	0,7	30
7	(3,4]	(6,10]	(10,15]	3	11	14	93%	21%	79%		1	15	20%	73%	0%	7%	3,5	8,0	12,5	26	0,0	17	0,7	42
8	(5,10]	(10,20]	(6,10]	13	40	53	88%	25%	75%	2	5	60	22%	67%	3%	8%	7,5	15,0	8,0	30	0,0	56	0,7	90
9	(5,10]	(10,20]	(10,15]	15	54	69	88%	22%	78%	2	7	78	19%	69%	3%	9%	7,5	15,0	12,5	30	0,0	36	0,7	90
10	(5,10]	(10,20]	(15,20]	8	25	33	92%	24%	76%	1	2	36	22%	69%	3%	6%	7,5	15,0	17,5	30	0,0	26	0,7	90
11	(5,10]	(20,30]	(10,15]	7	18	25	93%	28%	72%		2	27	26%	67%	0%	7%	7,5	25,0	12,5	18	0,0	36	0,7	90
12	(10,15]	(10,20]	(10,15]	2	26	28	97%	7%	93%		1	29	7%	90%	0%	3%	12,5	15,0	12,5	50	0,0	60	0,7	150
13	(10,15]	(10,20]	(15,20]	3	12	15	100%	20%	80%		0	15	20%	80%	0%	0%	12,5	15,0	17,5	50	0,0	43	0,7	150

Tableau 12 : Déplacements en situation de non-choix de la voiture particulière

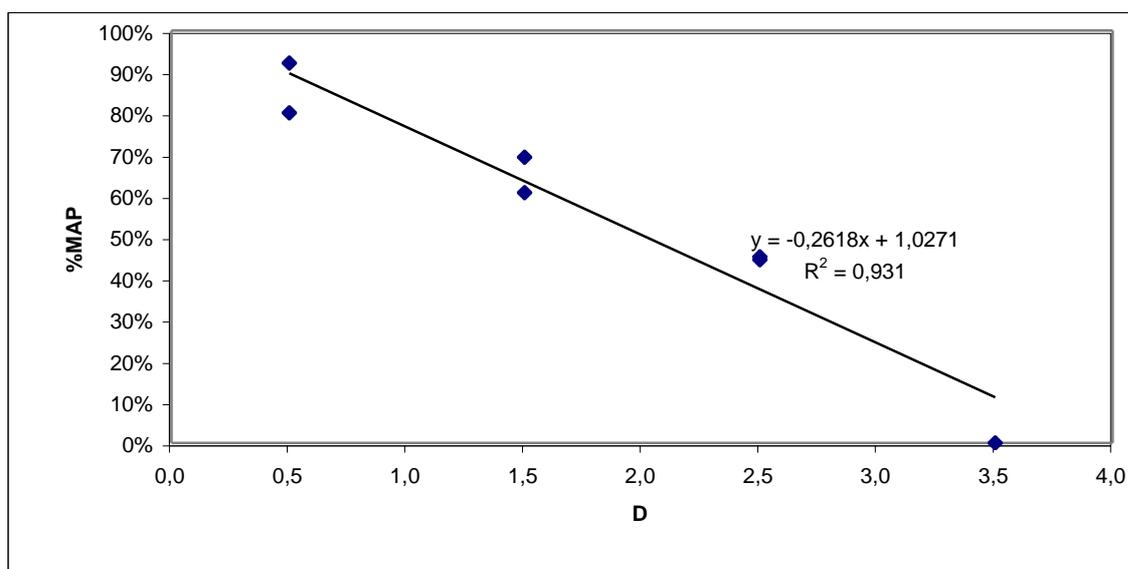


Figure 31 :

Ensuite les déplacements restant doivent être répartis entre transports collectifs et voiture particulière en tant que passager.

Les tentatives de calage d'un modèle de type prix-temps avec ces données se sont révélées infructueuses pour au moins deux raisons :

- L'imputation d'un coût au déplacement en voiture particulière en tant que passager ne semble pas simple.
- Les quantités de déplacements observés sont assez faibles malgré les regroupements par classes de distances et de vitesses, rendant difficile la détection de régularités.

En conséquence nous avons retenu un modèle très simple qui décompose le calcul de la part modale des transports collectifs en fonction de la distance du déplacement et de la vitesse des transports collectifs, selon l'algorithme suivant :

```

Si distance < 3 km et vitesse TC <= 3 km/h
  Alors part TC = 0,15
Sinon
  Si distance <= 5 km
    Alors part TC = 0,6
  Sinon part TC = 0,8

```

Cela signifie que pour les faibles distances et les faibles vitesses la part des TC dans ces déplacements motorisés s'établit à 15% (et la voiture en tant que passager à 85%), pour les distances entre 3 et 5 km, quelle que soit la vitesse, cette part s'établit à 60%, pour les distances supérieures à 5 km, cette part s'établit à 80%.

Les résultats du modèle, comparés aux observations, sont donnés dans le Tableau 13.

On voit que les erreurs de prédiction sur la marche à pied vont de -19% à +12%, sur les modes motorisés de -12% à +19% et sur les transports collectifs de -19% à +8%. Il y a là un évident potentiel d'amélioration, mais qui dépend grandement des données observées. Notons toutefois que ces erreurs ne concernent que la part des déplacements domicile-travail en

situation de non-choix de la voiture particulière soit 592 déplacements observés sur un total de 1918 déplacements domicile-travail observés (soit 31%).

No	VP PASS	TC	MAP	TOT	TOT- MAP	Modèle MAP	ER MAP/TOT	Modèle mot.	ER Mot / TOT	Modèle TC	ER TC/TOT
1	2	1	12	15	3	14	10%	2	-10%	0	-4%
2	2	5	117	124	7	112	-4%	12	4%	4	-1%
3	16	2	34	52	18	33	-1%	19	1%	3	1%
4	14	11	70	95	25	61	-10%	34	10%	15	4%
5	13	2	20	35	15	13	-19%	22	19%	2	1%
6	6	9	14	29	15	11	-10%	18	10%	9	0%
7	3	11		14	14	2	12%	12	-12%	8	-19%
8	13	40	2	55	53			55	4%	42	4%
9	15	54	2	71	69			71	3%	55	2%
10	8	25	1	34	33			34	3%	26	4%
11	7	18		25	25			25	0%	20	8%
12	2	26		28	28			28	0%	22	-13%
13	3	12		15	15			15	0%	12	0%

Tableau 13 : Comparaisons observations / modèle

7.5. Modèle de simulation

Nous présentons tout d'abord le modèle tel qu'il est mis en œuvre sous Vensim, puis les résultats de tests permettant de vérifier la cohérence du modèle.

7.5.1 Présentation du modèle

Le modèle de simulation élaboré sous Vensim traduit donc directement la structure des modèles et les équations économétriques élaborées précédemment.

Ce modèle est élaboré pour les déplacements à destination du travail, une liaison (origine-destination OD), une heure d'arrivée préférée et une heure de départ données. La généralisation à plusieurs liaisons OD, heures d'arrivée préférées et heures de départ, sera faite lors du couplage de ce modèle de répartition modale avec le modèle de choix d'heure de départ et d'affectation.

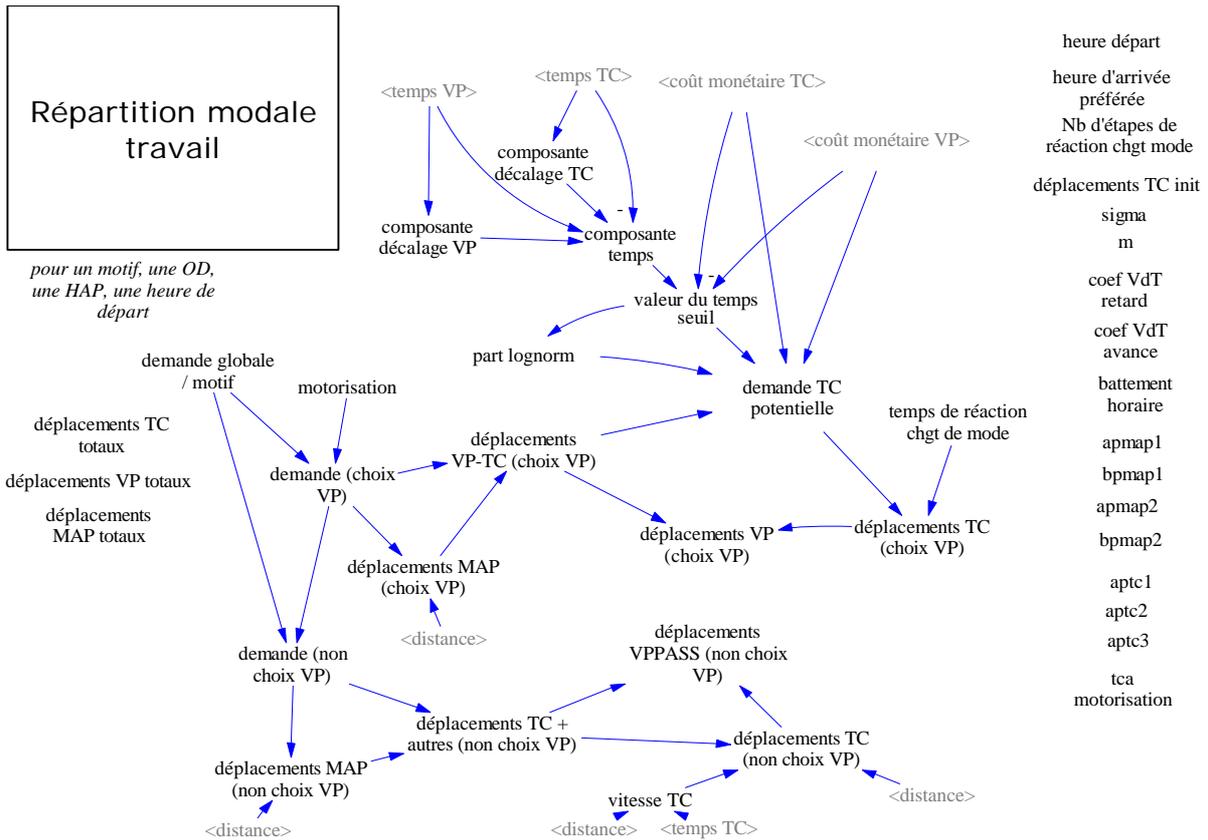


Figure 32 : Structure du modèle de répartition modale sous Vensim

Le modèle sépare d'abord les déplacements en situation de choix de la voiture particulière et ceux en situation de non-choix, en fonction du niveau de motorisation (considéré ici comme exogène). Ces deux paquets de déplacements sont ensuite traités séparément, selon les modèles économétriques élaborés précédemment. Les parts modales globales sont ensuite agrégées dans les variables « déplacements TC totaux », « déplacements VP totaux » et « déplacements MAP totaux ».

On notera que le coût en temps des deux modes (TC et VP) inclut explicitement le coût relatif à la durée du déplacement et ceux relatifs aux arrivées en avance ou en retard, en cohérence avec le modèle de choix d'heure de départ.

En outre, la dynamique est introduite par un retard dans la prise en compte des changements de seuil de valeur du temps : le modèle prix-temps produit une demande TC potentielle, vers laquelle va tendre la demande TC réelle, moyenne des demandes TC potentielles sur un « temps de réaction dans le changement de mode ». Ce temps de réaction est fixé ici à 4 semaines, délai considéré comme minimum pour la prise en considération complète des changements de mode (il s'agit ici de déplacements effectués par des personnes en situation de choix modal entre voiture particulière et transports collectifs).

Hypothèse : de nouvelles perceptions des temps de parcours et coûts des différents modes provoquent une réévaluation des choix modaux. Mais même en cas de distorsion entre les conditions de concurrence et l'optimalité du comportement effectif, il n'y a pas de remise en cause immédiate par l'agent de ses habitudes d'utilisation de modes de transport : un certain délai est nécessaire (cf. travaux de Goodwin).

Les équations sont données en annexe page 147.

7.5.2 Les tests

Avec la distance choisie ($d = 6$ km) les déplacements en marche à pied sont inexistants.

Avec une motorisation constante (77% des déplacements domicile-travail en situation de choix modal en 1995), les 5000 déplacements se répartissent entre 3850 déplacements en situation de choix de la voiture particulière et 1150 en situation de non-choix. Parmi ces derniers 920 vont vers les transports collectifs et 230 vers la voiture-passager. Ce dernier partage ne dépend pas de la vitesse des transports collectifs (cas d'une distance de plus de 5 km).

Les tests suivants vont consister à faire varier isolément :

- Le taux de croissance annuelle de la motorisation
- Les temps de parcours en voiture particulière puis en transports collectifs
- Les coûts du déplacement en voiture particulière puis en transports collectifs.

(On considère ici les temps VP et TC isolément mais ils interagissent à travers la congestion routière.)

7.5.2.1 Tests selon le niveau de motorisation

Taux de croissance annuelle de la motorisation variant de 0 à 5% (0% ; 1,5% ; 2% ; 3% ; 5%)

La variation du taux de motorisation fait d'abord évoluer la part de la demande en situation de choix de la voiture particulière au détriment de ceux qui n'ont pas le choix.

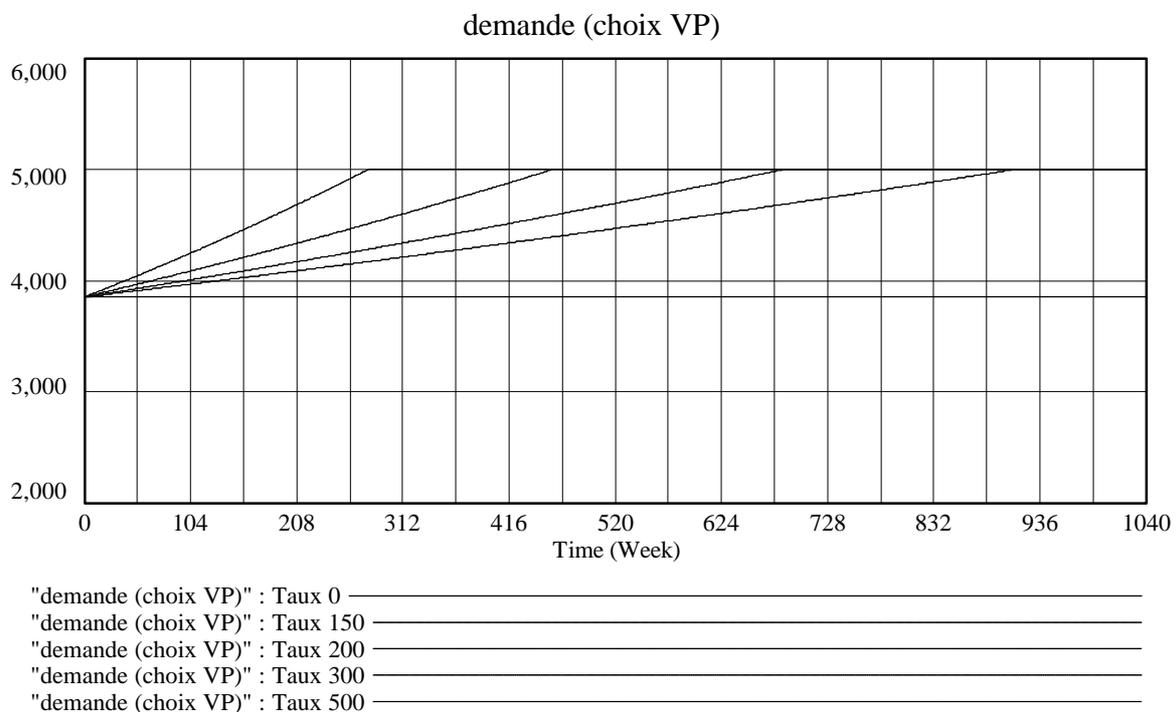


Figure 33

La motorisation est bornée à 1, ce qui fait que la demande en situation de choix de la voiture particulière atteint sa limite (5000 déplacements concernés) au bout d'un temps plus ou moins long (cf. Figure 38).

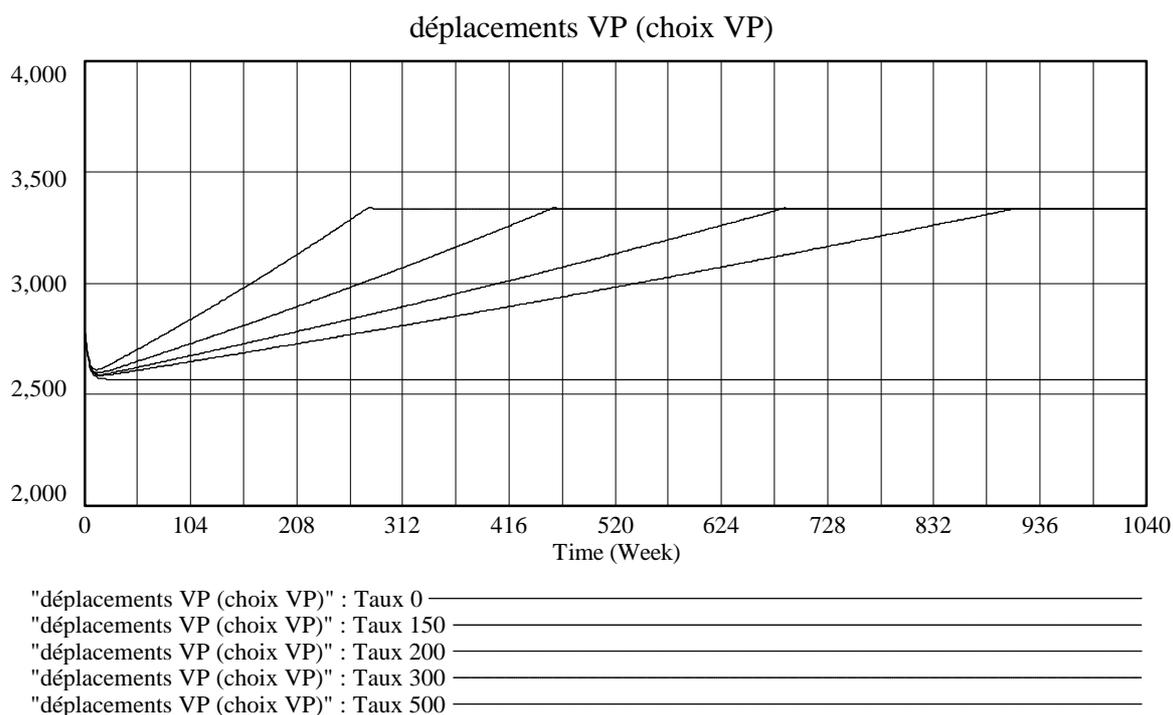


Figure 34

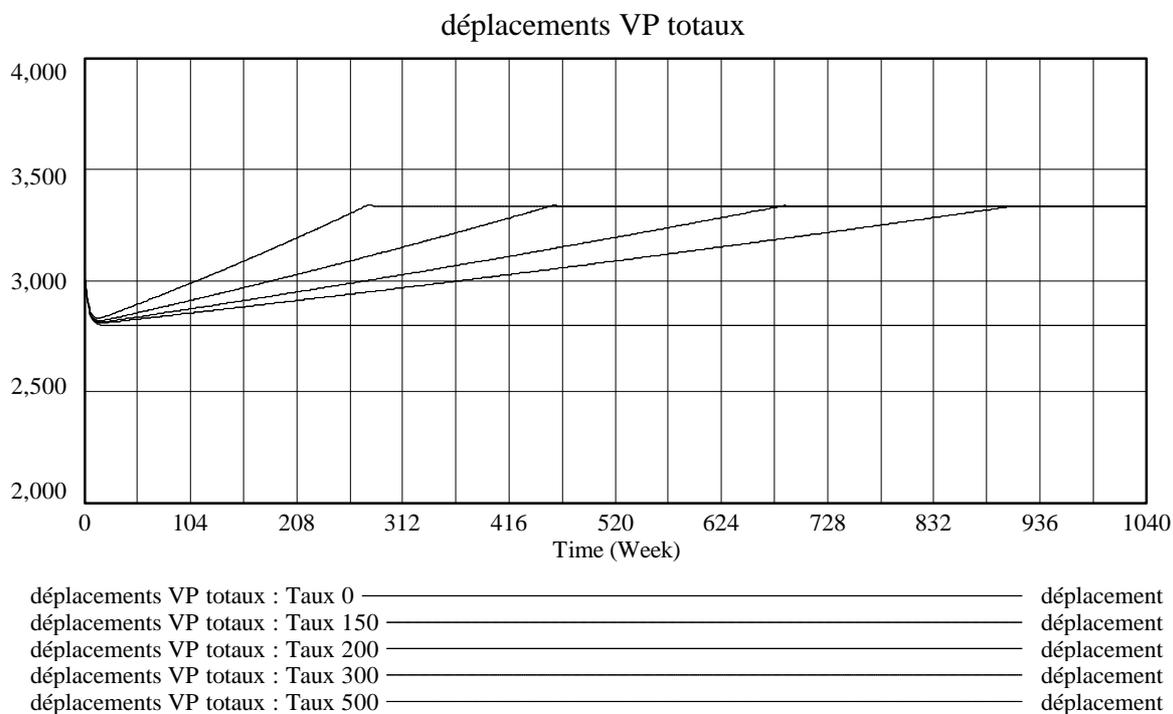


Figure 35

A motorisation constante (« Taux 0 ») les 3850 déplacements en situation de choix se répartissent, comme résultat du modèle prix-temps, en 2567 déplacements en voiture

particulière et 1283 déplacements en transports collectifs. En ajoutant les déplacements en situation de non-choix, on obtient 2797 déplacements en voiture particulière et 2203 déplacements en transports collectifs (cf. Figure 35 et Figure 36, chiffres non portés sur les graphiques).

Quand la motorisation croît chaque année on atteint tôt ou tard le palier de 5000 déplacements en situation de choix. Ces derniers se répartissent, comme résultat du modèle prix-temps, en 3334 déplacements en voiture particulière et 1666 déplacements en transports collectifs.

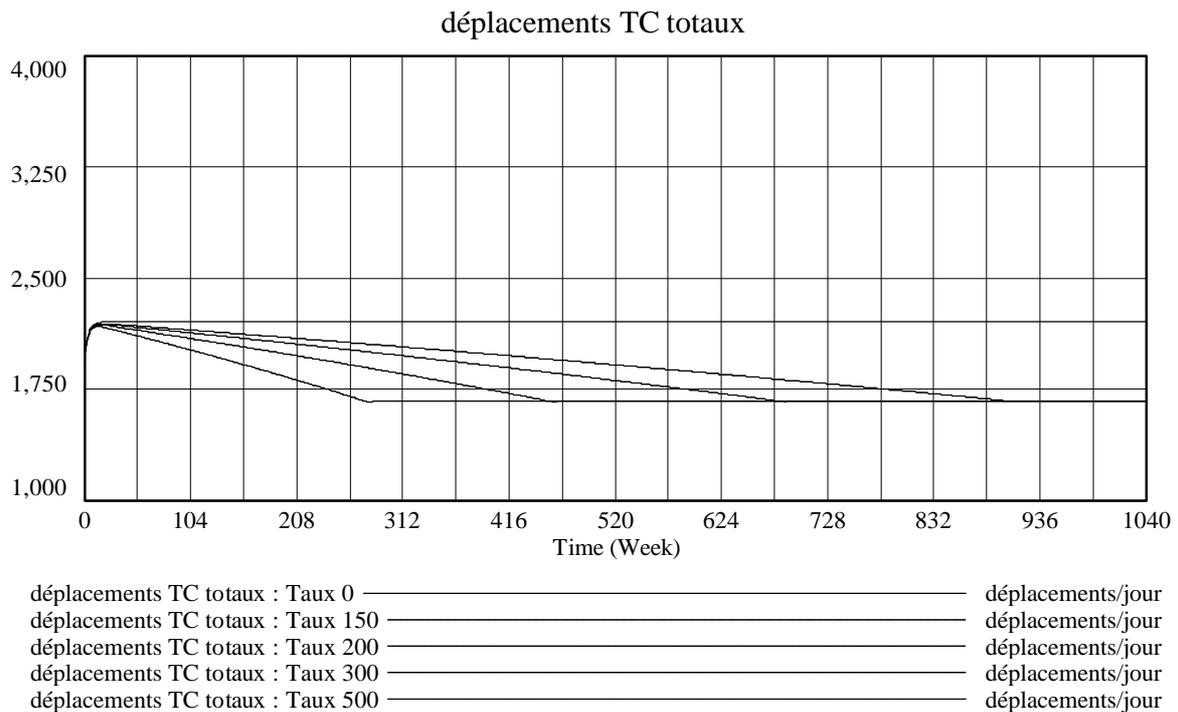


Figure 36

Dans tous les tests qui suivent le taux de croissance annuelle de la motorisation est maintenu à zéro.

7.5.2.2 Tests selon temps VP

Variation du temps VP : 5' à 40'

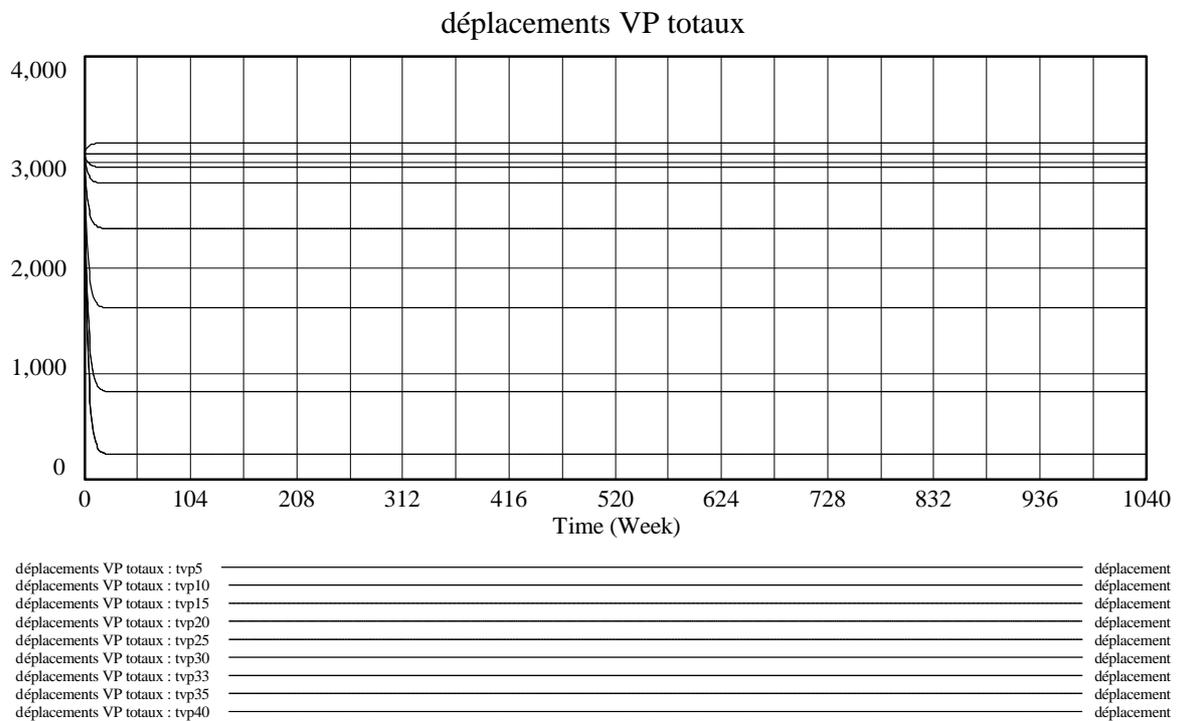


Figure 37

La voiture particulière est plus chère que les transports collectifs (3€ contre 1,2€). Quand son temps de parcours est à 5 mn le modèle prix-temps donne une part de 2945 déplacements en voiture particulière auxquels s'ajoutent les 230 déplacements en voiture-passager de ceux qui n'ont pas le choix, soit 3175 en tout. Quand le temps de parcours augmente le nombre de déplacements en voiture particulière baisse également, jusqu'à buter contre la limite inférieure des 230 déplacements (cf. Figure 37). Cette butée est rencontrée à partir de 35 mn en voiture particulière (le même temps que celui des transports collectifs) : les transports collectifs devenant aussi rapides et étant moins chers, la totalité de la demande en situation de choix se reporte sur les transports collectifs.

La part incompressible des 230 déplacements en voiture-passager découle du fait que ce partage est considéré comme indépendant de la vitesse de la voiture particulière (cf. étude économétrique précédente).

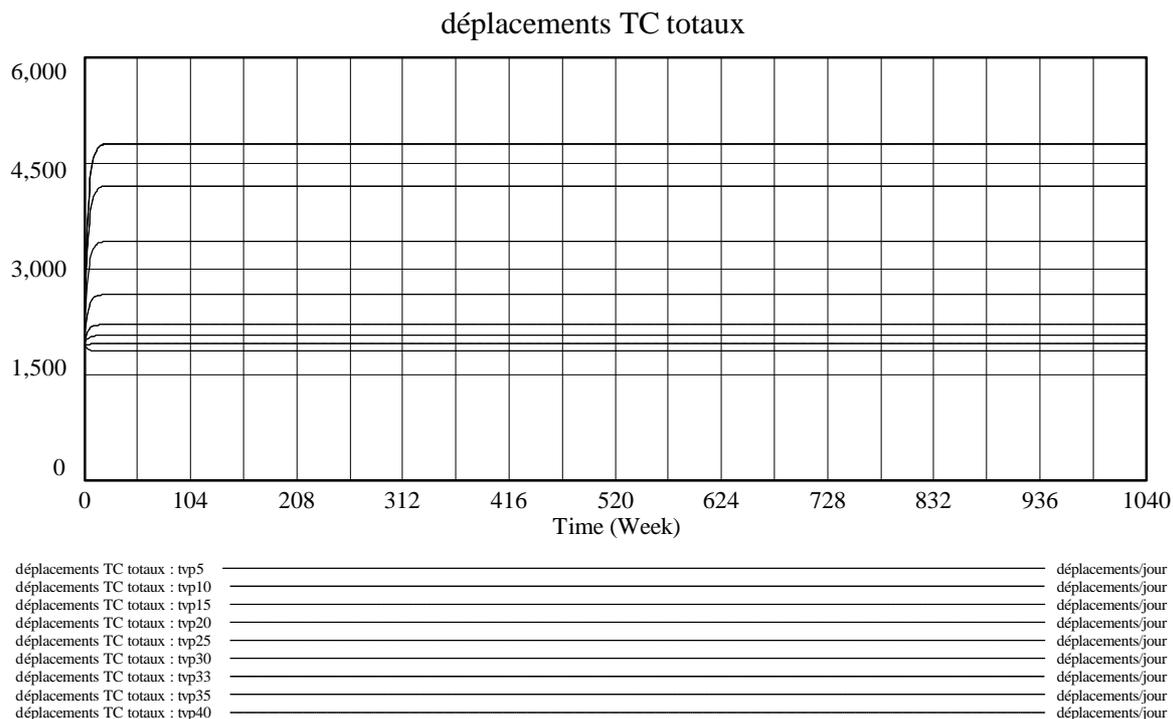


Figure 38

Corrélativement le maximum des déplacements en transports collectifs est atteint pour le temps de 35 mn en voiture particulière avec les 3850 déplacements en situation de choix qui se reportent intégralement sur les transports collectifs et les 920 déplacements en transports collectifs de la part de ceux qui n'ont pas le choix, soit 4770 déplacements au total. Le minimum est atteint pour le temps de 5 mn en voiture particulière avec 905+920=1825 déplacements en transports collectifs.

7.5.2.3 Tests selon temps TC

Variation du temps TC : 10' à 85'

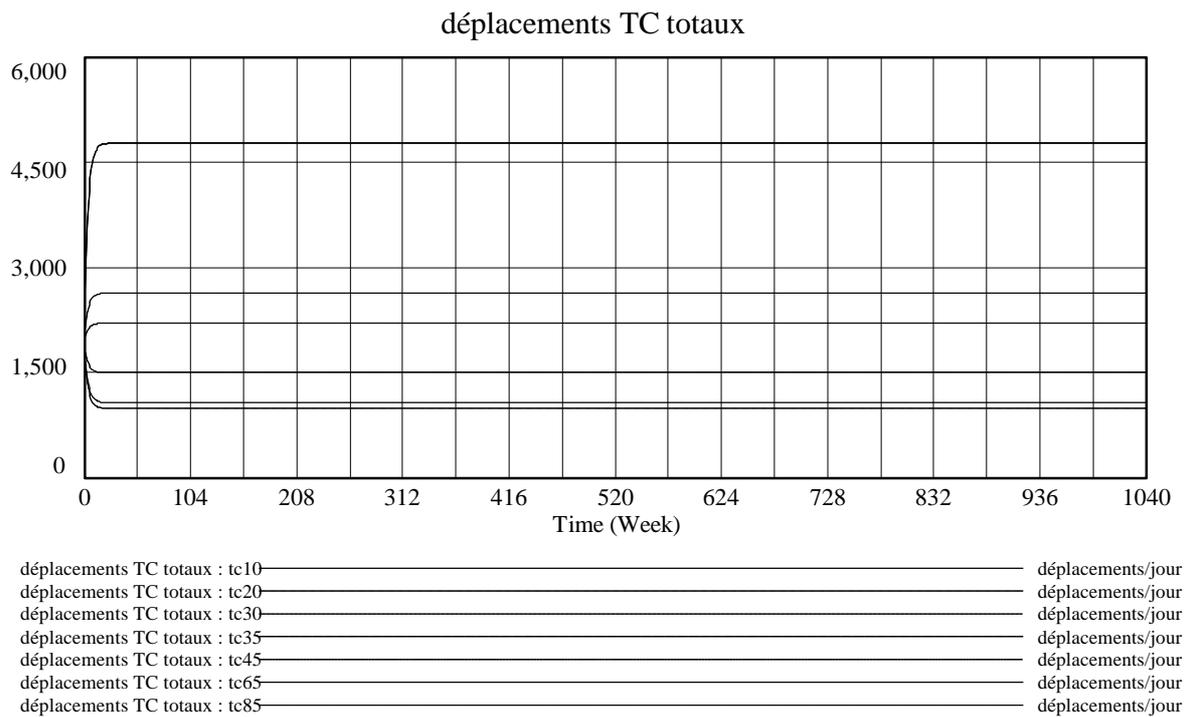


Figure 39

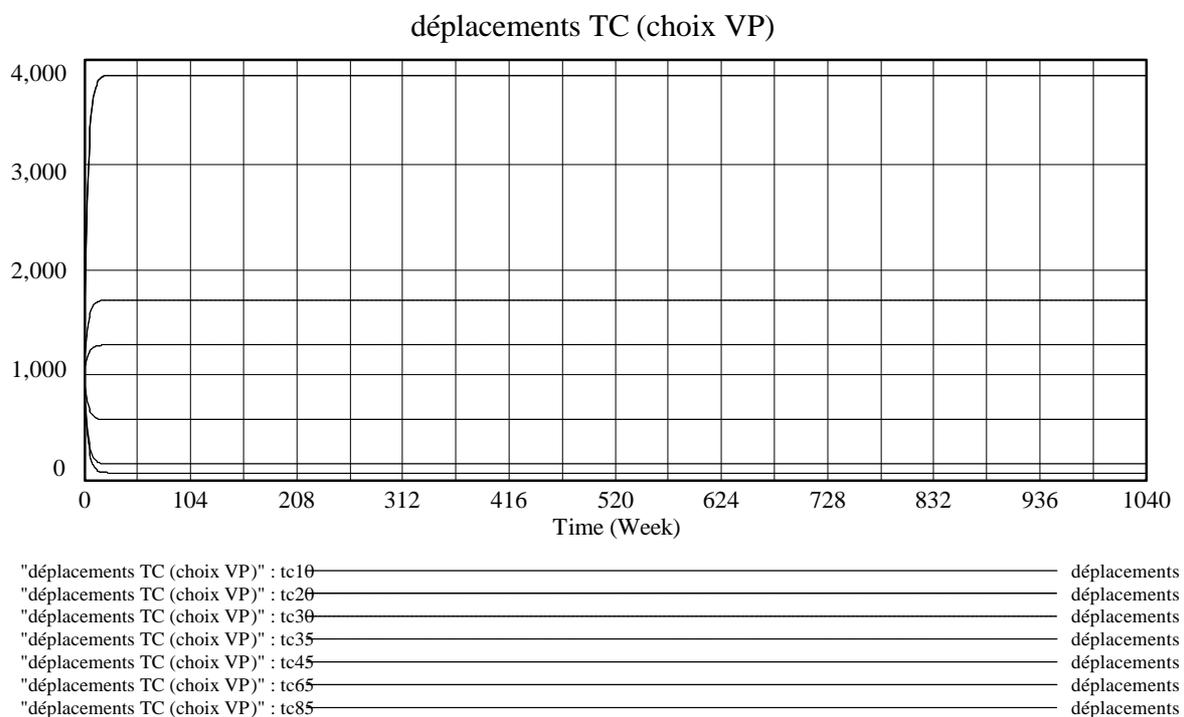


Figure 40

Pour un temps des transports collectifs inférieur à celui de la voiture particulière (20 mn) la demande en situation de choix se reporte intégralement sur les transports collectifs, soit 3850 déplacements, ce qui donne un total de 4770 déplacements en transports collectifs les courbes

« tc10 » et « tc20 » sont confondues). Au-delà de 20 mn le partage se fait progressivement en faveur de la voiture particulière.

Comme la voiture particulière est plus rapide mais plus chère, il reste toujours un nombre non nul de déplacements effectués en transports collectifs par ceux qui ont le choix malgré tout de la voiture particulière, qui s'ajoutent aux 920 déplacements effectués par ceux qui n'ont pas le choix.

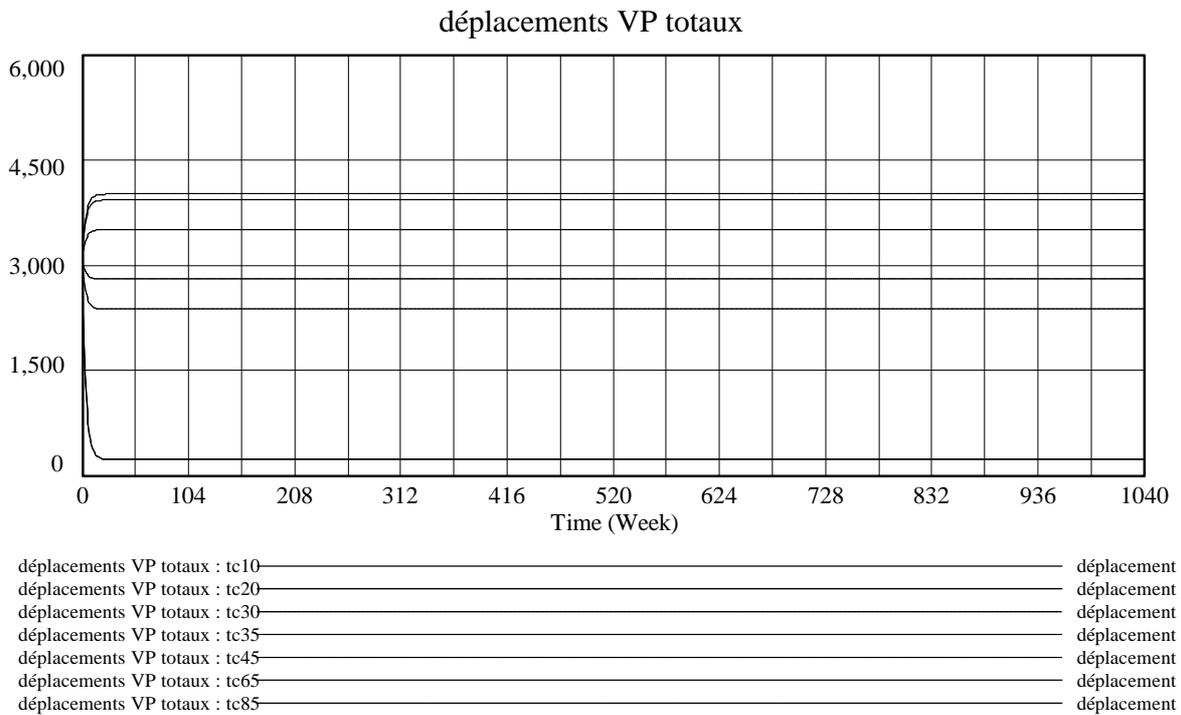


Figure 41

Il en résulte que parmi les 3850 déplacements en situation de choix, la part de la voiture particulière tend vers le maximum sans l'atteindre (3783 déplacements pour un temps TC de 85 mn) auxquels s'ajoutent les 230 déplacements de ceux qui n'ont pas le choix, soit 4013 déplacements.

7.5.2.4 Tests selon coût TC

Coût TC variant de 0 € à 3 € (0 ; 0,5 ; 0,8 ; 1,2 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; 3).

A partir d'un coût de 3€ les transports collectifs deviennent aussi chers que la voiture particulière tout en étant moins rapides (35 mn contre 20 mn), donc la totalité de la demande en situation de choix se reporte sur la voiture particulière. Il reste la limite inférieure correspondant aux 920 déplacements TC de ceux qui n'ont pas le choix de la voiture particulière.

En deçà du coût de 3€ le modèle prix-temps détermine la répartition entre la voiture particulière (plus chère et plus rapide) et les transports collectifs.

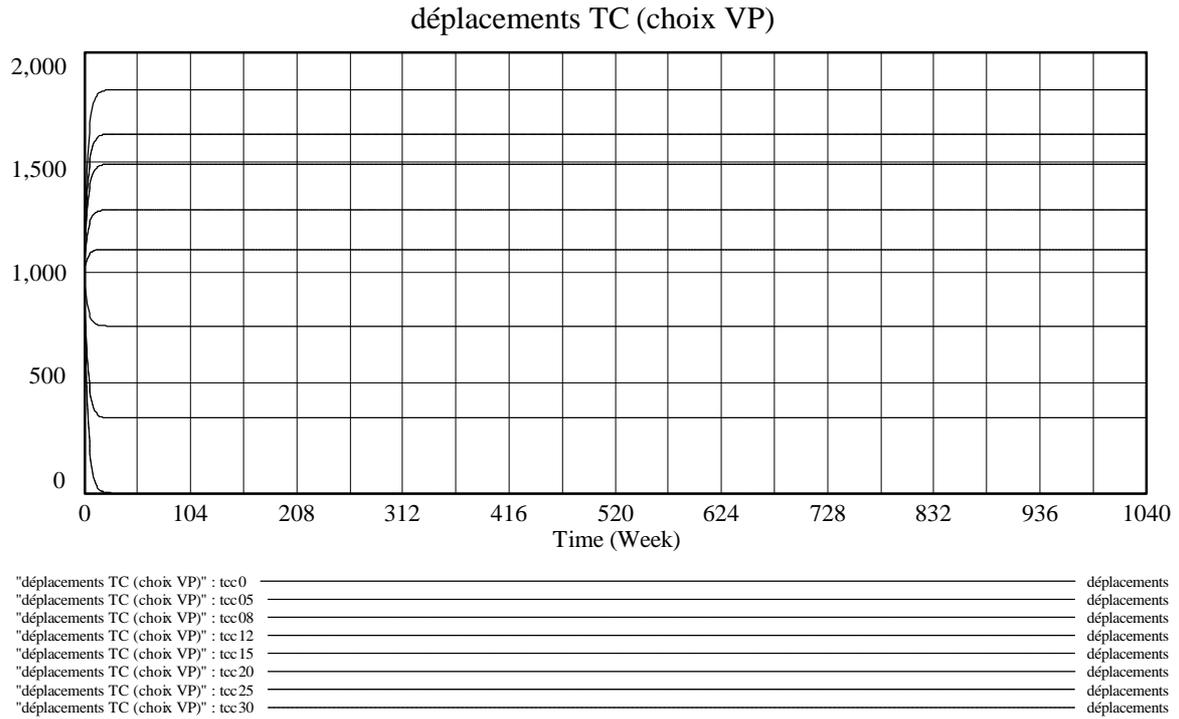


Figure 42

Le maximum est atteint pour un coût d'usage nul avec 1828 déplacements en transports collectifs (sur les 3850 en situation de choix) qui, s'ajoutant aux 920 déplacements de ceux qui ne sont pas en situation de choix donnent un total de 2748 déplacements.

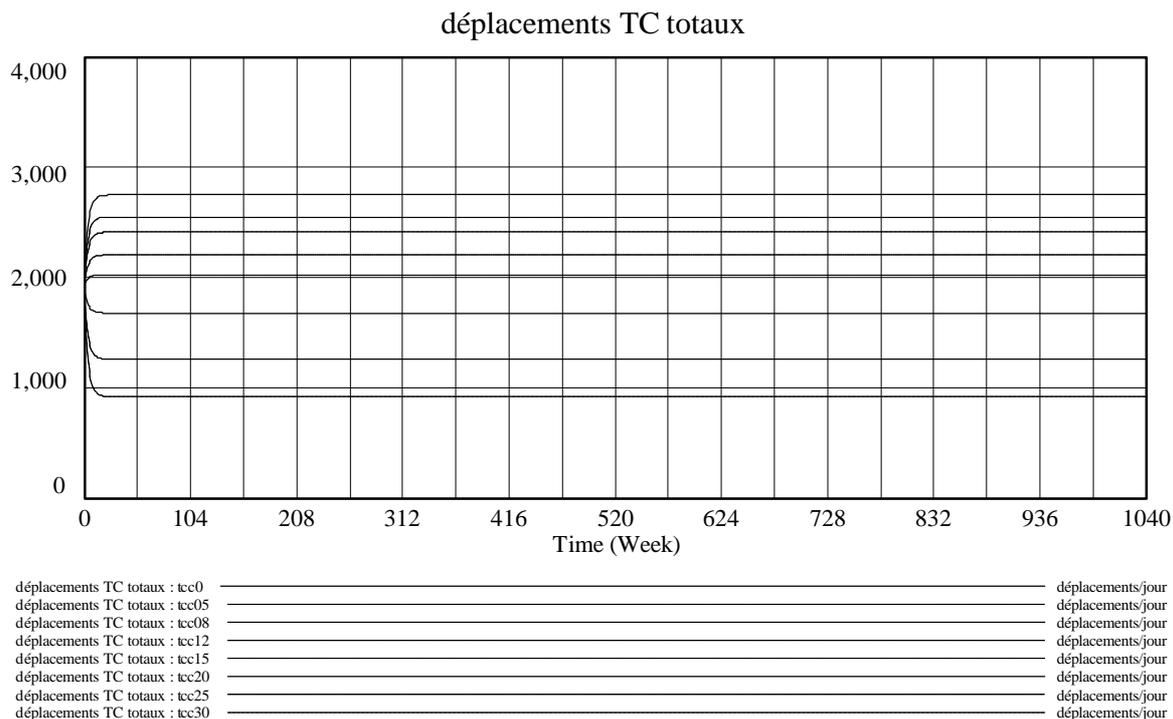


Figure 43

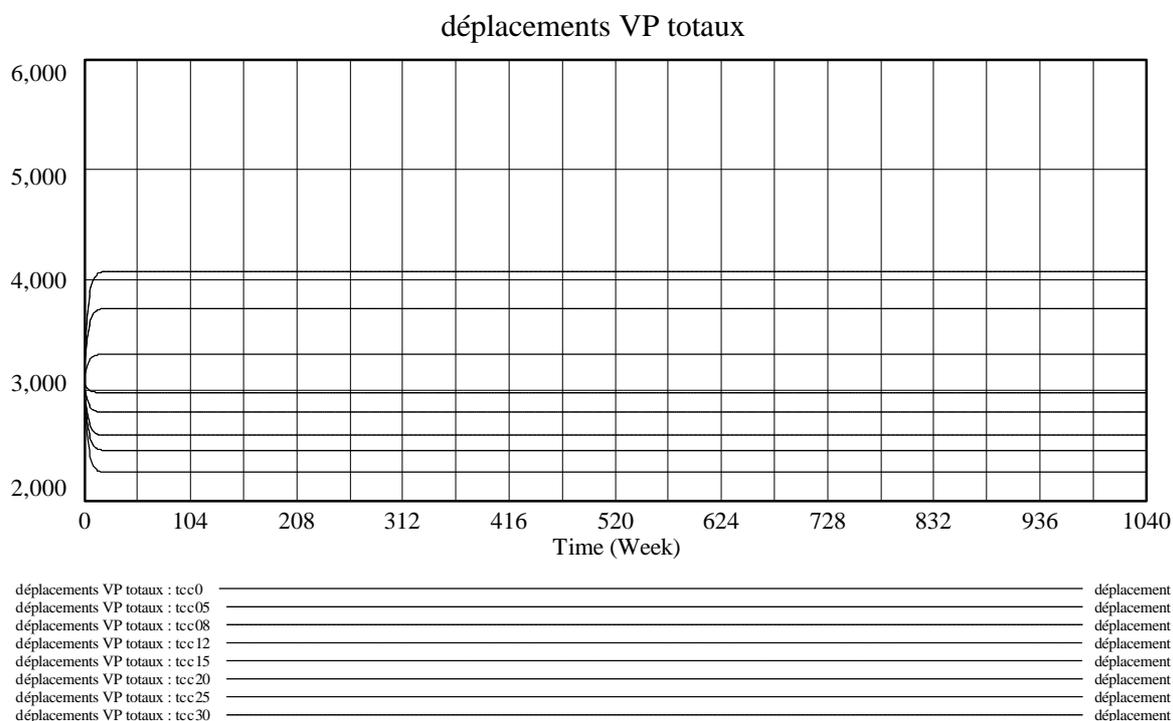


Figure 44

Les déplacements VPPAS (non choix VP) restent constants à 230 déplacements, ils s'ajoutent aux 2022 déplacements effectués en voiture particulière par ceux qui ont le choix, même pour un coût d'usage nul des transports collectifs, soit 2252 déplacements en tout. Quand le coût

d'usage des transports collectifs augmente la part de la voiture particulière augmente. A partir de 3€ elle devient maximale (3850 + 230 = 4080 déplacements).

7.5.2.5 Tests selon coût VP

Coût VP variant de 1 € à 15 € (1 ; 1,2 ; 1,5 ; 2 ; 3 ; 5 ; 8 ; 12 ; 15).

Tant que le coût d'usage de la voiture particulière est inférieur à celui des transports collectifs (1,2€) la totalité de la demande en situation de choix s'y reporte car la voiture particulière est plus rapide, soit 3850 déplacements. Au delà de 1,2€ le modèle prix-temps donne l'évolution du partage progressivement en faveur des transports collectifs. Cependant comme la voiture particulière reste plus rapide, même à 15€ il subsiste (en fonction de la distribution des valeurs du temps) une part de déplacements en voiture particulière parmi ceux qui sont en situation de choix (soit 579 déplacements en voiture particulière).

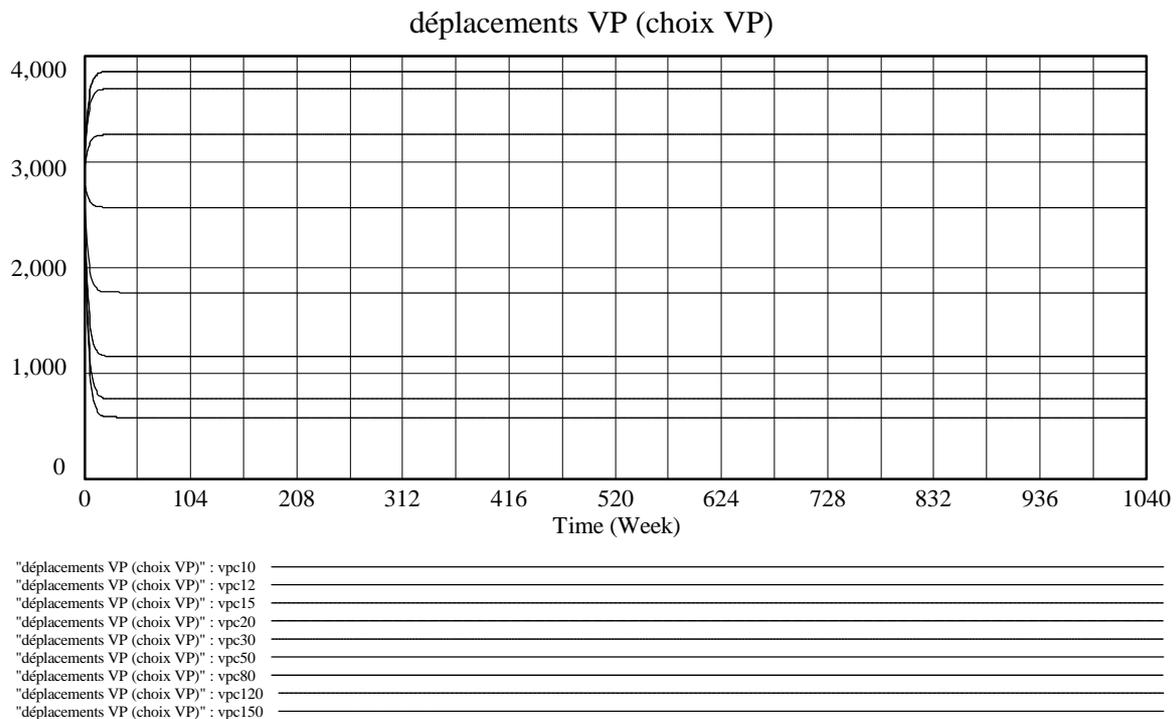


Figure 45

déplacements VP totaux

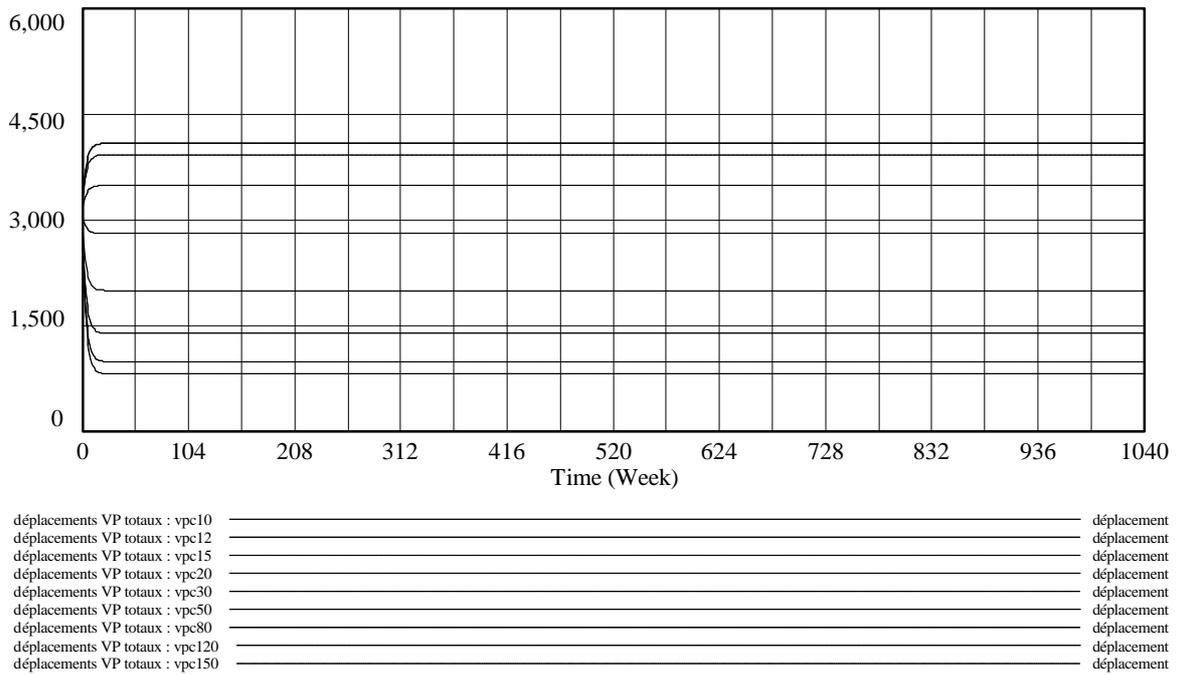


Figure 46

Le total des déplacements en voiture particulière se déduit des déplacements de ceux en situation de choix en y ajoutant les 230 déplacements en voiture-passager (qui ne seraient pas touchés par une augmentation du coût de stationnement mais le seraient par un éventuel péage : leur constance est source d'incohérence ici).

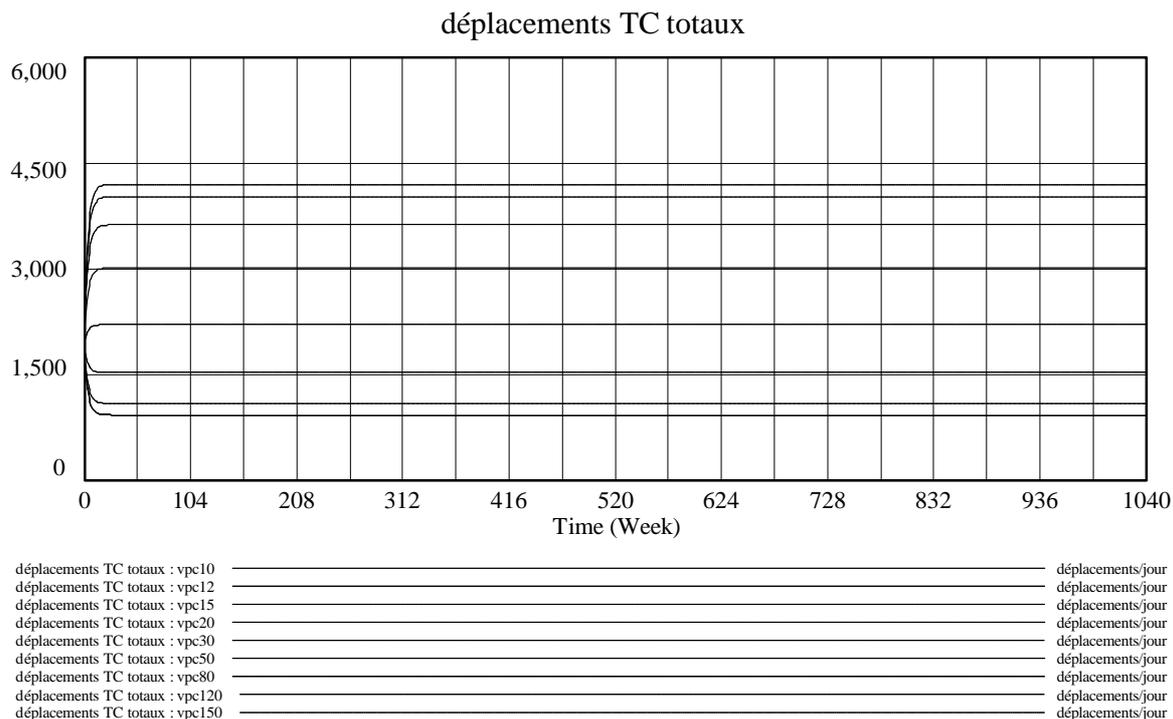


Figure 47

Corrélativement les déplacements en transports collectifs tendent vers leur maximum quand le coût de la voiture particulière augmente : pour un coût de la voiture particulière de 15€ il y a 3271 déplacements en transports collectifs sur les 3850 en situation de choix, auxquels s'ajoutent les 920 en situation de non choix soit 4191 au total. Le minimum de 920 est atteint dès que la voiture particulière devient moins chère que les transports collectifs (soit 1,2€).

7.6. Conclusion

Nous avons donc mis au point un modèle de répartition modale découlant de principes théoriques micro-économiques et fondé pour l'essentiel sur les déterminants du prix et du temps.

Le noyau central du modèle, un modèle prix-temps, a été calibré sur la base des comportements observés à Lyon en 1994-1995 et permet notamment, en s'appuyant sur des classes de distance, de s'affranchir d'un zonage ad hoc. Il s'appuie également sur des classes de vitesse de la voiture particulière et vitesse des transports collectifs : cela autorise une bonne transférabilité du modèle à d'autres agglomérations.

L'analyse des comportements observés et des caractéristiques de l'offre de transport a permis également de définir une méthode de modélisation qui

- distingue les populations en fonction de la disponibilité réelle d'une voiture particulière au moment du déplacement ;
- traite séparément les destinations avec stationnement payant ou gratuit ;
- traite séparément la marche à pied en fonction des classes de distance.

Le test du modèle en simulation a permis d'en valider la cohérence interne. Il reste néanmoins à analyser comment se comporte, et se modifie éventuellement, ce modèle pour les enquêtes précédentes.

Ce modèle est pour le moment restreint au motif de destination travail, il reste également à l'étendre aux autres motifs. Néanmoins la méthode de modélisation devrait rester la même.

Enfin, pour compléter le modèle, un modèle d'interaction entre offre et demande de stationnement doit être élaboré : une piste envisageable est, à partir d'un stock connu (ou au moins estimé) de places gratuites et payantes, modéliser le phénomène de remplissage des places, en cohérence avec le modèle de choix d'heure de départ.

8. Le couplage entre la répartition modale et le choix d'heure de départ

Dans cette partie nous nous attelons au couplage des deux modèles, d'une part celui de répartition modale, d'autre part celui du choix d'heure de départ et d'affectation sur les réseaux.

Nous présentons le modèle dans une première section, puis les résultats de tests de validation dans une deuxième section. Ce modèle est restreint pour le moment au motif travail.

8.1. Le modèle de simulation

Le couplage part des deux modèles existants et présentés dans les précédents chapitres, l'un relatif à la répartition modale, l'autre au choix d'heure de départ. Des modifications ont toutefois été rendues nécessaires pour rendre ces deux modèles compatibles entre eux, notamment du point de vue de leurs liaisons dynamiques.

La vue temps de parcours et heures de départ (Figure 48) intègre donc le modèle de choix d'heure de départ : la procédure de d'optimisation de l'heure de départ produit d'une part une répartition des déplacements par mode, heure de départ, heure d'arrivée préférée et origine-destination soit les « déplacements motorisés optimisés », d'autre part les temps de parcours pour les mêmes dimensions, soit les « temps VP instantané » et « temps TC instantané ».

Ce ne sont pas ces temps instantanés, mais leur accumulation par un lissage exponentiel qui est considérée par les agents dans leur comparaison entre modes, avec un temps moyen de retard, soit le « délai de prise en compte des temps de parcours ».

Hypothèse : un changement du temps de parcours de semaine en semaine est d'abord perçu comme provisoire. C'est l'accumulation de modifications dans un même sens qui va provoquer une réévaluation par l'agent de l'information qu'il intègre sur les caractéristiques des différents modes.

Ce « délai de prise en compte des temps de parcours » ou temps moyen d'accumulation de l'information sur les variations des temps de parcours a été fixé empiriquement ici à 8 semaines.

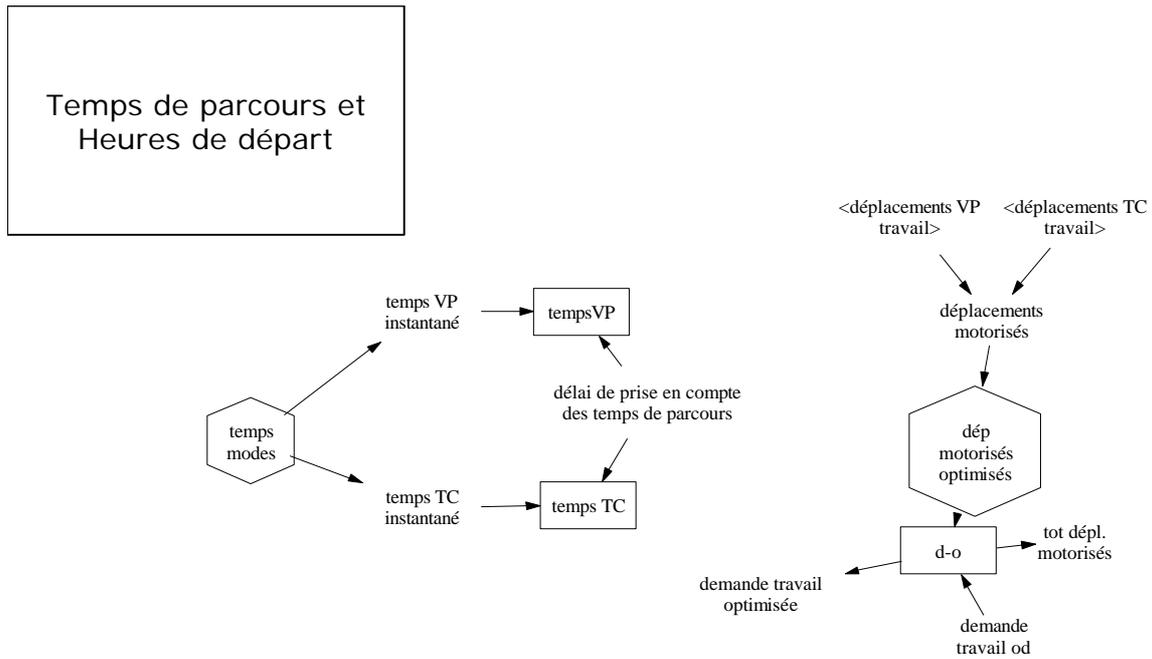


Figure 48 : Vue du module de temps de parcours et des heures de départ

Dans la chaîne causale les déplacements pour le travail par heure et pour chacun des modes, soit les « déplacements VP travail » et les « déplacements TC travail », vont être utilisés comme entrée de la procédure d'optimisation de choix de l'heure de départ : rappelons que celle-ci est menée séparément pour chacun des modes. En sortie, les « déplacements motorisés optimisés » font l'objet d'un lissage exponentiel pour rendre compte du fait que les changements d'heure ne sont pas immédiats. Le temps moyen d'ajustement de ces déplacements optimisés a également été fixé empiriquement à 8 semaines. Le produit de ce lissage (« d-o ») est agrégé selon les deux modes pour donner la « demande travail optimisée » par heure de départ. Celle-ci sert d'entrée à la procédure de répartition modale.

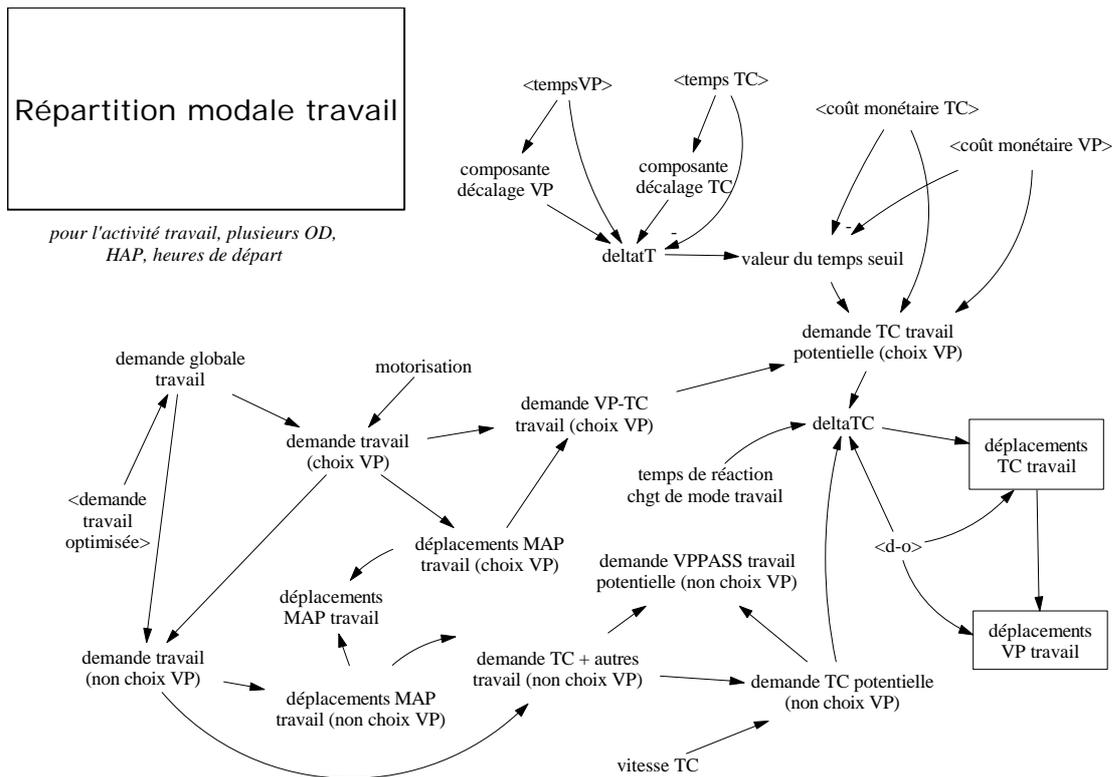


Figure 49 : Vue du module de répartition modale pour le travail

La demande de déplacements pour le motif travail, répartie par heure, (« demande travail optimisée ») va abonder la « demande globale travail » (il s'agit d'une égalité pour le moment, mais d'autres facteurs pourront venir influencer cette demande globale dans des versions ultérieures du modèle, comme l'évolution du niveau de la demande par origine-destination). On retrouve ensuite la structure causale déjà exposée pour le modèle de répartition modale.

La dynamique de retard dans le changement de mode, déjà exposée dans la version initiale du modèle de répartition modale, doit être raccordée au choix de l'heure de départ de façon particulière. Le lissage s'effectue sur la différence entre la nouvelle demande potentielle par mode et par tranche horaire, et la demande avant répartition modale.

Il en résulte la répartition entre « déplacements TC travail » et « déplacements VP travail » qui sert d'entrée, comme indiqué plus haut, à l'optimisation horaire des déplacements par mode.

Les équations sont données en annexe page 152.

8.2. Tests

Pour les tests de ce modèle nous avons repris les mêmes caractéristiques de réseau que pour le modèle de choix d'heure de départ (seules deux zones sont retenues).

Les données de ces tests sont les suivantes :

durée d'une période horaire = 15 mn
nombre de périodes horaires = 5
début de la 1ère période horaire = 7h00

La distribution de valeurs du temps est identique à celle du modèle initial de répartition modale.

Offre routière :

nb zones : 2

capacités (uvp/h):
15000 10000
10000 15000

distances (km) :
2 7
7 2

vitesse à vide (km/h) :
40 60
60 40

pas de péage.

stationnement payant : 3 euros, coût uniforme et constant s'appliquant à tous les déplacements en voiture particulière. On ne tient pas compte des coûts d'usage en carburant.

Offre transports collectifs :

2 zones intra

coefficient de pénibilité d'accès : 2

coefficient de pénibilité d'attente : 1.81

pas de pénalité d'accès aux réseaux métro, tram et bus.

pas de priorité bus sur la circulation automobile

temps d'accès moyen au réseau de bus : 5 mn

fréquence moyenne : 7,5 mn

pas de site propre lourd, ni tramway.

coût monétaire constant uniforme : 1,2 euros.

8.2.1 Evolution des parts modales pour une demande constante

La demande initiale est uniformément répartie : elle est fixée à 250 déplacements pour chacun des deux modes, pour chacune des 4 origines-destinations, pour chaque heure de départ et pour chaque heure d'arrivée préférée (soit un total de 50.000 déplacements à effectuer).

Nous analysons comment le modèle se comporte en observant l'évolution de la demande cherchant à aller de la zone 1 vers la zone 2 ($i1,j2$) et cherchant à arriver à l'heure $ha5$. Le modèle est simulé sur 1040 semaines (soit 20 ans environ) pour faire apparaître les discontinuités éventuelles à moyen terme.

En ce qui concerne la demande en voiture particulière (cf. Figure 50) les déplacements se reportent pour l'essentiel à l'heure de départ $hd3$, après une augmentation puis une diminution des déplacements cherchant à partir en $hd4$. Pour ce qui est des transports collectifs (cf. Figure 51), la demande se reporte également pour l'essentiel en $hd3$, tandis que les flux cherchant à partir aux autres heures diminuent régulièrement mais moins rapidement que dans le cas de la voiture.

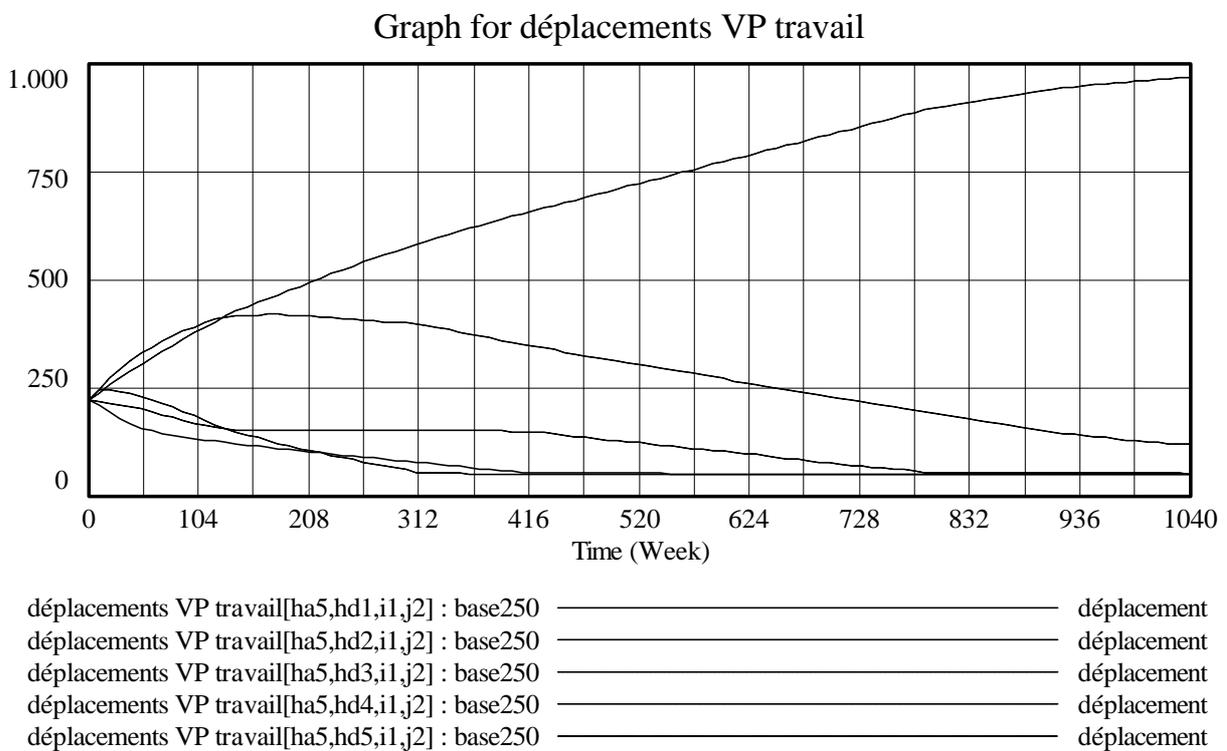
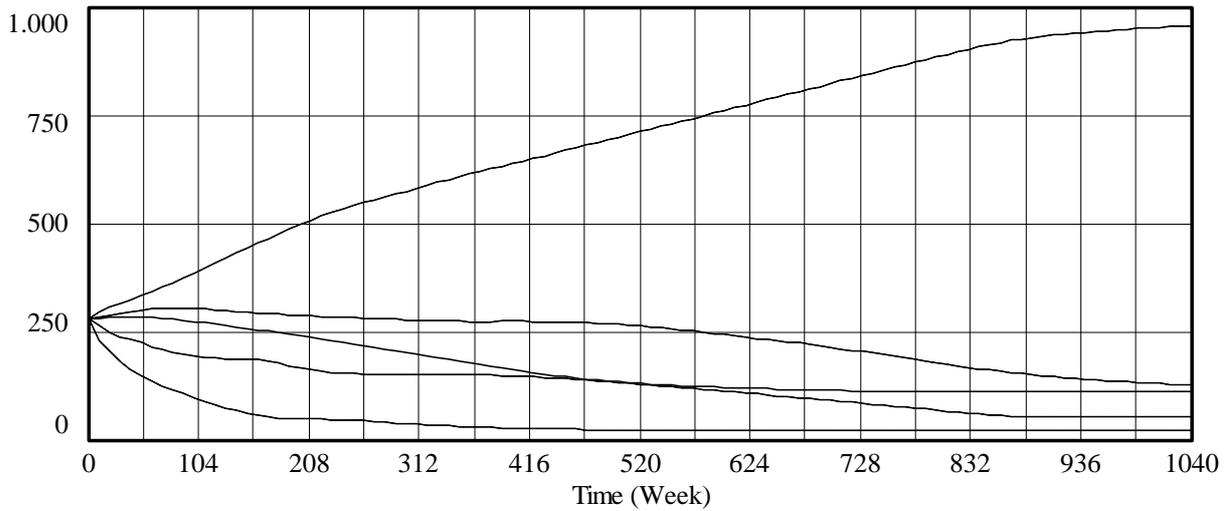


Figure 50

Graph for déplacements TC travail



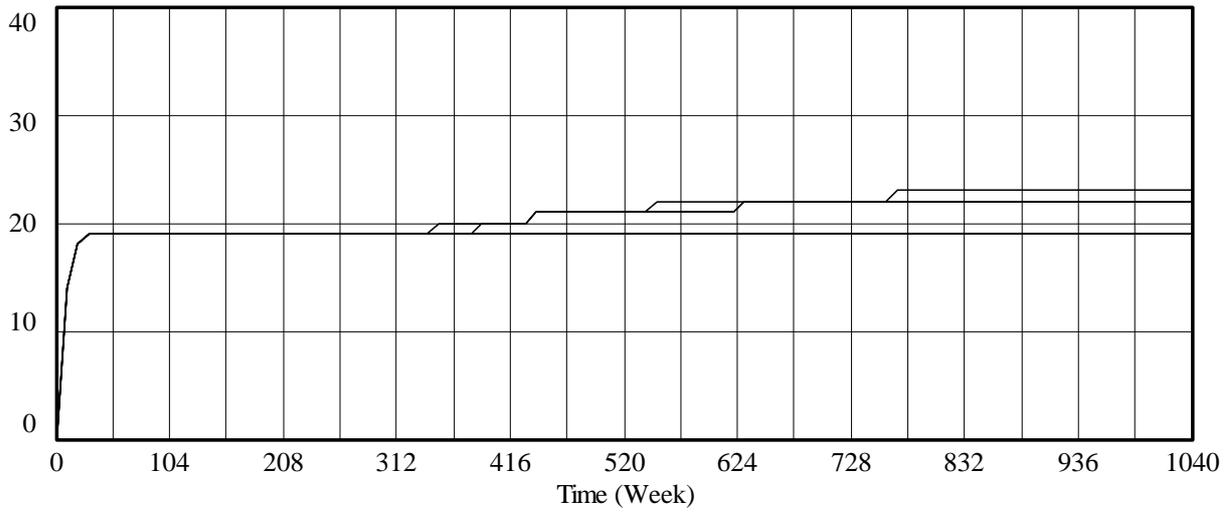
déplacements TC travail[ha5,hd1,i1,j2] : base250 ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd2,i1,j2] : base250 ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd3,i1,j2] : base250 ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd4,i1,j2] : base250 ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd5,i1,j2] : base250 ————— déplacement

Figure 51

Ces évolutions peuvent être expliquées par la relative situation de fluidité comme le montrent les données sur les temps de parcours. Les temps de parcours en voiture particulière (cf. Figure 52) se stabilisent assez rapidement (quelques mois !) autour de 20 mn, et ceux des transports collectifs (cf. Figure 53) autour de 30 mn. Il en résulte cette concentration des déplacements à l'heure de départ *hd3*, comme déjà montré pour le modèle de choix d'heure de départ en situation de fluidité.

Enfin, au total, la part modale des transports collectifs (cf. Figure 54) se stabilise à 48%.

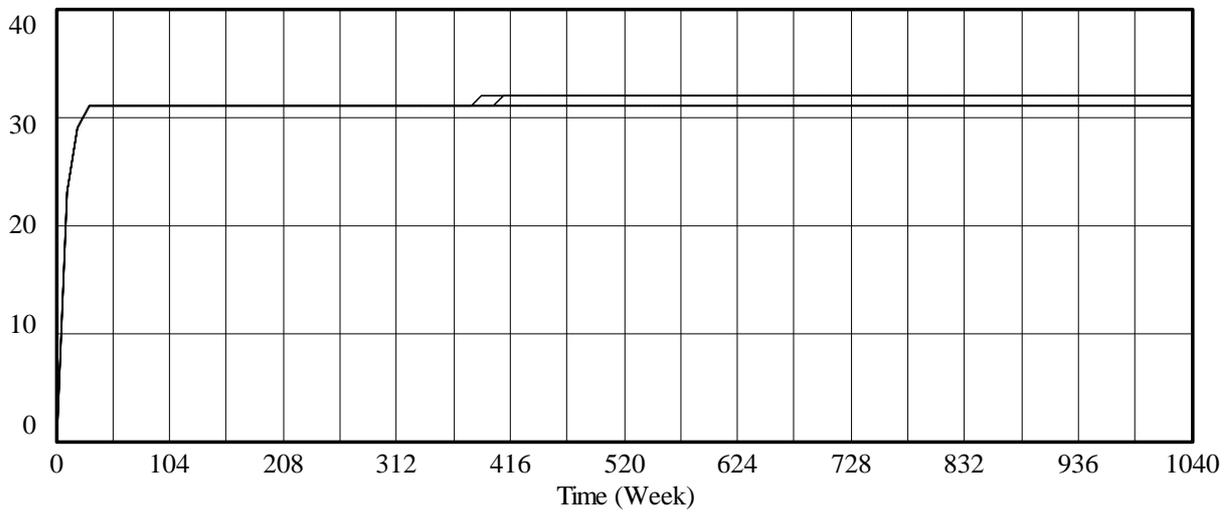
Graph for tempsVP



tempsVP[hd1,i1,j2] : base250 _____ mn
tempsVP[hd2,i1,j2] : base250 _____ mn
tempsVP[hd3,i1,j2] : base250 _____ mn
tempsVP[hd4,i1,j2] : base250 _____ mn
tempsVP[hd5,i1,j2] : base250 _____ mn

Figure 52

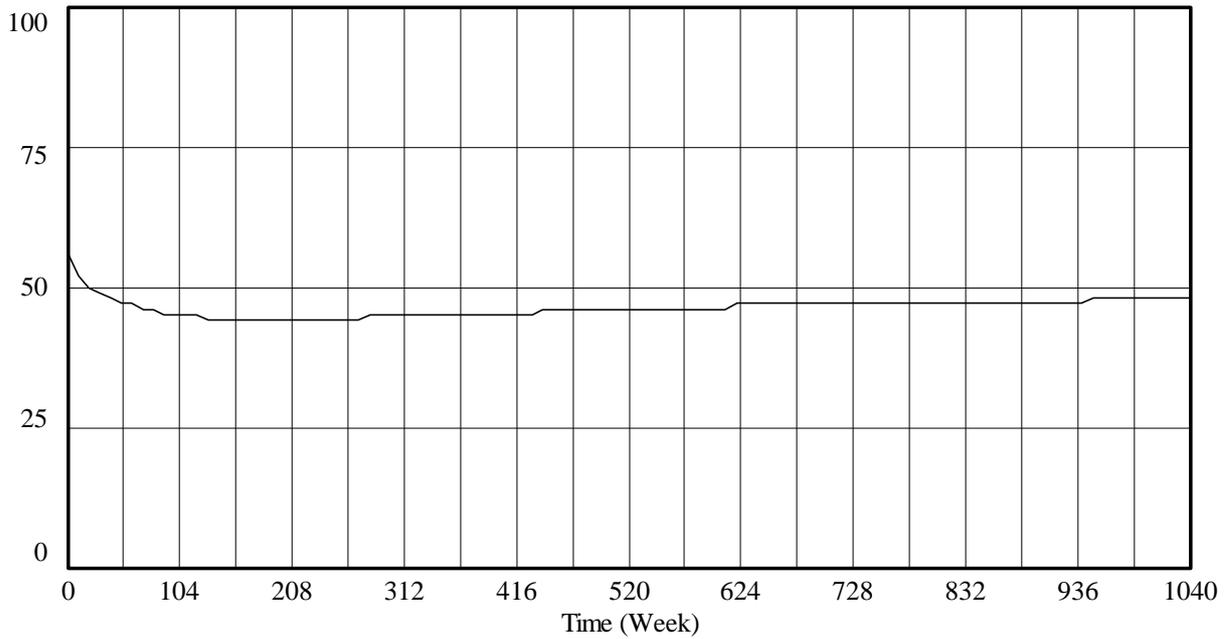
Graph for temps TC



temps TC[hd1,i1,j2] : base250 _____ mn
temps TC[hd2,i1,j2] : base250 _____ mn
temps TC[hd3,i1,j2] : base250 _____ mn
temps TC[hd4,i1,j2] : base250 _____ mn
temps TC[hd5,i1,j2] : base250 _____ mn

Figure 53

Graph for part TC



part TC : base250

Figure 54

Enfin, à titre d'illustration sont montrées les répartitions de flux de déplacements en fin de période, pour chaque heure d'arrivée préférée (*ha1* à *ha5*) et par heure de départ (*hd1* à *hd5*), respectivement pour la voiture particulière (Figure 55) et les transports collectifs (Figure 56).

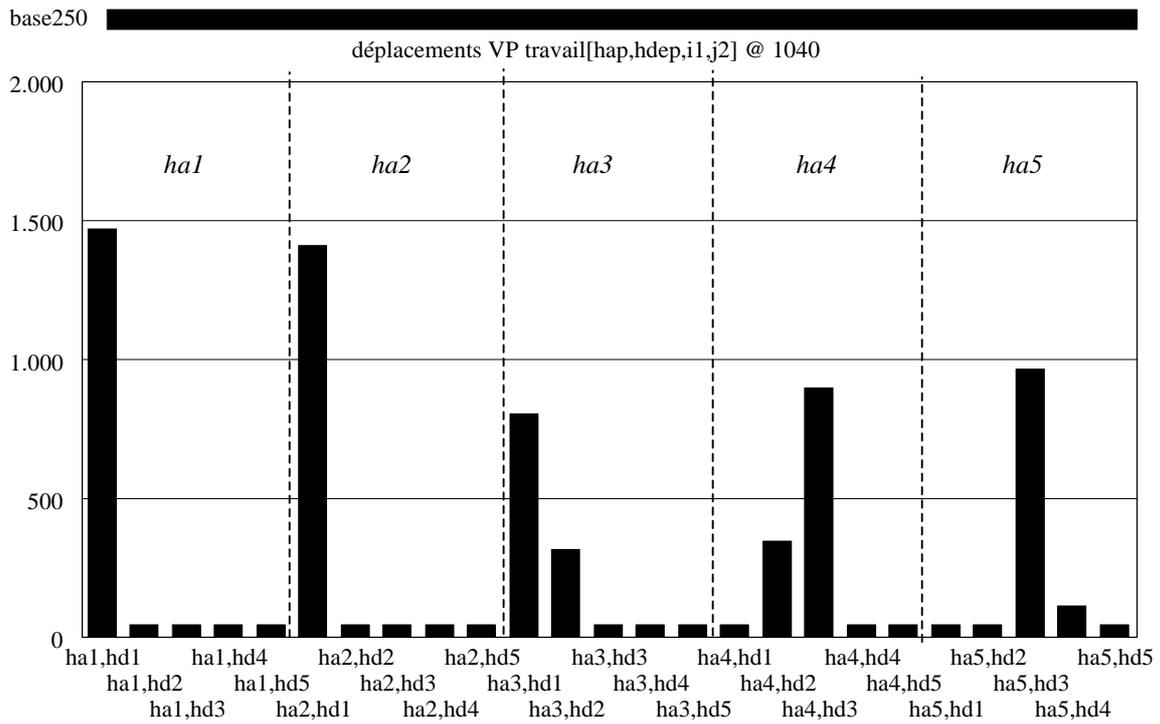


Figure 55

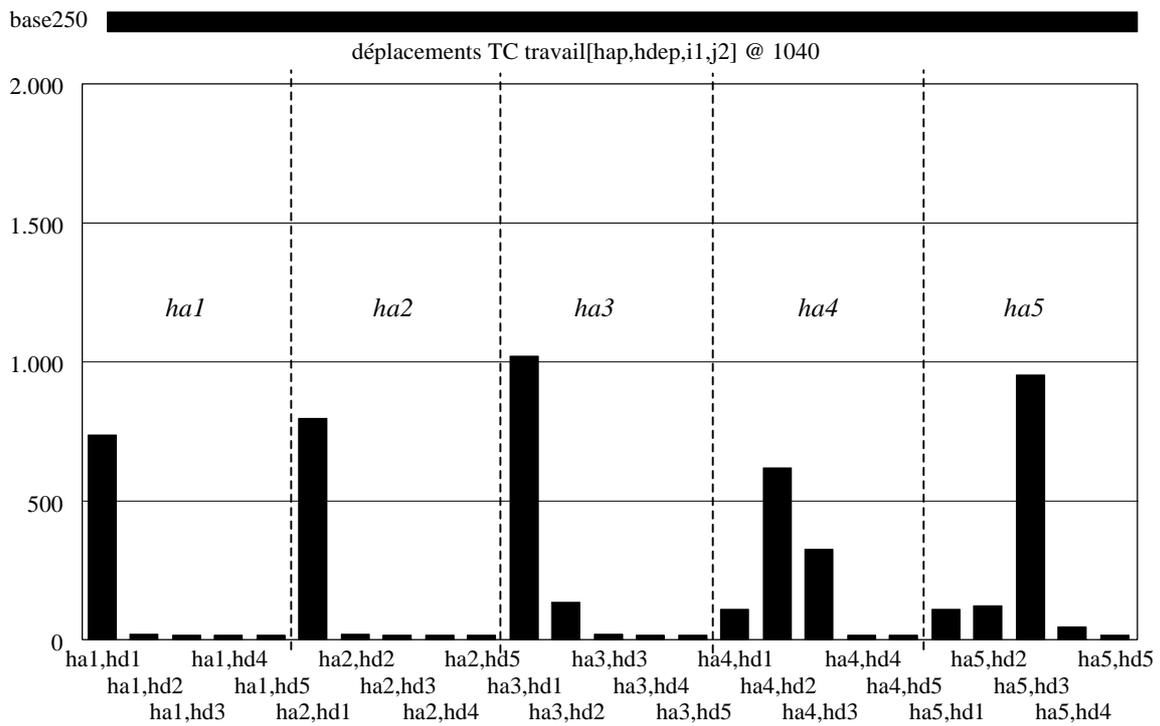


Figure 56

8.2.2 Evolution avec une motorisation croissante

Nous gardons cette fois-ci la demande constante mais faisons croître la motorisation au rythme de 5% par an, ce qui fait que la totalité des agents demandant à se déplacer pour le travail dispose d'une voiture à partir de la semaine 280.

L'évolution des répartitions des déplacements selon l'heure de départ, que ce soit pour la voiture particulière (cf. Figure 57) ou pour les transports collectifs (cf. Figure 58), montre une oscillation entre les heures de départ *hd3* et *hd4*.

Ces oscillations peuvent se comprendre par l'augmentation des déplacements en voiture particulière (cf. Figure 59), du fait de la motorisation croissante, ce qui fait que l'accroissement des déplacements en périodes *hd3* et *hd4* est plus rapide que dans le test précédent. Ensuite l'augmentation des flux en voiture particulière provoque une augmentation des temps de parcours en voiture particulière (cf. Figure 60) ce qui motive les changements d'heure de départ.

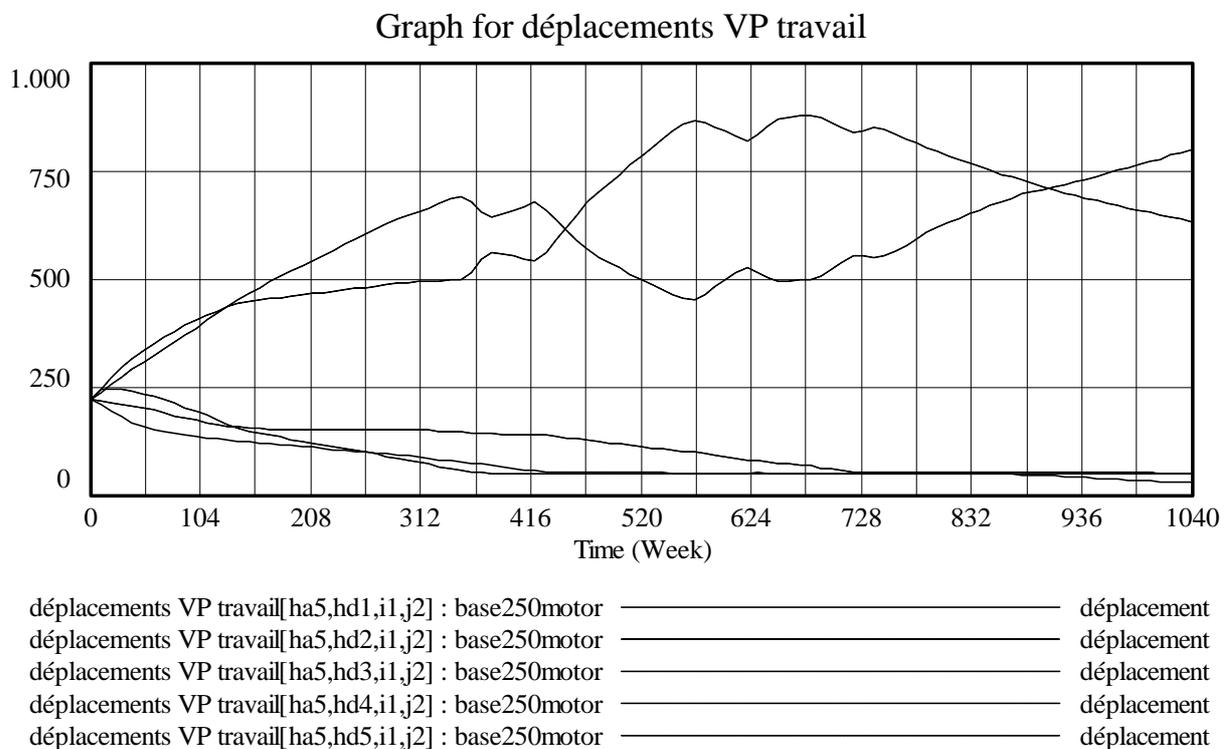
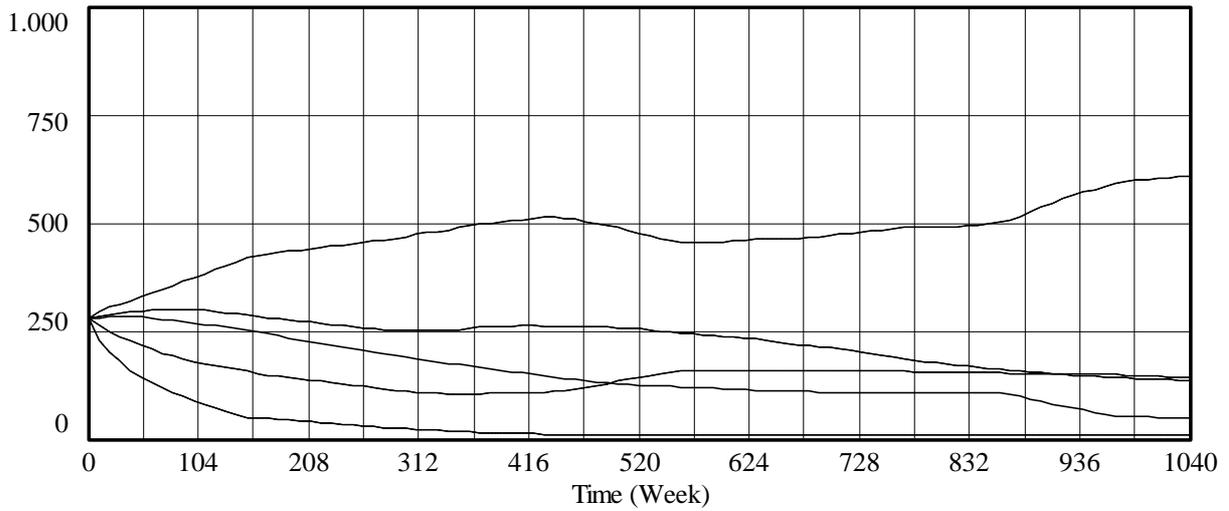


Figure 57

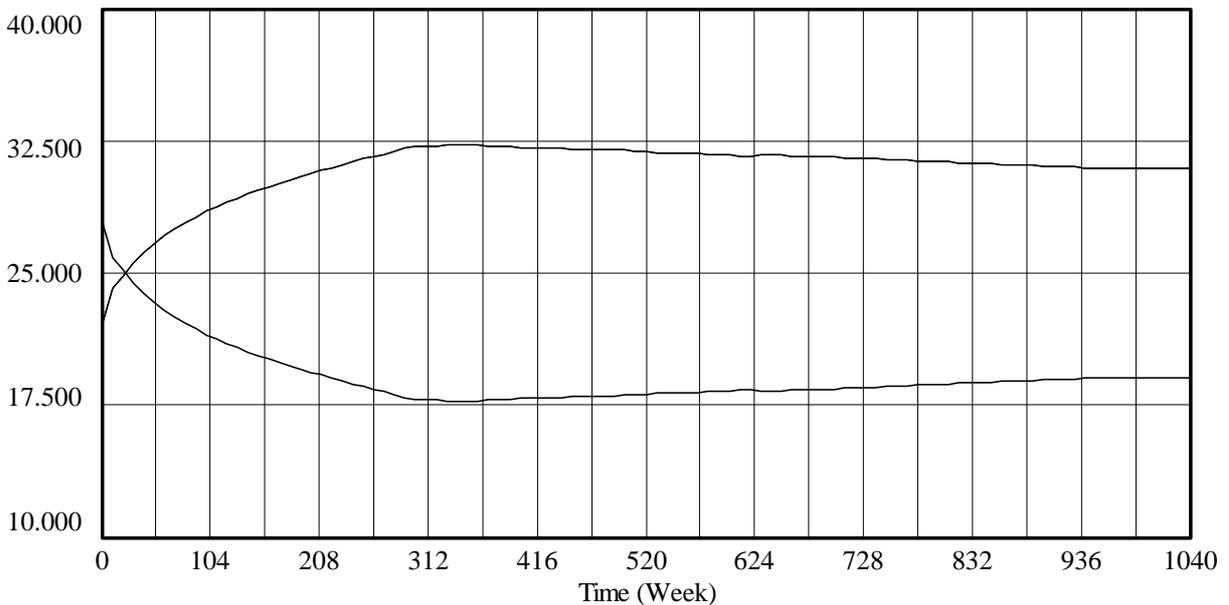
Graph for déplacements TC travail



déplacements TC travail[ha5,hd1,i1,j2] : base250motor ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd2,i1,j2] : base250motor ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd3,i1,j2] : base250motor ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd4,i1,j2] : base250motor ————— déplacement
 déplacements TC travail[ha5,hd5,i1,j2] : base250motor ————— déplacement

Figure 58

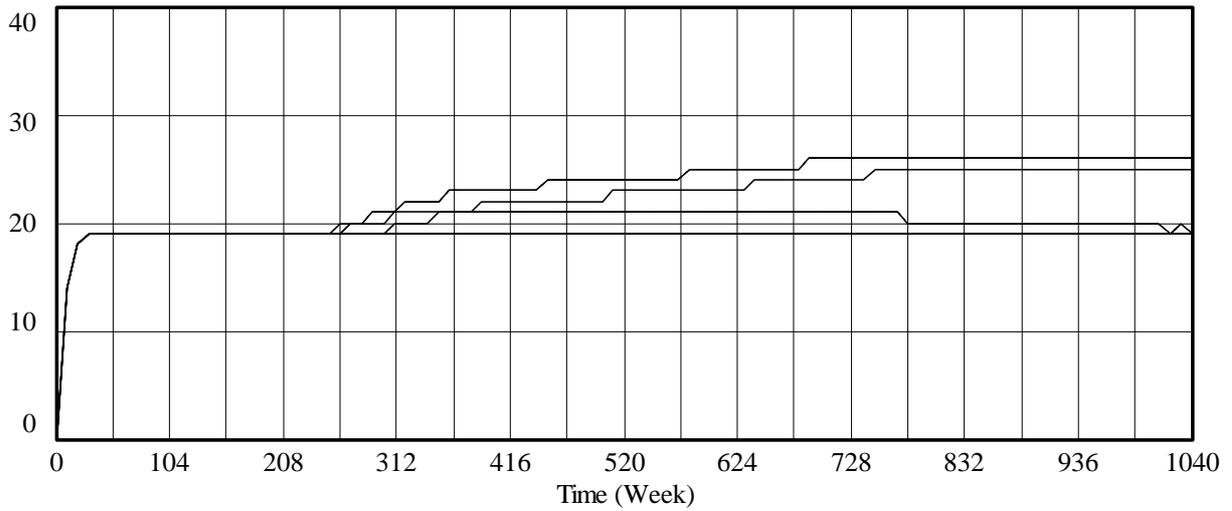
Parts modales



déplacements TC agrégés : base250motor —————
 déplacements VP agrégés : base250motor —————

Figure 59

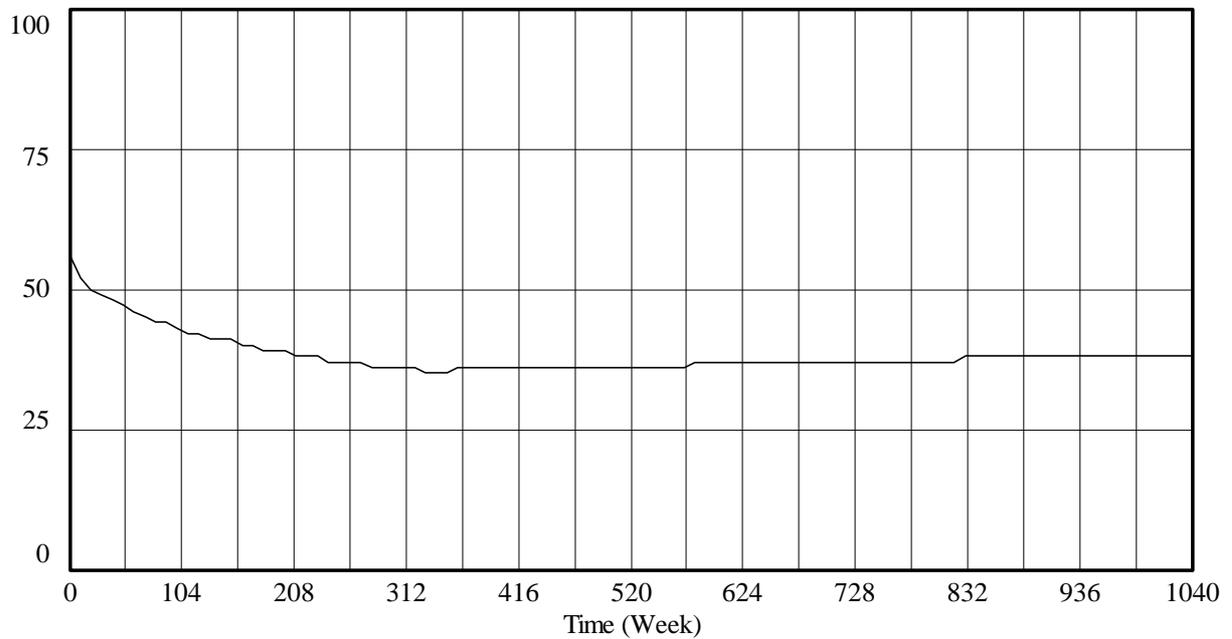
Graph for tempsVP



tempsVP[hd1,i1,j2] : base250motor _____ mn
 tempsVP[hd2,i1,j2] : base250motor _____ mn
 tempsVP[hd3,i1,j2] : base250motor _____ mn
 tempsVP[hd4,i1,j2] : base250motor _____ mn
 tempsVP[hd5,i1,j2] : base250motor _____ mn

Figure 60

Graph for part TC



part TC : base250motor _____

Figure 61

Au total la part des transports collectifs baisse à 38% (cf. Figure 61).

Ces résultats, attendus, montrent que le modèle de répartition modale réagit fort logiquement à une croissance de la motorisation, à demande constante.

8.2.3 Evolution pour une motorisation et une demande croissantes

A la croissance de la motorisation de l'exemple précédent, nous ajoutons une croissance exogène de la demande, à un rythme hebdomadaire régulier correspondant à une hausse de 40% environ des déplacements en dix ans (la hausse des déplacements en voiture particulière est estimée à 38% à Lyon entre les deux enquêtes-ménages de 1986 et 1995).

Comme le montre la Figure 62 l'essentiel de la demande en voiture particulière pour arriver en *ha5* se reporte cette fois-ci à l'heure de départ *hd4*.

Cela peut tout à fait s'expliquer par la hausse du trafic total en voiture particulière (cf. Figure 63) qui se traduit par une augmentation des temps de parcours en voiture particulière (cf. Figure 64). Il faut aussi rappeler pour mémoire les charges de voirie occasionnées par les déplacements des agents désirant arriver aux autres heures que *ha5*.

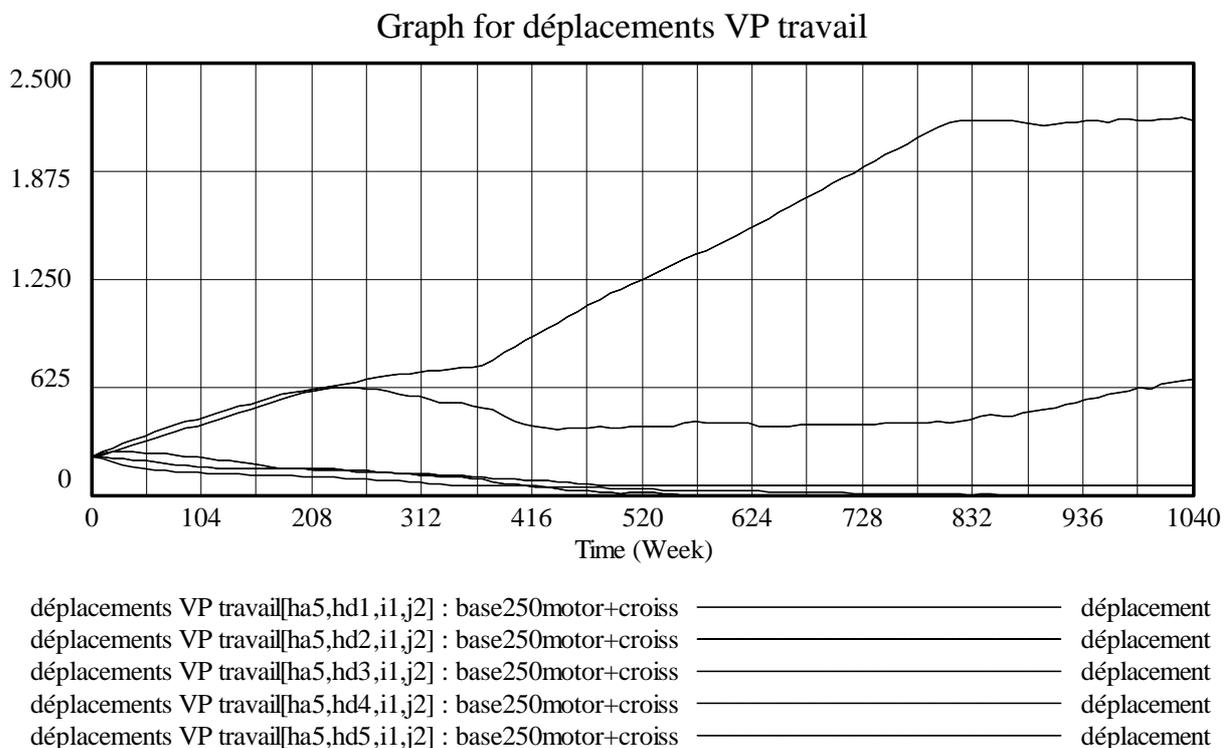
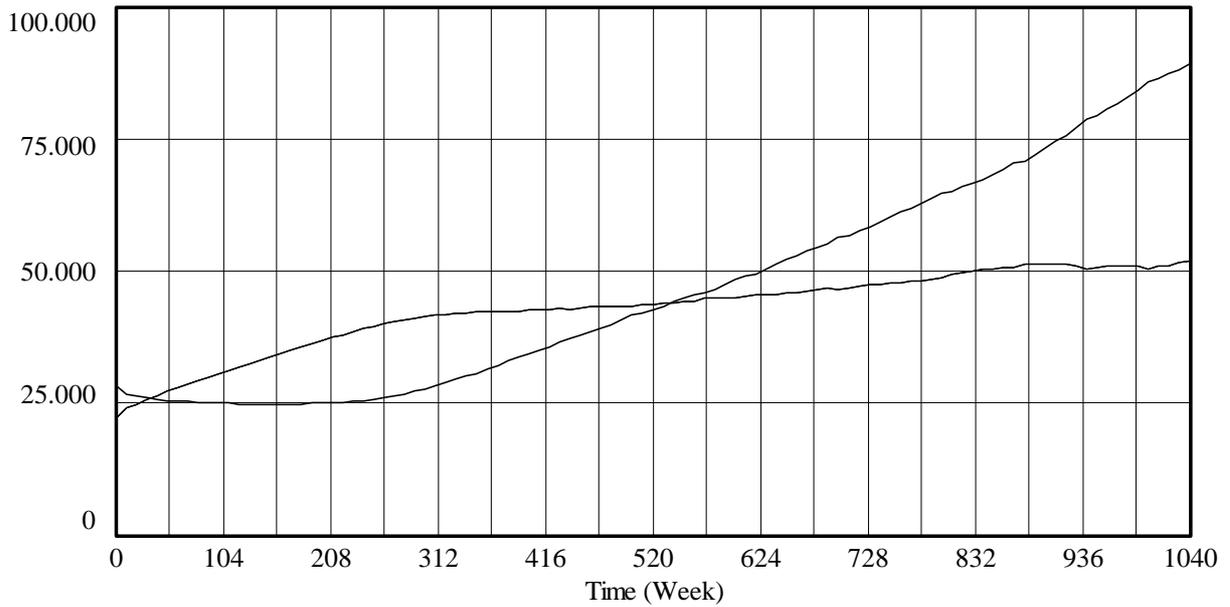


Figure 62

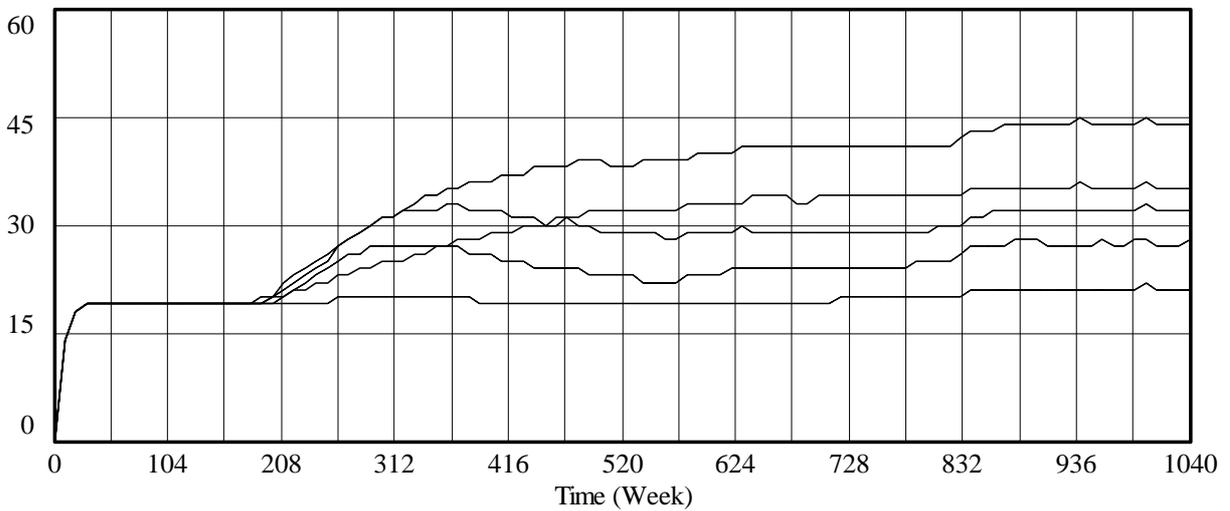
Parts modales



déplacements TC agrégés : base250motor+croiss _____
 déplacements VP agrégés : base250motor+croiss _____

Figure 63

Graph for tempsVP



tempsVP[hd1,i1,j2] : base250motor+croiss _____ mn
 tempsVP[hd2,i1,j2] : base250motor+croiss _____ mn
 tempsVP[hd3,i1,j2] : base250motor+croiss _____ mn
 tempsVP[hd4,i1,j2] : base250motor+croiss _____ mn
 tempsVP[hd5,i1,j2] : base250motor+croiss _____ mn

Figure 64

Les temps en transports collectifs tendent vers des valeurs similaires à celles des temps en voiture particulière (cf. Figure 65). Il s'ensuit que les valeurs du temps seuil pour partager entre transports collectifs et voiture particulière deviennent plus élevées (car la différence entre temps de parcours, au dénominateur, devient plus faible alors que la différence entre coûts au numérateur reste inchangée) et donc que la part des transports collectifs augmente jusqu'à 63% (cf. Figure 66). Il en serait tout autrement en l'absence de stationnement payant : la voiture particulière, légèrement plus rapide, conserverait systématiquement son avantage.

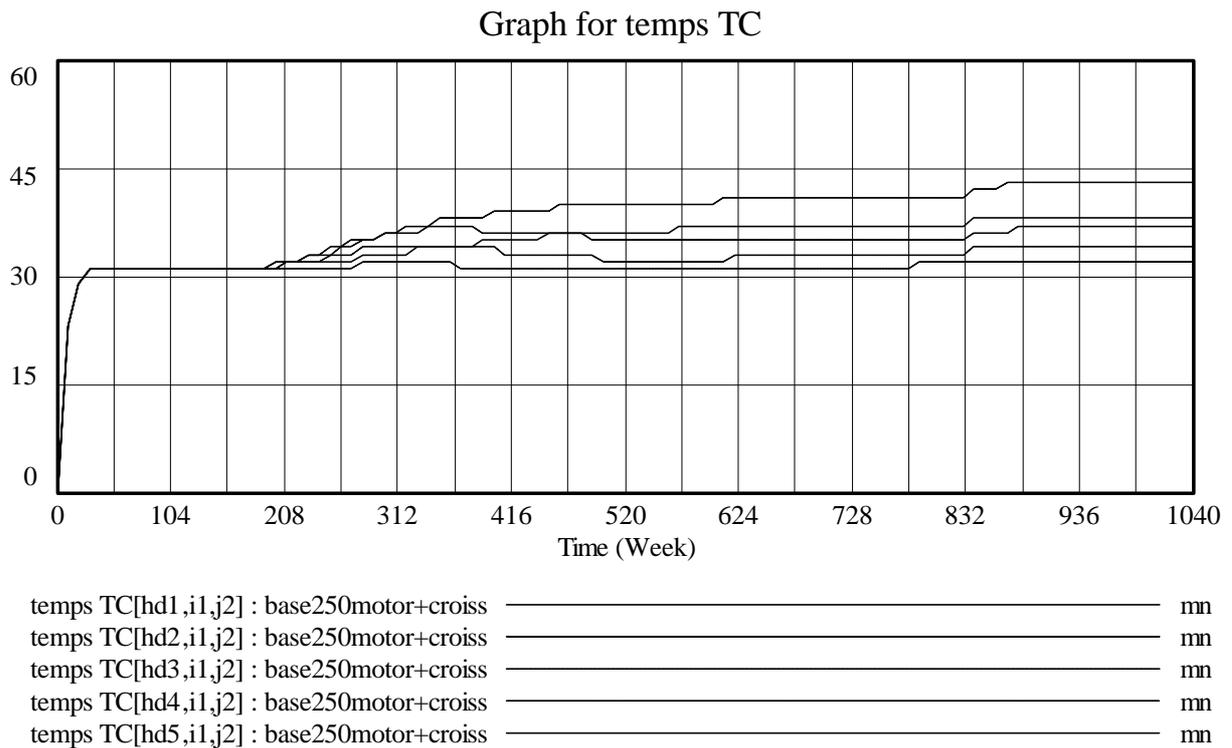
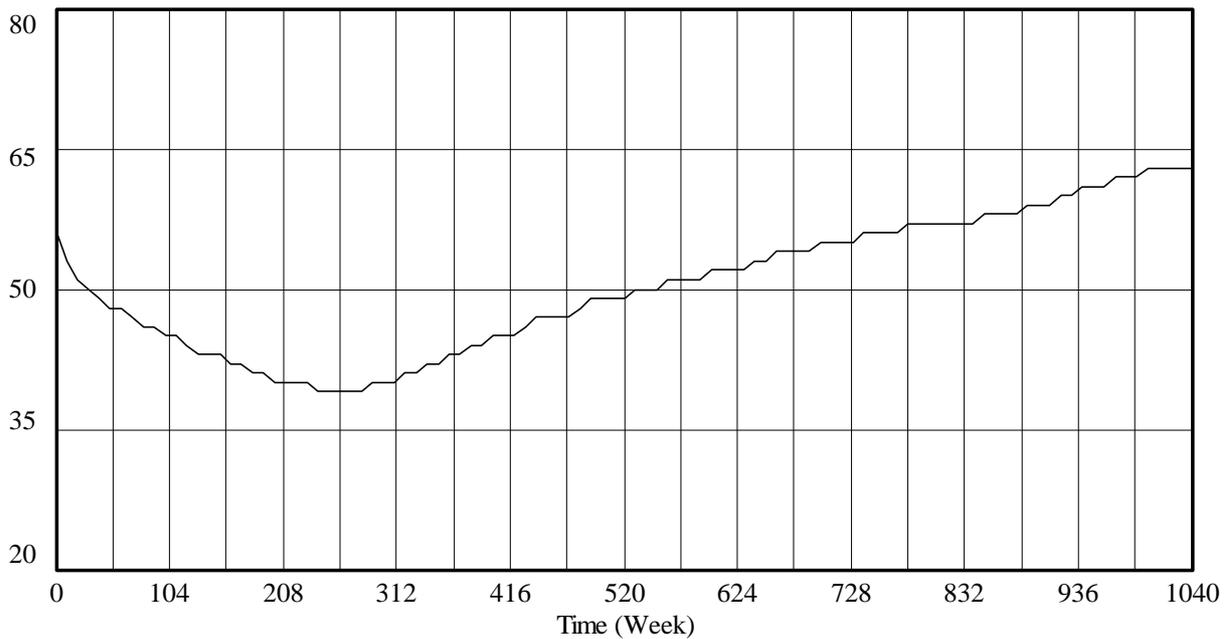


Figure 65

Graph for part TC



part TC : base250motor+croiss

Figure 66

Ce modèle montre que toutes choses égales par ailleurs, la montée de la congestion favorise les transports collectifs. Attention cependant, ce résultat est montré sous les hypothèses de constance de la demande, de coût marginal significatif d'usage de la voiture particulière (stationnement payant), de constance des fréquences et d'élasticité infinie de l'offre en transports collectifs...

Ce constat est confirmé dans l'exemple suivant.

8.2.4 Evolution quand la contrainte de congestion se relâche

Pour simuler un relâchement de la contrainte de congestion, par exemple en conséquence d'une augmentation de capacité routière au cours du temps⁹ nous supposons que la demande décroît au cours du temps (ici une diminution de 90% sur 20 ans) en partant d'une demande initiale uniforme de 800 déplacements par mode, heure de départ, d'arrivée préférée et couple origine-destination.

Les flux en transports collectifs diminuent plus vite que les flux en voiture particulière au cours du temps (cf. Figure 67), ce qui se traduit par une diminution de la part modale des transports collectifs (cf. Figure 68), de 55% initialement à 45% en fin de période.

⁹ Paramétrage non encore implanté dans le modèle

Parts modales

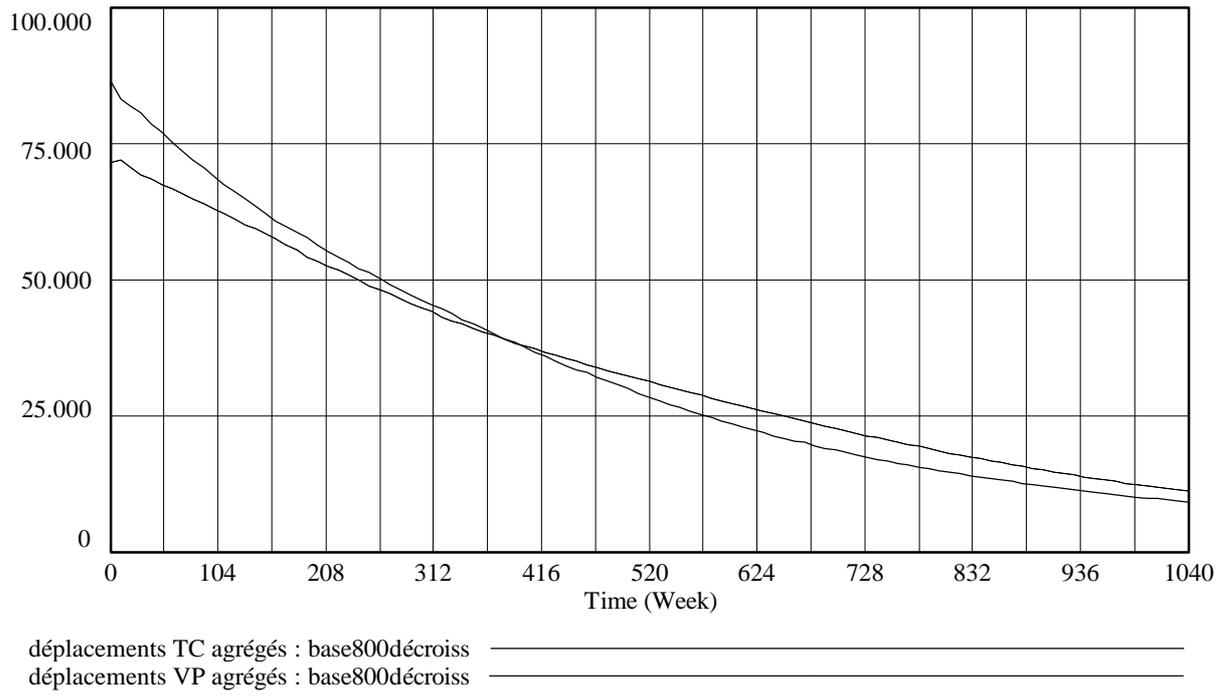


Figure 67

Graph for part TC

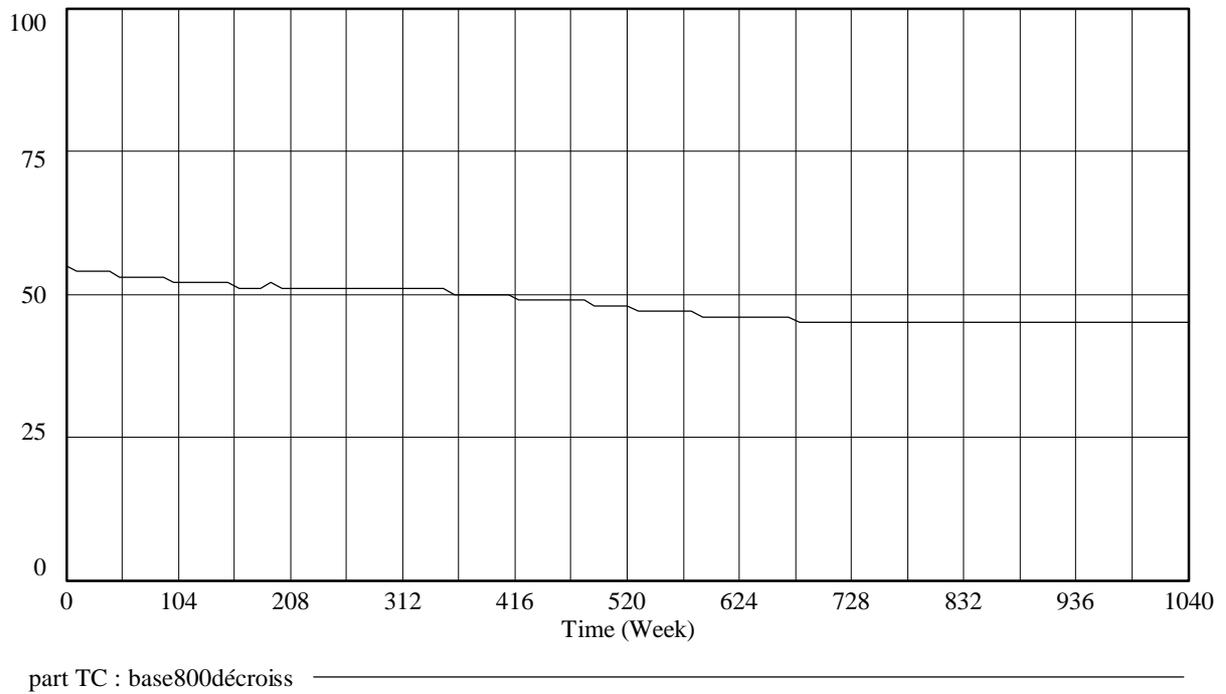


Figure 68

Cette évolution s'explique parfaitement par la situation de fluidité qui se crée progressivement, comme en témoigne l'évolution des temps de parcours en voiture particulière (cf. Figure 69). La compétitivité de la voiture particulière devient maximale (compte tenu du stationnement payant qui reste constant).

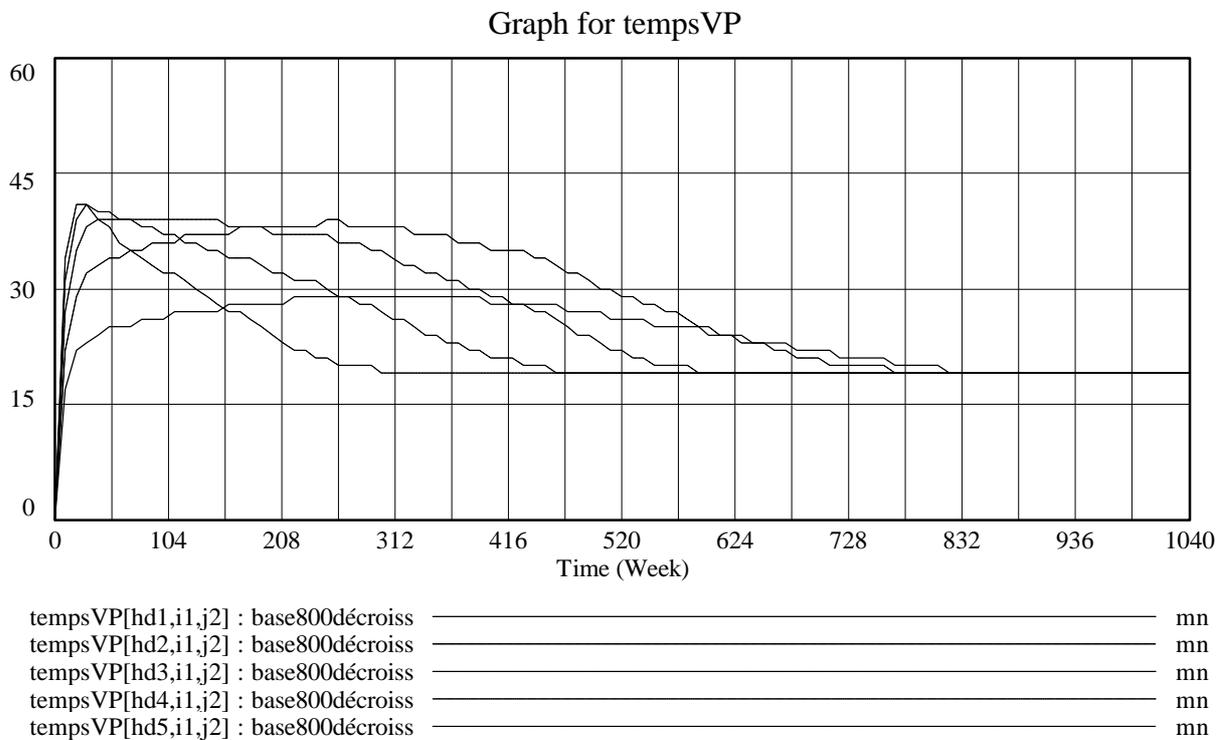


Figure 69

8.3. Conclusion

Nous avons donc élaboré un modèle conjoint de la répartition modale, du choix d'heure de départ et d'affectation sur les réseaux. Les tests sur des configurations limitées d'offre et demande ont permis de valider le comportement du modèle face à des situations de congestion et aux évolutions de la motorisation.

Sous les hypothèses de constance de la demande, de coût marginal significatif d'usage de la voiture particulière (stationnement payant), de constance des fréquences et d'élasticité infinie de l'offre en transports collectifs, la montée de la congestion favorise les transports collectifs. L'introduction d'une contrainte de financement (cf. le modèle de financement des transports collectifs qui reste à coupler) ou de l'impact de la congestion sur la variabilité des fréquences changerait bien sûr le diagnostic final. Inversement, une augmentation de capacité routière permet à la voiture particulière de conserver ses avantages, voire de les renforcer par rapport aux transports collectifs.

La dynamique de ce système a trois sources :

- le retard dans les changements d'heure de déplacement,

- le retard dans la prise en compte des informations sur les temps de parcours, et
- le retard dans le changement des habitudes de choix de mode.

Faute de données empiriques, les valeurs de ces temps de retard ont été fixées quelque peu arbitrairement. On ne dispose en effet que d'une information qualitative sur l'existence de ces retards, comme en témoigne la littérature sur l'observation des comportements, et que traduisent par exemple les différences entre élasticité-prix de court terme et de long terme.

Il y a grossièrement deux méthodes pour déterminer ces paramètres de retard :

- la première consiste à ajuster ces paramètres de manière à faire coller les résultats du modèle aux observations d'enquêtes sur les déplacements : par exemple les enquêtes-ménages pour lesquelles on ne dispose que de quelques points dans le temps (une fois tous les dix ans en moyenne) ;
- la seconde consiste à observer les comportements de panels d'individus au cours du temps, notamment les choix et critères de décision de choix en matière de transport et localisation d'activités, dans un contexte d'offre évolutif : c'est probablement le seul moyen d'obtenir une mesure précise de ces paramètres.

Le calage de ces paramètres d'inertie en grandeur nature reste donc à faire, cela pourrait être fait dans un premier temps à l'aide des données d'enquêtes déplacements auprès des ménages comme celles disponibles sur l'agglomération lyonnaise (1976, 1986, 1995).

En outre, les données de l'enquête de 1995 peuvent servir de base de départ à la détermination de la distribution initiale des déplacements par heure de départ et heure d'arrivée préférée, en faisant l'hypothèse que la distribution horaire mesurée des déplacements correspond à une distribution quasi-optimale.

Il reste également à étendre ce modèle aux autres motifs, c'est-à-dire dans ce cas précis caler un modèle de choix modal pour les autres motifs que sont les achats et les déplacements pour les études.

Enfin, tel que conçu, ce modèle offre la possibilité d'inférer aisément les distances parcourues, les temps passés en déplacements, les dépenses afférentes, donc des calculs de surplus.

Conclusion générale et perspectives

Nous avons donc tout d'abord élaboré et décrit une architecture d'ensemble du système de déplacements urbains et de ses interrelations avec le système socio-démographique et le système de localisations. Pour le bloc « transport » nous avons détaillé les ensembles de rétroactions d'une part pour la voiture particulière, d'autre part pour les transports collectifs.

Ont notamment été identifiées un certain nombre de boucles de rétroaction (R pour les positives ou B pour les négatives) qui sont, pour la voiture particulière

- la boucle R2 : « toujours plus loin en voiture »,
- la boucle B5 : « la congestion comme frein à l'étalement urbain »,
- la boucle B6 : « l'accroissement de capacité comme solution à la congestion »,
- la boucle B7 : « la régulation par la congestion »,

et pour les transports collectifs

- la boucle B8 : « la réduction des coûts d'exploitation »
- la boucle B9 : « la hausse des recettes »
- la boucle R1 : « l'autodégradation financière des TC »
- la boucle R3 : « la congestion dégrade l'offre des TC ».

Enfin, nous avons spécifié le traitement de l'évolution de la demande sur la base de segments de déplacements définis par une origine-destination, une activité, un mode de déplacement et une heure donnés. Les transitions entre segments se font par des modèles de changement qui sont relatifs respectivement, à l'heure, au mode et à la destination du déplacement. Certains de ces modèles restent encore à élaborer.

Nous avons en outre construit une maquette d'un modèle de régulation financière de l'offre en transports collectifs et testé ce modèle à partir de données d'entrée fictives. Ce modèle permet de simuler le mécanisme des boucles R1 (auto-dégradation financière des TC), B8 (réduction des coûts d'exploitation) et B9 (hausse des recettes). Nous avons montré comment, sous certaines conditions de restriction financière, le système pouvait s'effondrer.

Le modèle de choix d'heure de départ que nous proposons est couplé à l'affectation sur les itinéraires et a pour caractéristiques :

- d'intégrer une représentation plus réaliste de la formation de la congestion sur un axe routier, à travers la formation de files d'attente, sur la base d'un modèle de goulot ;
- de combiner ce modèle de goulot avec un algorithme de recherche de plus court chemin (en temps généralisé) pour calculer l'affectation du trafic sur le réseau et les temps de parcours correspondant ;
- d'« endogénéiser » le choix de l'heure de départ, par rapport à une heure d'arrivée préférée, en intégrant les coûts d'arrivée en avance ou en retard.

Ce modèle offre des pistes pour simuler, en combinaison avec le modèle de choix modal, plusieurs « paradoxes » de la congestion comme par exemple le paradoxe de Downs-Thomson à l'origine de la conjecture de Mogridge.

Le modèle de répartition modale, quant à lui, découle de principes théoriques micro-économiques et est fondé pour l'essentiel sur les déterminants du prix et du temps. Le noyau central du modèle, un modèle prix-temps, a été calibré sur la base des comportements

observés en 1994-1995 sur l'agglomération lyonnaise et permet notamment, en s'appuyant sur des classes de distance, de s'affranchir d'un zonage ad hoc. Il s'appuie également sur des classes de vitesse de la voiture particulière et vitesse des transports collectifs : cela autorise une bonne transférabilité du modèle à d'autres agglomérations. Le test du modèle en simulation a permis d'en valider la cohérence interne.

L'analyse des comportements observés et des caractéristiques de l'offre de transport a permis également de définir une méthode de modélisation de la répartition modale qui

- distingue les populations en fonction de la disponibilité réelle d'une voiture particulière au moment du déplacement ;
- traite séparément les destinations avec stationnement payant ou gratuit ;
- traite séparément la marche à pied en fonction des classes de distance.

Enfin, le couplage entre le modèle de répartition modale et celui du choix d'heure de départ et d'affectation sur les réseaux a été réalisé. Les tests sur des configurations simplifiées d'offre et de demande ont permis de valider le comportement du modèle face à des situations de congestion et aux évolutions de la motorisation. Ce modèle montre comment, sous certaines hypothèses, la montée de la congestion favorise les transports collectifs, alors qu'inversement, une augmentation de capacité routière permet à la voiture particulière de conserver ses avantages par rapport aux transports collectifs.

Bien évidemment, un certain nombre de tâches restent à accomplir pour aboutir à un système de modèles complet. Certaines d'entre elles peuvent d'ores et déjà être identifiées.

Le modèle de répartition modale est pour le moment restreint au motif de destination travail, il reste à l'étendre aux autres motifs. Néanmoins la méthode de modélisation devrait rester la même. Il conviendra également de tester la robustesse de ce modèle pour les enquêtes précédentes.

En outre, pour compléter le modèle, un modèle d'interaction entre offre et demande de stationnement doit être élaboré : une piste envisageable est, à partir d'un stock connu (ou au moins estimé) de places gratuites et payantes, modéliser le phénomène de remplissage des places, en cohérence avec le modèle de choix d'heure de départ.

Malgré quelques tentatives de calage, non exposées dans ce rapport, de l'influence des localisations des résidences et des emplois sur les flux de déplacements domicile-travail par couple origine-destination, le modèle de distribution spatiale reste à élaborer.

Le couplage de l'ensemble répartition modale / choix d'heure de départ avec le modèle de régulation financière des transports collectifs devra être réalisé. Entre temps ce modèle de régulation de l'offre aura pu être enrichi pour le rendre plus réaliste, par exemple en introduisant la densité d'arrêts, le taux de remplissage des véhicules, un modèle d'arrivée aux arrêts fonction des fréquences, et également un module de gestion de la dette qui a un impact sur la capacité de financement dans le cadre du niveau de déficit accepté.

Faute de données empiriques, les valeurs des délais d'adaptation comportementale au changement des caractéristiques de l'offre ont été fixées quelque peu arbitrairement. Comme exposé dans la section consacrée au couplage des modèles de répartition modale et de choix d'heure de départ, différentes méthodes peuvent être utilisées pour calibrer ces paramètres. Il conviendra de tester la sensibilité du modèle aux valeurs de ces paramètres : cela permettra de déterminer si des investigations empiriques supplémentaires sur des panels sont requises pour aider à la mesure de ces paramètres.

Concernant le modèle de choix d'heure de départ, il faudra déterminer par des tests de sensibilité dans quelle mesure des mesures précises des coûts horaires d'arrivée en avance ou

en retard sont requises pour l'agglomération où est appliquée le modèle ou si le transfert de valeurs nationales est suffisant.

Enfin, tel que conçu, ce modèle offre la possibilité d'inférer aisément les distances parcourues, les temps passés en déplacements, les dépenses afférentes, donc des calculs de surplus. Les modules correspondants restent cependant à élaborer.

Bibliographie

- Abbas, K.A., Bell, M.G.H. (1994) System dynamics applicability to transportation modeling. *Transportation Research A*, Vol 28A, n° 5, pp. 373-400, 1994.
- Armoogum, J. Bussière, Y., Madre, J.-L. (1995) Demographic dynamics of mobility in urban areas : a case study of Paris and Grenoble. *World Conference on Transportation Research Proceedings*, Sydney.
- Armoogum, J., Madre, J.-L. (1996) *Motorisation et mobilité des Franciliens aux horizons 2010-2020*. Rapport INRETS n° 209.
- Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R. (1993) A Structural Model of Peak Period Congestion : a Traffic Bottleneck with Elastic Demand. *American Economic Review* 83 (1), pp. 161-179.
- ATN (2002) Simulation de scénarios d'évolution prospective de la mobilité urbaine à 20 ans. Application à l'Aire Urbaine de Lyon. Rapport de résultats. Octobre 2002, 44 p.
- Berthier, J.P. (1998) Congestion urbaine : un modèle de trafic de pointe à courbe débit-vitesse et demande élastique. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°34/1998, pp. 3-29.
- Bonafous, A. (1985) Simulation du financement du transport urbain : le modèle QuinQuin. *Transports urbains*, n°54, GETUM, Paris.
- Bouf, D. (1989) *Un nouvel instrument d'analyse stratégique pour la RATP : le modèle Gros QuinQuin*. Thèse de l'Université Lumière-Lyon2, Lyon.
- Bouf, D., Gargaillo, L. (1985) Les modèles QuinQuin. *Transport, Urbanisme, Planification*, vol.7, Paris.
- Cairns, S., Hass-Klau, C., Goodwin, P. (1998) *Traffic Impact of Highway Capacity Reductions: Assessment of the Evidence*. Landor Publishing, 1998, 261 p.
- De Palma, A. Fontan, C. (2000) *Enquête MADDIF : Multimotif adaptée à la dynamique des comportements de déplacements en Ile-de-France*. Rapport de recherche pour la DRAST. 147 p.
- De Palma, A., Fontan, C. (2001) Choix modal et valeur du temps en Ile-de-France. *Recherche Transports Sécurité*, n° 71, pp. 24-48.
- de Palma, A., Marchal, F. (2001) *Real cases applications of the fully dynamic METROPOLIS tool-box: an advocacy for large-scale mesoscopic transportation systems*. Unpublished paper. 28 p.
- Gallez, C. (1995) Une nouvelle perspective pour la projection à long terme des comportements d'équipement et de motorisation. *Recherche Transports Sécurité*, n°48, pp. 3-14, Septembre 1995.
- Golob, T., Kitamura, R., Long, L. (eds) (1997). *Panels for Transportation Planning*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Goodwin, P. (1998) The End of Equilibrium. In : *Theoretical foundations of travel choice modeling*, T. Gärling, T. Laitila, K. Westin, eds, pp. 103-127. Pergamon, Oxford, 1998.

- Goodwin, P.B. (1984) Evolution de la motivation des usagers en matière de choix modal, *Rapport de la 68ème table ronde*, CEMT, Paris.
- Goodwin, P.B. (1992) A Review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes. *Journal of Transport Economics and Policy*. Vol XXVI n°2, pp. 155-169.
- Jara-Diaz, S.-R. (1998) Time and Income in Travel Choice : Towards a Microeconomic Activity-Based Theoretical Framework. In Garling, T. Laitila, T. and Westin, K. (eds.), *Theoretical Foundations of Travel Choice Modelling*. Pergamon, 1998, pp. 51-73.
- Jara-Diaz, S.-R., Videla, J. (1989) Detection of Income Effect in Mode Choice : Theory and Application. *Transportation Research*, 23B, 393-400.
- Karsky, M. Salini, P. (1999) *Le modèle Simtrans*. Rapport de recherche PREDIT. 50p. + annexes, Septembre 1999.
- Kitamura, R. (1990) Panel analysis in transportation planning : an overview. *Transportation Research*, vol.24 A, N°6, 1990.
- Lichère, V. (1997) *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements. Présentation générale*. SEMALY-LET, 28 p. + annexes.
- Mas-Colell, A., Whinston, M.D., Green, J.R. (1995) *Microeconomic Theory*. Oxford University Press. 981 p.
- Mougeot, M. (1989) *Economie du secteur public*. Economica, 485 p.
- Raux (C.) (1998) *Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise. Tests de sensibilité, erreurs et incertitudes liées à la prévision*, LET, SEMALY, janvier 1998, 64 p.
- Raux (C.), Masson (S.), Godinot (C.) (1997) *Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise. Vingt ans de rétrospective à travers les enquêtes-déplacements de l'agglomération lyonnaise (1976-1986-1995)*, LET, SEMALY, février 1997, 181 p.
- Raux, C., Tabourin, E. (1992) Congestion et crise du financement des transports à Lyon : vers un péage urbain ? In *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Raux, C. et Lee-Gosselin, M. (ss la direction de). Editions du Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, Lyon, pp. 41-63.
- Segonne, C. (2001) Choix d'itinéraires et péage urbain. Le cas du tunnel Prado-Carénage à Marseille. *Recherche Transports Sécurité*, n° 71, pp. 3-23.
- SEMALY, LET (1997) *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements. Présentation générale*. Février 1997, 28p. + annexes.
- SEMALY, LET (2000) *Modélisation des contraintes de stationnement*. Rapport pour la DTT (à paraître).
- Small, K.A. (1982) The scheduling of consumer activities : work trips. *American Economic Review*, vol. 72.3, pp. 467-479.
- Small, K.A. (1992) *Urban Transportation Economics*. Harwood Economic Publishers, Luxembourg, 185 p.
- Stopher, P.R., Hartgen, D., Li, Y. (1996) SMART : simulation model for activities, resources and travel. *Transportation* 23 :293-312, 1996

Tabourin, E. (1988) Un modèle de simulation du financement public des transports collectifs urbains à l'horizon 2000 : le modèle QuinQuin. *Transport, Environnement, Circulation*, n°87, Paris.

Tabourin, E. (1989) *Un modèle de simulation du financement des transports collectifs urbains à l'horizon 2000 : le modèle QuinQuin. Application à l'agglomération lyonnaise*. Thèse de l'Université Lumière-Lyon2, Lyon.

Vickrey, W.S. (1969) Congestion Theory and Transport Investment. *American Economic Review* (59) pp. 251-260.

Viton, P.A. (1985) On the Interpretation of income Variables in Discrete Choice Models. *Economics Letters* 17 (1985) 203-206.

Wiel, M. (1999) *La transition urbaine*. Pierre Mardaga Editeur. Liège. 149 p.

Annexes

8.4. Annexe 1 : Equations du modèle TC2

vitesse TC=

18
~ km/h
~ |

valeur du temps seuil=

(coût monétaire VP - coût monétaire TC) / (temps TC - temps VP)
~ euros/h
~ |

coût monétaire TC=

tarifs TC
~ euros/déplacement
~ |

déplacements TC=

IF THEN ELSE(valeur du temps seuil < 0 , 0 , IF THEN ELSE(valeur
du temps seuil > 20 , 0 , demande globale * valeur du temps seuil / 20))
~ déplacement
~ |

proportion moyenne d'attente avant le prochain passage=

1/2
~ véhicules TC/déplacement
~ |

temps TC=

distance/vitesse TC + (1/fréquence TC) * proportion moyenne d'attente
avant le prochain passage
~ h/déplacement
~ |

variation de fréquence TC=

IF THEN ELSE((fréquence TC > 59):AND:(variation fréq potentielle>0),
0,variation fréq potentielle)
~ véhicules TC/h/Year
~ |

variation fréq potentielle=

- fréquence TC * tx max var fréq * pression à réduire le déficit
~ véhicules TC/h/Year
~ |

coût fixe d'exploitation=

200
~ euros
~ |

```

coût km VP=
  0.3
  ~      euros/km
  ~      |

coût marginal d'exploitation=
  75
  ~      euros/véhicules TC
  ~      |

coût monétaire VP=
  coût km VP * distance
  ~      euros/déplacement
  ~      |

coûts d'exploitation TC=
  coût fixe d'exploitation + coût marginal d'exploitation * (fréquence
  TC * période horaire)
  ~      euros
  ~      |

déficit=
  recettes TC - coûts d'exploitation TC
  ~      euros
  ~      |

demande globale=
  3000
  ~      déplacement
  ~      |

distance=
  6
  ~      km/déplacement
  ~      |

fréquence TC= INTEG (
  variation de fréquence TC,
  fréquence TC init)
  ~      véhicules TC/h [0,60,1]
  ~      |

fréquence TC init=
  10
  ~      véhicules TC/h
  ~      |

niveau de déficit accepté=
  -350
  ~      euros
  ~      |

période horaire=
  1
  ~      h
  ~      |

pression à réduire le déficit=
  IF THEN ELSE(déficit < niveau de déficit accepté, 1, -1 ) *
  MIN(ABS((niveau de déficit accepté - déficit) / ( - niveau de déficit
  accepté)), 1)

```

~ Dmnl
~ On borne la valeur absolue de la pression à 5, pour éviter les valeurs extrêmes quand le niveau accepté tend vers 0. Le signe de la pression est >0 quand le déficit < accepté, <0 sinon.

recettes TC=
déplacements TC * tarifs TC
~ euros
~ |

tarif TC init=
1.2
~ euros/déplacement
~ |

tarifs TC= INTEG (
variation de tarifs TC,
tarif TC init)
~ euros/déplacement
~ |

temps VP=
distance / vitesse générale
~ h/déplacement
~ |

tx max var fréq=
0.1
~ Dmnl/Year
~ |

tx max var tarif=
0.05
~ Dmnl/Year
~ |

variation de tarifs TC=
tarifs TC * tx max var tarif * pression à réduire le déficit
~ euros/déplacement/Year
~ |

vitesse générale=
25
~ km/h

Niveau de déficit accepté : -800 €

Time (Year)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
fréquence TC	10	17.84	21.15	21.68	21.75	21.75	21.76	21.76	21.76	21.76	21.76
temps TC	0.3833	0.3613	0.3569	0.3563	0.3563	0.3563	0.3563	0.3563	0.3563	0.3563	0.3563
tarifs TC	1.2	0.8860	0.8127	0.8026	0.8014	0.8013	0.8012	0.8012	0.8012	0.8012	0.8012
valeur du temps seuil	4.186	7.531	8.440	8.568	8.584	8.586	8.586	8.586	8.586	8.586	8.586
déplacements TC	627.90	1,129	1,266	1,285	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287
recettes TC	753.48	1,000	1,028	1,031	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032
coûts d'exploitation TC	950	1,538	1,786	1,826	1,831	1,831	1,832	1,832	1,832	1,832	1,832
déficit	-196.51	-537.49	-757.54	-794.70	-799.36	-799.92	-800	-800	-800	-800	-800
pression à réduire le déficit	-0.7543	-0.3281	-0.0530	-0.0066	-0.0007	-9.5367e-005	-1.1138e-005	-1.3732e-006	-3.0517e-007	-3.0517e-007	-3.0517e-007

Niveau de déficit accepté : -185 €

Time (Year)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
fréquence TC	10	9.504	9.129	8.729	8.129	6.683	2.750	1.185	0.7354	0.5225	0.3980
temps TC	0.3833	0.3859	0.3880	0.3906	0.3948	0.4081	0.5151	0.7549	1.013	1.290	1.589
tarifs TC	1.2	1.230	1.255	1.284	1.330	1.464	2.216	3.289	4.141	4.892	5.590
valeur du temps seuil	4.186	3.900	3.675	3.425	3.033	1.993	-1.514	-2.892	-3.028	-2.944	-2.809
déplacements TC	627.90	585.10	551.30	513.83	455.03	299.04	0	0	0	0	0
recettes TC	753.48	720.10	692.26	659.80	605.33	438.03	0	0	0	0	0
coûts d'exploitation TC	950	912.86	884.73	854.70	809.74	701.27	406.29	288.94	255.16	239.18	229.85
déficit	-196.51	-192.75	-192.47	-194.89	-204.41	-263.23	-406.29	-288.94	-255.16	-239.18	-229.85
pression à réduire le déficit	0.0622	0.0419	0.0404	0.0535	0.1049	0.4229	1	0.5618	0.3792	0.2929	0.2424

8.5. Annexe 2 : La demande : comportements observés

8.5.1 Quelques résultats de l'enquête-ménage

L'agglomération de Lyon (1.200.000 hab.) a une forme urbaine classique dans laquelle les zones centrales (Lyon et Villeurbanne, zones 1 à 8) concentrent environ la moitié des habitants et des emplois avec une densité d'environ 9.000 hab/km² (cf. Figure 70). Comme ses consoeurs elle est toutefois sujette au phénomène d'étalement urbain, population et emplois ayant tendance, sur le long terme, à s'exiler en banlieue ou en péri-urbain.

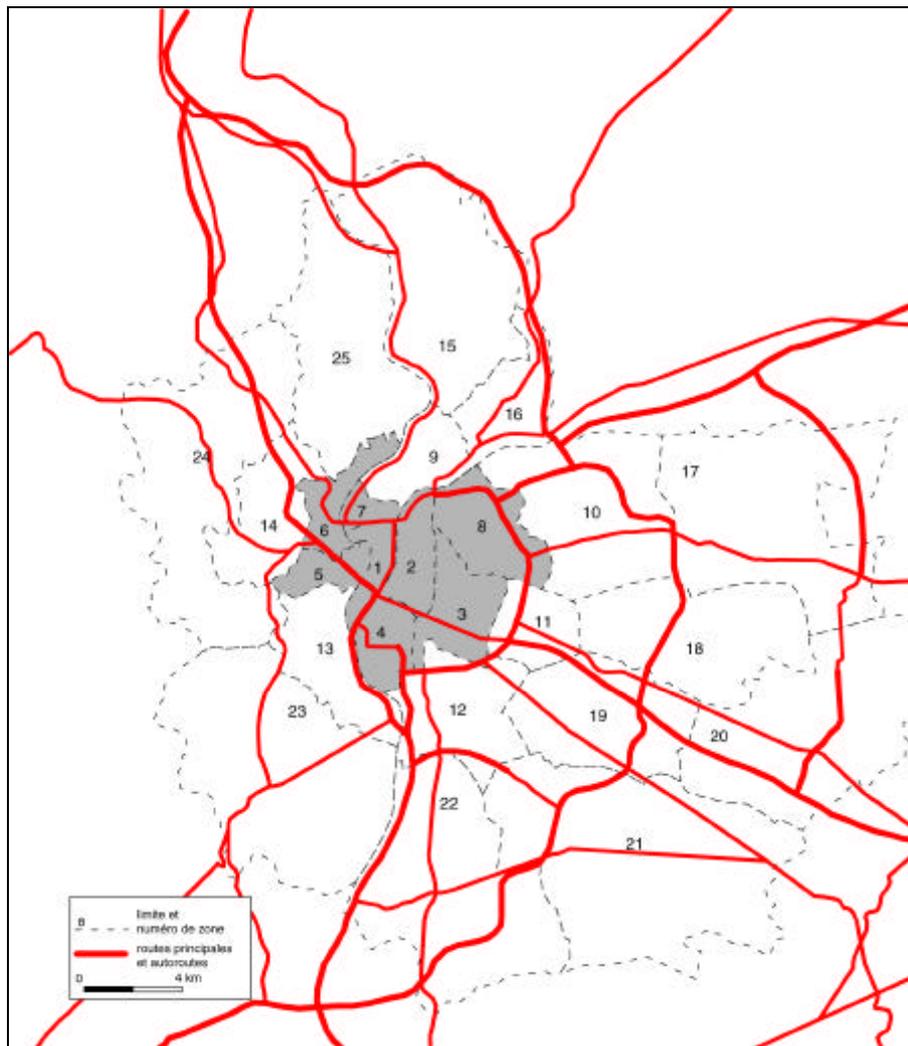


Figure 70 : Carte de l'agglomération lyonnaise et découpage en 25 zones

Les trois dernières Enquêtes Ménages dont les données sont disponibles pour l'agglomération lyonnaise ont été réalisées en 1976-1977, 1985-1986 et 1994-1995. Les principaux résultats en sont exposés dans un autre rapport (Raux et al, 1997).

Dans l'approche de modélisation développée ici, nous analysons l'échantillon d'enquête non pas du point de vue de sa représentativité de la population mais du point de vue de sa structure

interne. C'est pourquoi nous travaillons sur les données *non redressées* de l'enquête (ici celle de 1994-1995, correspondant à des déplacements circonscrits à l'aire de l'EM95 à l'exception des communes de l'Ain).

Sans vouloir reprendre l'ensemble des résultats du rapport de 1997, nous rappelons ici quelques résultats concernant les déterminants qui nous semblent à la base des comportements de déplacements, à savoir

- L'effet « cycle de vie » sur les possibilités de choix du mode de déplacement : cet effet est appréhendé ici avec l'âge.
- L'effet « revenu » pour illustrer le recours à la voiture.
- L'effet « distance » comme première approche des conditions d'offre.

8.5.1.1 Répartition entre les différents modes de déplacement

2RM	AUTRE	MAP	TC	VELO	VP	Total
302	173	14861	6397	371	27254	49358
1%	0%	30%	13%	1%	55%	100%

Tableau 14

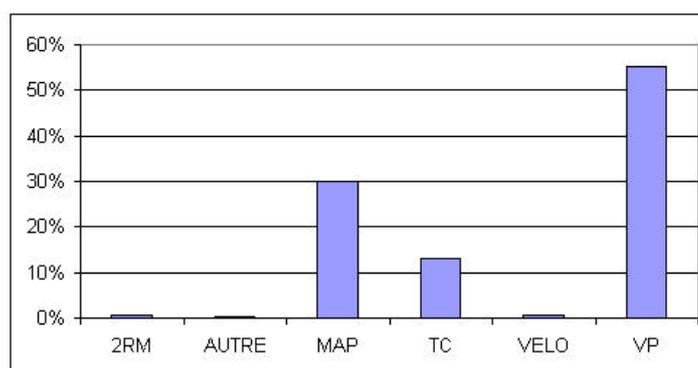


Figure 71

Ce premier graphique permet de rappeler la nette prépondérance des modes voiture particulière (VP), marche à pied (MAP) et transports collectifs (TC). Les modes deux-roues à moteur (2RM), AUTRE et VELO sont quant à eux marginaux.

8.5.1.2 Mode de déplacement et âge

	2RM (%)	AUTRE (%)	MAP (%)	TC (%)	VELO (%)	VP (%)
05#10	0	0	52	4	0	44
10#18	1	0	47	26	2	24
18#25	1	0	26	30	1	42
25#30	1	0	25	10	0	63
30#40	0	0	22	7	1	70
40#50	0	0	20	7	0	71
50#60	0	0	24	9	1	66
60#70	0	0	35	10	1	53
70#80	1	0	44	15	1	39
80#90	0	0	57	12	0	31
90#100	0	0	55	15	0	30

Tableau 15

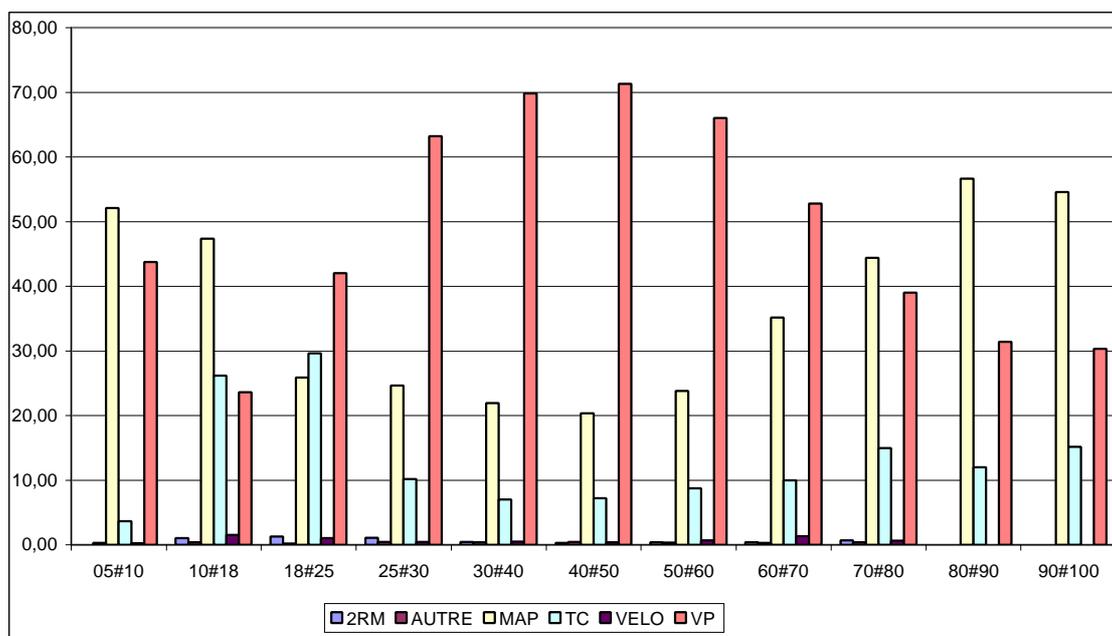


Figure 72

Ce graphique nous permet de visualiser la proportion de chacun des modes de transport pour chaque classe d'âge.

De 5 à 10 ans

La marche à pied est le mode prépondérant, avec plus de la moitié des déplacements. Le véhicule personnel est le second mode de déplacement. Bien entendu, c'est en tant que passager que s'effectuent ces déplacements en véhicule particulier. Les transports collectifs sont marginaux avec 3,7% des déplacements.

De 10 à 18 ans

L'on remarque une baisse des parts modales de la voiture particulière et de la marche à pied au profit des transports collectifs. La part des transports collectifs y est devenue supérieure à la part des véhicules personnels (toujours à 100% passager). Ceci peut s'expliquer par l'autonomie croissante des écoliers, collégiens et lycéens qui se reportent donc vers les transports collectifs : ceux-ci leur permettent d'aller plus loin qu'à pied et de se déplacer seuls, contrairement au mode voiture particulière où ils doivent être accompagnés.

De 18 à 25 ans

La décroissance de la part modale de la marche à pied continue, majoritairement au profit du mode voiture particulière qui occupe désormais la première place.

Le changement important est le passage de déplacements VP 100% passagers à seulement 26,6%.

De 25 à 60 ans

Le mode voiture particulière prédomine largement (de 63% à 71%), suivi du mode marche à pied. La part du mode transports collectifs est inférieure à 10%.

De 60 ans à plus

Au-delà de 60 ans, la part modale de la voiture particulière décroît fortement pour laisser à nouveau la place à la marche à pied et aux transports collectifs.

8.5.1.3 Mode de déplacement et revenu

Il s'agit des revenus mensuels du ménage y compris les prestations sociales.

Catégorie	Revenu
0	Moins de 2 500F
1	de 2 500 à moins de 5 000F
2	de 5 000F à moins de 7 500F
3	de 7 500F à moins de 10 000F
4	de 10 000F à moins de 12 500F
5	de 12 500F à moins de 15 000F
6	de 15 000F à moins de 20 000F
7	de 20 000F à moins de 30 000F
8	de 30 000F à moins de 50 000F
9	50 000F et plus
99	non-réponse

Tableau 16

	2RM (%)	AUTRE (%)	MAP (%)	TC (%)	VELO (%)	VP (%)	total
R0	0	0	47	30	1	22	100%
R1	1	1	51	20	1	27	100%
R2	1	0	40	17	1	41	100%
R3	1	0	38	13	1	47	100%
R4	1	0	32	12	1	54	100%
R5	1	0	25	11	1	62	100%
R6	0	0	22	10	1	67	100%
R7	1	0	21	10	1	67	100%
R8	0	0	20	10	0	69	100%
R9	0	0	16	14	0	69	100%
R99	1	1	29	14	1	56	100%

Tableau 17 : Répartition entre les différents modes par tranche de revenus (%)

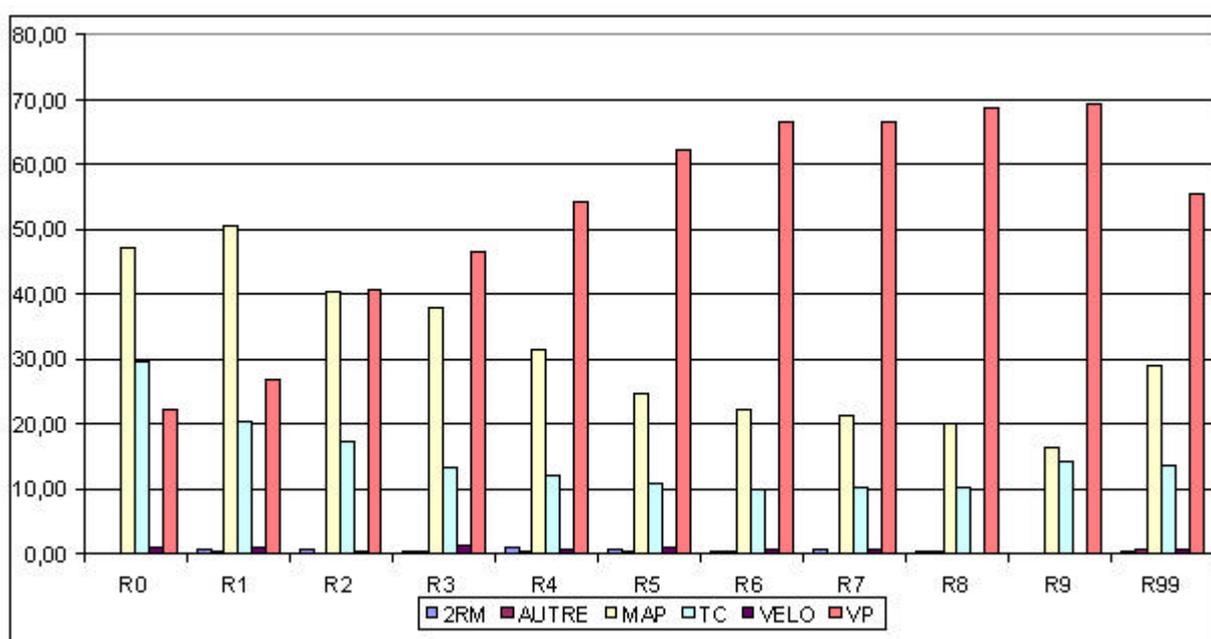


Figure 73

On remarque que les individus ont d'autant plus recours au véhicule personnel que les revenus de leur ménage sont importants. A contrario, les individus de revenus moins importants ont plutôt tendance à se tourner vers la marche et les transports collectifs. Le cas R0 est d'ailleurs révélateur, avec seulement 22% de VP contre 30% de TC et 47% de MAP.

Pour être plus précise, l'analyse devrait tenir compte du nombre de personnes dans le ménage, par exemple en rapportant le revenu du ménage au revenu par unité de consommation. Cependant, cette première analyse suffit à illustrer l'importance de l'effet du revenu sur la préférence en faveur de la voiture.

8.5.1.4 Mode de déplacement et distance

Avec cette confrontation entre mode de déplacement et distance parcourue, on se place déjà à l'interface entre la demande et l'offre : ces données permettent d'illustrer la concurrence entre la voiture particulière et la marche à pied pour les petits déplacements et celle entre transports collectifs et voiture particulière pour les déplacements plus longs.

Classes de distance	2RM	AUTRE	MAP	TC	VELO	VP	total	total cumulé déplacements
(0,1]	0%	0%	75%	2%	0%	22%	100%	23%
(1,2]	0%	0%	40%	8%	1%	50%	100%	46%
(2,3]	1%	0%	21%	14%	1%	63%	100%	59%
(3,4]	1%	0%	7%	20%	1%	71%	100%	67%
(4,5]	2%	0%	2%	25%	1%	70%	100%	72%
(5,10]	1%	0%	1%	23%	0%	74%	100%	89%
(10,15]	1%	0%	1%	22%	0%	76%	100%	96%
(15,20]	1%	1%	1%	18%	0%	80%	100%	99%
(20,+]	1%	1%	1%	12%	0%	85%	100%	100%

Tableau 18 : Répartition des déplacements par mode selon les classes de distance à vol d'oiseau

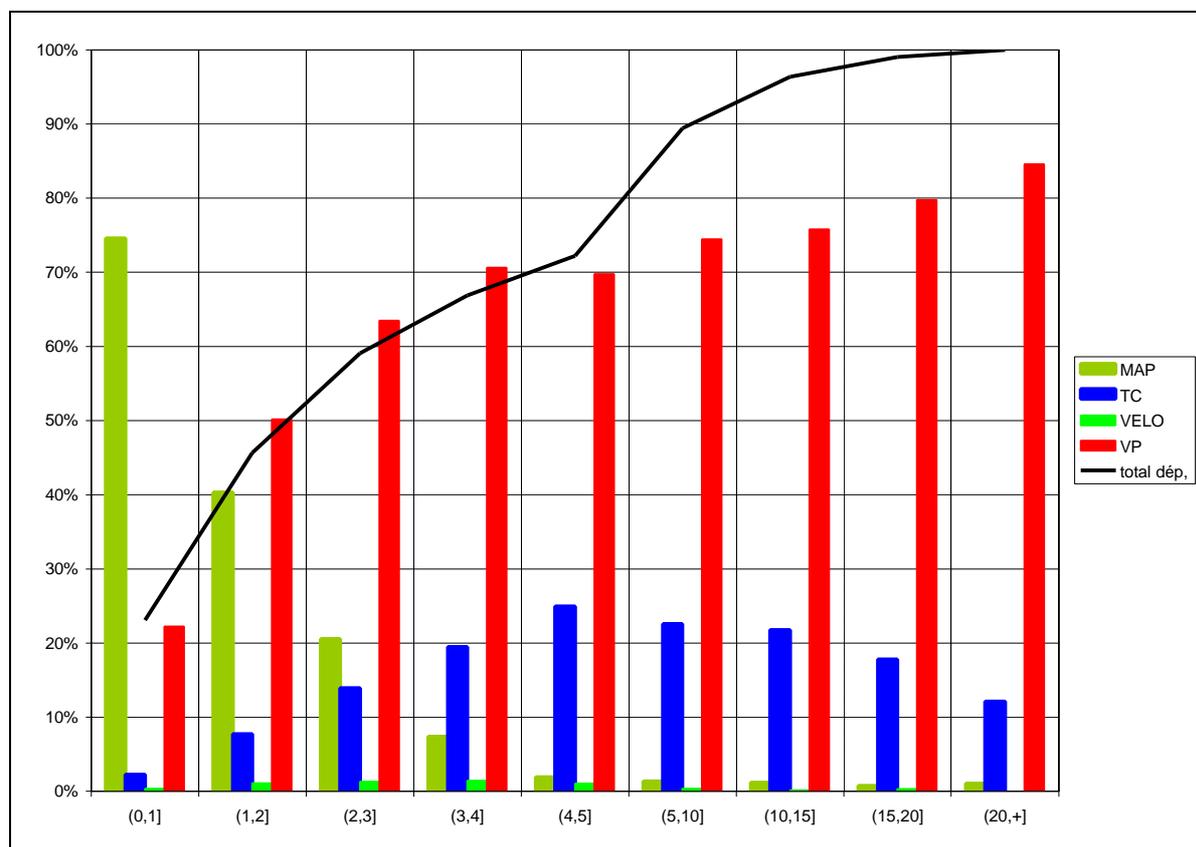


Figure 74 : Répartition des déplacements par mode selon les classes de distance rectilinéaire

Les distances utilisées sont les distances à vol d'oiseau du point de départ au point d'arrivée du déplacement : elles sont calculées sur la base d'un zonage fin. Pour obtenir une distance plus proche de la réalité, il suffit de multiplier par un coefficient de 1,3, qui correspond au rapport moyen entre la distance euclidienne et la distance rectilinéaire. La distance rectilinéaire permet de se rapprocher d'une distance plus réaliste, où les déplacements ne sont

pas des lignes droites, mais une succession de lignes brisées. Ces distances seront utilisées plus avant dans l'étude.

Pour les déplacements de courte distance (moins de 1000 m), la marche à pied est bien sûr majoritaire. Cependant, la voiture particulière monte assez vite en puissance : elle représente (données non montrées ici) déjà plus de 11% des déplacements de moins de 250 m à vol d'oiseau, et 36% entre 750 et 1000 m.

Dans ces déplacements à courte distance les transports collectifs sont quasiment absents. Est en cause probablement le tarif forfaitaire des transports en commun qui ne les rend compétitifs qu'au-delà d'un certain nombre de kilomètres, ainsi que les conditions de cette offre (temps d'accès à la station et fréquence) : la rigidité de cette offre la rend peu compétitive par rapport à la marche à pied ou la voiture pour les petits déplacements. C'est d'ailleurs dans les plages des distances moyennes à élevées (de 3 à 15 km) que les transports en commun obtiennent leurs meilleurs résultats : 20% de part des déplacements contre 75 à 80% pour la voiture particulière.

Bien évidemment, pour caractériser l'offre, il faut tenir compte des vitesses offertes, qui dépendent de la congestion routière, des fréquences pour les transports collectifs et des coûts monétaires des déplacements.

8.5.2 Les données sélectionnées de la base « déplacements » :

NE	Numéro du ménage
NP	Numéro d'ordre de la personne enquêtée au sein du ménage
ND	Numéro d'ordre du déplacement en commençant par le premier déplacement de la journée enquêtée
ORI	C'est le numéro de la zone origine du déplacement selon le découpage en 25 zones obtenu à partir d'une approche combinant bassins versants liés aux grands axes de transport et couronnes autour de Lyon
MORI	C'est le motif à l'origine du déplacement selon la nomenclature agrégée
DEST	C'est le numéro de la zone de destination du déplacement selon le découpage en 25 zones (voir ORI)
MDEST	C'est le motif à la destination du déplacement selon la nomenclature agrégée
DUREE	Durée du déplacement en minutes
MODESYNT	C'est le mode de transport utilisé, a savoir : <ul style="list-style-type: none"> - VPPASS : Véhicule Personnel (VP) en tant que passager - VPCOND : Véhicule Personnel en tant que conducteur - TC : Transports Collectifs - VPCONDTC : VPCOND + TC - VPPASSTC : VPPASS +TC - 2RM : Deux Roues à Moteur - VELO - AUTR - MAP : Marche A Pied
MODETRIPS	Version agrégée de MODETRIPS 2RM, AUTRE, MAP, TC, VELO, VP
DISTVO	Il s'agit de la distance du déplacement estimée à vol d'oiseau à partir des coordonnées x-y de l'origine et de la destination du déplacement. Cette distance est exprimée en km
NOVEHIC	Numéro (au sein du ménage) du véhicule utilisé pour le déplacement
NBPERVEH	Nombre de personnes dans le véhicule
PAYEURDE	Payeur du déplacement
TYPEPAYST	Type de stationnement : horodateur, abonnement mensuel ...

COUTST	Coût de stationnement
PAYEURST	Payeur du stationnement
TSNCF	Titre de transport SNCF (suivant la nomenclature de l'enquête)
TTCL	Titre de transport TCL (suivant la nomenclature de l'enquête)
AGE	Age de la personne
NBVPDISPO	Nombre de voitures disponibles au sein du ménage
PERMIS	La personne est-elle titulaire du permis ?
TARIFTC	Tarif TC correspondant
TEMPSTC	Temps TC du modèle OD en heure de pointe correspondant
NOVEHUTIL	<p>Nombre de véhicules utilisés au sein du ménage. Ce nombre a été calculé grâce à la requête SQL suivante :</p> <pre>SELECT NE,COUNT(DISTINCT(NOVEHIC)) FROM "TMP.DB" GROUP BY NE</pre> <p>L'on obtient ainsi le nombre de véhicule impliqués dans des déplacements au cours de la journée</p>

8.6. Annexe 3 : Le modèle prix-temps

(adapté de Bonnel, 2002)

Le modèle repose sur l'hypothèse que le choix d'un voyageur entre deux modes de transport A et B s'effectue en fonction de la valeur que celui-ci attribue à son temps, et des caractéristiques de coût et de temps de transport de chacun des modes. La comparaison se fait par le biais du coût généralisé de chacun des modes : ce coût généralisé s'exprime comme une combinaison du coût d'usage du mode et du temps passé en déplacement valorisé par la valeur du temps h_k de l'individu.

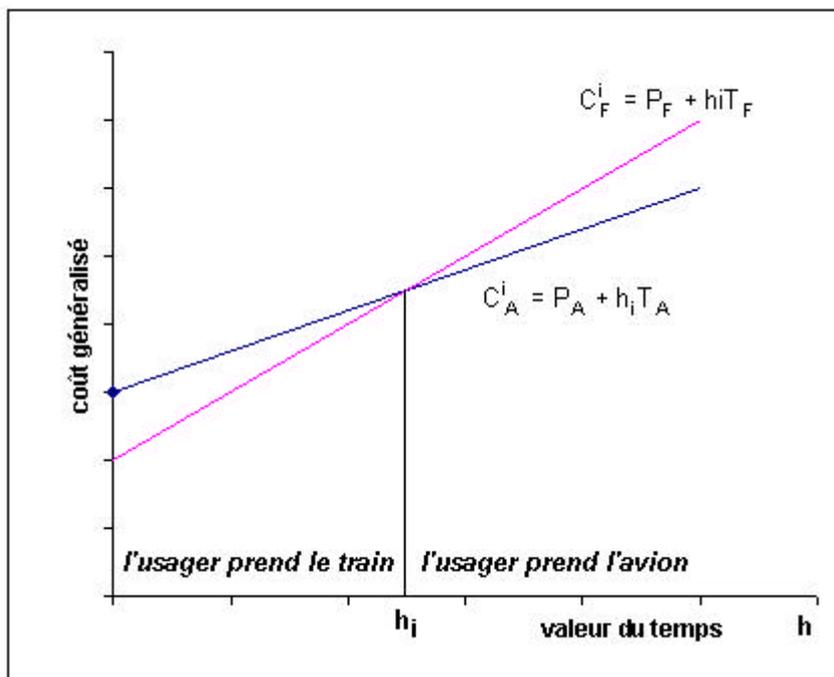
Le coût généralisé cg_{mk} d'un mode m pour l'individu k s'écrit

$$cg_{mk} = c_m + h_k t_m$$

où c_m représente le coût monétaire d'usage du mode, h_k la valeur du temps de l'individu k et t_m le temps passé en déplacement avec le mode m .

Hypothèse 1 : l'utilisateur k choisit le mode dont le coût généralisé est le plus faible.

Avec deux modes A et B nous permet d'obtenir le graphique suivant :



Sur une liaison donnée i desservie par les deux modes A et B, il existe une valeur du temps h_i telle que $cg_{Ai} = cg_{Bi}$, soit encore

$$h_i = \frac{(c_A - c_B)}{(t_B - t_A)}$$

Cette quantité est appelée valeur d'indifférence du temps sur la liaison i . On vérifie aisément qu'un voyageur k choisira le mode B si $h_k < h_i$, le mode A sinon.

Hypothèse 2 : on suppose que la population des voyages est caractérisée par une distribution de la valeur du temps des voyageurs $f(h)$.

La fonction de répartition $F(h) = \int_0^h f(x)dx$

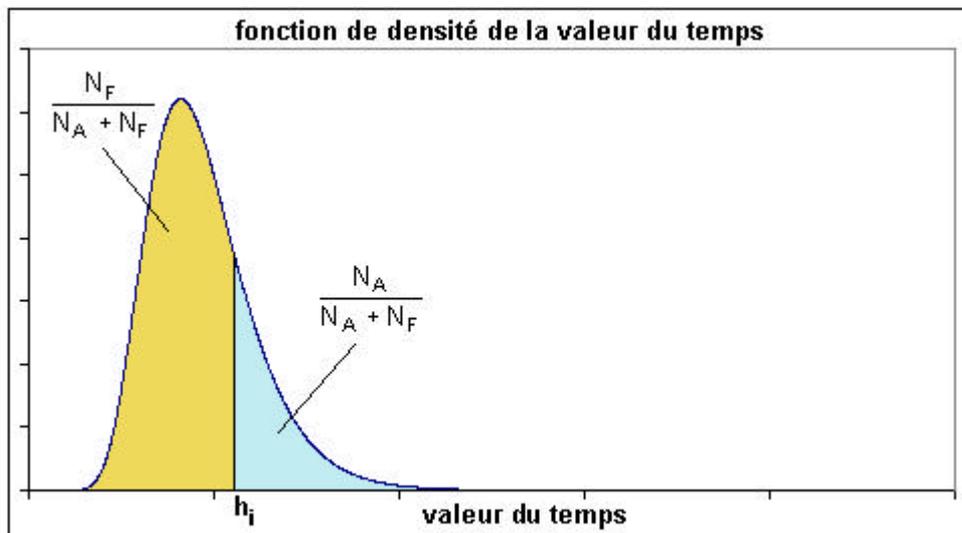
est égale à la proportion de voyages dont la valeur du temps est inférieure à h .

Il en découle que la proportion d'usagers du mode B dans le trafic total sera donnée par $F(h_i)$ et la proportion d'usagers du mode A par $(1 - F(h_i))$.

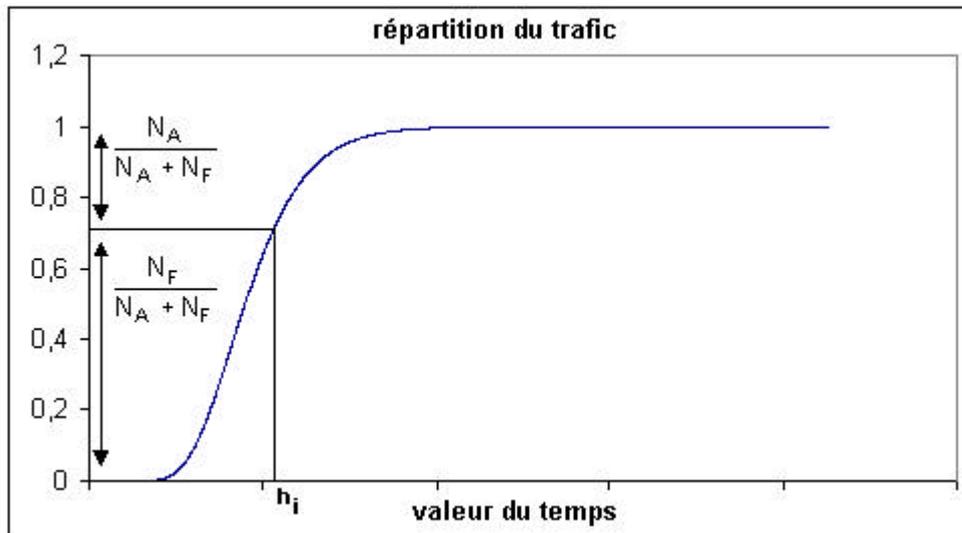
Hypothèse 3 : la forme de la fonction de distribution des valeurs du temps n'étant pas connue, on pose une analogie avec la distribution des revenus dans la population, soit une fonction de densité log-normale.

$\ln(h)$ suit une loi normale $N(m, \mathbf{s})$

où \mathbf{s} est l'écart-type du logarithme népérien des valeurs individuelles du temps, et m la moyenne du logarithme népérien des valeurs individuelles du temps.



Forme de la fonction de densité log-normale



Forme de la fonction de répartition log-normale

De cette fonction de densité log-normale on déduit que la fonction de répartition s'écrit :

$$F(h) = N\left(\frac{\ln(h) - m}{s}\right)$$

où N est la loi normale standard.

L'ajustement du modèle consiste à estimer les paramètres s et m .

Posons

$$u = \frac{1}{s}(\ln(h) - m)$$

u étant la transformée de Laplace-Gauss (fonction inverse de la loi normale standard).

Il suffit donc d'estimer les paramètres de la droite à partir des observations pour en déduire m et s .

Les valeurs de u s'obtiennent aisément sous tableur avec la fonction statistique « loi.normale.standard.inverse ». Les valeurs de h_i (valeurs d'indifférence) sont obtenues à partir des données de temps et de coût monétaire. Il suffit donc d'estimer la droite passant au plus près de ces points par régression linéaire.

8.7. Annexe 4 : Les données issues du modèle stratégique

8.7.1 Distances

km	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	z15	z16	z17	z18	z19	z20	z21	z22	z23	z24	z25	
z1	2,0	2,5	5,0	4,4	3,2	4,4	2,5	5,0	5,0	10,1	8,8	10,1	6,9	6,3	13,9	10,1	18,3	15,8	14,5	23,9	18,9	17,6	12,6	11,3	10,1	z1
z2	2,5	2,0	3,8	4,4	5,0	5,0	3,8	3,8	4,4	9,5	7,6	8,8	7,6	7,6	13,9	8,8	17,0	13,9	12,6	22,7	17,6	17,6	13,2	12,6	10,7	z2
z3	5,0	3,8	2,0	5,0	7,6	8,8	6,9	5,0	8,2	8,2	4,4	5,7	7,6	11,3	16,4	11,3	15,1	11,3	9,5	20,2	15,1	15,1	11,3	15,1	13,9	z3
z4	4,4	4,4	5,0	2,0	5,7	7,6	6,9	7,6	8,8	12,6	8,2	6,3	3,2	8,8	17,0	13,2	18,9	15,1	12,0	23,3	15,1	13,9	8,2	13,2	14,5	z4
z5	3,2	5,0	7,6	5,7	2,0	3,8	3,8	8,2	7,6	15,1	11,3	11,3	5,7	4,4	15,1	12,6	21,4	18,9	16,4	27,7	19,5	17,6	10,7	8,8	10,7	z5
z6	4,4	5,0	8,8	7,6	3,8	2,0	3,2	8,8	5,0	13,9	13,2	13,9	8,8	3,2	11,3	10,7	21,4	18,9	18,3	28,4	21,4	21,4	13,9	6,9	7,6	z6
z7	2,5	3,8	6,9	6,9	3,8	3,2	2,0	6,3	2,5	11,3	11,3	12,6	8,8	5,0	10,1	8,2	18,9	17,0	16,4	26,5	20,2	20,2	13,9	9,5	7,6	z7
z8	5,0	3,8	5,0	7,6	8,2	8,8	6,3	2,0	5,0	5,7	6,3	10,1	10,7	10,7	12,6	6,3	13,9	11,3	12,0	21,4	17,0	18,9	15,8	14,5	11,3	z8
z9	5,0	4,4	8,2	8,8	7,6	5,0	2,5	5,0	2,0	10,1	10,7	13,9	11,3	7,6	8,2	6,3	17,0	16,4	16,4	25,8	21,4	22,7	16,4	12,0	6,3	z9
z10	10,1	9,5	8,2	12,6	15,1	13,9	11,3	5,7	10,1	2,0	6,3	11,3	15,1	16,4	15,1	8,2	7,6	7,6	10,7	17,0	17,0	20,2	20,2	20,8	15,1	z10
z11	8,8	7,6	4,4	8,2	11,3	13,2	11,3	6,3	10,7	6,3	2,0	6,3	10,7	15,1	18,3	12,0	12,0	6,3	5,7	15,1	11,3	14,5	13,9	19,5	17,0	z11
z12	10,1	8,8	5,7	6,3	11,3	13,9	12,6	10,1	13,9	11,3	6,3	2,0	6,9	13,9	21,4	15,8	17,6	12,0	7,6	18,3	8,8	8,8	8,8	18,3	19,5	z12
z13	6,9	7,6	7,6	3,2	5,7	8,8	8,8	10,7	11,3	15,1	10,7	6,9	2,0	8,8	20,2	16,4	22,1	17,6	13,9	25,2	15,8	12,6	5,0	12,6	16,4	z13
z14	6,3	7,6	11,3	8,8	4,4	3,2	5,0	10,7	7,6	16,4	15,1	13,9	8,8	2,0	13,9	12,6	23,3	21,4	19,5	30,2	23,3	21,4	13,9	5,0	10,1	z14
z15	13,9	13,9	16,4	17,0	15,1	11,3	10,1	12,6	8,2	15,1	18,3	21,4	20,2	13,9	2,0	6,9	19,5	20,8	22,7	30,2	29,0	30,2	25,2	16,4	5,0	z15
z16	10,1	8,8	11,3	13,2	12,6	10,7	8,2	6,3	6,3	8,2	12,0	15,8	16,4	12,6	6,9	2,0	13,9	13,9	17,0	23,9	22,7	25,2	21,4	16,4	7,6	z16
z17	18,3	17,0	15,1	18,9	21,4	21,4	18,9	13,9	17,0	7,6	12,0	17,6	22,1	23,3	19,5	13,9	2,0	6,3	12,6	12,6	18,3	23,9	25,2	27,7	21,4	z17
z18	15,8	13,9	11,3	15,1	18,9	18,9	17,0	11,3	16,4	7,6	6,3	12,0	17,6	21,4	20,8	13,9	6,3	2,0	6,9	9,5	12,6	18,3	20,2	25,2	21,4	z18
z19	14,5	12,6	9,5	12,0	16,4	18,3	16,4	12,0	16,4	10,7	5,7	7,6	13,9	19,5	22,7	17,0	12,6	6,9	2,0	11,3	6,3	12,6	15,8	23,9	22,7	z19
z20	23,9	22,7	20,2	23,3	27,7	28,4	26,5	21,4	25,8	17,0	15,1	18,3	25,2	30,2	30,2	23,9	12,6	9,5	11,3	2,0	13,2	20,2	26,5	34,0	30,9	z20
z21	18,9	17,6	15,1	15,1	19,5	21,4	20,2	17,0	21,4	17,0	11,3	8,8	15,8	23,3	29,0	22,7	18,3	12,6	6,3	13,2	2,0	7,6	15,1	26,5	27,1	z21
z22	17,6	17,6	15,1	13,9	17,6	21,4	20,2	18,9	22,7	20,2	14,5	8,8	12,6	21,4	30,2	25,2	23,9	18,3	12,6	20,2	7,6	2,0	9,5	23,3	27,1	z22
z23	12,6	13,2	11,3	8,2	10,7	13,9	13,9	15,8	16,4	20,2	13,9	8,8	5,0	13,9	25,2	21,4	25,2	20,2	15,8	26,5	15,1	9,5	2,0	15,1	21,4	z23
z24	11,3	12,6	15,1	13,2	8,8	6,9	9,5	14,5	12,0	20,8	19,5	18,3	12,6	5,0	16,4	16,4	27,7	25,2	23,9	34,0	26,5	23,3	15,1	2,0	10,1	z24
z25	10,1	10,7	13,9	14,5	10,7	7,6	7,6	11,3	6,3	15,1	17,0	19,5	16,4	10,1	5,0	7,6	21,4	21,4	22,7	30,9	27,1	27,1	21,4	10,1	2,0	z25

8.7.2 Temps TC

Temps OD pénibilisés normés

mn	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	z15	z16	z17	z18	z19	z20	z21	z22	z23	z24	z25
z1	22	23	25	33	30	22	21	27	26	45	30	36	37	36	51	52	76	54	52	67	63	64	61	52	45
z2	23	23	23	33	37	24	29	24	33	42	28	30	44	38	53	60	73	52	50	71	57	58	70	55	47
z3	25	23	22	39	39	27	30	31	35	41	25	27	45	41	56	61	72	50	47	68	54	55	71	58	51
z4	33	35	34	28	46	39	38	43	43	60	43	36	30	52	68	69	90	68	64	80	66	67	54	65	59
z5	37	39	42	52	28	31	43	47	64	47	64	47	49	35	33	60	74	72	69	85	77	77	58	50	55
z6	22	24	27	39	31	28	28	32	32	48	32	34	43	30	48	59	79	56	54	70	62	62	69	50	43
z7	21	29	30	38	35	28	27	33	21	51	35	42	42	41	51	48	81	60	57	69	69	66	69	55	48
z8	27	24	31	41	41	32	33	23	34	34	35	38	48	46	61	59	62	61	58	75	66	66	74	60	53
z9	26	33	35	43	40	32	21	35	28	52	40	46	47	45	46	43	83	64	62	74	73	70	73	59	46
z10	45	42	42	59	59	49	51	34	51	28	36	45	63	63	67	46	45	45	61	70	73	73	90	78	71
z11	30	28	25	44	44	32	35	35	40	36	28	28	47	46	61	65	64	44	41	69	56	56	73	63	56
z12	36	30	27	44	47	34	39	38	43	45	28	28	38	49	64	70	76	53	45	63	47	47	61	65	58
z13	42	45	47	34	35	44	44	50	48	65	48	39	28	51	74	75	95	73	67	83	69	70	40	55	65
z14	34	37	40	48	32	32	37	42	41	60	45	47	51	28	58	68	91	69	67	79	75	75	67	40	49
z15	50	46	50	59	62	51	51	51	46	68	55	57	69	65	40	49	99	79	77	96	84	85	95	76	48
z16	44	40	44	54	57	45	48	45	44	47	49	52	64	59	49	40	74	74	71	91	79	79	90	76	69
z17	79	76	76	93	93	83	85	66	85	48	68	80	98	97	102	78	40	54	75	59	91	107	120	112	106
z18	54	52	49	69	68	56	60	60	64	45	44	53	71	70	85	74	49	40	49	53	69	80	97	87	80
z19	48	50	47	62	59	51	51	56	55	61	41	44	62	64	81	82	71	49	40	57	48	70	88	78	72
z20	51	54	51	65	62	54	53	59	58	69	52	46	64	67	83	84	60	54	44	40	60	74	90	81	74
z21	51	54	51	65	62	54	53	59	58	69	52	46	64	67	83	84	92	68	44	60	40	50	90	81	74
z22	49	53	50	62	59	52	51	57	56	68	52	45	64	65	81	82	99	76	69	82	50	40	71	79	72
z23	52	55	57	58	59	54	54	60	58	78	62	64	41	52	81	85	108	87	84	96	93	71	40	58	75
z24	43	46	49	57	47	41	45	51	50	69	54	56	55	38	67	76	100	78	76	88	83	84	73	40	55
z25	50	52	56	67	59	45	56	61	52	77	61	63	71	49	46	68	108	85	82	98	90	91	93	56	40

8.7.4 Temps VP

Temps OD en charge sur réseau primaire + 12 mn

mn	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	z15	z16	z17	z18	z19	z20	z21	z22	z23	z24	z25	
z1	15	18	23	20	17	21	16	28	20	33	30	30	22	23	28	27	41	39	34	41	39	36	28	27	28	z1
z2	16	15	18	20	21	23	18	22	21	28	24	26	25	28	30	29	35	34	29	35	33	32	30	31	30	z2
z3	38	34	15	42	41	44	39	20	27	25	19	21	33	48	35	35	33	28	23	30	28	26	38	52	44	z3
z4	20	25	22	15	25	28	24	29	27	35	28	22	17	31	36	35	43	36	31	37	32	28	22	35	36	z4
z5	36	41	42	33	15	18	39	49	43	51	42	36	21	19	33	39	58	49	44	51	46	42	26	23	25	z5
z6	33	38	44	38	18	15	36	48	38	45	48	42	26	17	28	33	53	53	50	57	51	47	32	21	20	z6
z7	24	22	27	30	23	17	15	27	16	32	33	36	31	22	24	24	40	40	37	44	42	42	37	26	24	z7
z8	39	35	20	43	44	38	33	15	20	18	18	25	37	43	28	27	25	25	23	29	27	30	42	47	36	z8
z9	37	35	30	43	36	30	26	23	15	29	29	36	45	36	20	20	36	36	34	40	38	41	50	39	29	z9
z10	45	41	25	48	49	44	39	18	25	15	23	29	41	49	28	23	20	19	25	30	29	34	46	53	39	z10
z11	46	41	24	42	39	44	40	18	26	21	15	18	30	46	34	32	29	21	16	23	21	24	36	50	43	z11
z12	44	42	21	36	33	38	46	25	32	28	18	15	24	39	41	39	35	25	20	27	21	18	30	43	46	z12
z13	32	37	34	24	21	26	36	40	39	43	34	28	15	27	42	47	50	41	36	43	37	33	18	31	34	z13
z14	29	34	40	37	19	20	32	44	36	48	47	43	27	15	30	35	55	55	51	58	52	48	33	16	22	z14
z15	47	46	41	54	37	32	36	33	22	29	40	46	46	33	14	17	37	37	42	47	47	52	51	37	23	z15
z16	49	47	38	55	42	37	37	30	24	24	35	41	51	38	17	14	32	32	37	42	42	47	57	42	28	z16
z17	63	59	43	66	66	62	57	36	43	30	39	46	58	67	46	41	14	32	35	27	40	45	63	71	57	z17
z18	52	48	32	52	48	51	46	25	32	19	21	28	40	55	35	30	23	14	17	22	22	28	45	59	46	z18
z19	50	46	29	47	43	49	44	23	30	24	16	23	35	50	38	35	26	17	14	19	17	22	40	54	47	z19
z20	58	53	36	54	51	56	51	30	38	32	24	30	42	58	46	43	20	25	20	14	24	30	48	61	55	z20
z21	55	50	32	48	44	50	49	27	35	29	21	24	36	51	43	40	31	22	17	24	14	18	41	55	52	z21
z22	53	52	30	45	42	48	54	33	41	35	27	21	33	49	49	46	37	28	22	29	18	14	39	52	55	z22
z23	41	45	43	33	29	35	44	49	48	52	43	36	21	36	51	56	59	50	45	51	46	42	14	40	43	z23
z24	32	38	44	41	22	24	36	48	40	49	50	46	30	16	31	36	56	56	54	61	55	52	36	14	23	z24
z25	39	45	49	47	27	21	43	41	30	38	48	51	35	22	20	25	45	45	50	55	55	56	41	26	14	z25
z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	z15	z16	z17	z18	z19	z20	z21	z22	z23	z24	z25		

8.8. Annexe 5 : Les déplacements domicile-travail avec stationnement payant

CD	CVVP	CVTC	COND	TC	MAP	TOT	%COND	%TC	%MAP
(10,15]	(10,20]	(10,15]	1	5		6	17%	83%	0%
(10,15]	(10,20]	(15,20]	1	4		5	20%	80%	0%
(10,15]	(10,20]	(20,30]		1		1	0%	100%	0%
(10,15]	(20,30]	(10,15]			1	1	0%	0%	100%
(10,15]	(20,30]	(15,20]	2			2	100%	0%	0%
(15,20]	(10,20]	(10,15]	4	2		6	67%	33%	0%
(15,20]	(10,20]	(15,20]		1		1	0%	100%	0%
(15,20]	(20,30]	(10,15]		2		2	0%	100%	0%
(15,20]	(20,30]	(15,20]		1		1	0%	100%	0%
(15,20]	(20,30]	(20,30]		1		1	0%	100%	0%
(2,3]	(10,20]	(10,15]			1	1	0%	0%	100%
(2,3]	(10,20]	(6,10]		2	3	5	0%	40%	60%
(2,3]	(6,10]	(10,15]			2	2	0%	0%	100%
(2,3]	(6,10]	(4,6]		3	3	6	0%	50%	50%
(2,3]	(6,10]	(6,10]	3	17		20	15%	85%	0%
(20,25]	(10,20]	(10,15]	1			1	100%	0%	0%
(20,25]	(20,30]	(20,30]	2	1		3	67%	33%	0%
(3,4]	(0,6]	(4,6]	2		2	4	50%	0%	50%
(3,4]	(10,20]	(10,15]		1		1	0%	100%	0%
(3,4]	(10,20]	(6,10]	3	6	2	11	27%	55%	18%
(3,4]	(6,10]	(10,15]	3	6		9	33%	67%	0%
(3,4]	(6,10]	(4,6]		3		3	0%	100%	0%
(3,4]	(6,10]	(6,10]	1	4		5	20%	80%	0%
(4,5]	(0,6]	(4,6]		1		1	0%	100%	0%
(4,5]	(10,20]	(10,15]	1	3		4	25%	75%	0%
(4,5]	(10,20]	(6,10]		4	1	5	0%	80%	20%
(4,5]	(6,10]	(10,15]	4	4		8	50%	50%	0%
(4,5]	(6,10]	(6,10]	1	1		2	50%	50%	0%
(5,10]	(0,6]	(4,6]	1			1	100%	0%	0%
(5,10]	(10,20]	(10,15]	7	18	1	26	27%	69%	4%
(5,10]	(10,20]	(15,20]	6	6		12	50%	50%	0%
(5,10]	(10,20]	(6,10]	2	10	2	14	14%	71%	14%
(5,10]	(20,30]	(10,15]			1	1	0%	0%	100%
(5,10]	(20,30]	(15,20]	4	2		6	67%	33%	0%
(5,10]	(6,10]	(10,15]	2	9		11	18%	82%	0%
(5,10]	(6,10]	(6,10]	2	4		6	33%	67%	0%

Tableau 19 : Les déplacements domicile-travail avec stationnement payant

8.9. Annexe 6 : Equations du modèle « RépartMode » sous Vensim

```
valeur du temps seuil=  
  IF THEN ELSE(composante temps = 0, -1 , (coût monétaire VP - coût  
monétaire TC) * 60\  
  / composante temps)  
  ~ euros/h  
  ~ Si la composante temps est nulle on met une valeur négative à  
VdT, sinon \  
  on la calcule.  
  |
```

```
composante temps=  
  (temps TC - temps VP + composante décalage TC - composante décalage  
VP)  
  ~ mn  
  ~ Différence temps de parcours et décalage (retard / arrivée)  
entre modes  
  |
```

```
tca motorisation=  
  0  
  ~ [0,100]  
  ~ Taux annuel de croissance de la motorisation (en %)  
  |
```

```
apmap1=  
  -0.053  
  ~  
  ~ Coef droite de régression part marche à pied en fonction de la  
distance \  
  pour ceux qui ont le choix VP  
  |
```

```
apmap2=  
  -0.26  
  ~  
  ~ Coef droite de régression part marche à pied en fonction de la  
distance \  
  pour ceux qui n'ont pas le choix VP  
  |
```

```
aptc1=  
  0.15  
  ~  
  ~ Part TC pour demande non choix VP, faible distance et faible  
vitesse TC  
  |
```

```
aptc2=  
  0.6  
  ~  
  ~ Part TC pour demande non choix VP, faible distance  
  |
```

```
aptc3=  
  0.8  
  ~
```

```

~      Part TC pour demande non choix VP, distance de plus de 5 km
|
"demande (non choix VP)"=
  "demande globale / motif" - "demande (choix VP)"
~
~      |
bmap1=
  0.21
~
~      Constante droite de régression part marche à pied en fonction
de la \
      distance pour ceux qui ont le choix VP
|
bmap2=
  1
~
~      Constante droite de régression part marche à pied en fonction
de la \
      distance pour ceux qui n'ont pas le choix VP
|
distance=
  6
~      km
~      |
"demande (choix VP)"=
  "demande globale / motif" * motorisation
~
~      |
"déplacements VP-TC (choix VP)"=
  "demande (choix VP)" - "déplacements MAP (choix VP)"
~      déplacement
~      |
déplacements MAP totaux=
  "déplacements MAP (choix VP)" + "déplacements MAP (non choix VP)"
~
~      |
motorisation=
  MIN(0.77*((1 + tca motorisation / 100)^(1/52))^ramp(1,0,FINAL
TIME),1)
~
~      |
"déplacements TC (non choix VP)"=
  IF THEN ELSE(distance < 3 :AND: vitesse TC <= 3, aptc1, IF THEN
ELSE(distance <= 5, \
      aptc2, aptc3)) * "déplacements TC + autres (non choix VP)"
~
~      |
déplacements VP totaux=
  "déplacements VP (choix VP)" + "déplacements VPPASS (non choix VP)"
~      déplacement
~      |

```

```

"demande globale / motif"=
  5000
  ~
  ~      |

vitesse TC=
  distance / temps TC
  ~      km/h
  ~      |

déplacements TC totaux=
  "déplacements TC (choix VP)" + "déplacements TC (non choix VP)"
  ~      déplacements/jour
  ~      Déplacements TC tous motifs
  |

"déplacements MAP (choix VP)"=
  IF THEN ELSE(distance < 0.5, 1 ,MAX((apmap1 * distance + bmap1),0) *
"demande (choix VP)"\
  )
  ~
  ~      |

"déplacements VPPASS (non choix VP)"=
  "déplacements TC + autres (non choix VP)" - "déplacements TC (non
choix VP)"
  ~
  ~      |

"déplacements TC + autres (non choix VP)"=
  "demande (non choix VP)" - "déplacements MAP (non choix VP)"
  ~
  ~      |

"déplacements MAP (non choix VP)"=
  MAX((apmap2 * distance + bmap2),0) * "demande (non choix VP)"
  ~
  ~      |

battement horaire=
  10
  ~      mn
  ~      |

composante décalage VP=
  coef VdT retard * MAX((temps VP + heure départ - heure d'arrivée
préférée - battement horaire\
  ), 0) + coef VdT avance * MAX((heure d'arrivée préférée -
battement horaire - heure départ\
  - temps VP), 0)
  ~      mn
  ~      |

composante décalage TC=
  coef VdT retard * MAX((temps TC + heure départ - heure d'arrivée
préférée - battement horaire\
  ), 0) + coef VdT avance * MAX((heure d'arrivée préférée -
battement horaire - heure départ\
  - temps TC), 0)
  ~      mn

```

```

~          |
coef VdT avance=
  0.5
~      Dmnl
~          |

coef VdT retard=
  2
~      Dmnl
~          |

heure départ=
  450
~      mn
~          |

heure d'arrivée préférée=
  480
~      mn
~          |

coût monétaire TC=
  1.2
~      euros/déplacement
~          |

coût monétaire VP=
  3
~      euros/déplacement
~          |

part lognorm=
  LOGNORMAL(valeur du temps seuil , m , sigma)
~
~          |

demande TC potentielle=
  IF THEN ELSE( valeur du temps seuil <= 0, IF THEN ELSE(coût monétaire
VP <= coût monétaire TC\
    , 0, "déplacements VP-TC (choix VP)"
  ) , IF THEN ELSE(coût monétaire VP >= coût monétaire TC, part lognorm *
"déplacements VP-TC (choix VP)"\
    , (1 - part lognorm) * "déplacements VP-TC (choix VP)"
  ) )
~      déplacements
~      La demande TC potentielle est celle vers laquelle va tendre la
demande TC \
le mode le \
réelle. Si la VdT est négative, la demande totale se porte sur
moins cher (qui est aussi le plus rapide), sinon la fonction de
\
répartition de la loi lognormale est affectée au mode le moins
cher (qui \
est aussi le plus lent).
|

temps de réaction chgt de mode=
  Nb d'étapes de réaction chgt mode * TIME STEP
~      Week
~          |

```

```

temps TC=
  35
  ~      mn
  ~      |

"déplacements VP (choix VP)"=
  "déplacements VP-TC (choix VP)" - "déplacements TC (choix VP)"
  ~
  ~      |

temps VP=
  20
  ~      mn
  ~      |

Nb d'étapes de réaction chgt mode=
  4
  ~
  ~      |

déplacements TC init=
  1000
  ~      déplacement
  ~      |

"déplacements TC (choix VP)"=
  ROUND(SMOOTHI(demande TC potentielle , temps de réaction chgt de
mode, déplacements TC init\
  ))
  ~      déplacements
  ~      Déplacements TC pour ce motif.
  |

sigma=
  1.39
  ~      Dnml
  ~      parametre sigma de la densité de distribution de valeur du
temps
  |

m=
  2.573
  ~      Dnml
  ~      parametre m de la densité de distribution de la valeur du temps
  |

période horaire :
  (h0-h23)
  ~
  ~      subdivision de l'intervalle de temps observé (la journée)
en périodes \
  horaires
  |

```

8.10. Annexe 7 : Equations du modèle « RépartModeHDPcc.mdl »

```
part TC=
  ROUND((déplacements TC agrégés / "total VP+TC")*100)
  ~
  ~
  |
"total VP+TC"=
  déplacements TC agrégés + déplacements VP agrégés
  ~
  ~
  |
temps TC[hdep,orig,dest]=
  ROUND(SMOOTH(temps TC instantané[hdep,orig,dest], délai de prise en
  compte des temps de parcours\
  ))
  ~ mn
  ~ ROUND(SMOOTH(temps TC instantané[hdep,orig,dest], délai de
  prise en compte \
  des temps de parcours))
  |
tempsVP[hdep,orig,dest]=
  ROUND(SMOOTH(temps VP instantané[hdep,orig,dest], délai de prise en
  compte des temps de parcours\
  ))
  ~ mn
  ~ ROUND(SMOOTH(temps VP instantané[hdep,orig,dest], délai de
  prise en compte \
  des temps de parcours))
  |
déplacements VP travail[hap,hdep,orig,dest]=
  MAX("d-o"[a1,m1,hap,hdep,orig,dest] + "d-o"[a1,m2,hap,hdep,orig,dest]
  - déplacements TC travail\
  [hap,hdep,orig,dest],0)*(1+tx croissance od)
  ~ déplacement
  ~ ROUND(SMOOTH("déplacements VP travail (choix
  VP)"[hap,hdep,orig,dest] + \
  "déplacements VPPASS travail (non choix
  VP)"[hap,hdep,orig,dest], temps de \
  réaction chgt de mode travail))
  |
demande travail od[mode,hap,hdep,orig,dest]=
  800
  ~
  ~ demande travail od init[mode,hap,hdep,orig,dest]
  |
déplacements TC travail[hap,hdep,orig,dest]=
  MAX(("d-o"[a1,m2,hap,hdep,orig,dest] +
  deltaTC[hap,hdep,orig,dest]),0)*(1+tx croissance od\
  )
  ~ déplacement
  ~ Déplacements TC tous motifs. ROUND(SMOOTH("demande TC travail
  potentielle (choix \
  VP)"[hap,hdep,orig,dest] + "demande TC potentielle (non choix
  VP)"[hap,hdep
```

```

,orig,dest], temps de réaction chgt de mode travail))
|
tx croissance od=
0
~
~ IF THEN ELSE(Time<200, 0.01 , 0 ). 0.015 (=environ 40% total
VP+TC en 10 \
ans)
|
"tot dépl. motorisés"=
SUM("d-o"[activité!,mode!,hap!,hdep!,orig!,dest!])
~
~ |
temps TC instantané[hdep,orig,dest]=
temps modes[m2,hdep,orig,dest]
~ mn
~ |
temps VP instantané[hdep,orig,dest]=
temps modes[m1,hdep,orig,dest]
~ mn
~ |
deltaTC[hap,hdep,orig,dest]=
("demande TC travail potentielle (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest] +
"demande TC potentielle (non choix VP)"\
[hap,hdep,orig
,dest] - "d-o"[a1,m2,hap,hdep,orig,dest]) / temps de réaction chgt
de mode travail
~
~ |
demande globale travail[hap,hdep,orig,dest]=
demande travail optimisée[hap,hdep,orig,dest]
~ déplacement
~ init=demande travail od[hap,hdep,orig,dest]
|
"d-o"[activité,mode,hap,hdep,orig,dest]=
SMOOTH(dép motorisés
optimisés[activité,mode,hap,hdep,orig,dest],8,demande travail od\
[mode,hap,hdep,orig,dest])
~
~ SMOOTH(dép motorisés \
optimisés[activité,mode,hap,hdep,orig,dest],4,demande travail \
od[mode,hap,hdep,orig,dest])
|
demande travail optimisée[hap,hdep,orig,dest]=
SUM("d-o"[a1,mode!,hap,hdep,orig,dest])
~ déplacement
~ |
temps modes[mode,hdep,orig,dest]=
TEMPS PCC(temps init[mode,hdep,orig,dest])
~
~ |

```

```

dép motorisés optimisés[activité,mode,hap,hdep,orig,dest]=
  STRUCT HD(déplacements motorisés[activité,mode,hap,hdep,orig,dest])
  ~   déplacement
  ~   |

"demande VPPASS travail potentielle (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  "demande TC + autres travail (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest] -
"demande TC potentielle (non choix VP)"\
  [hap,hdep,orig,dest]
  ~   déplacement
  ~   "déplacements TC + autres travail (non choix
VP)"[hap,hdep,orig,dest] - \
  "déplacements TC travail (non choix VP)"[hap,hdep
,orig,dest]
  |

demande travail od init[mode,hap,hdep,i1,j1]=
  0 ~~|
demande travail od init[mode,hap,hdep,i2,j1]=
  0 ~~|
demande travail od init[mode,hap,hdep,i2,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[mode,ha1,hdep,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[mode,ha2,hdep,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[mode,ha3,hdep,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[mode,ha4,hdep,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[m1,ha5,hd1,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[m1,ha5,hd2,i1,j2]=
  4000 ~~|
demande travail od init[m1,ha5,hd3,i1,j2]=
  3300 ~~|
demande travail od init[m1,ha5,hd4,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[m1,ha5,hd5,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[m2,ha5,hd1,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[m2,ha5,hd2,i1,j2]=
  9500 ~~|
demande travail od init[m2,ha5,hd3,i1,j2]=
  7500 ~~|
demande travail od init[m2,ha5,hd4,i1,j2]=
  0 ~~|
demande travail od init[m2,ha5,hd5,i1,j2]=
  0
  ~
  ~   |

temps de réaction chgt de mode travail=
  Nb d'étapes de réaction chgt mode travail * TIME STEP
  ~   Week
  ~   |

"demande TC potentielle (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  IF THEN ELSE(distance[orig,dest] < 3 :AND: vitesse TC
[hdep,orig,dest]<= 3, aptc1, IF THEN ELSE\

```

```

        (distance[orig,dest] <= 5, aptc2, aptc3)) * "demande TC +
autres travail (non choix VP)"\
    [hap,hdep,orig,dest]
~    déplacement
~    |

déplacements MAP agrégés=
    SUM(déplacements MAP travail[hap!,hdep!,orig!,dest!])
~
~    |

déplacements VP agrégés=
    SUM(déplacements VP travail[hap!,hdep!,orig!,dest!])
~
~    |

déplacements TC agrégés=
    SUM(déplacements TC travail[hap!,hdep!,orig!,dest!])
~
~    |

valeur du temps seuil[hap,hdep,orig,dest]=
    IF THEN ELSE(deltatT[hap,hdep,orig,dest]=0, -1 , (coût monétaire
VP[hdep,orig,dest] \
    - coût monétaire TC[hdep,orig,dest]) * 60 /
deltatT[hap,hdep,orig,dest])
~    euros/h
~    |

epsilon=
    0.01
~
~    |

deltatT[hap,hdep,orig,dest]=
    (temps TC[hdep,orig,dest] - tempsVP[hdep
,orig,dest] + composante décalage TC[hap,hdep,orig,dest] - composante
décalage VP[hap\
, hdep,orig,dest])
~
~    |

activité:
    a1
~
~    |

déplacements motorisés[a1,m1,hap,hdep,orig,dest]=
    déplacements VP travail[hap,hdep,orig,dest] ~~|
déplacements motorisés[a1,m2,hap,hdep,orig,dest]=
    déplacements TC travail[hap,hdep,orig,dest]
~
~    |

orig:
    (i1-i2)
~
~    |

dest:
    (j1-j2)

```

```

~
~      |
temps init[mode,hdep,orig,dest]=
0
~
~      |
hdep:
(hd1-hd5)
~
~      |
mode:
(m1-m2)
~
~      |
hap:
(ha1-ha5)
~
~      |

délai de prise en compte des temps de parcours=
8
~      Dmnl
~      Délai d'acquisition de l'information sur les durées de
déplacements par \
pour \      les individus. Les temps instantanés sont moyennés sur ce délai
mode éventuel.
|

tca motorisation=
0
~      [0,100]
~      Taux annuel de croissance de la motorisation (en %)
|

apmap1=
-0.053
~
~      Coef droite de régression part marche à pied en fonction de la
distance \
pour ceux qui ont le choix VP
|

apmap2=
-0.26
~
~      Coef droite de régression part marche à pied en fonction de la
distance \
pour ceux qui n'ont pas le choix VP
|

aptcl1=
0.15
~
~      Part TC pour demande non choix VP, faible distance et faible
vitesse TC

```

```

|
aptc2=
  0.6
  ~
  ~ Part TC pour demande non choix VP, faible distance
  |

aptc3=
  0.8
  ~
  ~ Part TC pour demande non choix VP, distance de plus de 5 km
  |

"demande travail (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  demande globale travail[hap,hdep,orig,dest] - "demande travail (choix
VP)"[hap,hdep,\
  orig,dest]
  ~ déplacement
  ~ |

bpmmap1=
  0.21
  ~
  ~ Constante droite de régression part marche à pied en fonction
de la \
  distance pour ceux qui ont le choix VP
  |

bpmmap2=
  1
  ~
  ~ Constante droite de régression part marche à pied en fonction
de la \
  distance pour ceux qui n'ont pas le choix VP
  |

distance[orig,dest]=
  6
  ~ km
  ~ |

"demande travail (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  demande globale travail [hap,hdep,orig,dest]* motorisation
  ~ déplacement
  ~ |

"demande VP-TC travail (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  "demande travail (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest] - "déplacements MAP
travail (choix VP)"\
  [hap,hdep,orig,dest]
  ~ déplacement
  ~ |

déplacements MAP travail[hap,hdep,orig,dest]=
  "déplacements MAP travail (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest] +
"déplacements MAP travail (non choix VP)"\
  [hap,hdep,orig,dest]
  ~ déplacement
  ~ |

```

```

motorisation=
  MIN(0.77*((1 + tca motorisation / 100)^(1/52))^ramp(1,0,FINAL
TIME),1)
  ~
  ~
  MIN(0.77*((1 + tca motorisation / 100)^(1/52))^ramp(1,0,FINAL
TIME),1)
  |

vitesse TC[hdep,orig,dest]=
  distance[orig,dest] /(temps TC[hdep,orig,dest] + epsilon)
  ~
  km/h
  ~
  |

"déplacements MAP travail (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  IF THEN ELSE(distance[orig,dest] < 0.5, 1 ,MAX((apmap1 *
distance[orig,dest] + bmap1\
  ),0) * "demande travail (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest])
  ~
  déplacement
  ~
  |

"demande TC + autres travail (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  "demande travail (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest] - "déplacements
MAP travail (non choix VP)"\
  [hap,hdep,orig,dest]
  ~
  déplacement
  ~
  |

"déplacements MAP travail (non choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  MAX((apmap2 * distance[orig,dest] + bmap2),0) * "demande travail
(non choix VP)"[hap\
  ,hdep,orig,dest]
  ~
  déplacement
  ~
  |

battement horaire[a1]=
  10
  ~
  mn
  ~
  |

composante décalage VP[hap,hdep,orig,dest]=
  coef VdT retard[a1] * MAX((tempsVP[hdep,orig,dest] + heures départ
travail[hdep] - \
  heures d'arrivée préférées travail[hap] - battement
horaire[a1]), 0) + coef VdT avance\
  [a1] * MAX((heures d'arrivée préférées travail[hap] -
battement horaire[a1] - heures départ travail\
  [hdep] - tempsVP[hdep,orig,dest]), 0)
  ~
  mn
  ~
  |

composante décalage TC[hap,hdep,orig,dest]=
  coef VdT retard[a1] * MAX((temps TC[hdep,orig,dest] + heures départ
travail[hdep] -\
  heures d'arrivée préférées travail[hap] - battement
horaire[a1]), 0) + coef VdT avance\
  [a1] * MAX((heures d'arrivée préférées travail[hap] -
battement horaire[a1] - heures départ travail\
  [hdep] - temps TC[hdep,orig,dest]), 0)
  ~
  mn
  ~
  |

```

```

coef VdT avance[a1]=
  0.5
  ~      Dmnl
  ~      |

coef VdT retard[a1]=
  2
  ~      Dmnl
  ~      |

heures départ travail[hdep]=
  420,435,450,465,480
  ~      mn
  ~      |

heures d'arrivée préférées travail[hap]=
  420,435,450,465,480
  ~      mn
  ~      |

coût monétaire TC[hdep,orig,dest]=
  1.2
  ~      euros/déplacement
  ~      |

coût monétaire VP[hdep,orig,dest]=
  3
  ~      euros/déplacement
  ~      |

part lognorm[hap,hdep,orig,dest]=
  LOGNORMAL(valeur du temps seuil[hap,hdep,orig,dest] , m travail ,
  sigma travail)
  ~
  ~      |

"demande TC travail potentielle (choix VP)"[hap,hdep,orig,dest]=
  IF THEN ELSE( valeur du temps seuil[hap,hdep,orig,dest] <= 0, IF THEN
ELSE(coût monétaire VP\
  [hdep,orig,dest] <= coût monétaire TC[hdep,orig,dest], 0,
"demande VP-TC travail (choix VP)"\
  [hap,hdep,orig,dest]
  ) , IF THEN ELSE(coût monétaire VP [hdep,orig,dest]>= coût monétaire
TC[hdep,orig,dest]\
  ], part lognorm[hap,hdep,orig,dest] * "demande VP-TC travail
(choix VP)"[hap,hdep,orig\
  ,dest], (1 - part lognorm[hap,hdep,orig,dest]) * "demande VP-TC
travail (choix VP)"\
  [hap,hdep,orig,dest]
  ) )
  ~      déplacement
  ~      La demande TC potentielle est celle vers laquelle va tendre la
demande TC \
réelle. Si la VdT est négative, la demande totale se porte sur
le mode le \
moins cher (qui est aussi le plus rapide), sinon la fonction de
\
répartition de la loi lognormale est affectée au mode le moins
cher (qui \
est aussi le plus lent).
  |

```

Nb d'étapes de réaction chgt mode travail=

8

~

~

|

sigma travail=

1.39

~

Dnml

~

parametre sigma de la densité de distribution de valeur du

temps

|

m travail=

2.573

~

Dnml

~

parametre m de la densité de distribution de la valeur du temps

|

Table des matières

INTRODUCTION.....	7
1. LE PROJET, LA PROBLÉMATIQUE	9
2. ETAT DE L'ART	11
3. MÉTHODOLOGIE	14
4. L'ARCHITECTURE GLOBALE.....	16
4.1. Les frontières du système.....	16
4.2. Architecture d'ensemble	16
4.2.1 Bilan socio-économique	18
4.3. Le bloc Transport	19
4.3.1 Vue d'ensemble.....	19
4.3.2 Route et voiture particulière.....	20
4.3.2.1 Les aspects « durée de déplacement ».....	20
4.3.2.2 Les aspects « coûts monétaires ».....	23
4.3.3 Transports collectifs :	24
4.3.3.1 Les principales boucles de rétroaction dans la sphère des transports collectifs.....	26
4.3.3.2 Interface.....	26
4.3.3.3 Inputs principaux.....	27
4.4. Le bloc Demande	27
4.5. Conclusion	28
5. LE MODÈLE DE RÉGULATION DE L'OFFRE EN TRANSPORTS COLLECTIFS	30
5.1. Hypothèses	30
5.2. Structure et spécification du modèle.....	30
5.3. Valeurs des paramètres	32
5.4. Sensibilité au niveau de déficit accepté	32
5.5. Conclusion	36
6. LE MODÈLE CONJOINT D'AFFECTATION ET D'HEURE DE DÉPART	37
6.1. Représentation de la congestion.....	37

6.1.1	Le modèle de formation de la queue sur un arc et une période horaire	38
6.1.2	Extension du modèle en considérant plusieurs périodes horaires	39
6.2.	Affectation sur le réseau	40
6.3.	Choix de l'heure de départ.....	41
6.3.1	Principe.....	41
6.3.1.1	Quelles valeurs ?	42
6.3.1.2	Lien avec le modèle de répartition modale	42
6.3.2	Algorithme du choix d'heure de départ de plus court chemin	43
6.4.	Exemples d'effet de la congestion sur l'étalement de la pointe.....	44
6.5.	Conclusion	53
7.	LE MODÈLE DE RÉPARTITION MODALE « PRIX-TEMPS ».....	54
7.1.	Quel type de spécification retenir ?.....	54
7.1.1	Les limites de la spécification des modèles de choix discret	55
7.1.1.1	La difficulté de prise en compte de l'effet-revenu	55
7.1.1.2	Le degré de désagrégation de l'analyse de la demande	56
7.1.2	Le choix du modèle prix-temps.....	57
7.2.	La constitution des bases de données de demande et d'offre.....	59
7.2.1	Coût kilométrique en carburant de la voiture particulière.....	59
7.2.2	Temps de déplacements en voiture particulière	60
7.2.3	Coûts monétaires des transports collectifs	60
7.2.4	Temps de déplacements en transports collectifs	60
7.2.5	Temps de déplacements en marche à pied	61
7.2.6	Le rôle joué par le stationnement payant.....	61
7.2.7	L'état de la concurrence en 1995 entre transports collectifs et voiture particulière.....	61
7.3.	Méthode de modélisation de la répartition modale.....	62
7.3.1	Détermination des populations étudiées.....	62
7.3.1.1	Population en situation de choix de la voiture particulière	62
7.3.1.2	Population sans voiture particulière disponible	63
7.3.2	Le traitement du stationnement	63
7.3.3	Modèles séparés	63
7.4.	Les résultats obtenus	64
7.4.1	Un découpage par classes de distances et de vitesses	65
7.4.2	Les déplacements en situation de choix de la voiture	69
7.4.2.1	Un premier modèle général	71

7.4.2.2	Un deuxième modèle traitant séparément la marche à pied.....	75
7.4.2.3	Une meilleure prise en compte de la marche à pied.....	78
7.4.3	Les déplacements en situation de non-choix de la voiture particulière.....	81
7.5.	Modèle de simulation.....	84
7.5.1	Présentation du modèle	84
7.5.2	Les tests	86
7.5.2.1	Tests selon le niveau de motorisation	86
7.5.2.2	Tests selon temps VP	89
7.5.2.3	Tests selon temps TC	90
7.5.2.4	Tests selon coût TC	92
7.5.2.5	Tests selon coût VP	95
7.6.	Conclusion	97
8.	LE COUPLAGE ENTRE LA RÉPARTITION MODALE ET LE CHOIX D’HEURE DE DÉPART	99
8.1.	Le modèle de simulation	99
8.2.	Tests	101
8.2.1	Evolution des parts modales pour une demande constante	102
8.2.2	Evolution avec une motorisation croissante.....	108
8.2.3	Evolution pour une motorisation et une demande croissantes	111
8.2.4	Evolution quand la contrainte de congestion se relâche.....	114
8.3.	Conclusion	116
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	119
	BIBLIOGRAPHIE	123
	ANNEXES 127	
8.4.	Annexe 1 : Equations du modèle TC2	127
8.5.	Annexe 2 : La demande : comportements observés.....	131
8.5.1	Quelques résultats de l’enquête-ménage	131
8.5.1.1	Répartition entre les différents modes de déplacement.....	132
8.5.1.2	Mode de déplacement et âge	132
8.5.1.3	Mode de déplacement et revenu.....	134
8.5.1.4	Mode de déplacement et distance.....	135
8.5.2	Les données sélectionnées de la base « déplacements » :	137
8.6.	Annexe 3 : Le modèle prix-temps.....	139
8.7.	Annexe 4 : Les données issues du modèle stratégique	142

8.7.1 Distances	142
8.7.2 Temps TC.....	143
8.7.3 Coût TC.....	144
8.7.4 Temps VP.....	145
8.8. Annexe 5 : Les déplacements domicile-travail avec stationnement payant.....	146
8.9. Annexe 6 : Equations du modèle « RépartMode » sous Vensim.....	147
8.10. Annexe 7 : Equations du modèle « RépartModeHDPcc.mdl ».....	152