

Un modèle de la dynamique du système de déplacements urbains

Charles Raux,

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

Journée DRAST-PREDIT

« Systèmes, dynamique des systèmes et choix publics »,

23 Octobre 2003

Résumé :

Ce papier 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 transport urbain dans une optique de mobilité durable. Trois modèles sont présentés successivement avec quelques résultats de simulation : un premier modèle de régulation du financement des transports collectifs prenant en compte la contrainte de rareté des ressources publiques ; un deuxième modèle de répartition modale reposant sur une modélisation prix-temps ; un troisième modèle conjoint d'affectation et de choix d'heure de départ reposant sur une représentation de la congestion par un modèle de file d'attente. Enfin est présenté le couplage entre ces deux derniers modèles.

1 INTRODUCTION

Ce papier 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 transport 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 (cf. par exemple Cairns et alii, 1998). De plus, ces changements de comportement en réponse à des stimulus divers ne se font pas instantanément mais avec retard, comme en témoignent les valeurs d'élasticités empiriquement calculées, différentes entre le court et le long terme (Goodwin,

1992). Ces considérations amènent d'ailleurs Goodwin (1998) à annoncer « la fin de l'équilibre ».

Il est possible en théorie de mettre en œuvre des interactions dynamiques dans la modélisation traditionnelle à quatre étapes, bien que celle-ci nécessite l'hypothèse d'équilibre pour une utilisation cohérente (Ortuzar et Willumsen, 1994). Cependant ces rétroactions sont le plus souvent ignorées à cause de la lourdeur des calculs et de la complexité que cela entraîne (Stopher et al, 1996).

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. La modélisation de la dynamique des systèmes urbains a connu un engouement il y a plus de 20 ans avec les travaux de Forrester. La dynamique des systèmes 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 été utilisée plus récemment pour la modélisation stratégique des transports à l'échelle européenne dans la cadre du projet européen ASTRA (1998-2000).

L'approche proposée consiste à construire un système 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.

L'architecture d'ensemble de notre plate-forme de modélisation comprend sept grands blocs qui sont : le bloc d'« évolution démographique et économique » de l'agglomération ; le bloc « urbanisation » décrivant l'usage des sols ; le bloc de « demande de déplacements internes » à l'agglomération décrivant la génération des déplacements, par motif, heure, origine et destination ; le bloc « motorisation » des ménages ; le bloc de « demande de transport externe » à l'agglomération (échange et transit) ; le bloc « transport » qui confronte l'offre et les demandes précédentes ; le bloc « évaluation » produisant les bilans socio-économiques et environnementaux.

Le papier se concentre sur trois modèles du bloc « transport » présentés successivement avec quelques résultats de simulation : un premier modèle de régulation du financement des transports collectifs prenant en compte la contrainte de rareté des ressources publiques ; un deuxième modèle de répartition modale reposant sur une modélisation prix-temps ; un troisième modèle conjoint d'affectation et de choix d'heure de départ reposant sur une représentation de la congestion par un modèle de file d'attente. Ensuite est présenté le couplage entre ces deux derniers modèles.

2 UN MODELE DE REGULATION DU FINANCEMENT DES TRANSPORTS PUBLICS

Le modèle de régulation du financement des transports publics a pour objectif de simuler le jeu de la contrainte de rareté des ressources publiques et ses conséquences sur le fonctionnement des transports publics. Nous présentons dans un premier temps la structure du modèle, puis, dans un deuxième temps, quelques résultats de simulation.

2.1 Structure du modèle

Le domaine ici modélisé est restreint au financement des transports publics : seuls sont traités les aspects liés à la demande et à l'offre de transports publics, en excluant pour le moment les interactions avec l'offre de transport privé. En particulier l'effet de la congestion sur la vitesse des bus sur voirie banalisée n'est pas considéré ici : la vitesse des véhicules de transports publics est donc supposée constante. En outre, dans ce modèle simplifié, on considère une liaison d'une distance donnée. Donc dans la durée du déplacement en transports publics, seule varie la composante de durée d'attente.

La Figure 1 résume les principales relations de ce modèle.

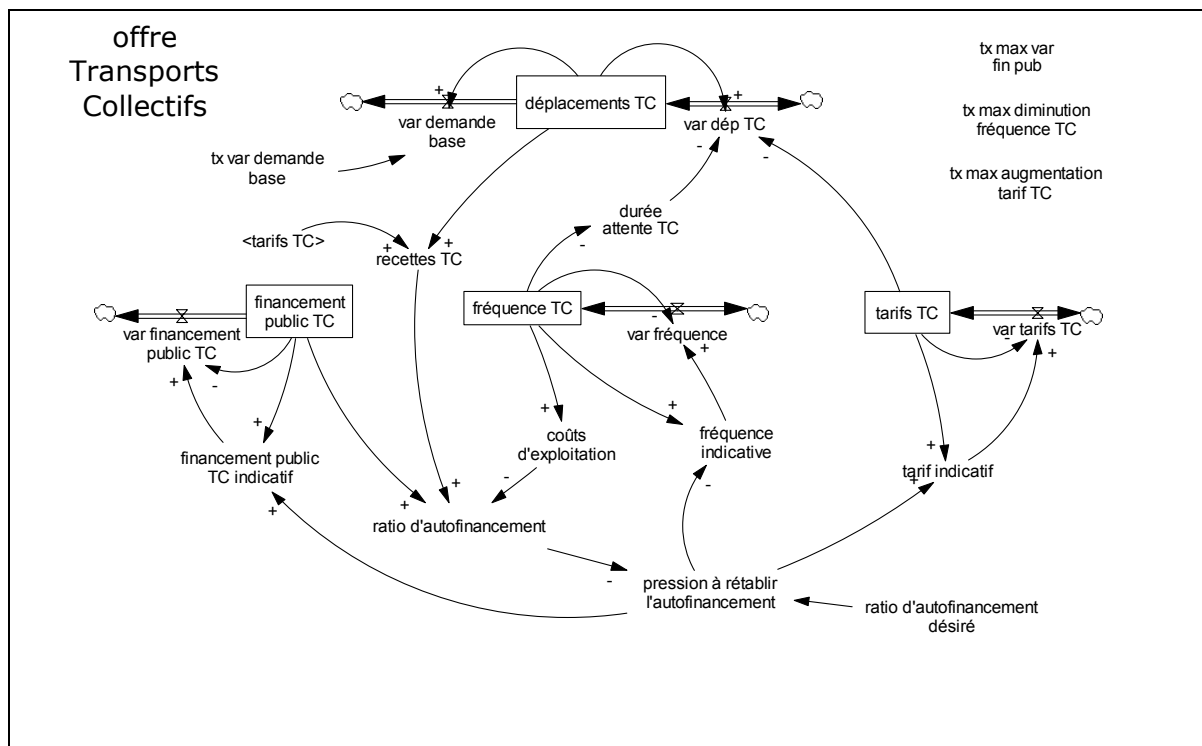


Figure 1 : Une représentation simplifiée du modèle de régulation des transports publics

L'offre en transports publics (ou transports collectifs, TC) est ici résumée à deux paramètres fondamentaux, l'un relatif à la durée des déplacements, l'autre au coût monétaire de ces déplacements pour le client usager. En ce qui concerne la durée des déplacements, comme nous avons supposé une vitesse constante, le seul facteur de variation est la *fréquence* de la desserte en transports publics. Le coût monétaire du déplacement est égal au *tarif* pratiqué. Ces deux paramètres d'offre déterminent d'une part les *coûts d'exploitation* directement fonction de la fréquence de la desserte, d'autre part les *recettes* fonction du niveau de tarif et de la demande.

Le troisième paramètre fondamental est le besoin de *financement public* qui va permettre de relâcher éventuellement la contrainte d'autofinancement, en permettant d'augmenter les fréquences ou de diminuer les tarifs.

Les recettes et le financement public, d'une part, les coûts d'exploitation, d'autre part, vont déterminer le *ratio d'autofinancement*. Un des objectifs de l'autorité organisatrice est de maintenir les finances en fonction d'un *ratio d'autofinancement désiré*, dont la pratique veut qu'il s'établisse autour de 0,25 sans descendre en deçà de 0,20. Dès que le ratio s'écarte de

cette valeur cible de 0,25 une *pression à rétablir l'autofinancement* va agir à la fois sur les niveaux de financement public, des fréquences et des tarifs, en déterminant des valeurs indicatives respectivement pour ces trois paramètres. Ces paramètres font alors l'objet d'un ajustement, qui n'est pas immédiat car il faut du temps à l'autorité organisatrice pour reconnaître ce besoin d'ajustement et l'étaler dans le temps : par exemple le niveau des tarifs TC intègre à chaque pas du modèle une variation calculée comme l'écart entre le *tarif indicatif* et le tarif actuel divisé par le temps d'ajustement des tarifs. En outre, ces variations peuvent être bloquées dans les simulations, c'est-à-dire que l'autorité organisatrice peut se refuser à augmenter le financement, à réduire les fréquences ou à augmenter les tarifs. Ces variations peuvent être également bornées par un taux annuel maximum de variation choisi par l'autorité organisatrice, comme l'indiquent le *taux maximum de variation du financement public*, le *taux maximum de diminution de la fréquence TC* et le *taux maximum d'augmentation du tarif TC*. La pression à rétablir l'autofinancement est donc un mécanisme qui régule les niveaux du financement public, des fréquences et des tarifs.

La demande de *déplacements TC* est elle-même dépendante des deux paramètres d'offre que sont la durée du déplacement et son coût pour l'utilisateur. Dans ce modèle cette influence sur la demande (*var dép TC*) est modélisée par une élasticité-prix et une élasticité-durée, variables en fonction du niveau de demande courant par rapport au niveau de demande de référence : plus la demande courante est élevée, plus l'élasticité s'élève, et inversement. Enfin, la demande de déplacements TC peut décroître sous l'influence de divers facteurs contribuant à diminuer la clientèle captive : ce peuvent être des facteurs socio-démographiques comme la baisse des effectifs de jeunes scolarisés, ou économiques comme la hausse des revenus et donc de l'équipement en automobiles.

2.2 Quelques résultats de simulations

Les simulations suivantes permettent d'illustrer l'interaction entre offre de service de transports publics et demande de déplacements à travers le jeu des trois leviers que sont les tarifs, les fréquences et le financement public.

Le pas temporel du modèle est annuel, l'horizon étant de 20 ans. Les valeurs d'élasticité-prix (-0,7) et d'élasticité-durée (-0,4) ont été adaptées de valeurs tirées de la littérature (Goodwin, 1992 ; TRACE, 1998). Les valeurs de références (ou conditions initiales) pour la demande de déplacements TC, le financement public, la fréquence et les tarifs, ont été fixées à un niveau d'équilibre. En outre, les résultats sont montrés en évolution à partir d'une base 100.

Tous les scénarios qui suivent se déroulent dans un contexte où la demande de base décroît de 5% par an, sous l'effet conjoint d'une motorisation croissante et d'un vieillissement démographique.

Le but de ces scénarios est d'explorer les possibilités de maintien ou non de l'équilibre financier du système de transports publics, sous des contraintes d'évolutions modérées du financement public, des tarifs et des fréquences du service. Nous présentons tout d'abord l'effet séparé des leviers que sont les tarifs, puis les fréquences. Ensuite nous abordons l'effet simultané des tarifs, des fréquences et du financement public.

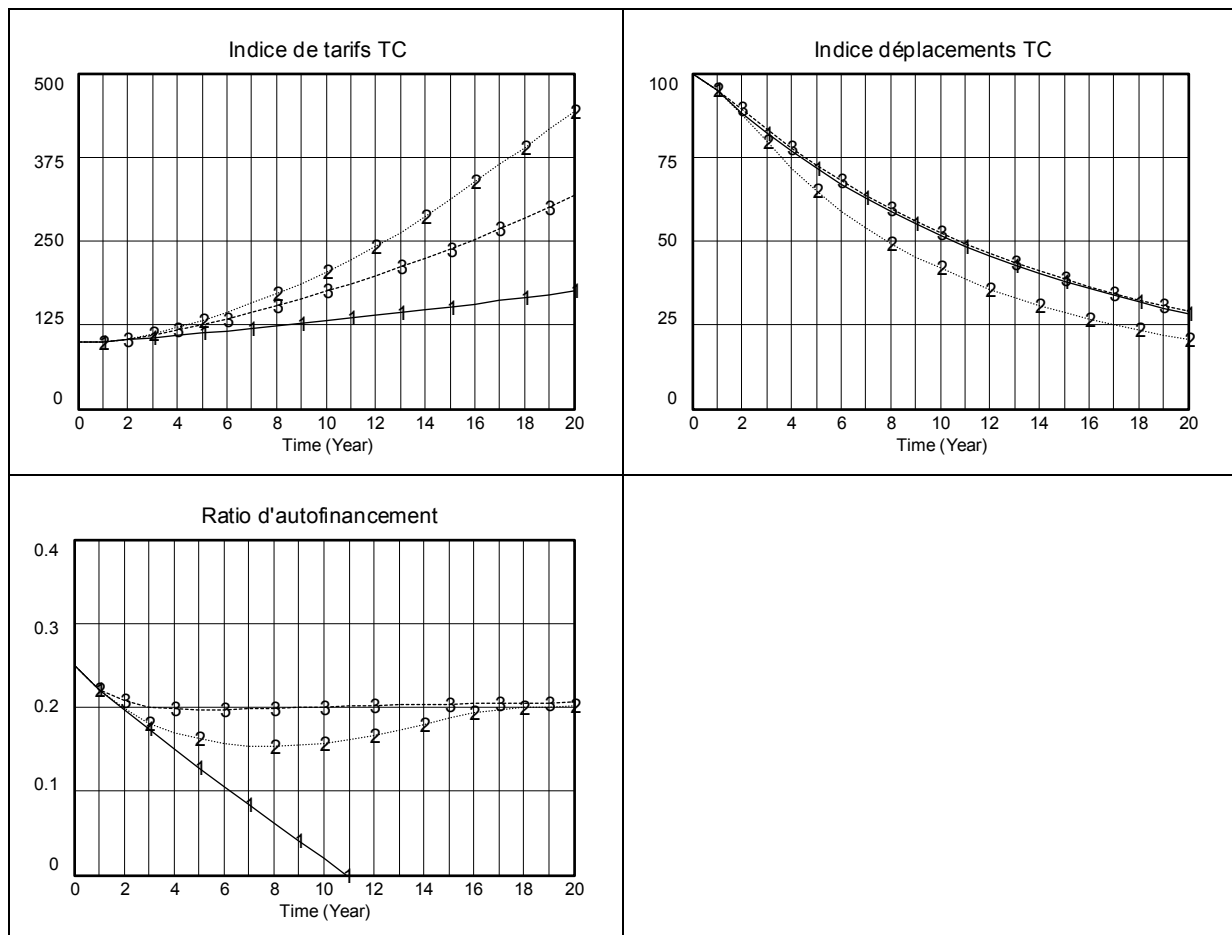


Figure 2 : Les scénarios de variation tarifaire

Dans les scénarios tarifaires (cf. Figure 2), le financement public et la fréquence du service sont fixés à leur valeur initiale et invariants. Un premier scénario (1) dans lequel le maximum d'augmentation annuelle du tarif est fixé à 3% montre que l'on ne peut compenser la chute des recettes résultant de la baisse de la demande : le ratio d'autofinancement s'effondre jusqu'à devenir négatif au bout de 10 ans. Ce n'est que si on s'autorise une augmentation de tarifs maximale de 9% par an (scénario 2) que le ratio de d'autofinancement peut être ramené de valeurs dangereusement basses à des valeurs acceptables (de l'ordre de 0,20) au bout de quinze ans. Cependant ces résultats sont dépendants de la sensibilité de la demande au tarif. Si au lieu d'une élasticité de référence de $-0,7$, valeur considérée dans la littérature comme une élasticité de long terme, on retient une valeur de $-0,3$ (scénario 3), la hausse des tarifs peut être plus modérée (taux maximum d'augmentation de 7% par an) : les tarifs sont multipliés « seulement » par trois en 20 ans, la demande ne baisse pas plus que dans le premier scénario et le ratio d'autofinancement est maintenu en permanence à une valeur acceptable de 0,20.

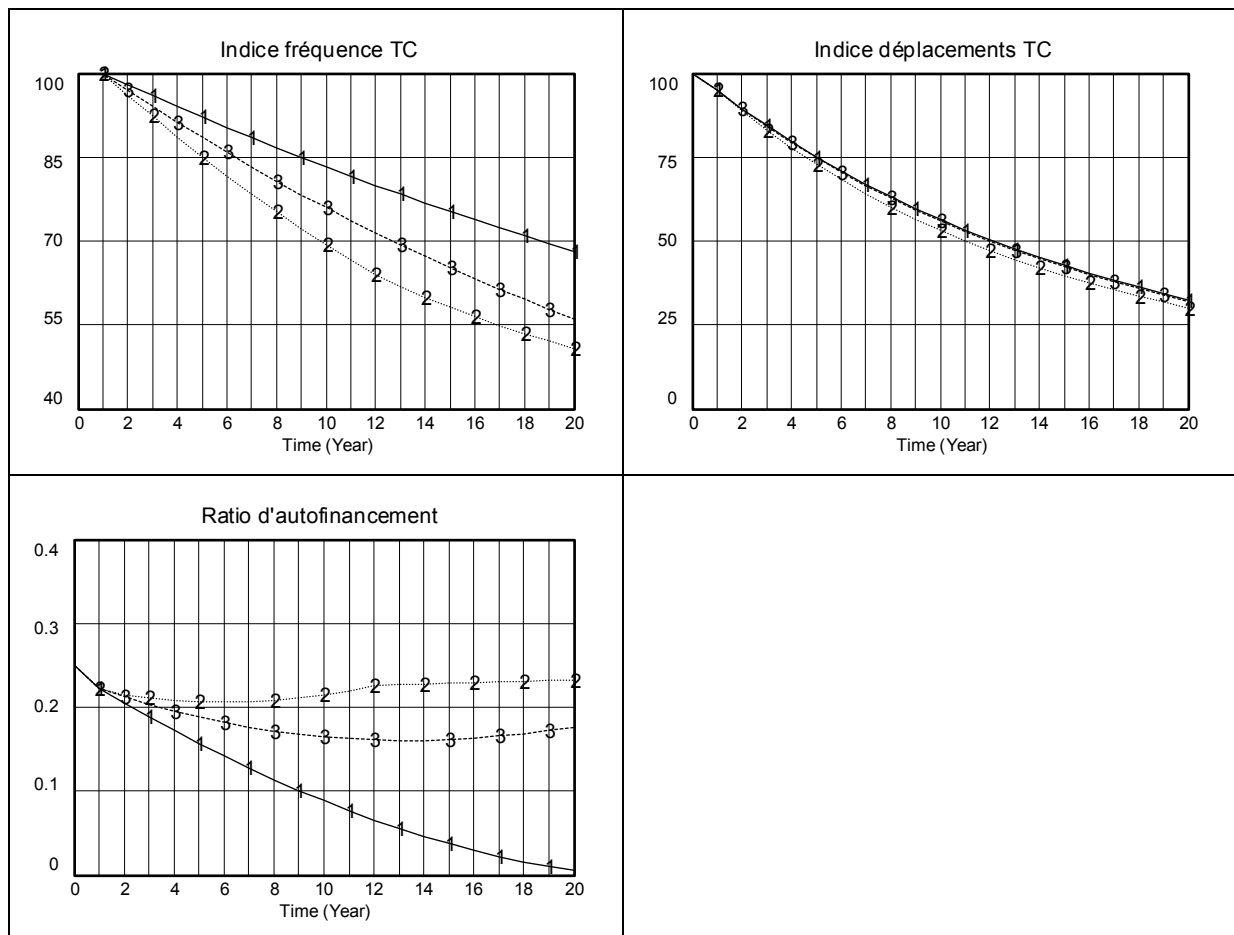


Figure 3 : Les scénarios de variation des fréquences

Dans les scénarios de variation des fréquences (cf. Figure 3), le financement public et le tarif du service sont fixés à leurs valeurs initiales et invariants. Un premier scénario (1) dans lequel le maximum de diminution annuelle des fréquences est fixé à 2% montre que cette baisse autorisée de fréquence ne permet pas de maintenir un ratio d'autofinancement acceptable : en effet, la baisse des coûts d'exploitation résultant de cette baisse de fréquence est insuffisante pour compenser les pertes de recettes découlant de la baisse de la demande. Seule une baisse maximale autorisée des fréquences de 4% par an (scénario 2) permet de maintenir le ratio d'autofinancement à un niveau acceptable supérieur à 20%. Là encore, ces résultats sont dépendants de la sensibilité de la demande à la durée d'attente. Si au lieu d'une élasticité de référence de $-0,4$, on retient une valeur de $-0,3$ (scénario 3), on peut ramener la baisse maximale autorisée des fréquences à 3% par an et le ratio d'autofinancement peut être ramené à une valeur proche de l'acceptable au bout de vingt ans.

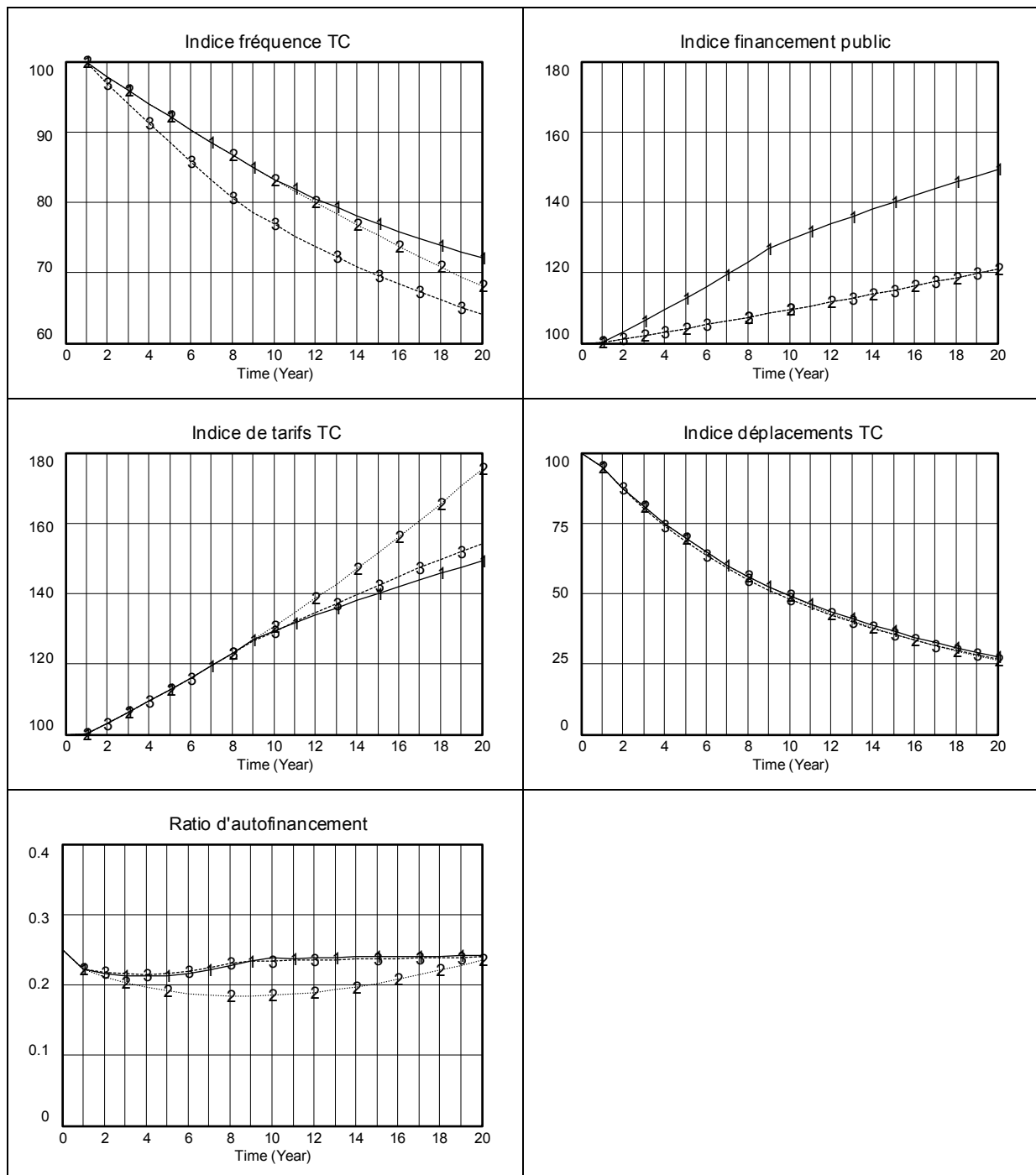


Figure 4 : Les scénarios d'ajustement simultané du financement, des tarifs et des fréquences

Les derniers scénarios mettent en jeu simultanément les leviers du financement, des tarifs et des fréquences du service (cf. Figure 4).

Dans le premier scénario (1) les maxima autorisés sont de 3% pour l'augmentation annuelle du financement public, 3% pour celle des tarifs et 2% pour la diminution annuelle des fréquences. La variation simultanée de ces trois leviers permet d'aboutir à une solution financière acceptable car le ratio d'autofinancement baisse à 20% environ et est ramené à près de 25% en moins de 10 ans : cet équilibre s'obtient avec une baisse de 28% des fréquences, et une hausse de 49% des tarifs et du financement public, au bout de 20 ans.

La comparaison avec d'autres scénarios possibles d'évolution montre que l'on peut se conformer à un même objectif de ratio d'autofinancement avec une combinaison différente de politiques. Si, pour des raisons de rigueur budgétaire, on ne s'autorise qu'une hausse annuelle maximale de 1% du financement public (scénario 2, avec une baisse annuelle maximale de 2% des fréquences et une hausse annuelle maximale de 3% des tarifs), le ratio d'autofinancement s'abaisse dangereusement mais revient à des valeurs acceptables au bout d'une quinzaine d'années : cela au prix d'une baisse de fréquence de 32% et d'une hausse marquée des tarifs de 75% en vingt ans. Si on ne s'autorise qu'une hausse maximale annuelle de 1% du financement public mais une baisse maximale annuelle de 3% des fréquences (scénario 3), le ratio d'autofinancement se comporte de manière similaire à celui du premier scénario : la baisse des fréquences est plus marquée (36%), l'augmentation des tarifs l'est moins (54%) et celle du financement public quasi-identique à celle du premier scénario (21%).

2.3 Conclusion

Ce modèle permet donc d'illustrer et de quantifier le jeu de l'interaction entre offre et demande, principalement à travers les deux paramètres d'offre que sont les tarifs et les fréquences. Ces deux paramètres influent respectivement les recettes et les coûts de production du service ; d'autre part ils influent conjointement le niveau de demande qui in fine influe le montant des recettes. Ce modèle intègre également un mécanisme régulateur à travers la pression à rétablir l'autofinancement, qui joue sur les niveaux du financement public, des fréquences et des tarifs.

Les simulations précédentes ont montré que ce type de modèle pouvait servir à explorer les conditions du maintien de l'équilibre financier de l'offre en transports publics, dans un contexte de compétitivité dégradée de ce mode de transport.

Ce modèle peut ensuite être interfacé avec un modèle de formation de la congestion : en effet le développement de cette dernière a un impact sur la vitesse commerciale des véhicules de transports collectifs routiers et donc sur la qualité de l'offre en transports publics et leurs coûts d'exploitation. Il peut être interfacé également avec un modèle de répartition modale traduisant la concurrence entre voiture particulière et transports publics sur la base des durées de déplacement et des coûts d'usage respectifs selon ces modes : ce modèle est présenté ci-après.

3 LE MODELE DE REPARTITION MODALE « PRIX-TEMPS »

Le modèle de répartition modale repose pour l'essentiel comme nous allons le voir, sur un modèle prix-temps. Nous présentons tout d'abord les raisons, d'ordre théorique, de ce choix. L'analyse de nos données d'enquête nous permet de souligner le rôle fondamental de la disponibilité d'une voiture et celui du stationnement payant, dans les conditions de choix du mode de déplacement. En outre, une représentation particulière des caractéristiques spatiales de l'offre est adoptée. Le calibrage du modèle et ses résultats sont présentés. Enfin, la structure du modèle de simulation est brièvement expliquée.

3.1 Le choix du modèle prix-temps

Pour choisir le type de modèle nous devons tenir compte de plusieurs critères : 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.

Les modèles de choix discret sont basés sur un substrat théorique leur conférant une relative consistance. Avec les hypothèses d'utilité aléatoire, de spécification additive et de distribution des termes d'erreur (distribution de Weibull) on aboutit au modèle logit, de loin le plus utilisé étant donné sa plus grande facilité de calibrage.

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

La simplicité du modèle a un coût (Jara-Diaz, 1998), à savoir que le revenu ne peut intervenir dans une spécification linéaire additive du choix : le choix entre deux modes est indépendant du revenu. 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). Les tentatives pour réintroduire l'effet du revenu dans le modèle de choix discret du mode ne sont pas très concluantes (Jara-Diaz et Videla, 1989 ; Viton, 1985 ; de Palma et Fontan, 2001).

C'est pourquoi nous avons retenu un modèle de type « prix-temps ». Cette spécification 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. 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 de l'individu. 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.

La spécification d'une distribution des valeurs du temps permet de prendre en compte la variabilité des comportements individuels. En outre, l'effet-revenu est intégré en dérivant la distribution des valeurs du temps de celle des revenus.

Le modèle « prix-temps » 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.

En ce qui concerne le degré de désagrégation d'analyse de la demande (comportements individuels), le débat peut être provisoirement tranché en considérant que ce degré de désagrégation est conditionné par celui de l'offre (coûts et temps de parcours offerts) : en pratique on mesurera le temps et le coût moyennés à partir d'une zone géographique que l'on déterminera aussi petite que possible pour éviter la dispersion des valeurs réelles autour de ces moyennes. Cependant, les caractéristiques spatiales de l'offre ont été traitées de manière particulière (cf. infra).

Le développement du modèle s'appuie sur les données de l'Enquête Ménages de Lyon réalisée en 1994-1995.

3.2 La disponibilité d'une voiture particulière

Dans le modèle que nous construisons, nous séparons l'aspect de la disponibilité d'une voiture particulière (traité par ailleurs en amont de la répartition modale) de son usage effectif. En effet, par 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.

Le modèle de répartition modale entre la voiture particulière et un autre mode est donc calibré sur l'échantillon des déplacements effectués par des individus en situation de choix, c'est-à-dire ayant une voiture à disposition. Dans l'échantillon observé, cette population a été reconstituée par l'agrégation de deux catégories : (1) ceux qui se déplacent effectivement en voiture comme conducteur et (2) ceux qui utilisent un autre mode, possèdent le permis de conduire, et pour lesquels une voiture était disponible au moment du déplacement, c'est-à-dire non utilisée par un autre membre du ménage.

La méthode de modélisation de la répartition modale consiste donc à segmenter l'échantillon en fonction des possibilités de choix de mode des personnes puis à élaborer des modèles séparés pour chacun de ces segments.

3.3 Le rôle fondamental du stationnement payant

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*. En effet, sur la base des tarifs pratiqués en 1995, pour que les transports publics soient compétitifs *sur le plan du coût monétaire*, il faut faire plus de 10 kilomètres entre deux zones centrales de l'agglomération et plus de 17 kilomètres pour les autres zones. Or, 89% des déplacements ont une longueur de moins de 10km et 96% de moins de 15km.

Cependant, si l'on tient compte des durées de déplacement, la situation de concurrence peut être inversée : les transports collectifs peuvent être plus rapides que la voiture particulière, notamment dans le cas des liaisons centrales avec des transports collectifs en site propre ou protégés de la congestion routière.

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

3.4 Du zonage aux classes de distance et de vitesse

Quand il s'agit de représenter l'offre de transport, on doit arbitrer entre une nécessité de précision qui pousse à un découpage spatial le plus fin possible et une difficulté d'ordre statistique : celle-ci tient à la faiblesse du nombre d'observations quand on croise modes de transport et origines-destinations. Cette difficulté a été contournée en abandonnant le zonage traditionnel pour passer à un découpage en classes de distances et de vitesses. Les déplacements observés ont été regroupés selon les combinaisons de classes de distance et de vitesse des différents modes.

3.5 Le calibrage du modèle

Le modèle de partage modal est pour l'instant limité aux déplacements domicile-travail.

Pour les déplacements de ceux qui ont une voiture particulière disponible, l'analyse économétrique des données d'observation aboutit à modéliser séparément les déplacements en marche à pied de ceux effectués par un mode motorisé. La conclusion que nous en tirons est que à moins de 4 km, la part de la marche à pied est indépendante des conditions de concurrence des autres modes et ne dépend que de la distance. Cette part s'annule au-delà de 4 km. Le reste des déplacements est considéré comme un ensemble de déplacements motorisés auquel on applique le modèle prix-temps pour déduire les parts respectives de la voiture particulière et des transports collectifs.

Les paramètres de la loi lognormale associée à ce modèle prix-temps sont une valeur du temps médiane de 13,1 €/h avec $\sigma = 1,39$. Cela dénote pour notre distribution des valeurs du temps, une distribution plus asymétrique, plus concentrée sur les faibles valeurs et plus étirée vers les fortes valeurs que la distribution de valeurs du temps trouvée par de Palma et Fontan (2001) en Ile-de-France : il est cependant difficile de comparer des valeurs issues de modèles aux spécifications différentes.

Les erreurs relatives de prédiction des parts modales sont acceptables : entre -8% et +6% pour la marche à pied, entre -5% et +8% pour la voiture particulière, entre -5% et +13% pour les transports collectifs.

Par contre, en ce qui concerne les déplacements effectués par les personnes qui n'ont pas le choix de la voiture particulière, 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 va pas de soi ; les déplacements observés sont peu nombreux et, malgré les regroupements par classes de distances et de vitesses, cela rend difficile la détection de régularités. En conséquence nous avons retenu un modèle très simple mais rustique, 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. Il y a là un évident potentiel d'amélioration, mais qui dépend grandement des données observées.

3.6 Le modèle de simulation

Le modèle de simulation traduit donc directement la structure des modèles et les équations économétriques élaborées précédemment (cf. Figure 5). Ce modèle est élaboré pour les déplacements à destination du travail, une liaison, une heure d'arrivée préférée et une heure de départ données. La généralisation à plusieurs liaisons OD, plusieurs heures d'arrivée préférées et plusieurs 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.

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 (cf. infra).

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).

En effet, l'hypothèse est la suivante : de nouvelles perceptions des temps de parcours et des coûts des différents modes provoquent une réévaluation des choix modaux. Cependant, 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. Goodwin, 1984, 1992).

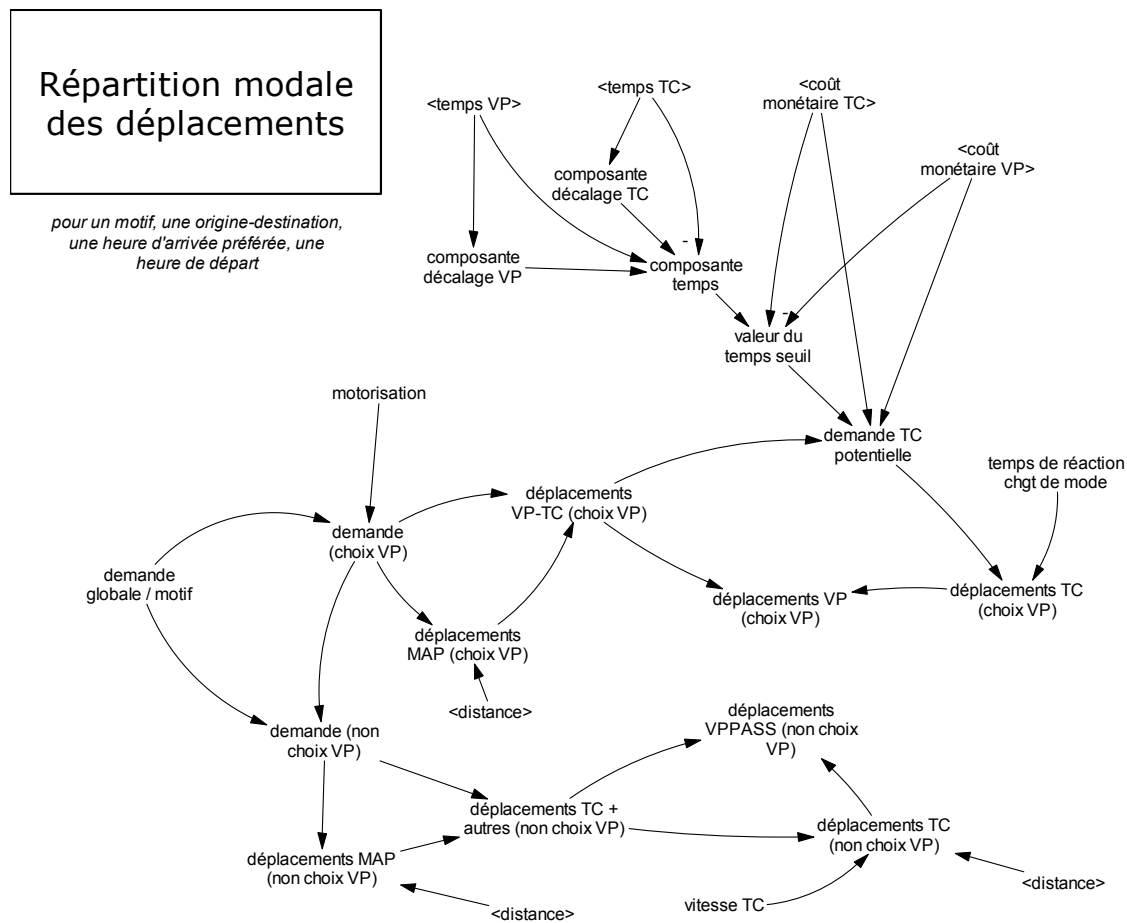


Figure 5 : Structure du modèle de répartition modale

3.7 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 en 1994-1995 et permet notamment, en s'appuyant sur des classes de distance, de s'affranchir d'un zonage adhoc. 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, et traite séparément la marche à pied en fonction des classes de distance.

Nous abordons ci-après la question de la congestion, de l'affectation sur le réseau et du choix de l'heure de départ.

4 LE MODELE CONJOINT D'AFFECTION ET DE CHOIX D'HEURE DE DEPART

Ce modèle conjoint d'affectation et d'heure de départ est fondé sur une représentation de la formation des files d'attente par un modèle de goulot : la phase d'affectation repose sur un algorithme de recherche des plus courts chemins, adapté ici au modèle de goulot. Enfin, le modèle de choix d'heure de départ intègre les concepts de coût de retard et d'avance.

4.1 La représentation de la congestion par un modèle de goulot

La représentation de la capacité de voirie routière par un goulot nous semble particulièrement pertinente pour représenter la formation des files d'attente, à l'inverse d'une courbe débit-vitesse statique : en effet, le modèle de goulot permet de rendre compte de l'étalement des heures de départ en situation de congestion, de calculer la vitesse à partir de la quantité de véhicules voulant entrer sur la route, et de représenter la dynamique de formation de la congestion. 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 al (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.

Selon Small (1992, pp. 72 et suivantes) on peut exprimer le temps d'attente moyen \bar{T}_D pour passer un goulot de capacité V_K à l'instant t par :

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

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

avec $V_a(t)$ (demande à passer sur l'arc à t), en supposant le goulot vide avant la période dt

Le temps de parcours total est la somme du temps d'attente et du 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.

Pour généraliser ce modèle à plusieurs périodes horaires, on discrétise l'intervalle de temps en périodes horaires, on fait l'hypothèse que la demande est une fonction constante par morceaux et on tient compte du fait qu'il subsiste ou non une congestion découlant de la période horaire précédente. Un algorithme permet alors de calculer pour chaque période horaire le temps moyen d'attente dans la queue. La journée est donc découpée en périodes horaires et on peut calculer, *pour chaque heure de départ*, les temps de déplacement de zone à zone en fonction du trafic présent sur le réseau.

Le calcul des temps de déplacement s'appuie sur un modèle d'affectation sur le réseau routier, adapté de celui utilisé pour le modèle stratégique de l'agglomération lyonnaise (Lichère, 1997). Il opère une affectation du trafic en tranches avec recherche d'itinéraire et affectation au plus court chemin à chaque itération. Cependant, au lieu d'utiliser une courbe débit-vitesse statique, nous utilisons le modèle de goulot précédemment exposé.

4.2 Le 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 présentons ensuite brièvement le principe de l'algorithme de résolution de ce programme.

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)

$$Cg_{mh}(t) = \alpha T_{mh}(t) + \beta \max[(hap - \Delta) - (t + T_{mh}(t)), 0] + \gamma \max[(T_{mh}(t) + t) - (hap + \Delta), 0] + C_{mh}$$

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

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

β 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,

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

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

Par 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.

En l'absence de mesures spécifiques sur Lyon, les valeurs ont été adaptées de celles trouvées dans la littérature (Small ; 1982 ; de Palma et Fontan, 2000).

Sachant que nous considérons une distribution de valeurs du temps pour la répartition modale (cf. supra), 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.

$$\beta = k_{\beta} \alpha \text{ avec } k_{\beta} = \frac{1}{2} \text{ et } \gamma = k_{\gamma} \alpha \text{ avec } k_{\gamma} = 2$$

α étant la distribution de valeurs du temps calibrée pour la répartition modale.

Le calcul de la structure de répartition des flux selon l'heure de départ s'effectue via un certain nombre d'itérations au cours 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. Puis, pour chaque mode, les usagers changent d'heure de départ si cela peut faire baisser leur coût généralisé.

Par hypothèse, la répartition des déplacements par heure de départ résulte d'un processus d'apprentissage où seule une fraction d'usagers cherchent à changer à chaque journée. 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.

Les tests effectués ont montré que le modèle restitue bien le phénomène d'étalement des heures de départ quand la demande augmente à capacité d'écoulement constante et, qu'inversement, les heures de départ ont tendance à se concentrer et à se rapprocher de l'heure d'arrivée préférée quand on augmente la capacité.

4.3 Conclusion

Ce modèle intègre donc 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. Ce modèle de goulot est combiné 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. En outre, ce modèle 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.

Nous présentons ci-après le couplage entre d'une part ce modèle d'affectation et de choix d'heure de départ, d'autre part le modèle de répartition modale.

5 LE COUPLAGE ENTRE LA REPARTITION MODALE ET LE CHOIX D'HEURE DE DEPART

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.

5.1 Le modèle de simulation

Les deux modèles précédents, l'un relatif à la répartition modale, l'autre au choix d'heure de départ, sont couplés moyennant quelques modifications nécessaires pour les rendre compatibles entre eux.

La procédure d'optimisation du choix 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 l'accumulation de cette information par un lissage exponentiel qui est considérée par les agents dans leur comparaison entre modes : ce lissage se fait avec un temps moyen de retard, soit le « délai de prise en compte des temps de parcours ». En effet, par 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 perçue sur les caractéristiques des différents modes.

Dans la chaîne causale, les déplacements pour le travail, par heure et pour chacun des modes, issus de la procédure de répartition modale (cf. Figure 5), sont utilisés comme entrée de la procédure d'optimisation de choix de l'heure de départ : 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 produit de ce lissage est agrégé selon les deux modes pour donner la demande de déplacements pour le travail par heure de départ. Celle-ci sert d'entrée à la procédure de répartition modale (variable *demande globale/motif*, cf. Figure 5) : 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 de la population d'actifs ou du nombre d'emplois par zone d'origine ou de destination.

5.2 Quelques résultats

Pour illustrer les capacités du modèle le contexte d'application est ici volontairement très simplifié. Les données de ce contexte sont les suivantes : la journée est découpée en tranches de 15 mn, la période étudiée est de 5 tranches de 15 mn, deux zones sont considérées, la capacité routière est définie, le stationnement payant s'applique à tous les déplacements en voiture particulière, les fréquences et les tarifs des transports publics sont définis, les véhicules de transport public ne bénéficient pas de voies protégées. La demande initiale est uniformément répartie sur la période étudiée (5 tranches) : 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 devant être effectués).

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 et cherchant à arriver à l'heure d'arrivée préférée 5. Le modèle est simulé sur 20 ans (soit 1040 semaines) pour faire apparaître le comportement du système à long terme.

5.2.1 Evolution avec une motorisation croissante

Nous gardons la demande constante mais faisons croître la motorisation au rythme de 5% par an, ce qui fait que la totalité des agents cherchant à se déplacer pour le travail disposent d'une voiture dans le courant de la 5^{ème} année (semaine 280).

Du fait de cette motorisation croissante, les déplacements en voiture particulière augmentent fortement (cf. Figure 6, partie droite), au détriment de ceux effectués en transports collectifs.

L'évolution des répartitions des déplacements selon l'heure de départ pour la voiture particulière (cf. Figure 6, partie gauche) montre d'abord un accroissement rapide des déplacements partant aux tranches horaires 3 et 4. Ensuite, l'augmentation des flux en voiture particulière provoque une augmentation des temps de parcours selon ce mode, ce qui motive une stabilisation puis une légère décroissance de la part modale de la voiture particulière (au-delà de la semaine 312). Par contrecoup, comme il y a moins de circulation automobile, les automobilistes peuvent partir un peu plus tard, dans la tranche horaire 4 plutôt que la tranche 3. Ensuite apparaît une oscillation entre les heures de départ 3 et 4.

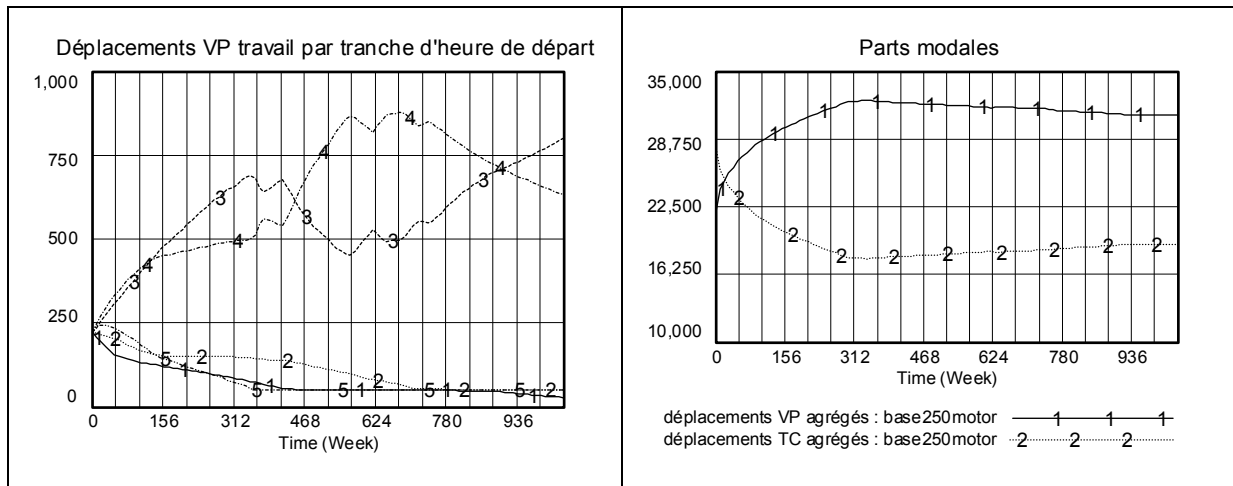


Figure 6 : Résultats du scénario de motorisation croissante

En résumé, la hausse de la motorisation provoque une hausse des déplacements en voiture particulière : la montée de la congestion qu'elle induit est contrebalancée par un étalement des heures de départ. Simultanément la part des transports collectifs baisse puis se stabilise.

5.2.2 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 temps¹ 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, par heure de départ, par heure d'arrivée préférée et par couple origine-destination.

Une situation de fluidité sur la route se crée progressivement, comme en témoigne l'évolution des temps de parcours en voiture particulière qui convergent vers une même valeur de 19 mn (cf. Figure 7, partie gauche). La compétitivité de la voiture particulière par rapport aux transports collectifs devient maximale (compte tenu du stationnement payant qui reste constant).

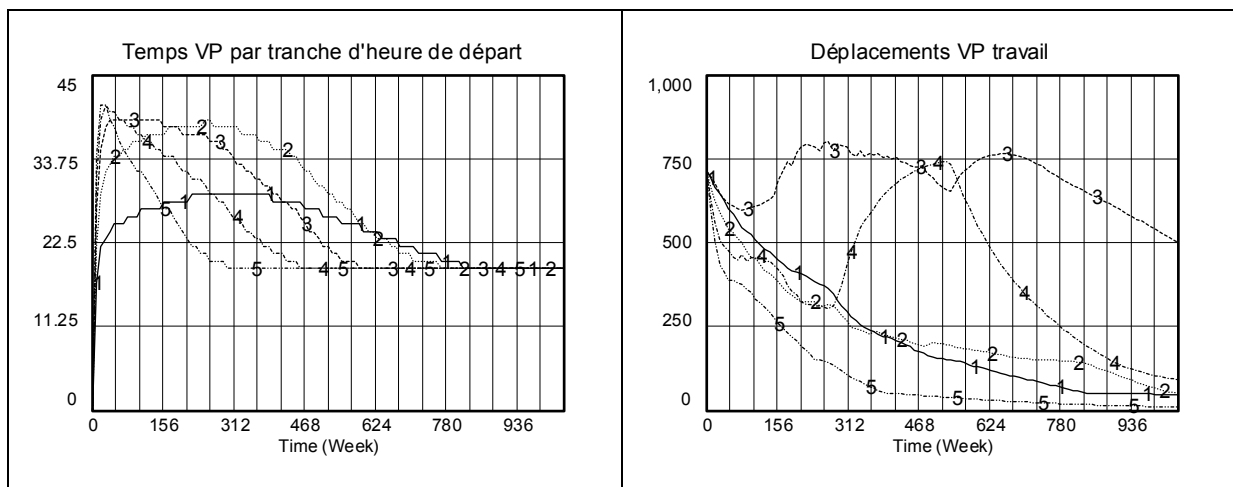


Figure 7 : Résultats du scénario de relâchement de la congestion

¹ Paramétrage non encore implanté dans le modèle

De ce fait, un basculement se produit des transports collectifs vers la voiture particulière (pour ceux qui ont une voiture à disposition), d'abord dans la tranche horaire de départ 3, puis dans la tranche 4 (cf. Figure 7, partie droite). Ultérieurement la hausse du trafic automobile fait que la demande se déplace de nouveau plus tôt, sur la tranche de départ 3, dans un contexte global de décroissance de la demande.

Il en résulte que les flux en transports collectifs diminuent plus vite que les flux en voiture particulière au cours du temps, soit une diminution de la part modale des premiers, de 55% initialement à 45% en fin de période.

5.3 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. Parmi quelques résultats, le modèle montre que la hausse de la motorisation provoque une hausse des déplacements en voiture particulière, malgré la montée de la congestion qu'elle induit : cette dernière est contrebalancée par un étalement des heures de départ. Simultanément la part des transports collectifs baisse. Inversement, une augmentation de capacité routière permet à la voiture particulière de conserver ses avantages par rapport aux transports collectifs, tout en homogénéisant les durées de déplacement en voiture particulière.

La dynamique de ce système a trois sources :

- le retard dans les changements d'heure de départ,
- 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. Le calage de ces paramètres d'inertie en grandeur nature reste donc à faire.

6 CONCLUSION GENERALE

Nous avons tout d'abord présenté un modèle de régulation du financement des transports publics urbains. Ce modèle permet d'illustrer et de quantifier le jeu de l'interaction entre offre et demande de transport public, à travers les paramètres des tarifs et des fréquences du service. Ce modèle intègre également le mécanisme régulateur de l'autofinancement qui joue sur les niveaux à la fois du financement public, des fréquences et des tarifs. Comme nous l'avons montré, ce type de modèle permet d'explorer les conditions du maintien de l'équilibre financier de l'offre en transports publics.

Le modèle de répartition modale que nous avons construit repose sur un fondement théorique micro-économique, avec les déterminants du prix et du temps. Le modèle prix-temps a été calibré sur la base des comportements observés en 1994-1995 à Lyon. La représentation spatiale de l'offre de transport sur la base de classes de vitesse et de distance permet de rendre le modèle indépendant du zonage et autorise une bonne transférabilité du modèle à d'autres agglomérations.

Une représentation plus réaliste de la formation de la congestion a été adoptée, sur la base d'un modèle de goulot. Ce modèle de goulot est mis en œuvre dans un modèle d'affectation du trafic. Il permet également 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.

Enfin, nous avons réalisé le bouclage de ces modèles de répartition modale, du choix d'heure de départ et d'affectation sur les réseaux. La dynamique de ce système a trois sources : le retard dans les changements d'heure de départ, 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. Notamment le modèle montre que la hausse de la motorisation provoque une hausse des déplacements en voiture particulière, malgré la montée de la congestion qu'elle induit : cette dernière est contrebalancée par un étalement des heures de départ. Inversement, une augmentation de capacité routière permet à la voiture particulière de conserver ses avantages par rapport aux transports collectifs, tout en homogénéisant les durées de déplacement en voiture particulière.

Ces trois modèles constituent donc une bonne base pour les développements futurs d'un système de simulation des déplacements urbains fondé sur une approche de dynamique des systèmes.

7 REMERCIEMENTS

La recherche dont il est fait état dans ce papier a été subventionnée par la DRAST dans le cadre du PREDIT (Décision de subvention n°00 MT 61).

8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

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.

ASTRA (2000) *Assessment of Transport Strategies*, Final Report for the European Commission, 48 p. (<http://www.iww.uni-karlsruhe.de/ASTRA>)

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.

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.

- 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.
- 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.
- Lichère, V. (1997) *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements. Présentation générale*. SEMALY-LET, 28 p. + annexes.
- Ortuzar, J.d.D., Willumsen, L.G. (1994) *Modelling Transport*, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- 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.
- 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
- TRACE (1998) *Review of existing evidence on time and cost elasticities of travel demand and on value of travel time*. Report for the European Commission, Directorate General for Transport. May 1998, 100 p.
- 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.