



De la modélisation des comportements à l'évaluation des politiques publiques : le cas des transports

Charles Raux

► To cite this version:

Charles Raux. De la modélisation des comportements à l'évaluation des politiques publiques : le cas des transports. Economies et finances. Université Lumière - Lyon II, 2006. tel-00115076

HAL Id: tel-00115076

<https://theses.hal.science/tel-00115076>

Submitted on 20 Nov 2006

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

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

Université Lumière Lyon 2

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

De la modélisation des comportements à l'évaluation des politiques publiques : le cas des transports

présenté par

Charles RAUX
Ingénieur de recherche CNRS
Laboratoire d'Economie des Transports

soutenu le 8 novembre 2006

Membres du jury

M. LEE-GOSSELIN Martin, Professeur d'Université, Université Laval (Québec)

M. BELLET Michel, Professeur des Universités, Université de Saint-Etienne

M. DAUPHINE André, Professeur des Universités, Université de Nice

M. ORFEUIL Jean-Pierre, Professeur des Universités, Université Paris 12

M. BONNAFOUS Alain, Professeur des Universités, Université Lyon 2

M. CROZET Yves, Professeur des Universités, Université Lyon 2

Lyon, le 17 novembre 2006

RESUME

C'est dans le cadre d'une vision stratégique interdisciplinaire de la recherche appliquée aux transports – mais en me revendiquant comme économiste –, que je propose une synthèse de mes travaux.

Auparavant, il m'a paru nécessaire d'apporter un éclairage épistémologique et méthodologique à mes travaux de conceptualisation, d'expérimentation et de modélisation. La mise en perspective que je propose, est structurée autour de questions comme le critère de démarcation de la science à travers la rigueur opératoire de sa méthode, les débats sur la marche du progrès scientifique entre théorie et expérience, l'alternative entre le rationalisme et le relativisme, le débat entre réalisme et instrumentalisme à travers les limites de l'expérimentation contrôlée en sciences sociales, et enfin, la causalité et le déterminisme partiel à l'œuvre dans les sciences sociales.

La synthèse de mes travaux est organisée selon trois thèmes de recherche principaux, à savoir la définition et la mesure des concepts utilisés, la modélisation du système de déplacements urbains, et la conception et l'évaluation d'instruments de régulation.

Au sujet du premier thème, j'illustre comment j'ai mis en œuvre une définition « opératoire » de la mobilité, et je discute comment cette définition évolue de concert avec les modèles-théories qui la représentent et la manipulent. Je montre également comment ce concept est utilisé dans le cadre d'une expérimentation contrôlée fictive – une méthode d'enquête interactive de simulation, dite de « réponses déclarées » – pour explorer « l'univers de choix » comportemental des individus en matière de mobilité quotidienne.

Ce concept de mobilité est mis en œuvre dans le développement de plusieurs modèles, deuxième thème de mes recherches. Le modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise s'est révélé particulièrement adapté comme outil de recherche, ainsi que pour l'exploration méthodologique de l'incertitude en matière de prévision. Certains développements techniques récents pour dépasser les limites du modèle sont exposés, notamment l'introduction d'un modèle de choix modal « prix-temps », sur la base de fondements micro-économiques. Finalement, des essais assez concluants de modélisation dynamique du système de déplacements urbains sont présentés, avec les exemples d'un modèle de régulation des transports publics et d'un modèle de choix d'heure de départ reposant sur un modèle de goulot.

Enfin, le troisième thème de mes recherches concerne la conception et l'évaluation de deux catégories d'instruments de régulation. La première est une approche par les prix, le péage urbain : plusieurs scénarios de péage urbain ont été élaborés puis évalués à l'aide des modèles précédents, de même que l'équité et, plus généralement, l'acceptabilité des politiques de péage. La deuxième catégorie d'instruments relève d'une approche par les quantités, les permis transférables appliqués dans le secteur des transports.

Les perspectives de recherche que je présente comportent deux axes, l'un autour des politiques innovantes de régulation de la demande, au sujet des quotas transférables dans le secteur des transports, l'autre relatif à la simulation de la ville comme système complexe, sur la base d'une modélisation multi-agents.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. UNE CONCEPTION DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE	7
1.1 Le critère de démarcation de la science.....	8
1.2 Théorie et expérience, comment la science progresse-t-elle ?	10
1.3 Une marche inéluctable du rationalisme vers le relativisme ?	14
1.4 De l'instrumentalisme au réalisme opératoire : l'expérimentation contrôlée en sciences sociales.....	16
1.5 De la causalité « à l'œuvre » au déterminisme partiel	20
1.6 Conclusion.....	24
CHAPITRE 2. DU CONCEPT DE MOBILITE A L'EXPLORATION DE L'UNIVERS DE CHOIX COMPORTEMENTAL	25
2.1 Le concept de mobilité : de la mesure au modèle	25
2.2 L'exploration de l'univers de choix par les enquêtes interactives de simulation.....	29
CHAPITRE 3. MODELISER ET SIMULER LE SYSTEME DE DEPLACEMENTS URBAINS	37
3.1 Le modèle stratégique	38
3.2 Limites du modèle stratégique, développements récents.....	43
3.3 La simulation dynamique du système de déplacements urbains	49
CHAPITRE 4. LA REGULATION DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS : PEAGE URBAIN, PERMIS TRANSFERABLES.....	55
4.1 De la tarification aux péages urbains	55
4.2 Les permis transférables.....	60
CHAPITRE 5. PERSPECTIVES DE RECHERCHE	65
5.1 La régulation par les quotas transférables dans le secteur des transports	65
5.2 Modélisation multi-agents et ville-modèle stylisée	66
CONCLUSION.....	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	75

LISTE DES ENCADRES

Encadré 1 : Individualisme méthodologique et rationalités	22
Encadré 2 : L'univers de choix	30
Encadré 3 : Les enquêtes interactives de « réponses déclarées »	32
Encadré 4 : Le modèle de choix discret à utilité aléatoire	46
Encadré 5 : Le modèle prix-temps	48
Encadré 6 : Le modèle de régulation des transports publics	51
Encadré 7 : De la tarification optimale d'usage des infrastructures au péage urbain	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le cheminement spatio-temporel	27
Figure 2 : L'architecture du modèle stratégique	41
Figure 3 : Une représentation simplifiée du modèle de régulation des transports publics.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Adéquation des permis transférables aux cibles selon différentes nuisances	61
--	----

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Neuf publications choisies sont offertes en annexe, sous forme de tirés à part. Elles sont référencées dans le corps du texte et leur liste est la suivante :

Annexe 1 : ANDAN (O.), FAIVRE D'ARCIER (B.), RAUX (C.), 1994. Mouvements, déplacements, transport : la mobilité quotidienne, in *Encyclopédie d'économie spatiale*, sous la direction de AURAY (J.P.), BAILLY (A.), DERYCKE (P.H.), HURIOT (J.M.) ; Paris, Economica, 1994, pp. 247-253.

Annexe 2 : RAUX (C.), ANDAN (O.), GODINOT (C.), 1998. The simulation of behaviour in a non-experienced future : the case of road-pricing. In ORTUZAR, J. de D., HENSHER, D.A and JARA-DIAZ, S.R. (Eds.), *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*. Pergamon, Oxford, 1998, pp. 67-86.

Annexe 3 : LEE-GOSSELIN (M.), BONNEL (P.), RAUX (C.), 1998. Guest Editorial, *Transportation* 25, pp. 121-127, 1998.

Annexe 4 : FAIVRE D'ARCIER (B.), ANDAN (O.), RAUX (C.), 1998. Stated Adaptation Surveys and Choice Process : Some Methodological Issues, *Transportation* 25, pp. 169-185, 1998.

Annexe 5 : RAUX (C.), 2002. Uncertainties in Forecasting: The Role of Strategic Modeling to Control Them. In H.-S. MAHMASSANI (ed), *In Perpetual Motion. Travel Behavior Research Opportunities and Application Challenges*. Pergamon, Elsevier Science, Oxford, 2002, pp. 505-526.

Annexe 6 : RAUX (C.), ANDAN (O.), 2002. Comment les péages urbains peuvent-ils satisfaire une politique d'agglomération ? *Recherche Transports Sécurité* 75 (2002) 115-130.

Annexe 7 : RAUX (C.), SOUCHE (S.), 2004. The acceptability of urban road pricing: A theoretical analysis applied to experience in Lyon. *Journal of Transport Economics and Policy*. Vol 38, Part 2, May 2004, pp. 191-216.

Annexe 8 : RAUX (C.), 2004. The use of transferable permits in transport policy. *Transportation Research Part D*. Vol 9/3, pp 185-197.

Annexe 9 : RAUX (C.), MARLOT (G.), 2005. A System of Tradable CO₂ Permits Applied to Fuel Consumption by Motorists. *Transport Policy*, 12 (2005) 255-265.

Parmi la pluralité des modes d'exposition pour un mémoire d'habilitation à diriger des recherches, j'ai choisi le mode de « synthèse de travaux ». Certes « le moi est haïssable », mais ce mode d'exposition autorise l'utilisation du « je » pour parler des travaux que j'ai mené en complète autonomie, ou pour la part la plus substantielle quand il s'agissait de travaux collectifs. Le « nous » tient sa place qui lui revient, pour les travaux menés en équipe où la paternité intellectuelle des résultats peut être légitimement partagée.

INTRODUCTION

Les questionnements sociaux et politiques relatifs au transport sont, depuis l'origine, générateurs de problèmes de recherche aussi bien appliquée que fondamentale, se jouant des frontières disciplinaires.

C'est en partant de la question de la production, du financement et de la tarification des infrastructures de transport, que Jules Dupuit, ingénieur des Ponts et Chaussées, a établi au milieu du 19^{ème} siècle les fondements de l'économie publique. C'est à lui que se réfère Maurice Allais, quand il élabore sa théorie générale des surplus et les fondements du calcul économique qui, entre autres travaux, lui vaudront le Prix Nobel d'économie en 1988. Daniel Mc Fadden a obtenu le même Prix Nobel en 2000 pour ses travaux en économétrie des choix discrets, particulièrement dans le domaine des transports. On peut encore citer les économistes Arthur Cecil Pigou et Ronald Coase qui, à partir de questionnements tirés du transport (congestion et externalités environnementales), ont développé des travaux qui sont à l'origine de courants majeurs de recherche dans la régulation des biens et des services publics, ainsi qu'en économie de l'environnement. On n'oubliera pas les mathématiciens, évidemment, qui se sont penchés sur les problèmes d'optimisation dans les réseaux de transport, et ont développé en réponse la théorie des graphes (une classe de méthodes de la recherche opérationnelle). Le géographe Torsten Hägerstrand innova en 1970, en soulignant l'importance critique du temps-durée dans la compréhension des contraintes physiques de déplacement, et des contraintes sociales de co-présence pesant sur les programmes d'activité individuels : il inaugura ainsi le courant actuel de la « Time Geography ».

Ces exemples nous montrent que, si la recherche dans les transports a été initialement dominée par l'ingénierie et l'économie, d'autres disciplines des sciences s'y sont depuis invitées.

L'irruption, dans la dernière décennie, de la problématique du « développement durable » fait que la politique des transports est entrée dans une nouvelle ère où, très prosaïquement, on ne peut plus se contenter de construire toujours plus de routes pour répondre à une demande croissante. Les nouveaux défis sont ceux de la performance technique et économique des transports face à la rareté de l'argent public, de la réduction des effets négatifs du transport sur le cadre de vie local et le climat global, du renforcement des solidarités sociales et spatiales à travers l'accès aux aménités urbaines.

Ces trois dimensions, économique, environnementale et sociale, de la « soutenabilité » de l'évolution du système des transports, apparaissent simultanément dans les dynamiques à l'œuvre dans le secteur du transport. La complexité de ces dynamiques peut être quelque peu éclairée et ordonnée en appliquant à notre problématique le cadre d'analyse DPSEEA¹ développé par l'OMS et sous une forme voisine (DPSIR²) par l'OCDE puis l'Agence Européenne de l'Environnement, pour décrire l'interrelation entre la société et son environnement :

¹ DPSEEA (*Driving forces-Pressures-State-Exposure-Effect-Action*), en français : Forces directrices, Pressions, Etat, Expositions, Effets, Actions.

² DPSIR (*Drivers-Pressure-State-Impact-Response*), en français FPEIR (Forces directrices, Pressions, Etat, Impacts, Réponses)

- Les *forces directrices* décrivent le fait que le développement démographique, social et économique des activités humaines, amène des changements dans les modes de vie, ainsi que dans les modes de production et de consommation des biens et services. Ces forces incluent par exemple les tendances démographiques (vieillesse et diminution de la taille des ménages), sociales (évolution des modes de vie et des préférences individuelles relatives au logement, au travail, au loisir), la croissance économique, le développement scientifique et technique, l'organisation logistique de la production et de la consommation.
- Du fait de ces forces directrices, les *pressions* exercées sur les ressources humaines et l'environnement naturel et construit s'intensifient : il s'agit par exemple de l'augmentation des véhicules-kilomètres parcourus en voiture particulière, donc des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre (GES), de la contamination des sols ou du bruit de la circulation.
- Ces pressions provoquent des changements dans l'état des ressources naturelles : la quantité de surface utilisée pour l'urbanisation et les infrastructures de transport, le niveau de bruit autour des infrastructures de transport, la qualité des eaux de ruissellement et des sols, la concentration de polluants atmosphériques ou de GES.
- Il en résulte des *impacts* pour les sociétés humaines et leur environnement qui se décomposent en *expositions* (par exemple, des populations au bruit, à la pollution atmosphérique) et *effets* résultant de ces expositions : mortalité et maladies humaines, perte de biodiversité, destruction d'espaces naturels, changement climatique global, dégradations locales des aménités environnementales. L'intérêt de distinguer exposition et effet permet de moduler l'impact, par exemple du bruit du transport ou des émissions polluantes, selon la densité de population des zones concernées.
- Ces impacts sont perçus et évalués de diverses manières : les évaluations font appel à des méthodes de comparaison de critères ou de calcul économique impliquant la monétarisation de certains effets, comme les effets environnementaux. Ces évaluations, médiatisées par le débat politique, amèneront des *actions* visant à : (a) prévenir les effets des forces directrices, par exemple en amenant un ralentissement de l'étalement urbain ou en réduisant la demande de transport par le biais de la tarification ; (b) diminuer les pressions en améliorant l'efficacité des procédés ou des produits, par exemple par le développement du transport collectif, des systèmes de transport intelligents ou des technologies de transport plus propres ; (c) adapter les sociétés humaines et leur environnement aux changements des états, par exemple par les équipements d'isolation phonique, ou la protection des bâtiments et des infrastructures de communication contre les événements climatiques exceptionnels ; (d) compenser les impacts négatifs, par exemple par des politiques curatives de santé ou de récréation d'espaces naturels.

Il s'agit bien entendu d'une représentation causale très simplifiée d'une dynamique complexe, mais qui offre l'avantage d'illustrer la nécessaire intégration des politiques économiques, sociales et environnementales, dans l'analyse du secteur des transports.

Pour l'élaboration et la mise en œuvre de ces réponses, il faut reconnaître que beaucoup des forces directrices évoquées plus haut sont hors de portée de la politique des transports. Néanmoins la puissance publique dispose de plusieurs manettes dans le champ des transports et de l'aménagement du territoire : l'expérience montre que leur mise en œuvre a des effets puissants sur les comportements des individus et des firmes à long terme, à travers les paramètres fondamentaux que sont le prix et le temps offerts selon les différentes alternatives de transport (la durée du déplacement et son coût monétaire sont les deux attributs essentiels

de ce qu'on appelle « l'offre » de transport). Ces manettes incluent la tarification du transport, la régulation des vitesses, le financement et l'investissement dans les infrastructures et les services de transport, la planification de l'urbanisation, la réglementation et l'organisation des « marchés » des transports.

Il s'agit donc de questions vives qui renvoient à tout un ensemble de thèmes de recherche que l'on peut classer en deux grandes catégories, l'une n'allant pas sans l'autre : la première regroupe les problématiques d'optimisation de l'offre et de régulation de la demande (les manettes de l'action publique évoquées plus haut) ; la seconde regroupe les problématiques d'évaluation, c'est-à-dire les méthodes d'évaluation proprement dite ainsi que la mesure, l'analyse et la modélisation des comportements.

L'optimisation du fonctionnement des réseaux et des services de transport, dans un espace des possibles toujours plus contraint, fait appel à un ensemble aujourd'hui en voie d'intégration et désigné sous le terme de systèmes de transports intelligents (STI). Il comprend les technologies évoluées de traitement de l'information, de communication, de mesure et de contrôle des véhicules et des infrastructures, et les stratégies de gestion de ces véhicules et infrastructures en vue de l'amélioration de leur fonctionnement. Les STI offrent en effet de nombreux avantages : information en temps réel et sécurité des usagers, management amélioré du trafic de véhicules routiers ou de sillons ferroviaires, réduction des accidents, réduction des encombrements, de la consommation d'énergie et de la pollution, amélioration de la « productivité » des usagers de l'infrastructure (exemple : ponctualité des transports en commun), réduction des coûts pour l'exploitant. Ces systèmes font l'objet d'un développement rapide et présentent des enjeux industriels considérables. Ces méthodes font appel à des disciplines très variées, la recherche opérationnelle, les mathématiques et la statistique, l'économie et, plus récemment, la science des systèmes complexes en plein essor dans le domaine des transports.

L'organisation et la régulation des « marchés » du transport fait référence aux défaillances classiques de ces marchés, telles que les identifie la théorie économique : ce sont les externalités (congestion, surconsommation de ressources environnementales), les rendements croissants (conduisant au monopole naturel devant être régulé par la puissance publique), et les biens collectifs (posant le problème du comment financer et produire de tels biens). Quelles sont les réponses à apporter à ces défaillances, quels mécanismes d'internalisation, quels arrangements institutionnels et contractuels dans la fourniture des services de transport, quels mécanismes d'investissement ? Ces questions font appel à l'économie de l'environnement, l'économie industrielle et des réseaux, à la théorie des contrats, au droit et à la science administrative.

Cette recherche de l'efficacité économique ne peut s'affranchir de la conception de politiques de régulation de la demande innovantes : certains instruments de régulation de la demande sont déjà largement utilisés (réglementation, fiscalité), d'autres sont plus nouveaux mais depuis longtemps étudiés au plan théorique comme les péages urbains, et enfin, d'autres ne sont pas encore appliqués dans le domaine des transports, comme les quotas transférables (droits à circuler ou permis d'émission). Il s'agit d'évaluer la performance de ces instruments, d'en analyser et d'en concevoir les conditions de mise en œuvre technique et sociale : ces questions font appel à l'ingénierie, à l'économie, à la sociologie et à la politologie.

Enfin, la problématique du financement des biens collectifs a pris de l'importance ces dernières décennies, dans un contexte de rareté croissante de l'argent public. Il s'agit d'élaborer des stratégies de financement efficaces et pérennes : quelle combinaison optimale entre subventions publiques et péages d'infrastructure, quels types de partenariat entre public et privé ?

Pour optimiser l'efficacité socio-économique de l'usage de ces manettes, il faut pouvoir évaluer. Cette évaluation fait appel au calcul économique, ce qui nécessite de résoudre le problème de la valorisation des effets négatifs sur l'environnement naturel et construit, et sur la santé humaine, ainsi que celui, positif, de la valorisation des gains de temps. L'évaluation implique aussi l'estimation des inputs produisant ces effets, c'est-à-dire de modéliser le fonctionnement du « système-ville » soumis à ces forces directrices et à l'action de ces manettes de l'action publique précédemment évoquées.

Le développement et la mise en œuvre de modèles nécessitent de passer par les étapes de conceptualisation et de mesure des comportements de déplacements, d'analyse de ces comportements, de modélisation et de simulation du fonctionnement de ce système-ville.

L'ensemble de ce processus d'évaluation et d'élaboration du triplet méthodes d'observation / concepts / modèles mobilise de nombreuses disciplines parmi lesquelles, pour ne citer que les principales, l'économie (y compris l'économétrie), la sociologie et la géographie, sans oublier les mathématiques et la statistique.

Enfin, pour évaluer, il faut simuler les conséquences d'hypothèses sociétales, économiques et technologiques (les forces directrices citées plus haut) sur les modes de vie, les localisations d'activités, l'offre de transport et les comportements de déplacements associés. Cette simulation peut s'appuyer sur des modèles économétriques et s'enrichir d'une méthode prospective, qui consiste à construire des scénarios sur la base des variables de maîtrise faible par les pouvoirs publics (exemple du prix du pétrole), et à confronter ces scénarios aux effets des manettes de l'action publique, afin d'élaborer des stratégies pertinentes.

Cette représentation d'ensemble de la « science des transports » dans le nouveau contexte des défis qui lui sont posés, montre que chacun de ses questionnements nécessite une réponse interdisciplinaire. Elle permet de donner une cohérence d'ensemble à une large palette de travaux qui peuvent être menés dans ce champ d'application.

C'est dans le cadre de cette vision stratégique assez large de la recherche appliquée dans le domaine des transports – mais en me revendiquant comme économiste –, que je propose dans ce qui va suivre une synthèse de mes propres travaux, suivie d'une présentation de mes perspectives de recherche.

Cependant, une telle synthèse nécessite, me semble-t-il pour un chercheur scientifique, d'analyser sa propre démarche du point de vue de la méthodologie scientifique. En effet, quand on prétend au caractère scientifique de son activité de recherche en économie, appliquée ici au champ des transports, quel genre de science pratique-t-on, si tant est que ce soit une science ? De quels procédés cette dernière fait-elle usage, comment progresse-t-elle ? Existe-t-il des critères intangibles pour juger du caractère scientifique de notre activité ? Comment s'opèrent les confrontations à la réalité, quels sont les causalités ou les déterminismes à l'œuvre ? Il nous faut donc, pour prendre position sur ces questions, faire un détour par le terrain de l'épistémologie et de la méthodologie des sciences, et c'est ce qui sera fait dans le Chapitre 1.

De cette analyse découle la structure des chapitres suivants, où je présenterai mes principaux travaux. Dans le Chapitre 2 (Du concept de mobilité à l'exploration de l'univers de choix comportemental) je montrerai comment sont élaborés les concepts que nous utilisons et comment ils sont utilisés dans un type d'expérimentation particulier. Le Chapitre 3 (Modéliser et simuler le système de déplacements urbains) rassemble la plus grande partie de mes travaux, au sujet de la modélisation de ces forces directrices et pressions évoquées plus haut (les D et P du cadre DPSEEA). Munis de ces concepts et outils de modélisation, il est possible de concevoir et d'évaluer des politiques de régulation (ou d'action publique, le A du

cadre DPSEEA), ce qui est présenté dans le Chapitre 4 (La régulation dans le secteur des transports : péage urbain, permis transférables). Enfin, le Chapitre 5 me permettra de présenter mes perspectives de recherche.

CHAPITRE 1. UNE CONCEPTION DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE

*« La science, en dépit de toutes ses insuffisances, est le seul système idéologique qui se mette lui-même en question et se corrige lui-même que l'homme ait encore inventé. »
(Blaug, 1994, p. 41).*

Discuter de méthode scientifique peut sembler incongru, quand tant d'ouvrages y ont été consacrés et que la science – apparemment sans trop se poser de questions existentielles – fait preuve d'avancées spectaculaires dans certains domaines, comme les sciences physiques ou les sciences du vivant. Et pourtant, les sciences sociales – et l'économie particulièrement – sont traversées de débats récurrents sur l'épistémologie et les critères de scientificité des méthodes qu'elles appliquent. Comme nous le verrons ci-après, avec les jugements assez ravageurs de Mark Blaug ou Deborah Mayo, les sciences sociales ont du mal à obtenir quelque légitimité en la matière.

C'est pourquoi, la première question que nous nous poserons est celle du critère de démarcation de la science (section 1) : nous verrons que la réponse passe par la nécessité d'élaborer des concepts opératoires dans le cadre d'opérations répétables. Quand on bâtit des procédés de mesure des comportements économiques des agents (par exemple en matière de transport), quand on analyse ces comportements, quand on développe des modèles économétriques de ces mêmes comportements, quels sont les rapports entre théorie et empirie ? Comment théorie et expérience évoluent-elles de concert pour faire progresser la science ? C'est ce que nous aborderons dans la section 2. Cependant, dans cette marche du progrès, existe-t-il une méthode scientifique universelle ? Nous verrons dans la section 3 qu'il n'est nul besoin de se restreindre à l'économie ou même aux sciences sociales, et que les sciences de la nature sont traversées par le doute : la raison scientifique a du mal à ne pas céder aux sirènes du relativisme.

Une différence fondamentale de l'économie en particulier, et des sciences sociales en général, d'avec les sciences de la nature, est la quasi impossibilité de se confronter au réel de manière contrôlée. Les économistes ont développé des fictions théoriques, dont on ne sait trop si elles doivent représenter le réel ou s'il ne s'agit que d'instruments voire de conventions : c'est le vieux débat entre instrumentalistes et réalistes qui traverse également les sciences de la nature. Nous verrons, dans la section 4, les différents types d'expérimentation contrôlée « fictive » que l'économiste peut mettre en œuvre dans son domaine, pour contourner le problème.

Quand, en matière de politique des transports, le chercheur en économie souhaite proposer des prévisions ou des évaluations, il cherche aussi à expliquer, c'est-à-dire à désigner des causalités. Parler de causalité aboutit à aborder la question du déterminisme, un débat vif dans les sciences sociales, mais qui a traversé aussi les sciences de la nature. Nous verrons, dans la section 5, comment le « réalisme opératoire » que nous impose la science dans notre recherche de causalité, débouche sur un déterminisme partiel qui nous amène à tenter de reproduire les phénomènes sociaux, dans des montages expérimentaux du type de « laboratoires virtuels ».

En conclusion, je présenterai les quelques lignes directrices qui me semblent indispensables pour la scientificité d'une démarche dans notre discipline.

1.1 Le critère de démarcation de la science

« La science est une construction bâtie sur des faits » (Davies, cité par Chalmers, 1987). Cette citation reflète bien l'inductivisme naïf, selon lequel la science construit des énoncés universels à partir d'une généralisation d'une série d'observations en nombre élevé, dans une grande variété de conditions, lesquelles observations doivent être toutes compatibles avec la loi universelle qui découle de cette généralisation. Cette vision a été progressivement battue en brèche avec l'avènement de la science moderne à partir du 18^{ème} siècle.

Depuis David Hume on sait que le principe d'induction ne peut être justifié, car on ne peut établir la vérité d'un énoncé universel uniquement sur l'expérience. La définition du principe reste vague : qu'est-ce qu'un « nombre élevé » d'observations, que sont les « conditions variées » ? S'agit-il de toutes les conditions possibles (une infinité au bout de laquelle on n'arrivera jamais) ? Pour expliquer le choix d'un mode de transport par un individu, doit-on déterminer la couleur de ses cheveux, de sa peau³, la couleur du ciel qu'il faisait ce jour-là⁴ ? On est alors amené à préciser qu'il s'agit de variations significatives à distinguer de variations superflues et que cette distinction implique de recourir à une théorie préalablement à l'observation.

« Ainsi pour qu'un mode particulier d'analyse et de classification de résultats empiriques conduise à une explication des phénomènes considérés, il faut qu'il soit fondé sur des hypothèses relatives à la manière dont ces phénomènes sont liés ; faute de telles hypothèses, analyse et classification sont aveugles. » (Hempel, 1972, p. 20).

L'observation pure, libre de tout préjugé, n'existe donc pas, celle-ci est chargée de théorie. Il faut une théorie pour observer mais comme cette théorie est faillible, les énoncés d'observation le sont eux-mêmes et ne peuvent constituer une base sûre pour fonder la science. Mais on n'en déduira pas immédiatement, comme le fait Hume, que la science ne peut être justifiée rationnellement.

C'est peut-être Popper (1973) qui exprimera l'opposition la plus tranchée contre l'inductivisme naïf, en proposant le falsificationnisme. Pour lui, « le problème central de l'épistémologie⁵ a toujours été et reste le problème de la croissance de la connaissance [...] scientifique » (Popper, 1973, préface à la 1^{ère} édition de 1934), et la science procède (et progresse) par essais et erreurs : ces essais consistent à tenter systématiquement de réfuter (ou falsifier) une loi ou une théorie par des observations et des expériences. Les théories ne sont jamais vérifiables empiriquement, aucune théorie non falsifiée n'est vraie dans l'absolu, elle n'est que la meilleure disponible par rapport à celles qui l'ont précédée, en attendant sa réfutation. Il ne s'agit donc que d'une acception négative de la validité scientifique des théories. Ce caractère asymétrique s'explique selon Popper par le fait que les énoncés universels (exemple « tous les cygnes sont blancs ») ne sont pas vérifiables car on ne peut

³ Le critère de race a été souvent utilisé dans les modèles nord-américains de choix de mode de transport... mais il s'agissait d'un indicateur pour la position sociale et indirectement le revenu.

⁴ ... et cela peut être tout à fait pertinent pour un cycliste qui, par temps de pluie, se rabat sur les transports collectifs...

⁵ au sens français de « théorie générale de la connaissance » ou anglais de « philosophie des sciences ».

explorer tout l'univers et le temps (futur) : on ne peut donc exclure la possibilité d'observer un jour quelque part un cygne noir. « S'il est caractéristique de la science empirique de considérer des énoncés singuliers comme des énoncés-tests, l'asymétrie provient de ce que eu égard à des énoncés singuliers, les énoncés universels ne peuvent être que falsifiés. » (Popper, 1973, page 69, note 2).

Il en résulte que le critère majeur de démarcation entre science et non-science est la falsifiabilité : un système théorique faisant partie de la science doit pouvoir être réfuté par l'expérience. Pour Popper, seule la méthode empirique, l'expérience, permet de distinguer les systèmes théoriques entre eux en les soumettant à la réfutation. Le but de la méthode empirique « n'est pas de sauvegarder des systèmes insoutenables mais, au contraire, de choisir le système qui est comparativement le plus apte en les exposant tous à la plus acharnée des luttes pour la survivance. » (Popper, 1973, p. 39).

Cela implique que la théorie doit être énoncée de façon claire et précise (i.e. mesurable dans ses énoncés) pour permettre de construire ou d'imaginer des expériences qui pourraient la réfuter⁶.

Pour qu'il y ait falsifiabilité, il faut donc la mesurabilité, comme le souligne Bonnafous (1989). La mesurabilité implique de manipuler des concepts opératoires. On peut en proposer une interprétation stricte selon l'« école opérationnaliste » de Bridgman : par exemple le concept de « longueur » définit une procédure qui comporte l'usage d'une règle rigide pour déterminer la distance entre 2 points.

Cette nécessité du caractère opératoire des concepts manipulés par le chercheur qui veut faire œuvre de scientificité, est énoncée avec le plus de rigueur par Ullmo. La science ne trouve pas ses objets tout faits, elle les construit, les élabore. La grandeur ne préexiste pas à la mesure, « la mesure même définit la grandeur à mesurer ». Ce principe se généralise dans la notion de « définition opératoire », qui « comporte la description d'un procédé régulier pour repérer, mesurer, plus généralement atteindre et identifier le concept défini. » (Ullmo, 1969, p. 24).

La définition opératoire comporte le postulat de répétition : n'importe qui doit pouvoir répéter les opérations incluses dans la définition opératoire et être assuré d'aboutir aux mêmes conclusions. La méthode de la science est donc de rechercher de telles relations répétables⁷ et à travers elles de désigner des êtres scientifiques. Par exemple les êtres « force » et « masse » sont désignés, non pas par on ne sait quelles propriétés intrinsèques, mais par la relation répétable $F = m\gamma$. Et, « la première exigence méthodologique de la science est de n'utiliser dans ses énoncés que des concepts ainsi définis. » (Ullmo, p. 25).

Le caractère incontournable de ce critère de démarcation est renforcé par la position des « nouveaux expérimentalistes », courant représenté par Mayo. Mayo (2000) argumente que les méthodes scientifiques ont des propriétés objectives (elles sont fiables ou non), indépendamment de leur application par le chercheur et de l'interprétation qu'il tire des données. Pour elle, une philosophie adéquate de la preuve et de l'inférence peut être construite sur la base des techniques statistiques telles que les tests de Neyman-Pearson et leurs intervalles de confiance, les tests de Fisher, les méthodes non-paramétriques et autres techniques d'analyse de données. Une recherche incapable de développer des investigations

⁶ Popper n'exige pas que chaque énoncé scientifique ait été effectivement soumis à des tests avant d'être accepté mais seulement qu'il *puisse* l'être.

⁷ ou plus généralement des corrélations répétables, au sens de relations répétables approchées.

suffisamment contrôlées à l'aide de cet arsenal de techniques statistiques, ne peut progresser dans la connaissance et ses références scientifiques peuvent être mises en doute.

Les jeux sont apparemment faits. Le tri entre disciplines scientifiques et non scientifiques semble possible. Et l'économie est assez mal placée, si l'on suit Blaug : « Les économistes modernes prêchent souvent l'infirmité [...] mais ils le pratiquent rarement. » (1994, p. 111).

Pourtant, tout n'est pas si simple, et de premières critiques de cette attitude quelque peu rigoriste, sont émises de l'intérieur des sciences considérées traditionnellement comme « dures », comme la physique. Comme le souligne Hempel (1972), une idée peut avoir initialement une forme faiblement testable : sur la base de tests initiaux elle peut être affinée, précisée et rendue ainsi plus contrôlable. Il n'est donc pas possible de dresser une démarcation tranchée entre ce qui est falsifiable et ce qui ne l'est pas. En outre, toujours selon Hempel, le concept « fondamental » de longueur renvoie concrètement à plusieurs façons plus ou moins précises de la mesurer dans des circonstances différentes. Il y aurait donc une prolifération de concepts consécutive à la diversité des détails opératoires de leur mesure.

Cette multiplicité des procédés opératoires n'est pas l'apanage des sciences de la nature, elle concerne aussi les sciences sociales, et particulièrement l'économie et sa méthode de mesure quantitative qu'est l'économétrie, comme le souligne Bonnafous (1989) : à l'instar de l'élasticité-prix qui varie selon les spécifications des modèles économétriques qui la mettent en œuvre, il n'y aurait dans cette discipline que des concepts « pseudo-opératoires » car correspondant à une multiplicité de procédés permettant de les mesurer.

Nous concluons cependant, que cette nuance apportée à la rigueur opératoire de la méthode scientifique n'en affaiblit nullement la nécessité. Je montrerai d'ailleurs, dans le Chapitre 2, comment cette méthode opératoire peut être mise à l'œuvre dans le domaine de l'analyse de la mobilité quotidienne, d'une part pour en donner une définition opératoire, d'autre part pour élaborer une méthode de mesure de « l'univers de choix », qui façonne le cadre de réalisation de ces comportements de mobilité.

1.2 Théorie et expérience, comment la science progresse-t-elle ?

Cependant, la critique se fait plus fondamentale et relève la faiblesse congénitale du falsificationnisme : comme les énoncés d'observation dépendent d'une théorie (exemple celle des instruments de mesure, comme l'optique introduite par Galilée, les hypothèses auxiliaires de l'expérience, etc.), ces énoncés sont également faillibles ; il est donc impossible de falsifier de manière concluante une théorie⁸, ce que reconnaissait d'ailleurs Popper (1973, p. 47). Lakatos (1994, pp. 14-15) enfonce le clou en montrant à partir d'un exemple d'une application de la théorie newtonienne, comment, du fait de la nécessité de spécifier les conditions d'observation, une théorie ne peut jamais à elle seule contredire un énoncé d'observation : c'est toujours une théorie *accompagnée* de clauses (de conditions initiales ou *ceteris paribus*) qui peut être réfutée ; en remplaçant une clause par une autre il est toujours possible de conserver la théorie. Cette critique touche également les théories probabilistes.

De surcroît, ce problème concerne a fortiori l'économie, à cause de l'impossibilité d'expérimentation contrôlée au sens strict dans cette discipline (Bonnafous, 1989) : si une

⁸ C'est le fameux problème de Duhem-Quine, dont la reconnaissance mène au conventionnalisme ou à l'instrumentalisme (cf. section 1.4 infra).

hypothèse est infirmée par la « donne » statistique (i.e. les objets construits de Ullmo, cf. supra), on ne sait pas si c'est la réalité qui infirme l'hypothèse ou si l'on n'a pas spécifié correctement le modèle des différents facteurs qui agissent sur la variable-réponse.

Pire encore, en suivant le falsificationnisme strict, les théories scientifiques auraient été rejetées dès leur stade initial puisqu'elles étaient contredites par beaucoup d'observations : ces théories ont parfois nécessité plusieurs siècles pour se renforcer, à l'instar de la révolution copernicienne. C'est pourquoi, au falsificationnisme, Popper ajoute d'autres règles méthodologiques, celle de l'exigence d'objectivité scientifique et l'interdiction de « stratagèmes immunisateurs », par exemple le recours à des hypothèses auxiliaires adhoc pour sauver une théorie contredite par les énoncés empiriques.

Il ne faudrait donc pas caricaturer le rationalisme scientifique de Popper : « la base empirique de la science ne comporte rien d'absolu » (Popper, 1973, p. 111), puisque les énoncés d'observation que le scientifique décide librement d'accepter sont des « interprétations faites à la lumière de théories ». Selon la métaphore de Popper, il n'y a pas de bases rocheuses, la science repose sur des pilotis que l'on enfonce dans un marécage et l'on ne s'arrête que lorsque ces derniers sont considérés comme assez solides pour supporter l'édifice, du moins provisoirement.

Une réponse aux critiques du falsificationnisme est apportée par Lakatos (1994) avec le concept de « programme de recherche scientifique » (PRS), constitué d'un « noyau dur » d'hypothèses de base ne pouvant être ni rejetées, ni modifiées : le noyau dur est protégé des falsifications par une « ceinture protectrice » d'hypothèses auxiliaires et de conditions initiales, qui servent à le maintenir inchangé pendant le temps nécessaire au développement du programme. Il y aurait ainsi eu un PRS copernicien, qui ne donna sa pleine mesure qu'avec l'avènement de la mécanique newtonienne. A ce noyau dur est adjoint une « heuristique positive », qui consiste en un ensemble de directions de recherche autorisées, adopté par les scientifiques.

Le falsificationnisme sophistiqué va au-delà du falsificationnisme naïf⁹, en ajoutant au face à face entre la théorie sur la sellette et l'expérimentation, une autre théorie rivale de la première. Le falsificationnisme sophistiqué diffère du naïf par ses règles d'acceptation d'une théorie et ses règles de falsification (Lakatos, 1994) : une théorie n'est acceptable que si elle surpasse la théorie précédente par son contenu empirique corroboré (elle conduit à découvrir ou expliquer des faits inédits) ; une théorie T est falsifiée si on a proposé une théorie T' qui a un contenu empirique supérieur à celui de T, si T' explique le succès antérieur de T et si une certaine partie du contenu supplémentaire de T' est corroborée. « Il n'y a pas de falsification avant que n'apparaisse de théorie meilleure » (p. 43). C'est la prolifération de théories qui fait avancer la science et ce sont les *séries* de théories, mises en perspective historique, qui sont objet d'évaluation scientifique¹⁰. « Une falsification ne peut pas forcer le théoricien à chercher une théorie meilleure tout simplement parce que la falsification ne peut pas précéder la théorie meilleure. » (p. 46)

C'est le triplet théorie / conditions initiales / clause *ceteris paribus* qui est simultanément considéré comme problématique à la lumière d'un énoncé d'observation contradictoire, et on essaie de remplacer chacune de ces trois composantes.

⁹ entre lesquels, selon Lakatos, Popper ne fait pas de distinction nette.

¹⁰ comme le dit Lakatos (p. 61) la continuité des théories d'une série fait penser à la « science normale » de Kuhn.

« Si un homme de science dispose d'une heuristique positive, il refuse de se laisser entraîner dans l'observation. Il va s'allonger sur son lit, fermer les yeux et oublier les données... A l'occasion, bien sûr, ce chercheur posera une question intelligente à la Nature : il sera alors encouragé si la Nature répond OUI, mais il ne se découragera pas si elle répond NON. » (Lakatos, p. 66, note 1). Si bien que, pour Lakatos, il est peu d'expérimentation qui compte vraiment. Il n'y a pas besoin de réfutations pour savoir qu'il faut remplacer une théorie, c'est l'heuristique positive du programme de recherche (PR) qui pousse les scientifiques à aller de l'avant. Il fustige la collecte maniaque de données et une précision excessive qui empêchent la formation d'hypothèses empiriques.

Pour Lakatos, l'histoire des sciences est celle de la rivalité entre PR (qui ont une analogie par certains côtés avec les « paradigmes » de Kuhn), mais ce n'est pas une succession de périodes de « science normale » : plus la compétition commence tôt, mieux cela vaut pour le progrès.

On ne réfute plus une théorie, on rejette un PR. La raison *objective* de rejeter un PR (ce qui différencie Lakatos de Kuhn) est l'existence d'un PR rival expliquant le premier et déployant un pouvoir heuristique supérieur. Rejeter un PR c'est cesser de travailler dessus. Néanmoins certains PRS dégénérants peuvent effectuer un retour en force. Lakatos reconnaît que sa méthodologie n'explique pas les choix de théorie que font les scientifiques. La principale critique faite à Lakatos est que sa méthodologie « est plus un guide pour l'historien des sciences que pour le scientifique » (Worrall et Currie (1978) cités par Chalmers, 1987).

Face au falsificationnisme, strict ou sophistiqué, et ses limites, Kuhn (1983) a pris le parti d'une approche sociologique du fonctionnement de la science. La plupart des scientifiques pratiqueraient la science « normale » dans le cadre d'un « paradigme », défini¹¹ comme un ensemble d'hypothèses théoriques générales, de lois et de techniques nécessaires à leur application. Ces scientifiques travailleraient à l'approfondissement et à l'extension du paradigme. Ces paradigmes sont définis de manière suffisamment imprécise et flexible pour que les échecs à résoudre certaines énigmes ne les remettent pas systématiquement en cause (similaire au glaci protecteur de Lakatos), et pour offrir des perspectives suffisamment vastes de problèmes à résoudre (similaire à l'heuristique positive de Lakatos). Ce n'est que lorsque les difficultés deviennent insurmontables que la crise apparaît, et qu'une « révolution scientifique » peut faire émerger un nouveau paradigme.

Pour Kuhn, « L'étude historique du développement scientifique ne révèle aucun processus méthodologique qui consiste à « falsifier » une théorie au moyen d'une comparaison directe avec la nature. » (Kuhn, 1983, p. 114). Comme l'écrit Lakatos, chez Popper le changement de théorie est rationnel (ou reconstruit rationnellement), chez Kuhn il est mystique. Blaug (1994) offre une autre interprétation, disant qu'à la méthodologie « agressive » de Popper, Kuhn oppose une méthodologie « défensive » justifiant la pratique scientifique réelle, tandis que l'approche de Lakatos serait un compromis entre les deux.

Alors que les problèmes rencontrés par la philosophie des sciences, depuis Popper, ont consisté à élargir la représentation des unités scientifiques, i.e. les paradigmes de Kuhn ou les programmes de recherche de Lakatos, l'approche des nouveaux expérimentalistes consiste à l'inverse, à se concentrer sur les tests locaux des hypothèses de la science normale. Pour Mayo (1996) la croissance de la connaissance ne passe pas par le remplacement ou l'amendement d'une théorie, mais plutôt par la mise à l'épreuve d'hypothèses particulières de telle manière qu'il y a de bonnes chances d'apprendre quelque chose. « *The aim of science is not avoiding anomaly and error but being able to learn from anomaly and error.* » (p. 55).

¹¹ Kuhn a lui-même reconnu qu'il avait utilisé le terme de paradigme dans plusieurs acceptions différentes.

Ce que Kuhn dit, selon Mayo, c'est que les scientifiques « normaux » ne pourraient apprendre des échecs à résoudre les problèmes de la science normale, s'ils pouvaient tout le temps changer la question. C'est la tradition de la science normale qui permet de pointer les crises. Si une solution est apportée au problème, la connaissance est améliorée. S'il y a détection d'anomalies, pointe alors la crise : comme les anomalies qui sont produites de manière fiable dans la mise à l'épreuve normale indiquent des effets réels qui ne disparaîtront pas, cette mise à l'épreuve est la plus sévère de toutes. C'est la seule critique qui soit constructive, à l'opposé de la critique continuelle des paradigmes : « *Non sciences engage in mere critical discourse, not genuine criticism that allows learning from empirical tests.* » (p. 35)

Pour les nouveaux expérimentalistes, l'expérience joue un rôle fondamental pour juger de l'objectivité de l'observation, elle a sa propre vie à côté de celle de la théorisation de haut niveau : la pierre angulaire de l'expérience est sa capacité à distinguer le signal du bruit, l'effet réel de l'artefact. Mayo propose d'aller plus loin que les nouveaux expérimentalistes, en tentant d'ériger une épistémologie de l'expérience fondée sur les méthodes statistiques.

Elle distingue le modèle primaire, le modèle expérimental et le modèle de données : ce dernier, souvent négligé dans la philosophie des sciences, est réhabilité. A l'une des extrémités le modèle primaire concerne l'hypothèse scientifique primaire, laquelle fait référence à l'universalité, donc à l'infinité des cas, et à des quantités continues. A l'autre extrémité on trouve les données brutes qui sont discrètes et en nombre fini. Les modèles de données et les modèles expérimentaux servent à établir la liaison entre les données brutes et l'hypothèse scientifique primaire. Typiquement le modèle primaire comprendra l'hypothèse (exemple l'hypothèse nulle), à travers un modèle causal parfois décrit par des équations avec des paramètres à mesurer (cas du modèle économétrique). Le modèle expérimental décrira les conditions clés de l'expérience et les techniques d'analyse pour lier les résultats expérimentaux aux questions posées dans l'expérience : ce sera par exemple le modèle d'inférence statistique précisant la taille de l'échantillon, la mesure du paramètre de l'hypothèse nulle, l'intervalle de confiance et les seuils d'acceptation ou de rejet de l'hypothèse nulle. Le modèle de données concernera la constitution de la « donne » de telle manière qu'elle permette de mener à bien le test prévu par le modèle expérimental : plan d'expérience, corrections ou pondérations des données pour se conformer aux hypothèses du modèle expérimental (exemple, tirage aléatoire, indépendant et sans biais, etc.).

Mayo veut élaborer une philosophie des sciences fondée sur les statistiques d'erreur. L'investigation expérimentale repose sur la sévérité des tests : une hypothèse H passe un test sévère avec l'expérience e si e vérifie H et si la procédure de test a une haute probabilité de produire un résultat qui s'accorde moins bien avec H que e ne le fait, si H est fausse ou incorrecte. Paraphrasant van Fraassen, pour qui l'expérimentation est la continuation de la construction théorique par d'autres moyens, Mayo affirme que « l'application des méthodes statistiques peut être vue comme la continuation de l'expérience par d'autres moyens. » (p. 459).

Cependant, l'économétrie qui s'éloigne de sa ligne théorique directrice peut vite tourner au jeu stérile, le « playometrics » dénoncé par Frisch, l'« inventeur » de l'économétrie¹². Il est

¹² « Observations get a meaning only if they are interpreted by an underlying theory. Therefore, theory, and sometimes very abstract theory, there must be. And no kind of mathematical analysis in economics should be rejected just because it might be difficult and refined mathematics. But at the same time I have insisted that econometrics must have relevance for concrete realities - otherwise it degenerates into something which is not worthy of the name econometrics, but ought rather to be called playometrics. » Citation de Ragnar Frisch, tirée de « Econometrics in the world of today » in W. A. Eltis, M. F. G. Scott, J. N. Wolfe (editors), *Induction, Growth and Trade, Essays in honour of Sir Roy Harrod*, 1970, Oxford, 163.

aisé de chercher à tout prix à faire « coller » empiriquement son modèle aux données observées, si entachées d'erreurs et de biais qu'elles soient. J'illustrerai à travers plusieurs exemples dans le Chapitre 3 consacré à la modélisation, comment des éléments de théorie micro-économique permettent de rendre des modèles plus robustes que leurs concurrents ayant une même, voire une meilleure qualité d'ajustement empirique, parce que à la fois plus pertinents du point de vue des comportements modélisés et plus cohérents sur le plan théorique.

En bref, la théorie est requise pour dépasser les conditions particulières de l'expérience et l'application des méthodes statistiques, même si ces dernières ont leur propre fécondité.

1.3 Une marche inéluctable du rationalisme vers le relativisme ?

Le rationalisme suppose l'existence d'un critère universel et éternel permettant d'évaluer les théories rivales, et de distinguer la science de la non-science. Il est peut-être le mieux incarné par Popper, pour qui la logique scientifique n'est concernée que par les questions de justification et de validité. De ce point de vue, la psychologie (le « psychologisme ») n'a aucun intérêt. Lakatos défend aussi ce point de vue puisque, pour lui, « le problème central en philosophie des sciences est... d'établir les conditions universelles déterminant qu'une théorie est scientifique. »

Cela conduit à la position objectiviste défendue avant tout par Popper : tandis que les individus ou les groupes peuvent se tromper dans leur jugement, le progrès de la science est fondé sur des caractéristiques propres qui n'ont que faire des croyances et des limites des connaissances humaines. Cependant, il serait plus honnête de souligner que, pour ce qui est de la découverte, Popper ne rejette pas l'intuition créatrice ou la spéculation métaphysique, qui peuvent contribuer ainsi au progrès scientifique. Lakatos, également, est proche de ce type de position objectiviste mais de manière mesurée : il reprochera vivement à Popper le caractère sèchement abstrait et a-historique de son ouvrage (Lakatos, p. 224). Lakatos se rapproche de Kuhn par la place accordée à l'initiative humaine : « En science, la direction n'est pas déterminée par l'univers de faits qui nous environne, mais essentiellement par l'imagination créatrice des hommes » (Lakatos, p. 143).

C'est peut-être Bachelard qui rend le mieux compte des conditions psychologiques des progrès de la science : « c'est en termes d'obstacles [épistémologiques] qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique. » (p. 15). Car « quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés. » (p. 16). « ... l'observation première est toujours un premier obstacle pour la culture scientifique. En effet, cette observation première se présente avec un luxe d'images ; elle est pittoresque, concrète, naturelle, facile. Il n'y a qu'à la décrire et à s'émerveiller. On croit alors la comprendre. » (pp. 22-23). Un autre obstacle épistémologique est la connaissance générale : « une connaissance qui manque de précision ou, pour mieux dire, une connaissance qui n'est pas donnée avec ses conditions de détermination précise n'est pas une connaissance scientifique. Une connaissance générale est presque fatalement une connaissance vague. » (p. 87).

Le caractère humain de la fabrication de la science est également souligné par Bonnafous (1989) qui n'accepte pas cette indifférence de Popper, notamment pour ce qui concerne la discipline économique : on ne peut négliger la singularité des faits économiques et le contexte historique dans lequel chaque théorie économique a pu être élaborée. Et la falsification des énoncés économiques ne peut être facilement abstraite du contexte, d'où le rôle de ce dernier

dans le cheminement de la pensée. C'est de la rencontre entre la représentation du réel que se donne l'économiste et son imagination que vont naître des hypothèses. « Il y a donc là nécessairement une dialectique de l'énoncé et du terrain, faite tout à la fois de déduction et d'induction. » (p. 61)

Cependant, le rationalisme et l'objectivisme défendus par Popper et Lakatos se heurtent de front au relativisme, attribué à Kuhn ou revendiqué par Feyerabend.

Ce qui fait apparaître Kuhn comme relativiste, bien qu'il le nie, est qu'il soutient que les paradigmes rivaux sont incommensurables : ces paradigmes considèrent comme légitimes ou pertinentes différentes sortes de questions. Les discussions sur les paradigmes reviennent à poser la question : « quels problèmes est-il plus important d'avoir résolus ? » (Kuhn, p. 156). Ce sont des questions de valeurs, qui ne trouvent de réponse qu'en faisant intervenir des critères totalement extérieurs à la science normale. Les adeptes de différents paradigmes se livrent à leurs activités dans des mondes différents, le débat entre deux paradigmes est un « dialogue de sourds » (p. 204).

Cependant, le relativisme de Kuhn n'est pas aussi débridé que celui de Feyerabend. C'est la communauté des scientifiques qui choisit les paradigmes et non « les chefs d'Etat » ou « la masse du public » (Kuhn, p. 230). Il tient la science en haute estime, ce qui le fait apparaître beaucoup moins relativiste que Feyerabend.

Feyerabend dénonce vivement la position rationaliste et objectiviste et conteste la capacité des méthodologies développées par ses prédécesseurs, que sont Popper, Kuhn et Lakatos, à rendre compte de l'histoire des sciences, et notamment de la physique. Selon lui, la complexité de cette histoire (cf. par exemple son interprétation de celle de Copernic et Galilée) fait qu'il est vain de tenter de réduire la fabrication de la science à quelques règles méthodologiques simples et universelles : cela entrave l'imagination nécessaire au progrès des connaissances. La prolifération d'hypothèses incompatibles avec les faits est bénéfique. Pour progresser, il faut savoir ignorer « l'évidence » admise, « la variété des opinions est indispensable à une connaissance objective » (p. 46). L'ignorance, la superficialité, le désordre sont fructueux. Les scientifiques ne doivent donc pas se laisser enfermer dans ces règles. « Toutes les méthodologies ont leurs limites, et la seule "règle" qui survit, c'est : "tout est bon" ». (p. 333)

Pour Feyerabend la science n'est pas sacro-sainte, « c'est l'une des nombreuses formes de pensée qui ont été développées par l'homme, mais pas forcément la meilleure ». Il affirme que « ... le savoir d'aujourd'hui peut devenir le conte de fées de demain, et... le mythe le plus risible peut éventuellement devenir un élément très solide de la science. » (Feyerabend, p. 53)

Mais, après tout, ce rappel salutaire à l'humilité ne serait pas contredit par Ullmo : « La science étant progressive, ne peut jamais préjuger que son domaine ne s'étendra pas aux régions qui lui sont actuellement extérieures, donnant un sens opératoire à tel énoncé qui en paraît aujourd'hui dépourvu. Et, d'autre part, la science, n'étant pas totalitaire, ne peut rejeter *a priori* la possibilité d'un mode différent de connaissance et de certitude ; elle vise à épuiser le réel, elle ne se permet pas d'être déjà assurée d'y parvenir. » (Ullmo, p. 205)

Face aux positions tranchées entre rationalisme et relativisme, Chalmers (1999) essaie de se placer dans une position médiane. Pour Chalmers, c'est l'existence d'une méthode scientifique universelle et inchangée, donc a-historique, qui est rejetée, et, pour lui, c'est de cette « méthode » dont parle Feyerabend. La conclusion pessimiste est que la prétention de la philosophie des sciences à formuler une méthode scientifique universelle, aboutit inéluctablement à une forme extrême de relativisme : en effet, selon le critère strict du falsificationnisme, la physique ne ferait pas mieux que la sorcellerie ou le créationnisme.

C'est un échec pour Popper et le falsificationnisme, que Lakatos a malgré tout essayé de sauver avec sa version sophistiquée.

Mais, pour Chalmers, cela ne signifie pas : « pas de méthode du tout ». Les sciences couronnées de succès mettent en œuvre des méthodes et des normes dépendant du contexte historique¹³. Il défend ainsi l'idée du changement dans la méthode scientifique, sur des bases rationnelles et non sociologiques comme Kuhn.

Cependant, s'il y a amélioration des méthodes scientifiques, quels sont les critères pour juger de cette amélioration ? Il faudrait des super-normes pour juger ces normes. On aboutit donc à la position défendue par Worrall (2000), selon lequel il n'y a pas de position médiane possible entre le rationalisme extrême de la méthode universelle et le relativisme extrême. Mais pour Blaug (1994), il n'y a tout simplement pas de méthode parfaitement objective pour déterminer ce que sont ou ne sont pas les théories scientifiques acceptables.

De même, Chalmers (2000) estime que l'on n'a pas besoin d'une méthode universelle pour rendre compte des progrès de la science. Pour lui, les travaux de Galilée remplaçant l'observation à l'œil nu par l'observation au moyen d'un instrument tel que le télescope, sont le premier exemple de violation du critère de la science du 17^{ème} siècle. Cet exemple montre que, de même que les théories et les faits sont faillibles, les méthodes et les normes de la science peuvent elles-mêmes changer. Dire qu'une hypothèse statistique H_A est significative au seuil de 1% dans un test de Neyman-Pearson, revient à décider que le risque d'erreur de seconde espèce (accepter sa version négative H_0 à tort), est plus grand que le risque d'erreur de première espèce (rejeter H_0 alors qu'elle est vraie) : c'est une décision normative, comme le souligne Blaug (1994), et le principe de la falsification requiert de telles normes méthodologiques.

Enfin, les buts de la science peuvent changer : Boyle, avant tout expérimentateur, a élaboré sa loi macroscopique sur les gaz parfaits bien que son but était, dans la lignée de la philosophie mécaniste de son époque, la recherche d'explications ultimes, ce à quoi sa loi n'aboutit pas finalement. Pour Chalmers, le tissu des buts, méthodes, normes, théories et faits d'observation qui constituent une science à un instant donné, peut être progressivement modifié, mais on ne peut tout changer à la fois.

En bref, le lecteur l'aura compris, on se refusera au relativisme, tout en reconnaissant qu'il n'y a pas de méthode scientifique universelle permettant de déterminer si une théorie est ou non acceptable. Il existe toutefois un corpus courant de méthodes et normes, qui définissent selon nous les conditions minimales actuelles d'une démarche scientifique, même si ces dernières peuvent évoluer au fil du temps.

1.4 De l'instrumentalisme au réalisme opératoire : l'expérimentation contrôlée en sciences sociales

« Aucun économiste n'est assez absurde pour penser que l'humanité se comporte ainsi, mais cette démarche est la démarche nécessaire de la science. » Cette phrase est extraite d'une longue citation par Blaug de l'essai de John Stuart Mill (*On the Definition of Political Economy*), introduisant la fiction de « l'homo oeconomicus » (1994, p. 55). Ce faisant, Mill réalisait une double abstraction, celle des mobiles économiques dans le domaine de

¹³ « ..there are historically contingent methods and standards implicit in successful sciences. » (Chalmers, 1999, p. 162)

l'économie, celle des comportements économiques par rapport aux comportements obéissant à d'autres mobiles. Si Mill n'est pas dupe de cette fiction – il déclare ne pas prétendre que ses conclusions soient applicables aux autres aspects du comportement humain pour lesquels la richesse ne constitue pas le principal objet –, il n'est pas sûr que cette position soit partagée par tous les économistes qui lui ont succédé.

Milton Friedman, pour qui une hypothèse est importante si elle "explique" beaucoup à partir de peu, est connu pour avoir poussé cette notion de fiction jusqu'au paradoxe : « Une hypothèse, pour être importante, doit par conséquent avoir des postulats empiriquement faux ; elle ne doit prendre en compte et ne rendre compte d'aucune des nombreuses autres circonstances connexes, dans la mesure où son efficacité même révèle la non-pertinence de ces circonstances connexes pour expliquer les phénomènes concernés^{14 15}. » (1995, p. 11). Conscient toutefois du caractère énigmatique de cette affirmation, Friedman précise immédiatement : « Pour dire les choses de manière moins paradoxale, la question adéquate à poser concernant les "postulats" d'une théorie n'est pas celle de savoir s'ils sont empiriquement "réalistes", car ils ne le sont jamais, mais s'ils constituent des approximations suffisamment correctes par rapport au but recherché. Et on ne peut répondre à cette question qu'en tentant de voir si la théorie fonctionne, donc si elle permet des prévisions suffisamment précises. » (ibid, p. 11). Pour Friedman donc, la seule sanction est la capacité de prédiction confirmée par l'observation : et la dynamique de la concurrence rendrait compte des excellentes performances de la théorie orthodoxe en matière de prédictions, indépendamment de la « réalité » ou non du comportement prêté par les postulats de la théorie aux hommes d'affaires. On peut dire que cette position fonde la méthodologie de l'instrumentalisme en économie.

L'ennui, selon Blaug, c'est que Friedman n'a pas cherché à infirmer mais plutôt à confirmer l'hypothèse de maximisation des revenus. En particulier, le processus de « sélection naturelle » de la concurrence, décrit par Friedman (1995, p. 17) ne garantit en rien que les entreprises qui survivent sont celles qui maximisent leur profit, de même que rien ne prouve que les espèces qui survivent à la sélection naturelle soient parfaites.

En résumé, les théories sont-elles censées décrire le monde réel (i.e. la vérité objective des Popperiens) ou ne sont-elles que des instruments, des dispositifs calculatoires pour relier entre eux les états observables ? Là encore, un détour par les sciences dites « dures » peut nous apporter des éclairages utiles.

On peut emprunter à Chalmers (1999) la vision synthétique qu'il offre du débat entre « réalistes » et « anti-réalistes ». Les réalistes se demandent comment les théories scientifiques impliquant des entités inobservables (exemple les électrons ou les champs gravitationnels) peuvent connaître un tel succès si elles ne décrivent pas correctement le domaine de l'inobservable, au moins approximativement ? A l'opposé, pour les anti-réalistes, comme les théories passées ont réussi en dépit du fait qu'elles n'étaient pas des descriptions correctes de la réalité, il est raisonnable de supposer qu'il en est de même pour les théories contemporaines qui ont détrôné leurs consœurs passées.

¹⁴ « To be important, therefore, a hypothesis must be descriptively false in its assumptions; it takes account of, and account for, none of the many other attendant circumstances, since its very success shows them to be irrelevant for the phenomena to be explained. » (1953, pp. 14-15).

¹⁵ Cependant, il précise également que l'inverse de cette proposition ne tient pas : des postulats qui ne sont pas réalistes ne garantissent pas qu'une théorie sera significative.

Les anti-réalistes, que l'on peut assimiler à des instrumentalistes, ont donc des arguments à faire valoir : selon eux, les théories ne seraient que des fictions utiles pour nous aider à corréler et prédire les résultats de l'observation et de l'expérience. Une forme extrême en est le conventionnalisme, tel que le décrit Ullmo. Une théorie n'est pas vraie, elle est seulement commode, elle comprend des principes (des définitions déguisées que l'expérience ne peut démentir) et des objets ou images qui n'ont pas de valeur de réalité : une image peut être remplacée par une autre. La seule condition est qu'il y ait les mêmes rapports entre les objets réels qu'entre les images que nous sommes forcés de mettre à leur place.

Cependant, comme le souligne Ullmo, les images ne sont pas indifférentes, elles sont plus ou moins vraies, plus ou moins fécondes pour suggérer de nouvelles expériences, découvrir de nouvelles lois et ainsi atteindre la réalité. C'est la supériorité de l'hypothèse de Copernic sur celle de Ptolémée. En outre, les principes du conventionnalisme eux-mêmes peuvent être mis en échec par les expériences, ils sont une anticipation sur la réalité, qui peut être ensuite validée ou infirmée. C'est la philosophie du « comme si » : tout se passe comme si la terre tournait (au temps de Copernic), ou comme si le neutrino existait.

A trop mettre l'accent sur la fiction, les anti-réalistes sous-estiment la dépendance des observations à la théorie, et de cette manière esquivent les questions difficiles. Or, c'est parce que « et pourtant elle tourne » que Galilée, le réaliste, a du faire face à cette question difficile de la rotation de la Terre dans le cadre de la théorie copernicienne, et a réalisé, ce faisant, une percée majeure en mécanique.

Que devient ce souci de confrontation à la réalité en sciences sociales ? Une différence fondamentale d'avec les sciences de la nature est que l'économie comme l'essentiel des sciences sociales, ne peut réaliser d'expérimentation contrôlée de même nature que les premières. Ces sciences sociales sont le plus souvent réduites à observer les sociétés et les êtres qui les composent, se comporter dans un déroulement historique sur lequel le chercheur n'a pas de prise. « L'expérimentation contrôlée des sciences expérimentales trouve donc en économie son substitut dans les expériences incontrôlées de l'histoire » (Bonnaïfous, 1989, p. 67).

Cependant, les économistes ont développé tout un arsenal sophistiqué de techniques statistiques (l'économétrie) leur permettant de contrôler *a posteriori*, dans la mesure où les observations historiques le permettent, les effets de tel ou tel facteur¹⁶. C'est pourquoi Bonnaïfous parle en économie d'« expérimentation contrôlée fictive ». En général, on tâchera de sélectionner en fonction d'hypothèses préalables, les variables susceptibles d'expliquer le phénomène étudié, parmi la masse des données rendues disponibles par la prolifération des collectes statistiques. A l'instar du chercheur en sciences de la nature dans son laboratoire, on isolera le système étudié du reste du monde, ce qui correspond en économie à l'hypothèse *ceteris paribus* pour tout ce qui concerne les facteurs négligés.

Le concept « pseudo-opératoire » d'élasticité-prix évoqué plus haut peut aussi bien émerger des dépendances statistiques exprimées dans le(s) modèle(s) économétrique(s) qu'être déduit de la fiction théorique de l'homo œconomicus et de la « loi de la demande » : tout se passe comme si la population des consommateurs réagit à l'instar de cette fiction.

¹⁶ On notera cependant que les tests de l'économétrie reposent sur un « métamodèle » stochastique qui est lui-même difficilement falsifiable (Bonnaïfous, 1973) : l'hypothèse de tirage aléatoire des observations dans une population infinie ne tient pas ; la faible taille des échantillons observés fait que les hypothèses probabilistes du modèle, comme par exemple l'indépendance des résidus, ne peuvent qu'être grossièrement « vérifiées », sans compter le risque de deuxième espèce qui devient considérable.

J'illustrerai dans le Chapitre 3 consacré à la modélisation des comportements de mobilité quotidienne, cette première forme d'« expérimentation contrôlée fictive ».

Une seconde forme d'« expérimentation contrôlée fictive » a été développée par les économistes et les psychologues, et a donné lieu à un foisonnement de méthodes expérimentales qui, par certains aspects, tendent à se rapprocher du contrôle que pratiquent les sciences de la nature. Ces méthodes ont en commun de s'appliquer à des personnes réelles, placées autant que faire se peut dans des conditions de laboratoire : il s'agit en général de « jeux » appelant des décisions de la part de sujets placés dans des contextes hypothétiques se voulant contrôlés. Une de ces branches désignée sous l'expression d'« économie expérimentale » permet de tester et de moduler (voire infirmer) les hypothèses classiques de rationalité des acteurs. Une autre branche, celle des méthodes de « préférences déclarées » – incluses dans une catégorie plus générale dite de « réponses déclarées » (cf. infra) –, permet elle aussi de manipuler artificiellement et ainsi de contrôler le contexte socio-économique de la décision et, dans ce cadre, de tester et mesurer les réactions comportementales. Appliquées à large échelle aussi bien dans le domaine de l'évaluation des biens environnementaux que dans les choix comportementaux en matière de transport, ces méthodes ont montré des avantages et des limites sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement. Ce sont la conception et la mise en œuvre de ce type de méthode qui seront illustrées au Chapitre 2, avec les enquêtes de simulation permettant d'explorer « l'univers de choix » de réalisation des comportements de mobilité quotidienne.

Enfin, une troisième forme d'« expérimentation contrôlée fictive » a trait à la simulation des comportements d'agents économiques artificiels. Les modèles de « société artificielle », en appliquant des techniques de modélisation orientées agents, visent à travers une approche calculatoire, à étudier l'activité humaine au sein d'une science sociale unique. On constitue des laboratoires qui sont autant de tentatives de « générer » certaines structures sociales à l'aide de l'ordinateur (Epstein et Axtell, 1996). Ces modèles comprennent trois ingrédients de base : les agents, l'environnement et les règles. L'agent a des états internes (certains sont fixés, d'autres peuvent changer, comme les préférences) et des règles de comportement. L'environnement est représenté par un treillis de sites supportant des ressources (exemple de « Sugarscape »), il peut aussi être un réseau de communication. C'est une entité séparée des agents, sur laquelle ces derniers agissent et avec laquelle ils interagissent. Les règles de comportement concernent les interactions agent-agent, agent-environnement et environnement-environnement. Un exemple de résultat de ce type d'approche est d'étudier la formation des prix à partir d'échanges complètement décentralisés, sans faire référence à un quelconque commissaire-priseur chargé d'établir *a priori* l'équilibre du marché.

Que peut-on entendre finalement par « réalisme » ? Le réel ontologique n'est pas loin, quand on lit par exemple que « ... c'est par une transition graduelle que l'on passe des objets macroscopiques de notre expérience de tous les jours aux bactéries, aux virus, aux molécules, aux atomes et aux particules subatomiques ; et toute ligne que l'on tracerait pour les diviser en objets physiques réels et entités fictives serait tout à fait arbitraire. » (Hempel, 1972, pp. 128-129). De même, le « réalisme non figuratif » de Chalmers ne peut s'empêcher de faire référence à un réel en soi : « nous pouvons évaluer nos théories selon le critère de leur degré de réussite à saisir un aspect du monde, mais nous ne pouvons pas aller au-delà et évaluer le degré auquel elles parviennent à décrire le monde tel qu'il est réellement, pour la bonne raison que nous n'avons pas accès au monde indépendamment de nos théories d'une façon qui nous permettrait de juger l'adéquation de ces descriptions. » (Chalmers, 1987, pp. 211-212).

Pour Ullmo, la science passe outre nos préférences et nos partis-pris subjectifs et nous impose le « réalisme opératoire » issu des expériences et de la constatation des relations répétables, ainsi que de l'adéquation des structures décrivant les relations entre les objets scientifiques.

Partant de la mise à l'épreuve expérimentale par Einstein du « concept » de simultanéité pour conclure à sa relativité, il décrit cette conclusion comme un renoncement à l'intuition immédiate du temps comme réalité objective : il déclare alors « ... il n'y a pas de réalité préalable que l'on mesure ; il y a une réalité qui naît du moment où elle est mesurée. » (p. 44).

C'est une déclaration à laquelle nous nous rallierons volontiers.

Le mythe de la vérité absolue doit également être abandonné. « Au réel variable des étapes successives de la science correspond une vérité en devenir : ces approximations successives de la vérité de nos représentations d'un phénomène, sont de l'essence de la démarche scientifique » (Ullmo, p. 207).

1.5 De la causalité « à l'œuvre » au déterminisme partiel

Le principe de causalité pour Popper (1973), est l'affirmation que n'importe quel événement peut être expliqué par un lien causal et peut donc être prévu de manière déductive. Pour Popper c'est un principe métaphysique sur lequel il ne prend pas position. Mais une règle méthodologique s'impose, selon lui, à savoir « ne jamais renoncer à chercher des lois universelles et un système théorique cohérent, ni à nos essais en vue d'expliquer par un lien causal toute espèce d'événement que nous pouvons décrire ».

Pour Ullmo également « ... l'exigence de causalité est présente à la naissance de la science ». La question de la légitimité ne se pose pas, car « ... la science est essentiellement une méthode pour approcher le monde, et [que] cette méthode consiste à rechercher dans les phénomènes ce qui donne prise à la causalité, c'est-à-dire à y reconnaître des objets. » (Ullmo, p. 151).

La causalité, selon lui, consiste à « rendre compte de tous les phénomènes par des objets interagissants, définis et reconnus suivant des règles opératoires. » (p. 155). Rendre compte c'est formaliser et prévoir, mais aussi expliquer, satisfaire la raison. Cependant, il faut faire attention au blocage du langage « cause-effet » : il ne s'agit nullement de deux choses différentes, qui seraient données ou connues antérieurement à leur relation, sinon l'une pourrait exister sans l'autre, détruisant par là la relation de causalité qui les rend inséparables. Cause et effet « ... sont déduites de la relation, désignées par elles, n'existent que par elle... La liaison est nécessaire à leur existence même... » (p. 160). Si bien que, pour Ullmo, définir la causalité serait contraire au postulat opératoire : il faut voir cette notion à l'œuvre pour en saisir le contenu.

En résumé, il n'y a pas de fait individuel isolable, ni de cause isolable : chaque phénomène doit être rattaché à d'autres, il n'y a pas de commencement absolu. L'activité de la science, dans son exigence de causalité, consiste à multiplier les objets scientifiques *interagissants*, définis et reconnus par des méthodes régulières et contrôlables (les règles opératoires).

Si des conceptions pré-scientifiques de la causalité avait pu s'alimenter du déterminisme étroit de la mécanique classique du 19^{ème} siècle, l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique a profondément transformé l'idée de causalité, en introduisant la notion de causalité statistique. Pour Ullmo, la mécanique statistique conduit à renoncer à suivre le détail des interactions et l'histoire individuelle de chaque molécule, mais à rechercher l'état global le plus probable auquel peuvent conduire ces histoires individuelles inconnues. La causalité statistique définit un devenir irréversible à l'échelle macroscopique, irréversible car le système évolue vers des états de plus en plus probables. Il existe donc un devenir déterministe à l'échelle macroscopique, qui n'est en rien contredit par l'indéterminisme irréductible des

interactions ultimes (relations d'incertitude de Heisenberg) : les conclusions sur le devenir macroscopique d'un état global sont indifférentes aux propriétés supposées pour les systèmes simples constituants. Ce qui importe pour connaître la probabilité d'un état, c'est de savoir combien de combinaisons le réalisent, et non comment une de ces combinaisons le réalise.

Il en résulte que le déterminisme est un postulat méthodologique de la science, mais il s'agit d'un déterminisme partiel, et non absolu, « toujours partiel et progressant, visant à épuiser la diversité des phénomènes sans jamais affirmer son entreprise achevée... » (Ullmo, p. 181). En effet, le formalisme quantique, de par l'incertitude essentielle apportée par l'interaction entre sujet et objet à l'échelle microscopique, laisse sa place au rôle joué par l'observateur humain, à travers l'acte libre d'observation. Le déterminisme absolu qui a pu être inféré de la mécanique classique est donc exclu par la science. Cependant, le déterminisme partiel, comme celui de Claude Bernard en biologie, s'oppose à ceux qui pens(ai)ent¹⁷ que les caractères propres de la vie y introduis(ai)ent une imprévisibilité, une singularité irrémédiable des processus, qui rendraient la méthode scientifique impuissante. Il est en outre possible de concilier le déterminisme-méthode de la science avec le hasard, en donnant de ce dernier une définition opératoire : le hasard apparaît quand des conditions initiales expérimentalement indiscernables aboutissent à des effets séparés.

« Aujourd'hui, comprendre c'est être capable de refaire ; un concept est compris lorsqu'on en possède une définition opératoire ; un phénomène est compris lorsqu'on est capable de le reproduire, au moins virtuellement, et donc de le prévoir, comprendre c'est pouvoir [...] Nous n'appréhendons du monde extérieur que ce que nous sommes capables de comprendre » (Ullmo, pp. 228-229). On ne peut s'empêcher de relier ce constat avec la question « *can you grow it?* » posée par Epstein et Axtell (1996). Ces auteurs proposent à travers l'exemple de leurs « laboratoires virtuels » évoqués plus haut, une démarche novatrice sur trois points : le dépassement de l'opposition entre induction et déduction, une solution au passage du niveau micro au niveau macro, et une vision totalement nouvelle du déterminisme en sciences sociales.

Ces laboratoires virtuels qui sont constitués par le chercheur à l'aide de l'ordinateur, servent à tester des règles simples capables de générer des macrostructures familières. « Le but est de découvrir les mécanismes locaux ou microscopiques fondamentaux qui sont suffisants pour générer les structures sociales macroscopiques et les comportements collectifs qui nous intéressent. » (Epstein et Axtell, p. 4). A l'opposé de l'économie expérimentale (cf. supra) qui tend à complexifier la rationalité de l'homo oeconomicus, Epstein et Axtell montrent comment l'interaction d'agents aux règles de comportement simples, suffit à faire émerger des macrostructures sociales complexes : par exemple, avec des agents pourvus d'une vision limitée, ne pouvant se déplacer que dans les quatre directions cardinales, et se contentant de moissonner le sucre disponible à différents endroits de la maille de Sugarscape, la simulation fait émerger des comportements de groupe cohérents et inattendus, car qualitativement différents des comportements des individus composant le groupe (exemple, un déplacement collectif en diagonale alors que ce type de déplacement est interdit aux agents individuels). Cependant, la conclusion la plus surprenante n'est pas le phénomène macroscopique émergeant en lui-même, mais la suffisance de règles simples pour le faire émerger. L'approche de Epstein et Axtell n'est donc ni déductive, ni inductive, mais celle d'une science sociale générative : « Nous proposons un programme génératif pour les sciences sociales et considérons la société artificielle comme son principal instrument scientifique. »

¹⁷ Cf. le débat qui traverse les sciences sociales...

(p. 177). C'est ainsi que, pour Epstein et Axtell, les modèles de sociétés artificielles peuvent changer notre manière de penser l'explication dans les sciences sociales.

Encadré 1 : Individualisme méthodologique et rationalités

L'individualisme méthodologique (IM) est un paradigme défini par trois postulats :

- Le postulat P1 de l'individualisme, énonce que tout phénomène social résulte de la combinaison d'actions, de croyances ou d'attitudes individuelles. Bien entendu il ne s'agit pas d'un atomisme. Les acteurs individuels sont socialement situés dans leur contexte : tous n'ont pas les mêmes ressources matérielles et cognitives, ni les mêmes intérêts ou préférences.
- Le postulat P2 de la compréhension, énonce que comprendre les actions, croyances et attitudes de l'acteur individuel, c'est en reconstruire le sens qu'elles ont pour lui.
- Enfin, le postulat P3 de la rationalité, affirme que l'acteur adhère à une croyance ou entreprend une action parce qu'elle fait sens pour lui. Cela n'implique pas cependant, que le sujet soit clairement conscient du sens de ses actions et de ses croyances.

En outre, au moins trois autres postulats sont également considérés dans les variantes de l'individualisme méthodologique :

- Le postulat P4 conséquentialiste : le sens de l'action pour l'individu réside toujours pour lui dans les conséquences de ses actions (IM conséquentialiste ou instrumentaliste).
- Le postulat P5 de l'égoïsme : parmi les conséquences de son action, l'individu ne s'intéresse qu'à celles qui le concernent personnellement.
- Le postulat P6, dit du calcul coût-bénéfice (CCB) : l'individu choisit l'action qui maximise son CCB.

C'est avec les postulats P4 à P6 que les économistes, en général, associent individualisme méthodologique et utilitarisme de l'individu. La

théorie du choix rationnel (TCR) définie par les postulats P1 à P6, n'est donc qu'une variante de l'IM. Dans ce dernier, les raisons évoquées par le postulat P3 sont de natures diverses, et non réductibles à un type unique.

Ce qui fait l'attrait essentiel de la TCR, est que le postulat de l'action rationnelle guidée par le CCB rend l'explication complète : toute question supplémentaire sur les motivations de l'action individuelle est inutile.

Cependant, même si la TCR a fait preuve de son efficacité scientifique dans de nombreux cas, il existe de nombreux phénomènes sociaux devant lesquels elle achoppe. Ces phénomènes sont considérés comme des « paradoxes », si l'on veut accorder à la TCR une portée générale : paradoxe du vote, paradoxe d'Allais, paradoxe du jeu de l'ultimatum, etc.

Par contre, nombre de ces « paradoxes » se résolvent dans le cadre de l'IM. C'est pourquoi, pour Boudon, l'IM est le seul modèle rationnel général, si l'on veut bien admettre que la rationalité n'est pas réductible à sa version instrumentale :

- dans certains cas seulement, les raisons qui inspirent les comportements, attitudes ou croyances de l'acteur, sont dictées par son intérêt égoïste, et alors s'applique le CCB ;
- dans d'autres cas, il s'agit d'une rationalité cognitive qui consiste pour l'individu à rechercher le vrai dans la mesure de ses moyens ;
- dans d'autres cas enfin, la rationalité est dite axiologique, et revient pour un individu à déterminer, dans la mesure de ses moyens, ce qu'il est bien, légitime, etc. de faire dans telle ou telle circonstance.

D'après Boudon (2002)

Dans le passage du niveau micro au niveau macro, cette approche reste compatible avec l'individualisme méthodologique (cf. Encadré 1), tout en introduisant les interactions entre individus et institutions. On l'a déjà vu avec l'émergence de comportement collectifs inattendus, *a priori* incompatibles avec les comportements individuels : la société artificielle n'est donc pas le simple reflet de ses agents individuels. A l'inverse, la société rétro-agit sur les individus, puisque les agents bougent sur la base de ce qu'ils trouvent dans leur environnement et ce qu'ils trouvent dépend de l'action des autres agents. C'est l'exemple de l'introduction d'une externalité comme la pollution : celle-ci se forme à proportion de la

cueillette et de la consommation de sucre, et se diffuse d'une cellule à ses voisines, en parallèle au mouvement des agents ; les agents sélectionnent alors non plus les sites ayant le maximum de sucre disponible, mais ceux ayant le ratio sucre sur pollution maximum. Enfin, la société artificielle est capable d'une intelligence sociale qui dépasse celle des individus : c'est l'exemple, évoqué plus haut, d'un prix moyen d'équilibre émergeant à partir d'échanges complètement décentralisés, sans avoir à imaginer un quelconque commissaire-priseur qui informerait les agents de l'existence d'un prix d'équilibre qui serait préétabli.

On rejoint ainsi la vision originale de la « main invisible » d'Adam Smith. C'est également une piste pour prendre en compte les critiques de Kirman (1992), au sujet de l'absence de prise en compte de l'hétérogénéité des individus et des interactions entre eux dans le modèle macro-économique classique, prétendant aux fondements micro-économiques et reposant sur « l'individu représentatif »¹⁸.

Il en découle que le holisme méthodologique, lequel consiste à faire des êtres collectifs des sujets, n'a pas de place dans l'approche proposée par Epstein et Axtell : il n'y a pas de déterminisme social qui s'imposerait aux individus. En effet, les règles de comportements des agents individuels sont fixées initialement et ne sont pas modifiées par l'influence de la macrostructure sociale émergente : cette dernière n'influe sur les comportements des agents que par les modifications de l'environnement qu'elle provoque (exemple de la pollution). L'interaction entre les agents est au cœur de ce processus. Elle laisse de la place au hasard : dans le modèle d'échange bilatéral du sucre et de l'épice pratiqué dans Sugarscape le prix dépend des taux marginaux de substitution respectifs des deux agents partenaires dans l'échange. Comme en plus ces agents se déplacent dans l'espace, il est impossible de prévoir le prix sauf à décrire totalement l'espace d'état de la société artificielle. On ne peut faire ce calcul que de manière probabiliste : il en résulte que des agents identiques en capacités, préférences et dotations, ont des bien-être différents (une inégalité horizontale de bien-être strictement interdite dans l'équilibre walrassien). Enfin, facteur supplémentaire d'évolution, dans les modèles de sociétés artificielles il est possible de distribuer des règles différentes entre agents, la société peut apprendre. On peut de plus imaginer que les règles de chaque agent puissent changer, que des règles disparaissent et de nouvelles règles soient inventées, au cours d'un processus évolutif où seules survivraient les règles couronnées de succès (au sens de la survie des agents qui les portent).

On peut voir là une réponse au souhait de Blaug (1994) de poser l'individualisme méthodologique en tant que postulat heuristique (sans vouloir faire de ce souhait un oukase) : il s'agit de définir les « concepts holistiques » (variables agrégées) « ... en termes de comportements individuels si et quand cela est possible. » (p. 46). Cette réponse rejoint également l'individualisme méthodologique « complexe » (Dupuy, J.-P., 2004) : l'IM complexe, tout en affirmant que ce sont les individus qui « font » les phénomènes collectifs, rejette le holisme, mais affirme également que ces phénomènes sont plus complexes que les individus qui les engendrent, et sont dotés de lois propres. On ne sous-estimera pas toutefois l'ampleur des difficultés qu'a à affronter un programme micro-économique qui ambitionne de fonder l'explication des phénomènes macro-économiques (Malinvaud, 1990).

C'est la mise en œuvre de ce déterminisme partiel en sciences sociales, à travers ce type de laboratoires virtuels, que je souhaite privilégier dans mes perspectives de recherche (cf. Chapitre 5).

¹⁸ voir aussi le chapitre 2 de Simon (2004) sur la rationalité économique.

1.6 Conclusion

En guise de conclusion provisoire, nous commencerons par réaffirmer la nécessité de la rigueur apportée par les définitions opératoires dans la démarche scientifique. Dans le dialogue entre théorie et empirie, l'expérience joue un rôle fondamental à travers la constitution des modèles de données et des modèles expérimentaux permettant de mettre à l'épreuve, à l'aide de tests sévères, les hypothèses scientifiques. Cependant, si l'expérience a une fécondité propre – de même manière que l'analyse de données multidimensionnelles exploratoire a une capacité heuristique –, tôt ou tard la théorie est requise pour dépasser les conditions particulières de l'expérience.

A l'encontre du rationalisme triomphant, il faut faire preuve d'une certaine humilité et reconnaître le caractère humain de la fabrication de la science, à l'instar du chercheur en sciences sociales qui pratique l'aller-retour entre induction et déduction, ainsi que l'expérimentation contrôlée fictive. Il n'y a pas de méthode scientifique universelle et inchangée permettant de déterminer si une théorie est ou n'est pas acceptable, ni de comparer des théories entre elles. Cependant, il nous faut refuser le relativisme au sens de « toutes les méthodes se valent ». Les quelques critères évoqués précédemment permettent de définir les conditions minimales d'une démarche scientifique, même si méthodes et normes peuvent évoluer au fil du temps.

De même que les méthodes et normes scientifiques sont évolutives, le réel que nous cherchons à appréhender est variable, il s'impose à nous à travers les expériences – fictives pour le chercheur en sciences sociales – qui constatent les relations répétables entre objets scientifiques et mettent ainsi en œuvre la causalité. Le déterminisme partiel est un postulat méthodologique de la science qui vise à épuiser le réel sans prétendre y être parvenu. Cette compréhension en devenir des phénomènes suppose la capacité de les reproduire. C'est la démarche des laboratoires virtuels des sociétés artificielles, qui proposent une nouvelle conception du déterminisme en sciences sociales. Ce programme génératif pour les sciences sociales constitue-t-il un PR alternatif au PR néoclassique ? L'avenir le dira.

C'est sous cet éclairage méthodologique général que j'aborde, dans la suite de ce mémoire, la présentation de mes travaux, en commençant par la définition et la mise en œuvre de concepts opératoires et d'une méthode d'expérimentation contrôlée fictive.

CHAPITRE 2.

DU CONCEPT DE MOBILITE A L'EXPLORATION DE L'UNIVERS DE CHOIX COMPORTEMENTAL

Dans ce chapitre, j'illustre comment, dans mes travaux, j'ai mis en œuvre une définition « opératoire » de la mobilité (au sens qui lui a été donné précédemment en 1.1), et je discute comment cette définition évolue de concert avec les modèles-théories qui la représentent et la manipulent (section 1). La deuxième section montre comment j'ai, avec des collègues, utilisé ce concept dans le cadre d'une expérimentation contrôlée fictive, pour explorer l'univers de choix comportemental des individus en matière de mobilité quotidienne.

2.1 Le concept de mobilité : de la mesure au modèle

Le fonctionnement du système de transport, en lien avec le déroulement des activités économiques et sociales dans l'espace (les forces directrices, cf. introduction), est assez complexe. Afin de l'éclairer et d'y apporter un peu d'ordre, nous pouvons nous inspirer de la représentation du système-ville proposée par Bonnafois et Puel (1983). Ce système-ville est représenté comme l'interaction de trois sous-systèmes : un sous-système de localisation qui fait référence à l'utilisation physique et fonctionnelle du sol ; un sous-système de déplacement comprenant à la fois le système de transport et les flux de personnes et de biens qu'il supporte ; un sous-système de pratiques et relations sociales désignant le déroulement des activités quotidiennes des citoyens, s'inscrivant dans une organisation particulière de la société.

De cette représentation découle la notion de mobilité comme articulation entre espace et temps vécus, permettant la réalisation de certaines activités en différents lieux de l'espace urbain : cette mobilité peut alors être considérée comme partie intégrante d'un « programme d'activités » de l'individu, lequel est constitué par l'ensemble des activités au cours de la journée, repérées dans leur succession horaire, leur durée et leur localisation spatiale (on parle aussi de « schéma d'activités »). Comme je le soulignais dans ma thèse (**Raux, 1983**), nous disposons alors d'un concept tendant au caractère opératoire, puisque pouvant être mesuré dans le cadre d'enquêtes à la méthodologie éprouvée : par exemple, en France, les « enquêtes déplacements auprès des ménages » sont réalisées à intervalles plus ou moins réguliers dans la plupart des agglomérations de certaine importance. Néanmoins, je soulignais également que la mesure effective laissait une part d'appréciation à l'enquêté dans ses déclarations (par exemple, à partir de quel seuil de distance à pied un déplacement est-il considéré comme tel) et à l'enquêteur dans son travail de recueil (par exemple, son influence sur l'enquêté), sans parler des variations de méthode d'un pays à l'autre : il en résulte qu'il est plus pertinent de parler de concept « pseudo-opératoire » (cf. section 1.1, page 8).

Cependant, un tel concept n'est en rien figé. Il est le double fruit d'une évolution des enjeux sociétaux¹⁹ – qui jouent un rôle important dans notre discipline appliquée – et de l'évolution des paradigmes scientifiques qui, par ailleurs, entretiennent certaines relations avec ces enjeux sociétaux.

¹⁹ Sur l'évolution de ces enjeux voir Orfeuil (2000).

L'irruption de la problématique du développement durable est un bon exemple d'évolution des enjeux de la mobilité dans les aires d'influence des agglomérations urbaines. Les besoins évoluent et les objectifs poursuivis en matière de politiques de transport influencent directement la construction des modèles : la problématique des années 50, intéressée à la croissance des usages de l'automobile (Dupuy, G., 1975), n'est pas celle des années 90, intéressée aux conséquences environnementales de telle ou telle politique de transport, ou à la réorientation de la demande vers des modes et des déplacements de proximité, moins consommateurs de ressources environnementales (à ce sujet, voir l'article de *l'Encyclopédie d'économie spatiale* par Andan, Faivre d'Arcier et **Raux, 1994** ; cf. **Annexe 1**).

Cela implique, par exemple, l'élaboration de modèles qui ne s'intéressent pas uniquement aux déplacements automobiles, qui soient sensibles aux politiques d'orientation de la demande (choix multimodal) ou de réduction de la mobilité motorisée (pratiques piétonnières, impacts des équipements de proximité, etc.) ou encore qui permettent de simuler des actions d'orientation de la demande inédites jusqu'ici (régulation tarifaire, réglementation d'accès, etc.).

Par voie de conséquence, la construction de ces modèles nécessite de nouvelles manières de mesurer les comportements de mobilité : il faut s'intéresser par exemple aux caractéristiques de l'offre de transport, repérées de manière assez fine au niveau de l'usager dans ses déplacements quotidiens, telles que les facilités de stationnement, les caractéristiques (durée, pénibilité) des ruptures de charge dans les transports collectifs, ou encore les distances entre le lieu de l'activité terminale ou initiale et la place de stationnement, ou l'arrêt de bus ou de métro ; il faut aussi comprendre les liens entre équipements de proximité et mobilité, donc mieux mesurer que par le passé les petits déplacements effectués à pied ou en voiture ; cette mobilité en voiture doit être également finement repérée, si l'on veut pouvoir reconstituer les distances parcourues et les émissions de polluants liées aux départs à froid ainsi qu'à la vitesse instantanée des véhicules ; enfin, au-delà de l'observation des comportements actuels, l'exploration expérimentale des mécanismes du changement de comportement doit permettre de mieux comprendre ce processus de changement et de mieux le piloter.

C'est donc la conception des enquêtes qui se trouve de fait modifiée, même si le souci de comparabilité avec les données produites antérieurement peut freiner cette évolution. Le caractère évolutif de ce processus de production de données peut être illustré par l'évolution conjointe du paradigme de la mobilité et des modèles économétriques la représentant, évolution conjointe non exempte de contradictions.

Le concept de déplacement est intimement lié à la modélisation traditionnelle du transport en milieu urbain, développée dans les années cinquante : la ville est représentée de manière simplifiée par un découpage en zones reliées entre elles par un réseau de transport ; la modélisation repose sur l'approche classique en quatre étapes (génération, distribution, répartition modale et affectation). Dans cette approche, la planification consiste à prévoir un accroissement de la masse des déplacements émis (résidences) et attirés (emplois) par zone, puis à distribuer spatialement ces déplacements par origine et destination, à les répartir éventuellement par mode de transport, et enfin à les affecter sur un réseau. L'application de ces modèles, opérationnelle dans un contexte de développement continu de l'automobile dans les années cinquante et soixante, trouve aujourd'hui ses limites quand il faut, dans une conjoncture financière plus serrée, fournir des évaluations pour arbitrer entre des stratégies de transport différentes : il s'agit de représenter le fonctionnement du système de transport, et donc les comportements de ses acteurs de manière plus pertinente, pour mieux les comprendre et mieux agir dessus.

C'est ainsi que pour répondre à ces nouvelles questions, les approches du comportement de mobilité quotidienne ont cherché à mieux prendre en compte l'environnement spatial et social des individus : ces approches mettent en évidence le jeu des contraintes et opportunités qui modèlent ces comportements quotidiens. Ces approches fondées sur les activités ont été développées dans les années 70 et 80, à partir des travaux de géographes et de chercheurs en sciences sociales, et ont abouti à un nouveau paradigme de la mobilité.

Ce renouvellement trouve sa source dans un article fondateur paru en 1970 (*What about People in Regional Science?*), par Torsten Hägerstrand, géographe à l'université de Lund en Suède. Le modèle géographico-temporel de Hägerstrand formalise le schéma d'activités de l'individu comme un cheminement dans un espace à trois dimensions, les deux dimensions de l'espace géographique réduit à un plan, et la dimension du temps de déroulement des activités sur l'axe vertical (cf. Figure 1). L'activité est définie comme une séquence temporelle se déroulant sans changement de localisation. Chaque activité de l'individu est représentée par un segment vertical délimité par l'heure de début et de fin de l'activité, positionné selon la localisation de l'activité repérée par ses coordonnées spatiales dans le plan horizontal de l'espace géographique. Chaque segment oblique liant les extrémités de deux segments verticaux d'activité, représente un déplacement d'un point à un autre du plan géographique, déplacement nécessitant une certaine durée.

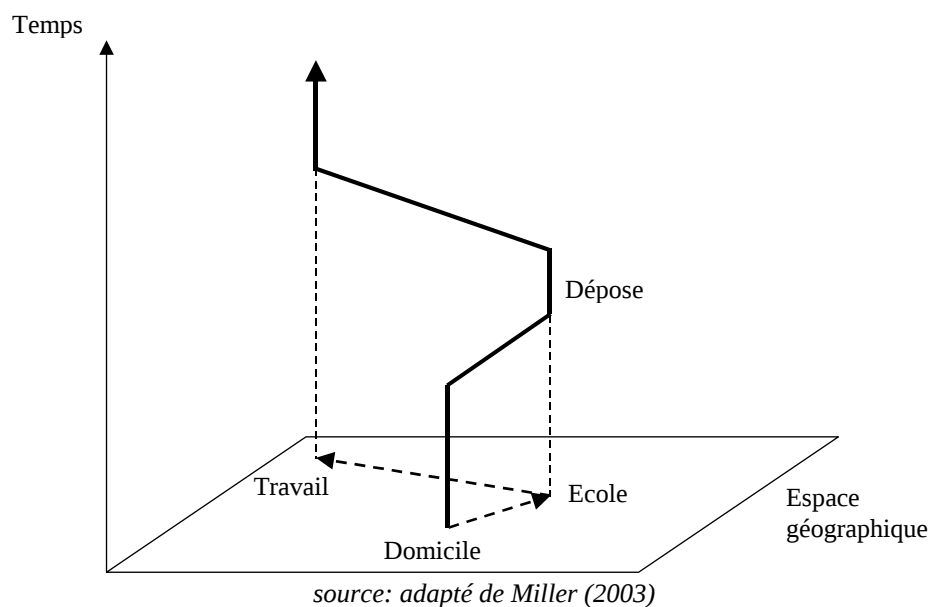


Figure 1 : Le cheminement spatio-temporel

Cette approche représente le comportement de déplacement comme intégré à une séquence d'actions résultant en un cheminement continu dans l'espace et le temps, plutôt que comme un ensemble discret de déplacements séparant des origines et des destinations. Le modèle de Hägerstrand apparaît comme le fondement théorique des approches géographico-temporelles de la mobilité quotidienne.

A cette représentation peuvent être associées deux types de contraintes, des contraintes de capacité et des contraintes interpersonnelles. Les contraintes de capacité désignent trivialement l'impossible ubiquité, et surtout le fait que l'offre de transport impose, par la vitesse de déplacement, un arbitrage entre le choix des destinations et le temps qui peut être consacré aux activités et aux déplacements : à cette aune, selon leur disponibilité et selon les

lieux visés, les modes de transport (automobile, bus, bicyclette ou marche à pied) ne sont pas tous égaux. Les contraintes interpersonnelles désignent la nécessité de se trouver en certains lieux en même temps que d'autres personnes : par exemple, pour le travail, ou aux heures d'ouverture des magasins, ou encore pour prendre soin des enfants.

On est donc passé progressivement de la notion de déplacement à celle d'activité et, par le biais de l'acteur de cette activité, à la notion d'individu situé socialement dans son entourage (par exemple, familial ou professionnel), ce dernier générant des obligations interpersonnelles entre individus ou avec des institutions sociales. On considère désormais que la demande de déplacements est une demande dérivée de la demande de réalisation d'activités en différents lieux et à différents moments. Cette réalisation d'activités est le fruit d'interactions complexes, d'une part des interactions physiques avec les réseaux et l'espace construit, d'autre part des interactions sociales.

Ces approches en termes d'activités ont donné lieu au développement de modèles fondés sur les activités qui se prolongent actuellement dans les recherches sur la micro-simulation spatio-temporelle de schémas d'activité individuels et les modèles multi-agents d'interaction sociale (cf. mes perspectives de recherche au Chapitre 5).

Cependant, c'est dans le domaine du recueil de données sur la mobilité quotidienne que l'on en trouve l'application la plus concrète. En effet, dans la plupart des méthodes d'enquête par carnet de bord auto-administré, on est passé du recueil des déplacements au recueil des activités. Cette évolution équivaut à une reconnaissance explicite du fait que la demande de transport est une demande dérivée du besoin de réaliser des activités. Cette focalisation sur les activités semble également plus appropriée à la représentation par les enquêtés de leur propre comportement. Elle permet aussi de minimiser les non-déclarations de déplacements perçus comme peu importants ou non perçus comme tels par les enquêtés.

Ce bref exposé de l'évolution conjointe du triplet besoins-modèles-données permet de rappeler une évidence, à savoir que les « données » d'observation de la mobilité ne sont jamais que le fruit d'une production fondée sur une certaine représentation du réel (on retrouve l'observation chargée de théorie, cf. section 1.1 supra, page 8). A cette représentation simplifiée du réel participent aussi bien les méthodes d'observation (i.e. les « modèles de données » de Mayo, cf. section 1.2, page 10) que les modèles qui mettent en musique les données produites (i.e. les « modèles expérimentaux » de Mayo). Dans ce processus de représentation de la réalité on peut en outre passer insensiblement de l'un à l'autre, dans la mesure où, par exemple, les modèles peuvent servir à produire des données de comportements, comme c'est le cas avec la reconstitution des origines et destinations de déplacements à partir de données de comptage de véhicules au droit des voies routières.

Enfin, le modèle apporte une interprétation causale à des observations qui sont le fruit de modèles de connaissance préétablis, lesquels ont été élaborés sur la base d'observations produites antérieurement. C'est donc un processus itératif qui est en œuvre dans lequel modèles et données produites évoluent de concert dans la construction de la connaissance. Or, cette évolution n'est pas dirigée uniquement par les besoins de la connaissance scientifique mais aussi en réponse à des besoins sociétaux qui évoluent, comme je l'ai montré plus haut (et comme je l'illustrerai dans le Chapitre 4 sur la régulation).

2.2 L'exploration de l'univers de choix par les enquêtes interactives de simulation

Avec les méthodes d'enquêtes interactives de simulation, dites de « réponses déclarées », nous abordons l'une des trois formes d'expérimentation contrôlée fictive que nous avons évoquées dans le premier chapitre (cf. 1.4 supra page 16).

Le fait que les politiques de transport se situent désormais dans une problématique de management clairvoyant de la demande, dans un contexte politique – budgétaire et environnemental – plus contraint, explique pour une part l'intérêt porté aux méthodes interactives de réponses déclarées. En effet, face aux nouvelles politiques de régulation envisagées, les méthodes classiques de prévision de la demande, fondées sur les choix révélés, apparaissent mal armées. Par exemple, des mesures de péages en zone urbaine induiraient probablement de véritables bouleversements dans les habitudes de déplacement des automobilistes : il s'agit alors de prendre en compte, au-delà des impacts du prix et de la durée des déplacements sur les choix en matière de mobilité, la capacité de ces automobilistes à adapter leur schéma d'activités sur la journée ou sur la semaine, compte-tenu des horaires d'application du péage.

Il importe donc de mieux comprendre quelles peuvent être les réactions des usagers à ces mesures et notamment les marges de manœuvre dont ils disposent pour intégrer, avec plus ou moins de perturbations dans leurs habitudes, les changements qui leur sont imposés. En effet, l'une des principales conclusions que l'on peut retenir des approches fondées sur les schémas d'activités est l'importance de la délimitation de ces marges de manœuvre que nous désignerons sous l'expression d'« univers de choix » (cf. Encadré 2). Selon que cet univers de choix est restreint ou non, tel ou tel ménage ou individu sera plus ou moins vulnérable à une mesure particulière. Par exemple, un ménage ayant fait le choix d'une localisation en grande banlieue, se rend captif de l'automobile et risque d'être très vulnérable à une forte hausse du coût du carburant, ou à des restrictions d'accès au centre-ville en automobile. Ce ne sera pas le cas, au contraire, pour un ménage résidant en ville avec une proximité aux aménités urbaines, et de bonnes alternatives de mode de déplacement à l'automobile.

Encadré 2 : L'univers de choix

L'univers de choix dans le cadre de la mobilité quotidienne, est une notion qui trouve ses racines dans des courants issus de plusieurs disciplines, qu'il s'agisse de la géographie, de la sociologie, de l'économie ou de la psychologie (pour un survey voir **Raux et al, 1988**).

Un premier groupe de travaux a permis d'introduire les contraintes encadrant la réalisation des activités quotidiennes, analysées à l'aide du concept de schéma d'activités. Ce concept développé à partir des travaux des équipes de Lund (Hägerstrand, 1970 ; Lenntorp, 1978) et d'Oxford (Jones et alii, 1983) repère dans l'espace et dans le temps les activités successives et les déplacements qui leur sont liés, sur une période de temps déterminée. Il articule la notion de cadre géographico-temporel, qui impose des limites à la liberté d'action spatiale et temporelle des individus, à la notion d'obligations interpersonnelles, qui génèrent des dépendances plus ou moins fortes entre les individus dans la planification de leur journée.

L'observation des comportements individuels fait ressortir qu'au-delà d'une certaine variabilité au quotidien, les schémas d'activités apparaissent plus ou moins structurés et marqués par un certain nombre de régularités, que l'on retrouve à travers leurs différentes composantes d'activités, de déplacements, de localisations, et de rythmes temporels. Ces régularités, tout comme le jeu des contraintes spatio-temporelles et inter-personnelles, montrent que l'individu dispose de marges d'action limitées. Ces marges de manœuvre définissent son univers de choix. Celui-ci est la résultante non seulement de ces contraintes qui pèsent sur lui, mais aussi des ressources (temps, argent, mode de locomotion...) dont il bénéficie. Cet univers de choix peut donc être très variable d'un individu à l'autre. La liberté dont chacun dispose pour pratiquer et localiser ses activités, ainsi que pour organiser ses déplacements, n'existe qu'à l'intérieur de ce cadre. Cet univers de choix a fait l'objet de recherches sous deux aspects : celui du repérage de ses divers déterminants et celui des temporalités de son action.

A côté de données factuelles comme l'organisation géographico-temporelle des activités, la structure du ménage et sa localisation résidentielle, ainsi que le rôle de l'individu dans ce ménage, interviennent des facteurs plus subjectifs pour réduire l'univers de choix (Brög et alii, 1977). Même si l'accessibilité physique existe, un individu peut considérer que tel espace ou telle activité lui sont interdits : les territoires individuels résultent de l'intersection des espaces physiquement accessibles

et des espaces socialement ou psychologiquement accessibles (Tarrius, 1978), ces derniers résultant d'un processus d'apprentissage spatial (Hanson, 1979 ; Horton, 1971). L'individu s'impose aussi des règles au travers de normes explicites ou intériorisées, règles qui régissent ses relations au sein du ménage comme vis-à-vis du monde extérieur. Les comportements routiniers sont l'expression la plus classique de ce jeu des normes sur les pratiques d'activités et de déplacements.

En résumé, l'univers de choix de l'individu est formé par l'action d'un ensemble de facteurs qui affectent les divers paramètres de sa mobilité. Ces facteurs sont à la fois source de limitations mais aussi d'opportunités à l'action individuelle. Ce sont :

- les localisations des activités et l'offre en transports,
- l'entourage social de l'individu qui forme ses contraintes inter-personnelles,
- les ressources économiques disponibles,
- les attitudes et facteurs culturels,
- les normes sociales imposées ou intériorisées.

L'ensemble de ces facteurs contribuent à délimiter le cadre d'action spatio-temporelle de l'individu, en lui conférant une certaine rigidité. Cependant, le degré de rigidité de ce cadre est relatif au terme considéré : plus on s'éloigne du court terme, plus la restructuration de l'univers de choix est possible.

En effet, d'autres facteurs peuvent intervenir à moyen ou long terme pour modifier cet univers de choix. Certains relèvent des individus eux-mêmes, tels que les transitions dans le cycle de vie (Bourgin, 1978 ; Clarke et Dix, 1983), le changement de localisation de la résidence (Andan et alii, 1984), ou l'effet du vieillissement (Kostyniuk et Kitamura, 1986). D'autres facteurs sont liés à l'évolution de la société (Haumont, 1980), comme le changement des normes imposées, l'éclatement de la famille ou la généralisation de la motorisation. Mais ces modifications n'entraînent pas systématiquement celles des comportements, dans la mesure où les individus offrent des résistances au changement dont la force est fonction de leurs habitudes, de leurs attitudes, ou des normes qu'ils ont intériorisées (Averous et Matalon, 1979). Il existe donc des segments de population plus ou moins instables.

En outre, les mesures de politique des transports peuvent accélérer l'évolution des univers de choix des individus.

Si l'on veut donc élaborer des stratégies susceptibles d'infléchir les comportements de mobilité dans le sens souhaité, il est crucial d'identifier ces univers de choix et de comprendre leur mode de constitution et d'évolution. C'est à l'occasion de l'application d'une méthode interactive de « réponses déclarées » (cf. Encadré 3), dans un contexte de scénarios de péage urbain, que nous avons cherché, d'une part à démontrer les mécanismes de fonctionnement de l'univers de choix, d'autre part à identifier certains leviers pertinents du changement des comportements.

L'application de scénarios de congestion et de tarification de l'usage de l'automobile, par le biais d'une simulation contrôlée sur un schéma d'activités effectivement réalisé (un jour précédant le jour d'enquête-simulation), amène l'individu à déformer ce dernier. L'observation de ce processus de déformations successives au fil des scénarios, permet de mettre en évidence la manière dont se construisent les adaptations individuelles. Ce jeu de reconstruction fait apparaître le schéma d'activité comme un ensemble de composants d'activités solidaires, jouant le rôle tantôt de « pivots » tantôt de « réserves » de temps-durée. Les pivots qui structurent la réorganisation du schéma d'activités apparaissent in fine bien différents des contraintes apparentes ex ante. L'univers de choix apparaît ainsi singulièrement flexible, grâce aux possibilités de réallocation du temps et au pouvoir de négociation de l'individu avec son entourage social. En identifiant les échappatoires possibles ou les situations de blocage potentiel, ce genre de méthode peut aider à la conception de stratégies pertinentes d'orientation des comportements de déplacement. Les résultats de cette simulation ont été publiés dans un chapitre d'ouvrage chez *Elsevier* (**Raux et al, 1998 ; cf. Annexe 2**).

Encadré 3 : Les enquêtes interactives de « réponses déclarées »

Ces méthodes d'enquête interactive visent à explorer l'éventail des adaptations envisagées par des agents en réponse à des changements dans leur environnement (ici les conditions de transport). Parce qu'il s'agit de changements non familiers (exemple, une hausse de prix du carburant non expérimentée dans le passé, ou un péage urbain), il importe de mettre en œuvre une démarche exploratoire, différente d'enquêtes classiques à questionnaire fermé. Un produit connexe de ce type d'enquête est également d'observer le processus de choix que mettent en œuvre les agents.

Les méthodes de « réponses déclarées » désignent un ensemble plus vaste que les méthodes de « préférences déclarées » (Lee-Gosselin, 1995) : avec les « préférences déclarées » les individus sont appelés à évaluer un ensemble fixé d'attributs ou à choisir parmi un ensemble fermé d'options, le tout dans un contexte de contraintes explicites ; avec les « réponses déclarées » l'éventail des réponses possibles et les contraintes qui pèsent sur les choix peuvent être l'objet de l'investigation.

Un postulat de base est que, dans la recherche d'adaptations comportementales, les agents explorent un ensemble de solutions qu'ils perçoivent comme possibles. Cet ensemble est désigné par l'expression d'« univers de choix comportemental » (cf. Encadré 2). Cet univers de choix n'est pas directement mesurable, on ne peut que l'explorer à l'aide d'une méthode d'enquête interactive de « réponses déclarées », fondée sur le mécanisme suivant : les agents sont confrontés à des changements dans leur environnement et, dans le cadre d'une sorte d'expérimentation contrôlée, amenés à déclarer les réponses comportementales variées qu'ils envisagent.

L'exploration de l'univers de choix suppose donc d'amener l'agent à réagir (virtuellement) et déclarer ses adaptations envisagées. Cela implique deux conditions d'efficacité à la simulation : il faut impliquer l'enquêté dans le jeu, par une mise en scène qui introduit les scénarios dans une progression graduelle, quitte à dramatiser parfois pour rendre plus plausible la possibilité de scénarios dérangeants ; il faut enfin introduire des pressions suffisantes pour amener l'enquêté à révéler indirectement son univers de choix.

La méthode intègre une certaine souplesse pour adapter les scénarios à chaque enquêté avant la simulation (sur la base de son profil préalablement recueilli), voire à chaud au cours de la simulation.

Pour faciliter l'apprentissage par l'enquêté au cours du jeu on peut modérer son rythme en alternant des scénarios à fortes contraintes et des scénarios à

faibles contraintes : ces derniers permettent à l'enquêté de « souffler », de laisser la place à des commentaires et à une exploration plus large de l'univers de choix.

Un avantage est également de séparer les attitudes du comportement. On peut à la fois recueillir une opinion très négative quant aux scénarios proposés, et des adaptations possibles à ces scénarios imposés.

On peut également détecter les comportements de non-réponse. Certaines non-réponses correspondent à une inadéquation des scénarios, qui n'ont alors aucun impact sur la base de faits. C'est l'adaptation des scénarios à chaque enquêté qui permet d'éviter ce genre de situation. D'autres non-réponses ou réponses implausibles peuvent être détectées à travers des adaptations systématiquement invoquées à l'identique, ou des adaptations dont la validité ne peut être vérifiée (exemple, une innovation technologique non encore diffusée sur le marché) : le directeur de jeu peut alors décider que cette solution n'en est pas une, et requérir une autre adaptation.

Enfin, les autres non-réponses ou blocages correspondent à des situations de traumatisme vécu par les enquêtés, qui n'acceptent pas la possibilité de certains scénarios : les enquêtés expriment ainsi les limites du concevable auxquelles ils arrivent.

Afin d'impliquer l'enquêté dans la simulation et de contrôler la plausibilité des réponses, la « base de faits » est de la plus grande importance. Cette « base de faits » sera par exemple, dans le cas du péage urbain, un programme d'activités, recensé à travers les activités et déplacements réalisés, par la personne interviewée, au cours d'une journée précédant la simulation proprement dite : elle permet de vérifier si les adaptations déclarées sont compatibles avec les contraintes pesant sur l'enquêté ; elle permet également de quantifier les conséquences de ces adaptations, afin de vérifier si ces dernières constituent une réponse adéquate à la pression exercée par les scénarios. La référence à la base de faits permet également de détecter des tactiques de réponses biaisées, par exemple celles qui répètent systématiquement les mêmes adaptations, ou qui envisagent d'emblée des adaptations radicales bouleversant le comportement de l'agent.

Quelle information donner ? On ne connaît pas *a priori* le niveau de connaissance de l'enquêté (par exemple sur les alternatives modales, sur les innovations technologiques envisageables, etc.). Doit-on donner initialement le maximum d'information sur chaque scénario, ou doit-on donner le strict minimum et attendre les questions

complémentaires ? C'est la deuxième option qui est privilégiée, la demande d'information par l'enquêté étant elle-même une information sur les variables importantes pour lui.

Le déroulement de ce type d'enquête comprend en général trois étapes : la collecte de la base de faits et des habitudes de comportement ; la simulation proprement dite avec l'application des scénarios ; le debriefing, à savoir une discussion informelle permettant de recueillir des opinions et

commentaires de l'enquêté, importants pour le travail de validation.

Il s'agit d'enquêtes lourdes, d'une durée de deux heures pour la simulation, outre la préparation. Comme on recherche la variété de situations et de comportements, l'expérience montre qu'à partir de 15-20 enquêtes, en ayant choisi judicieusement des profils variés d'enquêtés, les réponses deviennent redondantes.

Mais, tout compte fait, ces simulations de péages urbains ou autres mesures ne sont que des prétextes pour explorer de manière plus générale les processus de changement de comportements individuels en matière d'activités-déplacements (Andan et **Raux, 1997**).

L'exploration des univers de choix à travers cette simulation, amène en effet à jeter un regard nouveau sur le procédé de mesure des contraintes qui pèsent sur les choix des individus. L'énumération des activités considérées traditionnellement comme contraintes en horaires et en lieux, comme le travail ou les accompagnements, ne suffit pas. En effet l'accentuation des pressions sur les schémas d'activités peut amener à bouleverser complètement l'image que donnent à priori les enquêtés des contraintes qui pèsent sur leurs activités. C'est là le premier intérêt de la mise en œuvre d'une telle méthode expérimentale de simulation, à travers la déformation des univers de choix des automobilistes.

En effet, l'univers de choix n'est pas aussi rigide sur le court terme qu'on pourrait le penser. L'individu soumis à de fortes pressions peut significativement en modifier la configuration. Par sa propre action, il peut transformer une contrainte apparente en une réserve de temps disponible – par exemple l'annulation d'une activité d'accompagnement pour maintenir une autre activité – ou réorganiser son schéma d'activité de manière à alléger les pressions imposées – par exemple, en changeant ses heures de début ou de fin d'activité pour éviter la congestion ou le péage –. Cette flexibilité se révèle de manière relativement inattendue au fil de l'accentuation des pressions.

Cette flexibilité inattendue s'explique par le fait que, si le temps n'est pas un bien stockable, ce peut être un bien réallouable dans la planification du schéma d'activités. Cette possibilité de réallocation a une importance au moins aussi grande que les ressources financières dans le processus d'adaptation à des scénarios de tarification de la circulation.

Le degré de vulnérabilité des individus au changement est directement relié à leur (in)capacité de réorganisation du schéma d'activité, en addition avec les autres ressources de leur univers de choix. C'est ainsi que le pouvoir de négociation dont l'individu dispose vis-à-vis de son entourage social, familial ou professionnel, pour la réorganisation de ses activités ou les frais de ses déplacements, constitue un facteur essentiel dans les processus d'adaptation à de nouvelles politiques de transport visant l'usage de la voiture.

Toutefois, cet exemple de simulation montre que l'univers de choix n'est jamais complètement décrit. La simulation ne fait que provoquer l'activation de certaines ressources, comme la réallocation du temps ou des ressources financières : ces ressources ne sont activées par l'individu que dans un contexte donné et en tant que de besoin. De ce fait, l'univers de choix n'est que partiellement éclairé, sans que l'on puisse d'emblée en spécifier tous les contours.

Après l'application au péage urbain, ces méthodes de « réponses déclarées » ont fait l'objet d'autres applications par les chercheurs du LET. Elles ont données lieu à une session lors d'un

colloque que nous avons organisé en 1995 sur les méthodes d'enquêtes, dont j'ai co-édité les actes (cf. Bonnel, Chapleau, Lee-Gosselin et **Raux, 1997**).

Les méthodes interactives de « réponses déclarées » doivent cependant relever plusieurs défis d'ordre méthodologique et théorique, que nous avons identifiés et discutés dans un article paru dans un numéro spécial de la revue *Transportation* (Faivre d'Arcier, Andan, et **Raux, 1998** ; cf. **Annexe 4**), numéro dont j'ai été co-éditeur (Lee-Gosselin, Bonnel et **Raux, 1998** ; cf. **Annexe 3**). L'essentiel de ces défis est résumé ci-après.

Le premier défi est celui de l'importance centrale de la dotation en information. Quand on teste une situation connue, ou pressentie comme telle par l'enquêté – congestion habituelle, fréquences de bus, aménagement d'une gare, etc. –, ce problème peut être *a priori* ignoré. Ce n'est pas le cas quand on teste une situation inexpérimentée puisqu'alors on risque de faire par trop appel à l'imagination des enquêtés. En effet, chaque individu au moment de l'enquête se situe dans un contexte donné, dont la perception dépend de la nature de l'information initiale dont il dispose, cette dernière étant influencée par son vécu individuel et celui de son entourage social. Il est clair que l'expérience que l'on aura eue de la congestion dans sa propre histoire, a une influence sur les adaptations envisagées lors de jeux-simulation abordant ce thème. C'est donc le problème de l'hétérogénéité de la population face à l'information qui est posé.

Un deuxième défi est lié au phénomène d'apprentissage et à son impact sur les comportements. Comme cela a été souligné, ce n'est pas un problème spécifique aux méthodes interactives, puisqu'il existe pour toutes sortes de dispositifs d'observation : par exemple, les personnes qui participent à des panels deviennent plus sensibles au phénomène étudié que le reste de la population. L'interaction entre l'observateur et le sujet qu'il observe, phénomène général dans les enquêtes en sciences sociales, est ici rendue plus apparente. La perception du contexte par l'individu change et ses préférences changent également. La fourniture d'informations supplémentaires au cours d'un jeu-simulation et le déroulement du jeu, doivent aussi être soigneusement contrôlés et analysés pour mieux comprendre les changements de comportement et leurs mécanismes. C'est d'ailleurs l'un des avantages des méthodes interactives de simulation, que d'offrir la possibilité d'observer les processus d'apprentissage sous des conditions partiellement contrôlées.

Le rôle des méthodes interactives de simulation ne se limite pas, loin de là, à fournir un appoint aux méthodes quantitatives. Comme l'ont montré les exemples de simulation de restriction d'énergie, de péage urbain, ou d'introduction du véhicule électrique, leur intérêt est d'aider à détecter les circonstances d'adoption ou de rejet qui feront que la nouvelle technologie ou politique réussira ou non. Elles permettent de donner des indications sur la manière de conduire le processus décisionnel et une politique de changement, selon un chemin d'adoption.

Cette méthode est en cours d'application, dans une recherche sur une éventuelle extension des quotas transférables d'émission de CO₂ au secteur du transport de marchandises. Il s'agit d'une recherche que je dirige dans le cadre d'un projet que j'ai soumis au PREDIT²⁰ qui l'a sélectionné, et dont le financement est assuré par l'ADEME²¹.

Comme il y a été fait plusieurs fois allusion dans ce qui précède, cette méthode de simulation exploratoire a été utilisée dans le cadre de l'évaluation d'instruments de régulation que

²⁰ Le programme national de recherche sur les transports (www.predit.prd.fr).

²¹ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

j'examinerai au Chapitre 4. Auparavant, nous allons voir comment ce concept de mobilité et le triplet besoins-modèles-données est mis en œuvre dans le chapitre suivant sur la modélisation.

CHAPITRE 3.

MODELISER ET SIMULER LE SYSTEME DE DEPLACEMENTS URBAINS

Qu'est-ce qu'un modèle ? Comme le souligne Guillaume (1971), le modèle est une représentation simplifiée qui repose elle-même sur une représentation théorique du phénomène que l'on entend modéliser. Il y a continuité entre le processus de représentation et le modèle au sens strict auquel on aboutit. Le modèle permet d'apporter une certaine rigueur formelle, le plus souvent sous forme mathématique, en permettant de dépasser l'imprécision du langage et en explicitant les hypothèses mises en œuvre. C'est ce qui justifie, selon Boudon, le formalisme mathématique : il « revêt une fonction heuristique essentielle : celle de rendre indispensable la formulation claire de propositions imprécises et de prendre le relais de l'intuition, lorsque celle-ci est incapable d'apercevoir toutes les conséquences d'un ensemble de propositions... » (Boudon, 1970, p. 18).

En renfort du formalisme mathématique, l'ordinateur a permis, comme le souligne Simon (2004), la mise en œuvre calculatoire du modèle, et notamment un changement d'échelle dans cette prise de relais de l'intuition évoquée ci-dessus, quand il s'agit de manipuler un grand nombre d'équations et des conditions initiales compliquées. L'ordinateur a également rendu possible la simulation de systèmes que nous ne comprenons que partiellement, dans la mesure où il nous est possible d'en extraire les parties qui nous paraissent essentielles pour le problème qui nous intéresse, sans nous préoccuper de tout le détail de la structure interne du système modélisé (i.e. la représentation simplifiée évoquée ci-dessus).

La réalité à laquelle s'applique le modèle en sciences sociales est faite de comportements humains. De ce point de vue, cette réalité intègre les représentations que se font les individus de leur environnement. Les faits objectifs sont, en général, traduits et interprétés à la lumière des perceptions que les individus se forment du milieu social dans lequel ils vivent : c'est par exemple en économie, le phénomène de « l'illusion monétaire », qui fait que les comportements sont plutôt déterminés par les salaires nominaux et les prix perçus, que par les salaires réels. De même, en matière de transport, les modèles de demande ne tiennent en général pas compte du coût complet de la voiture, mais du coût apparent réduit aux frais de carburant et de stationnement. Ce phénomène de perception implique que la transposition du schéma stimulus-réponse du champ des sciences de la nature au champ des sciences sociales ne va pas de soi. En outre, le comportement de l'individu est non seulement fonction de la perception qu'il a de sa situation dans l'échelle sociale, mais aussi de la perception qu'il a de la façon dont les autres individus voient sa situation : ce sont les deux fonctions de statut et de rôle définies en sociologie.

Ces différents points amènent à préciser la notion de modèle en sciences sociales : selon Guillaume, le modèle est une « représentation simplifiée, construite sur un socle épistémologique qui est déjà une représentation, de faits objectifs qui, bien ou mal perçus, interviennent comme des contraintes et des perceptions complexes de ces faits par les agents dont il étudie le comportement. » (Guillaume, 1971, p. 33).

Dans ce qui suit, je présente plusieurs de mes activités de modélisation (au sens de la conception, de la formalisation mathématique, et de l'écriture logicielle de modèles) : une première section décrit les travaux de développement du modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise, tandis qu'une seconde section aborde certains développements

techniques récents pour dépasser les limites du modèle. Dans une troisième section sont décrits mes premiers essais de modélisation dynamique du système de déplacements urbains.

3.1 Le modèle stratégique

Le modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise a été développé en réponse à un double besoin d'application pour la politique des déplacements urbains et de recherche sur la simulation de tels systèmes (section 3.1.1). Sa mise en œuvre est décrite dans la section suivante 3.1.2. Ce modèle a également permis une exploration méthodologique des sources d'incertitude en matière de prévision, décrite en section 3.1.3.

3.1.1 Pourquoi un modèle stratégique ?

En économie des transports, comme dans toute discipline scientifique, chaque modèle n'a de sens et de pertinence que par rapport au phénomène dont on cherche à rendre compte, et aux paradigmes auxquels le modèle se réfère : cet ensemble permet de définir le champ d'application du modèle²². Chaque modèle possède donc des aptitudes spécifiques, qui sont à évaluer en rapport avec l'éventail des besoins d'évaluation de politiques de transports urbains. Cet éventail des besoins peut être ordonné selon deux dimensions, ou plutôt deux portées, l'une spatiale, l'autre temporelle.

La portée spatiale va du niveau du quartier jusqu'au niveau de l'agglomération ou de la région urbaine. La portée temporelle va du court terme (1 à 3 ans) au long terme (10 ans et au-delà). Ces deux portées permettent d'ordonner les différents types d'études requises pour mener à bien une politique de transport : cela va, sans être exhaustif, des études de projet détaillé d'infrastructure de transport à court terme, aux études de simulation à long terme au niveau de l'agglomération.

Il est clair qu'il n'existe pas de modèle à tout faire, et que chaque type d'étude appelle un ou des outils particuliers. L'analyste est mieux doté en matière de modèles de court ou moyen terme, qu'il s'agisse de modèles d'affectation sur des réseaux (issus de la recherche opérationnelle), ou de modèles économétriques de choix discret, qu'en matière de modèles de long terme.

Le long terme porte en lui une incertitude aux dimensions multiples. Cela justifie que les évaluations quantitatives issues d'un modèle de long terme ne s'intéressent qu'à un niveau spatial relativement agrégé, soit quelques zones au niveau de l'agglomération. En bref, le modèle stratégique doit reposer sur des régularités détectées à l'échelle spatiale de l'agglomération, et à l'échelle temporelle d'au moins une dizaine d'années voire plusieurs.

Le champ d'application de ce que nous appelons un modèle stratégique, est de pouvoir 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. Il s'agit, non pas de fournir les prévisions détaillées d'un futur inéluctable, mais de fournir des évaluations, sous forme d'ordres de grandeur ou de fourchettes, correspondant à ces situations contrastées. C'est en cela que l'on peut parler de modèles de simulation, au sens que donnent à ce terme les disciplines faisant un usage intensif de la

²² Cf. l'exemple de la physique des particules où les concepts d'onde et de corpuscule, un temps en conflit, sont progressivement apparus comme deux approximations de la nature profonde et unique des constituants de la matière, valables à l'échelle macroscopique mais incompatibles entre elles.

simulation numérique. Sous cet aspect, les modèles stratégiques ont un rôle pédagogique auprès des acteurs du système de transport, en permettant de confronter leurs visions du devenir de l'agglomération.

En regard de ces objectifs, les outils opérationnels existants sous forme de logiciels n'offrent que peu de réponses. Ces logiciels mettent le plus souvent en œuvre une architecture classique à quatre voire cinq étapes²³, où les étapes de génération, distribution et choix modal, sont réalisées à la journée, tandis qu'un passage à l'heure de pointe est introduit avant l'étape d'affectation des déplacements sur les réseaux : (1) la génération des déplacements par zone, est estimée à partir des évolutions socio-démographiques et économiques ; (2) la distribution spatiale des déplacements par origines et destinations, repose en général sur un modèle gravitaire, dont la fonction de résistance varie selon les coûts généralisés de déplacement entre zones ; (3) le choix modal de zone à zone estime le partage des flux de déplacements de zone à zone entre les différents modes de transports ; (4) les matrices origines-destinations à la journée sont transformées en matrices d'heure de pointe, en général par application de coefficients calculés sur l'observation du passé ; enfin, (5) les déplacements, tous motifs confondus, entrent en concurrence sur les réseaux, entre eux et avec le trafic de transit et d'échange extérieur à l'agglomération, en étant affectés par une procédure itérative sur les différents itinéraires.

Les boîtes à outils sont donc bien achalandées mais se prêtent mal à des simulations de stratégies. En effet, elles souffrent à cet égard de deux défauts majeurs, qui sont la lenteur et la lourdeur. La lenteur de ces outils découle de l'objectif qui leur est assigné, à savoir le calcul des charges sur les réseaux de voirie et de transports en commun, ce qui nécessite d'utiliser un découpage nécessairement fin (plus de 100 zones pour une agglomération millionnaire). Cela implique un temps de recherche d'information et d'interprétation des résultats non négligeables. Ce niveau de détail alourdit considérablement le traitement des rétroactions. Pourtant, le degré de congestion de la voirie a évidemment des impacts importants sur les trois premières étapes, i.e. le choix modal, les décisions de localisations résidentielles ou professionnelles des ménages, ou encore la remise en cause des déplacements ou même des choix d'équipement en véhicules. La prise en compte de ces interactions est théoriquement possible mais souvent ignorée (Stopher et alii, 1996).

La notion de modèle stratégique n'est pas nouvelle puisque, par exemple, le modèle QuinQuin développé dans le milieu des années 80 (Bonnafeous, 1985 ; Bouf, 1989 ; Tabourin, 1989 ; Bonnafeous et Tabourin, 1995), prend en compte cette dimension stratégique de long terme. Il a permis d'évaluer les conséquences de politiques de transport, sur les plans du financement des transports publics et de l'encombrement du réseau routier (**Raux et Tabourin, 1992**). Ce modèle reste malgré tout très global sur l'agglomération et le modèle que nous avons développé se veut plus sensible aux dimensions spatiales du système urbain. Des modèles stratégiques ont été développés également au Royaume-Uni, dans le cadre d'une série d'études intégrées de transport, notamment sur Londres (Oldfield, 1993), Birmingham (Jones et alii, 1990) et Edimbourg (Bates et alii, 1991). Ces modèles ont pour principe de fonctionner avec un nombre réduit de zones (de l'ordre de la dizaine), une représentation de l'offre de transport par des relations flux-vitesse entre zones, et la prise en compte de la rétroaction de l'état de l'offre sur la demande. On peut aussi se référer utilement aux modèles simplifiés de demande (Ortuzar, 1992).

²³ pour la présentation de ce type de modèle voir Ortuzar et Willumsen, 1994 ; Bonnel, 2004.

3.1.2 *Le principe du modèle stratégique développé à Lyon*

Le modèle stratégique développé dans le cadre de l'agglomération lyonnaise apporte des réponses au cahier des charges édicté plus haut (**Raux et al, 1996**). 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. Cette profondeur rétrospective de 20 ans rend plus solides les invariants (spécifications des modèles et valeurs des paramètres) élaborés à partir de l'analyse de ces données (cf. **Raux et al, 1997**).

Les enquêtes ménages, en tant qu'enquêtes de déplacements classiques, reposent sur le paradigme du déplacement. Il ne s'agit pas d'ignorer, loin de là, le nouveau paradigme géographico-temporel basé sur les schéma d'activités (cf. 2.1 supra, page 25). C'est ainsi que nous avons introduit des modifications dans la structure classique de modélisation à cinq étapes (cf. supra), sur laquelle repose le modèle stratégique.

La première modification est de modéliser les déplacements non comme tels directement, mais sous forme de chaînes de déplacements. En effet, le souci de recherche d'invariants de comportements nous a conduit à reconstituer, à partir des données d'enquêtes, des chaînes de déplacements qui ont été rattachées à un motif principal : par exemple, la suite de déplacements domicile / achat / travail est considérée comme une chaîne domicile-travail. L'analyse des enquêtes avait mis en évidence une grande régularité dans la génération de ces chaînes de déplacements par individu (exemple, le passage progressif à la « journée continue » pour le travail, observé au fil des enquêtes).

La seconde modification est le fonctionnement en pas-à-pas, qui permet de simuler et de tester le comportement du système modélisé au court du temps, ainsi que de traiter les rétroactions. Au lieu de projeter directement la situation calée en année de base sur l'année horizon (2005), le modèle calcule successivement les situations année après année, à partir d'une situation équilibrée entre offre et demande en année de base (1995). A chaque pas annuel, les flux de déplacements (génération, distribution et choix modal) sont déterminés par le contexte socio-économique et démographique de l'année en cours, et par les conditions de transport – temps et coûts – des années précédentes. Les charges des réseaux en découlant déterminent les conditions de transport de l'année en cours, et servent à calculer la situation des années suivantes. Trois raisons expliquent ce choix :

- la première est relative à la cohérence interne du modèle : la cohérence entre offre et demande est assurée dans un processus d'équilibrage dynamique. Ce n'est donc pas un équilibre statique du système de transport qui est recherché, mais plutôt un cheminement cohérent année après année ;
- la seconde a trait à la prise en compte des inerties dans les changements de comportements (Goodwin, 1988) : ainsi, une dégradation des conditions de déplacement en voiture sur une liaison donnée, ne produira pas immédiatement et pour toutes les activités un changement de mode ou de destination. L'inertie de la réponse dépend des activités et des contraintes de localisation ou d'horaires ;
- la troisième raison repose sur l'intérêt qu'il y a à considérer les interactions entre le rythme temporel propre au contexte socio-économique, et la mise en place effective de politiques de transport sur plusieurs années.

Enfin, la troisième modification, liée à la précédente, est celle d'une architecture modulée selon les motifs de déplacements. Cette modulation consiste à traiter les rétroactions entre étapes de manière différente selon les motifs de déplacements. Les différences d'inerties et de

rigidités de comportement spatial et temporel, selon les types d'activités, sont ainsi explicitement traitées dans le modèle.

L'architecture du modèle (cf. Figure 2) permet de caler des sous-modèles différents selon les motifs, et de mettre en œuvre des rétroactions également différentes selon les motifs.

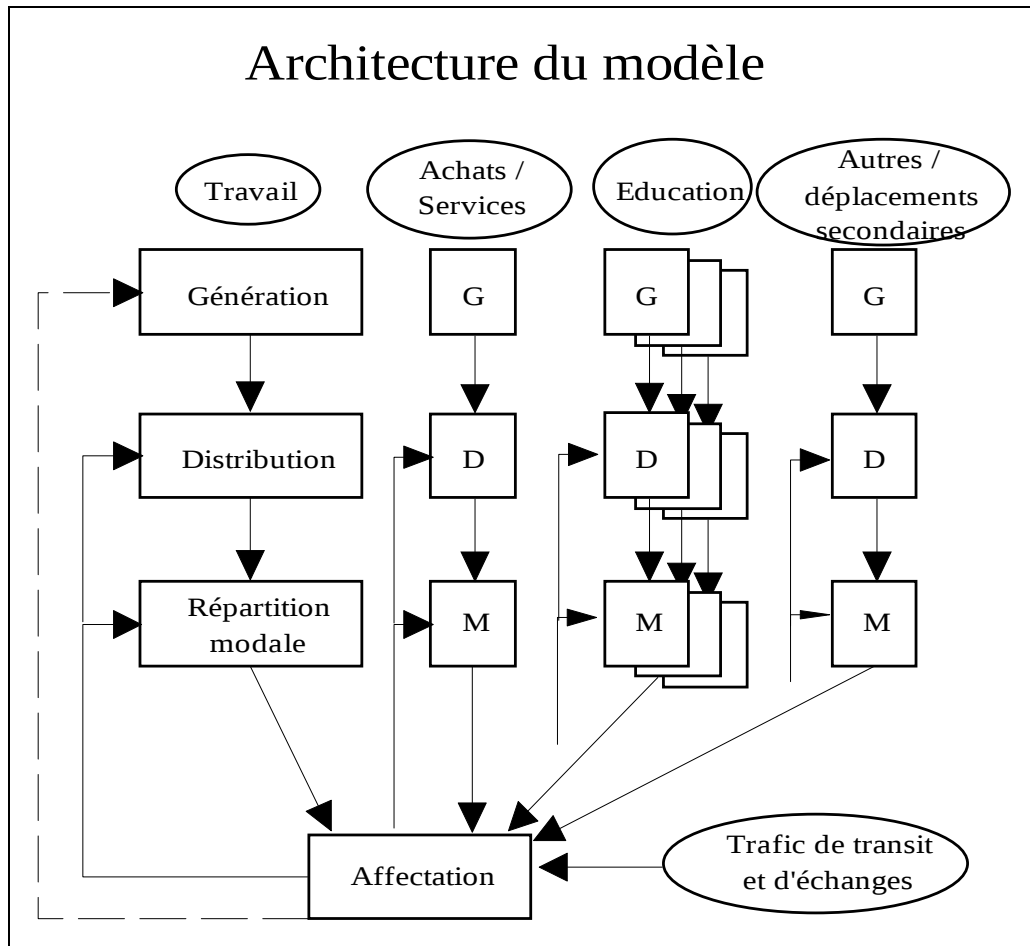


Figure 2 : L'architecture du modèle stratégique

Ce modèle a fait l'objet d'un développement en partenariat entre le LET et la SEMALY (une société d'ingénierie des transports urbains et ferroviaires basée à Lyon), avec comme chefs de projet, respectivement moi-même côté LET et Vincent Lichère côté SEMALY (Semaly et Let, 1997a, 1997b). Ce développement a été réalisé avec le soutien de la Direction de la Recherche du Ministère des Transports (DRAST), et pour le compte des collectivités locales (Communauté Urbaine de Lyon, le Sytral – l'autorité organisatrice des transports urbains – et le Conseil Général du Rhône). Ce concept et cette architecture de modèle stratégique ont ensuite été adaptés par la SEMALY, avec mon assistance, aux agglomérations de Grenoble et de Bordeaux. Ce modèle a également été utilisé et enrichi dans le cadre d'une thèse consacrée aux interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain (Masson, 2000). Cette démarche illustre, de manière exemplaire à mon sens, comment la recherche peut, d'une part aider à résoudre les problèmes que rencontrent les acteurs économiques et sociaux, d'autre part insuffler de l'innovation dans la pratique de ces acteurs.

En résumé, ce type de modèle offre plusieurs avantages. Sa structure repose sur une architecture ouverte et flexible ainsi que sur les principes de rapidité et de souplesse d'usage. Il est fondé sur une représentation globale de la demande et de l'offre de transport (découpage spatial limité et description représentative des conditions d'offre de zone à zone), sur un assemblage innovant, avec la prise en compte explicite des rétroactions, et sur un fonctionnement en pas à pas. Il intègre un module d'émissions de polluants atmosphériques et un module d'accessibilité. Sa structure ouverte de tableur offre la possibilité de connecter d'autres modules, comme un module de financement et d'évaluation, ou un module de déplacements externes à l'agglomération.

C'est pourquoi il s'est révélé particulièrement adapté comme outil de recherche, pour le test de plusieurs scénarios de péage urbain, et pour l'évaluation de l'équité et plus généralement de l'acceptabilité de politiques de péage, comme nous le montrerons dans le chapitre suivant.

3.1.3 De l'incertitude en matière de prévision

L'élaboration de tels outils de simulation pose cependant un véritable défi. Nous devons tenir compte de nombreuses incertitudes, mais aussi du cheminement d'évolution du système au cours de la simulation.

La plupart des travaux sur les erreurs des modèles de demande de transport et sur l'incertitude attachée aux prévisions faites à l'aide de ces modèles, datent du début des années 80. MacKinder et Evans (1981) ont montré que l'essentiel des erreurs de prédiction faites à partir de modèles agrégés classiques, provenait d'erreurs de prédiction du contexte exogène, essentiellement la croissance urbaine, démographique et économique. Un atelier de la 4^{ème} conférence de l'IATBR (*International Association for Travel Behaviour Research*) fut consacré également à ce problème (cf. notamment les contributions de Horowitz (1981), Talvitie (1981) et Ashley (1981)). Les conclusions de cet atelier (Koppelman, 1981) étaient que la structure d'interaction des erreurs entre les différents sous-modèles, ainsi que la propagation des erreurs, étaient mal connues. L'erreur globale d'estimation peut être vue comme le fruit (a) des erreurs d'échantillonnage et de mesure lors des enquêtes, (b) des erreurs issues de théories du comportement et de spécifications incorrectes, et (c) de procédures d'estimation biaisées. A cette erreur globale d'estimation s'ajoutent les erreurs de prévision du contexte pour former l'erreur de prédiction globale.

Cela m'a amené à explorer, avec le modèle stratégique, trois sources d'incertitudes : une source d'incertitude de type I, à savoir les erreurs d'estimation du modèle ; une source d'incertitude de type II, à savoir les erreurs de prédiction du contexte exogène ; enfin, une source d'incertitude de type III, à savoir les erreurs de projection dans le futur des mécanismes actuels de comportements.

La méthodologie des tests consiste à modifier de manière contrôlée les paramètres ou les entrées exogènes du modèle, et à évaluer les effets de ces modifications par rapport à deux points de comparaison qui sont la situation calée par le modèle en 1995, dénommée « point zéro » et une situation de référence en 2005 dite « au fil de l'eau ». Comme l'effet des modifications est mesuré en résultat du fonctionnement de l'ensemble du modèle, l'erreur résultante mesurée est une erreur propagée par le modèle, et non seulement l'erreur attachée à tel ou tel sous-modèle.

La principale incertitude de type I, ici la forme de la courbe débit-vitesse, nécessite des investigations plus poussées pour valider la robustesse de cette courbe. En effet, dans l'affectation routière, la forme de la courbe débit-vitesse a un impact particulièrement fort sur

les conditions de déplacements en voiture, et par contrecoup sur le choix modal et la distribution spatiale des déplacements.

Les incertitudes de type exclusivement II (erreurs de prédiction du contexte exogène) ou III (erreurs de projection des mécanismes futurs de comportements), ne peuvent être maîtrisées que par une stratégie de « maîtrise pragmatique de l'incertitude » : par cette expression, j'entends la mise en œuvre de simulations multiples, testant une politique de transport donnée sous plusieurs contextes exogènes contrastés. C'est l'unique moyen d'évaluer l'ampleur des risques qui doivent être assumés lorsqu'une politique de transport est mise en œuvre.

Les incertitudes combinant les type I et III peuvent faire l'objet d'approches concurrentes, soit en essayant d'affiner les modèles courants, soit en adoptant cette stratégie de maîtrise de l'incertitude. Cette alternative peut être illustrée avec l'exemple du couplage entre motorisation, mobilité et usage de la voiture. La tendance passée, reflétée dans la spécification et le calage des différents sous-modèles, est celle d'un impact direct de la motorisation sur l'usage de la voiture et l'intensité de déplacement. Cependant, on ne peut exclure que dans un futur proche, les politiques de gestion de la demande puissent provoquer un découplage entre équipement en automobiles des ménages et intensité d'usage de leurs voitures, par analogie avec le découplage observé entre PIB et consommation d'énergie. Or, rien n'indique que les modèles actuels fondés sur les préférences révélées, ni même les enquêtes d'adaptations déclarées, soient aptes à fournir des estimations précises des mécanismes futurs de comportements. La seule stratégie possible me semble donc une stratégie d'exploration de ces incertitudes, en testant plusieurs spécifications possibles de couplage ou découplage entre motorisation et usage de la voiture.

Ces travaux sur l'estimation de l'incertitude ont fait l'objet d'une publication dans un chapitre d'ouvrage chez *Elsevier*, suite à un colloque organisé par l'IATBR (**Raux, 2002 ; cf. Annexe 5**).

3.2 Limites du modèle stratégique, développements récents

Dans cette section, sont exposés mes travaux visant à s'affranchir de certaines limites du modèle stratégique : tout d'abord une représentation plus pertinente de l'univers de choix modal, puis le dépassement des limites statistiques et de l'artefact du zonage, et enfin l'introduction du modèle de répartition modale « prix-temps ».

3.2.1 Le décryptage de l'univers de choix modal

Dans le modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise (cf. supra), 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 les effets de l'équipement des ménages en automobiles, de la concurrence entre modes en termes de temps de parcours et de coûts d'usage, et des difficultés de stationnement approchées par la densité d'habitat et d'emploi dans la zone de destination des déplacements.

Nous avons eu l'occasion précédemment de souligner l'importance de « l'univers de choix », et de montrer comment il pouvait être exploré par des méthodes d'enquêtes de « réponses déclarées » (cf. 2.2 supra page 29). Cette question de la détermination de l'univers de choix

est vitale pour un calibrage correct des modèles de choix de mode (cf. la présentation théorique des modèles de choix discret en Encadré 4, infra).

Une première direction a donc consisté à améliorer la représentation de l'univers de choix modal. La solution proposée et mise en œuvre consiste à séparer l'aspect de la disponibilité d'une voiture particulière de son usage effectif : la disponibilité d'une voiture particulière est à traiter en amont de l'architecture à 5 étapes, dans un modèle d'équipement automobile du ménage. Je pose par hypothèse que les coûts d'amortissement et d'entretien n'influencent pas la décision d'utiliser ou non la voiture dans le cadre des déplacements quotidiens. Le coût d'usage de la voiture particulière est égal au coût en carburant augmenté d'éventuels frais de stationnement et de péage routier. La méthode consiste donc tout d'abord à segmenter l'échantillon en fonction des possibilités de choix de mode des personnes, et notamment de la disponibilité réelle d'une voiture particulière au moment du déplacement : cette disponibilité est considérée comme effective pour la personne si cette dernière utilise la voiture ou, dans les autres cas, si au moment du déplacement il existe une voiture disponible au sein du ménage (i.e. non utilisée par un autre membre du ménage). Ensuite, des modèles de choix modal sont élaborés séparément pour chacun de ces segments.

En outre, 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. Par exemple, à Lyon, sur la base des tarifs pratiqués en 1995, pour que les transports publics soient compétitifs au plan monétaire par rapport au coût d'usage de la voiture avec stationnement gratuit, il faut faire en automobile 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 10 km et 96% de moins de 15 km.

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. Or, ce sont les destinations où le stationnement est le plus souvent payant, venant ainsi relever singulièrement le coût monétaire du déplacement automobile.

En résumé, cette approche consiste à distinguer les populations en fonction de la disponibilité réelle d'une voiture particulière au moment du déplacement, et à traiter séparément le choix modal des destinations avec stationnement payant de celles avec stationnement gratuit.

Combinée au modèle de choix modal prix-temps (cf. 3.2.3 infra), le calage ainsi réalisé se révèle particulièrement amélioré.

3.2.2 Le dépassement des limites statistiques et de l'artefact du zonage

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 d'enquête, dans le cas des enquêtes-ménages françaises, quand on croise modes de transport et origines-destinations.

Par le zonage, est faite implicitement l'hypothèse que le 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 d'origine o , conditions moyennes d'arrivée au lieu final dans la zone de destination d .

En outre, se rajoute un critère d'ordre statistique, à savoir disposer d'un nombre suffisant d'observations pour chaque flux o,d considéré. Sachant que sur l'agglomération lyonnaise, environ 40.000 déplacements ont été enquêtés en 1995, 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.

Le découpage en zones aboutit à une impasse, puisqu'une agrégation spatiale permettrait de retrouver plus de flux analysables, mais en réduisant la pertinence de la représentation de l'offre : en effet, la dispersion interne aux zones, autour des valeurs moyennes des différents critères d'offre (temps et coûts), devient trop élevée pour que cette représentation soit acceptable. On retrouve ici la contradiction classique entre pertinence et mesurabilité, deux des trois conditions contradictoires qui fondent la problématique de l'opérationnalité des modèles (Bonnafous, 1973).

J'ai contourné cette difficulté particulière en abandonnant le zonage traditionnel pour passer à un découpage en classes de distances et de vitesses (vitesse de la voiture particulière et vitesse des transports collectifs). Je pense que cela constitue une voie intéressante pour assurer la transférabilité des modèles entre agglomérations.

3.2.3 *Un modèle de répartition modale « prix-temps »*

Après l'expérience du modèle stratégique, je souhaitais 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 monétaires dont dispose le consommateur, 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 de choix discret à utilité aléatoire.

Les modèles de choix discret, de plus en plus souvent utilisés pour le choix modal, sont basés sur un substrat théorique leur conférant une relative consistance (cf. Encadré 4). 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 une difficulté relative à la prise en compte des données socio-économiques individuelles comme le revenu. En effet, 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 (exemple, stationnement payant, péages routiers).

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 dans la population (modèle du type « mixed logit ») n'apporte pas grande différence avec un modèle logit classique.

Encadré 4 :

Le modèle de choix discret à utilité aléatoire²⁴

Comme, en matière de déplacements, le consommateur est le plus souvent face à un choix discret, i.e. se déplacer ou non, choisir une destination, un mode de transport, un itinéraire, parmi un ensemble d'options possibles, les modèles de choix discret se sont progressivement imposés en raison de leurs avantages théoriques et empiriques.

On considère une population d'individus faisant face au même ensemble d'options A (exemple, un ensemble de modes de transport) et on cherche à estimer la fraction de la population qui choisit une option donnée. La population peut être divisée en sous-populations homogènes par rapport à des facteurs socio-économiques observables. Dans chaque sous-population, on modélise le comportement d'un individu représentatif comme un comportement déterministe. Néanmoins, l'observation montre que, même à l'intérieur d'une sous-population homogène, les individus ne font pas tous le même choix, d'où une composante aléatoire dans le comportement. Les individus vont donc, en cohérence avec la théorie néoclassique, choisir l'option qui maximise l'utilité qu'ils en retirent, mais cette utilité aura deux composantes, l'une déterministe, l'autre aléatoire. Soit

$$U_j^i = u_j^i + \varepsilon_j^i$$

représentant l'utilité pour l'individu i du choix de l'option $j \in A$,

u_j^i étant la composante déterministe (observable et mesurable) de l'utilité et ε_j^i une variable aléatoire de moyenne nulle.

On suppose qu'au sein d'une sous-population homogène, les individus ne diffèrent les uns des autres que par les caractéristiques ou facteurs non-observés qui influencent leur choix. On peut donc prédire au mieux la probabilité de choix de l'option j par l'individu i soit

$$P_j^i = \Pr(U_j^i = \max_{k \in A} U_k^i)$$

Une large classe de modèles de choix discrets présente des propriétés remarquables et une relative facilité de calage, ce qui en a généralisé l'usage, malgré certaines limites qu'il n'y a pas lieu de discuter ici. Le modèle logit multinomial dérive de l'hypothèse que les aléas ε sont distribués indépendamment et identiquement selon une loi double-exponentielle. La probabilité de choix de l'option j par l'individu i suit alors une loi logistique, soit

$$P_j^i = \frac{\exp\left(\frac{u_j^i}{\mu}\right)}{\sum_{k \in A} \exp\left(\frac{u_k^i}{\mu}\right)}$$

²⁴ Cette présentation est adaptée de Anderson et al (1992)

C'est pourquoi j'ai 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 se place dans le cadre théorique général de maximisation de l'utilité du consommateur, ce dernier choisissant le mode de plus faible coût généralisé (cf. Encadré 5).

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 ma connaissance, pas sous cette forme à l'urbain. 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.

Le calibrage du modèle de partage modal, pour l'instant limité aux déplacements domicile-travail, a donné, pour les déplacements des individus qui ont une voiture particulière disponible, 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 selon les classes de distance/vitesse (cf. 3.2.2 supra) sont acceptables : entre -8% et +6% du total des déplacements de la classe considérée 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 pour le moment révélées infructueuses. Il y a là un potentiel évident d'amélioration, mais qui dépend grandement de la qualité des données d'enquête.

Encadré 5 : Le modèle prix-temps²⁵

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 de l'individu.

Le coût généralisé du choix du mode m pour l'individu i s'écrit

$$cg_m^i = c_m + vot^i t_m \quad \text{où}$$

c_m et t_m sont respectivement le coût et la durée du déplacement par le mode m et vot^i la valeur du temps de l'individu i .

Hypothèse 1 : l'usager i choisit le mode dont le coût généralisé est le plus faible.

Sur une liaison donnée l desservie par les deux modes A et B tels que $c_A > c_B$, il existe une valeur du temps vot_l telle que $cg_A = cg_B$, soit encore

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

Cette quantité est appelée valeur d'indifférence du temps sur la liaison l . On vérifie aisément qu'un voyageur i choisira le mode B si $vot^i < vot_l$, 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 $f(vot)$.

La fonction de répartition $F(vot) = \int_0^{vot} f(x)dx$

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

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

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.

$\ln(vot)$ suit une loi normale $N(\mu, \sigma)$

où μ est la moyenne du logarithme népérien des valeurs individuelles du temps, et σ l'écart-type du logarithme népérien des valeurs individuelles du temps.

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

$$F(vot) = N\left(\frac{\ln(vot) - \mu}{\sigma}\right)$$

où N est la loi normale standard.

L'ajustement du modèle consiste à estimer les paramètres μ et σ .

Posons $u = \frac{1}{\sigma}(\ln(vot) - \mu)$

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 μ et σ .

Dans son interprétation initiale le modèle est déterministe puisque l'appartenance à une classe de valeurs du temps détermine sans ambiguïté le choix du mode. Le modèle peut toutefois être interprété comme un modèle de choix discret à utilité aléatoire, où l'utilité de choix du mode m s'écrit

$$U_m^i = u_m^i + \varepsilon_m^i = u_{dest}^i - (c_m + \overline{vot} t_m) + \varepsilon_m^i$$

avec u_{dest}^i l'utilité de la destination pour l'individu i , $\overline{vot}$ le paramètre central de la distribution de valeur du temps et ε_m^i un terme aléatoire dont la loi de distribution dépend de la distribution des valeurs du temps individuelles.

²⁵ Cette présentation a été adaptée et enrichie à partir de (Bonnell, 2004)

3.3 La simulation dynamique du système de déplacements urbains

L'approche économétrique traditionnelle des comportements de déplacements rencontre plusieurs limites, essentiellement parce que les données disponibles (enquêtes de comportements observés) sont une photographie qui est interprétée comme un équilibre vu de manière agrégée : tous les jours en permanence $x\%$ des places de stationnement sont occupées, une pointe de trafic est observée 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).

Les réactions au changement du contexte des déplacements (vitesse, confort, 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, ou abandon du déplacement, sans prétendre être exhaustif. 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, correspondant à des horizons temporels différents, depuis le changement de l'heure de déplacement jusqu'à l'abandon de la voiture pour ce type de déplacement, et peut-être même un changement de lieu de travail ou de domicile. 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). Il en 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.

Comme on l'a vu précédemment, il est en théorie possible de mettre en œuvre des interactions dynamiques dans la modélisation traditionnelle à quatre étapes, mais ces rétroactions sont le plus souvent ignorées, à cause de la lourdeur des calculs et de la complexité que cela entraîne.

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.

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 et 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'analyse de la sensibilité du modèle stratégique lyonnais à diverses valeurs de paramètres d'entrée et spécifications des sous-modèles (cf. supra), a montré la nécessité d'explorer des mécanismes séquentiels de décision différents de ceux actuellement appliqués (étapes de distribution spatiale puis de choix modal). Il s'agit plus généralement de reprendre ces modèles 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 : il s'agit d'être mieux en cohérence avec l'approche pas-à-pas, et de surmonter la difficulté qui consiste à tenter de prédire les flux de zone à zone ou les parts modales, *ex nihilo* à partir des seules caractéristiques d'offre et de demande explicitement spécifiées, sans tenir compte de l'histoire du système.

Enfin, dans le cadre d'une modélisation des contraintes de stationnement (SEMALY, LET, 2000), je m'étais attaché à décrire les relations complexes de cause à effet qui régissent ces phénomènes liés au stationnement, sous forme d'une maquette de modèle dynamique.

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

Deux exemples de modèles sont présentés successivement : un premier modèle de régulation du financement des transports collectifs, prenant en compte la contrainte de rareté des ressources publiques ; un second 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 ce dernier modèle et le modèle prix-temps présenté ci-dessus (cf. 3.2.3 supra).

Ces travaux de recherche, encore en développement, ont été subventionnés par la Direction de la Recherche (DRAST) du Ministère des Transports (**Raux et al, 2003**). Un résumé a fait l'objet d'une communication à l'European Transport Conference de 2003 (**Raux, 2003**).

3.3.1 *Un modèle de régulation 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 (cf. Encadré 6).

Encadré 6 :**Le modèle de régulation des transports publics**

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 le transport privé. En particulier, l'effet de la congestion routière 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, liée à la fréquence du service. La structure du modèle est illustrée en Figure 3.

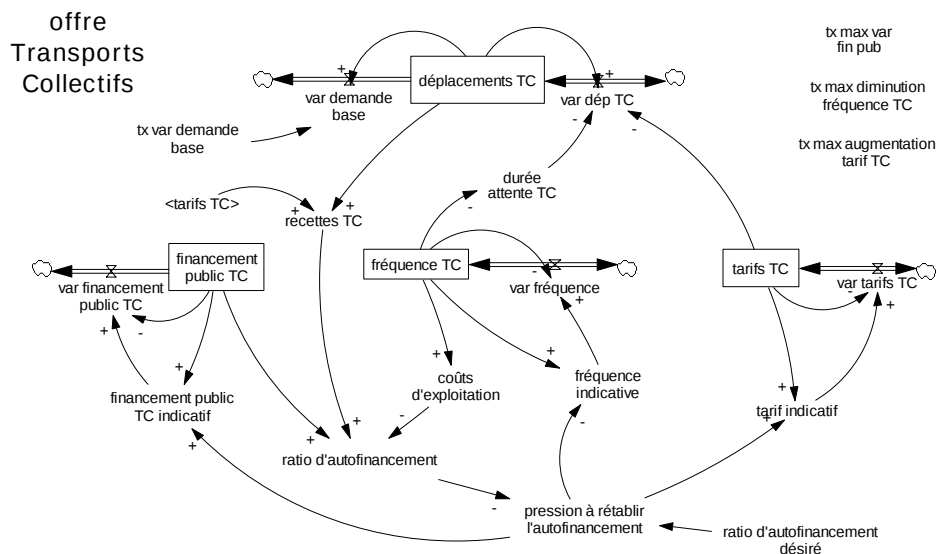


Figure 3 : Une représentation simplifiée du modèle de régulation des transports publics

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 l'utilisateur. 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, et 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 sur les niveaux du 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'usager. 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.

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.

Les scénarios testés 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. Ces scénarios permettent 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.

Ce modèle permet 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 sur les recettes et les coûts de production du service ; d'un autre côté, ils influent sur le niveau de demande qui, in fine, influe sur 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 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 (cf. 3.2.3 supra).

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

3.3.2 Le modèle conjoint d'affectation et de choix d'heure de départ

Ce modèle conjoint d'affectation sur le réseau et de choix 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.

Plusieurs problèmes sont posés par une courbe débit/vitesse statique telle que celle utilisée dans le modèle stratégique : (a) 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) ; (b) ce type de courbe

statique 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 ; (c) 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 me 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 un réseau 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 je suis parti d'un modèle de goulot simple décrit dans Small (1992), l'extension à un réseau restant à faire. S'il y a congestion à une période horaire donnée, une file d'attente se formera, qui ne sera pas forcément résorbée à la période horaire suivante. J'ai généralisé ce modèle à plusieurs périodes horaires (plusieurs groupes de véhicules partant à différentes heures de départ), en tenant compte du fait qu'il subsiste ou non une congestion découlant de la période horaire précédente.

Le programme d'optimisation micro-économique du choix de l'heure de départ par l'utilisateur d'un mode quelconque, peut être décrit en adaptant une formulation proposée par de Palma et Marchal (2001). 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.

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 à demande constante.

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 correspondant²⁶. 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 ce modèle d'affectation et de choix d'heure de départ, d'une part, et le modèle de répartition modale, d'autre part.

3.3.3 *Le couplage entre la répartition modale et le choix d'heure de départ*

L'intégration du modèle de choix modal a été réalisée de manière à ce que le coût en temps des deux modes (TC et VP), inclue explicitement le coût relatif à la durée du déplacement et

²⁶ Cet ensemble de modèles a été développé à l'aide du logiciel Vensim (formalisme DS), en combinaison avec le tableur Excel et des routines d'optimisation écrites en C.

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, dans le modèle prix-temps : un temps de réaction minimum est défini pour la prise en considération complète des changements dans les conditions de transport pour chaque mode (pour les 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 le comportement optimal et le 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).

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. 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.

Au total, la dynamique de ce système a trois sources, qui sont le délai dans les changements d'heure de départ, le délai dans la prise en compte des informations sur les temps de parcours, et le délai dans le changement des habitudes de choix de mode. Faute de données empiriques, les valeurs de ces délais ont été fixées quelque peu arbitrairement. On ne dispose en effet que d'une information qualitative sur l'existence de ces délais, 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 : il nécessite le recueil de nouvelles données d'observation en continu, de type panel.

J'ai donc apporté des améliorations à la pertinence de la représentation de l'univers de choix modal, et introduit un modèle de choix modal « prix-temps » sur la base de fondements micro-économiques. Les premiers essais de modélisation dynamique du système de déplacements urbains se sont révélés assez concluants, avec l'exemple du modèle de régulation des transports publics et du modèle de choix d'heure de départ reposant sur la théorie du goulot. Cette prise en compte de la dynamique me semble donc une piste appropriée à creuser dans mes perspectives de recherche présentées au Chapitre 5.

Auparavant, je vais montrer dans le Chapitre 4 suivant, consacré aux instruments de régulation, comment les modèles qui viennent d'être présentés, ont été utilisés pour évaluer des politiques de péage urbain.

CHAPITRE 4.

LA REGULATION DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS : PEAGE URBAIN, PERMIS TRANSFERABLES

Dans ce chapitre est abordé le « A » du cadre DPSEEA évoqué en introduction, c'est-à-dire les actions que peuvent entreprendre les autorités de régulation pour prévenir les effets négatifs des forces directrices. Selon les impacts considérés (i.e. la congestion ou les émissions de gaz à effet de serre), différentes activités seront à réguler, différents instruments pourront être mis en œuvre. Dans ce chapitre sont exposés deux types d'approche, l'une par les prix – le péage urbain –, l'autre par les quantités – les permis transférables –.

4.1 De la tarification aux péages urbains

Le début des travaux sur le péage urbain au LET a été marqué par un colloque international sur la question en 1991, colloque qui a rassemblé à Lyon des scientifiques d'Europe et d'Amérique du Nord. Ce colloque, dont j'ai été l'un des co-responsables, a donné lieu à publication d'un ouvrage (**Raux et Lee-Gosselin, 1992**).

Cette thématique a émergé en Europe, alors que la politique des déplacements urbains doit faire face à la rareté des ressources que sont l'espace disponible pour la fonction de circulation, l'argent public disponible pour le financement des infrastructures et des services de transport, et enfin, la qualité de l'environnement local, mise en cause par la pollution, le bruit et les accidents. La contrainte de rareté de ces trois ressources peut être plus ou moins relâchée selon l'évolution des technologies de construction des infrastructures de transport (exemple, en souterrain), selon la croissance économique, ou encore selon l'évolution de la technologie des transports (exemple, plus propres, plus sûrs ou à débit plus élevé).

La traduction théorique de ce problème de régulation tient, sous certaines hypothèses, en deux règles, celle de la tarification optimale et celle de l'investissement optimal : ces deux règles évitent les gaspillages de ressources et maximisent le surplus pour la collectivité (cf. Encadré 7).

Différents instruments permettent de jouer plus ou moins directement sur le prix de l'usage de la route : péages routiers mais aussi taxes sur les carburants, stationnement payant, fiscalité sur la possession ou l'achat de l'automobile. Ces différents instruments ont leurs avantages et leurs inconvénients en termes d'efficacité et de coût de mise en œuvre. Les taxes sur les carburants ont l'avantage de couvrir tous les usages des véhicules routiers, avec un coût de perception modique, mais ne peuvent à l'évidence être modulées selon les heures, ni même significativement selon les lieux²⁷ de circulation. Le stationnement payant est un instrument sous-utilisé en milieu urbain, mais frappe l'immobilité des véhicules, au risque de stimuler la mobilité de ces mêmes véhicules pour échapper à ce paiement ; il peut toutefois constituer dans certains cas (accès aux centres des affaires ou aux centres historiques), un instrument de

²⁷ Sauf à provoquer le « tourisme du réservoir », comme cela se pratique déjà aux frontières entre pays avec des niveaux de taxe sur les carburants assez différents.

tarification efficace. La fiscalité sur la possession de l'automobile n'est que trop indirectement liée à son intensité d'usage.

Au contraire, le péage routier a l'avantage, grâce aux technologies désormais disponibles de péage électronique, de pouvoir cibler directement la consommation d'espace de voirie et de ressources environnementales, en des lieux bien délimités et à des moments précis : il se révèle donc particulièrement adapté pour suivre les variations de redevances d'usage de la voirie.

Encadré 7 : De la tarification optimale d'usage des infrastructures au péage urbain

L'allocation optimale des ressources s'énonce formellement comme la maximisation du surplus collectif, somme des surplus des consommateurs et du producteur de l'infrastructure ou du service de transport. La résolution de ce problème dans le cas des transports, initiée par les travaux de Dupuit (1849), Pigou (1920), Knight (1924), Vickrey (1963) et Walters (1961), peut être trouvée dans plusieurs manuels (voir par exemple Small, 1992) : elle aboutit, sous certaines hypothèses, aux deux conditions liées de la tarification optimale et de l'investissement optimal.

La première condition exprime la règle de tarification au coût marginal de court terme : une redevance incluant l'externalité de congestion doit être perçue auprès des usagers de l'infrastructure de transport. A la redevance de congestion peuvent être éventuellement ajoutées les externalités d'environnement (pollution atmosphérique, bruit) et d'accident.

La deuxième condition exprime la règle d'investissement optimal : l'investissement doit être opéré jusqu'au point où la somme actualisée des économies marginales de coûts de congestion, égalise le coût marginal d'extension des infrastructures.

Le théorème du « second-best » (Lipsey et Lancaster, 1956) semble néanmoins affaiblir singulièrement la prescription théorique de la tarification au coût marginal. Plusieurs travaux montrent au cas par cas – sous-tarification d'un mode concurrent ou contrainte d'équilibre budgétaire sur un mode –, comment la tarification doit dévier du principe du coût marginal (pour une

revue cf. Quinet, 1998). Pour autant, cela ne remet pas en cause le principe de tarification en soi.

Il existe donc un consensus pour juger qu'il est plus efficace d'imputer un prix pour les externalités de congestion (et environnementales), plutôt que de ne rien tarifier du tout ou de tarifier un prix déconnecté des coûts occasionnés à la marge (Goodwin, 1995). Bien évidemment cette prescription se heurte à des considérations d'équité.

Les calculs montrent que cette redevance de coût marginal doit être approximativement constante en ce qui concerne l'environnement, mais croissante selon le niveau de trafic en ce qui concerne la congestion. Donc la redevance doit être variable dans le temps (plus élevée aux heures de pointe, quasi nulle en heures creuses) et dans l'espace, particulièrement en milieu urbain, siège de ces phénomènes d'encombrements liés à la densité de population et d'emplois.

La règle d'investissement optimal revient à investir pour accroître l'offre dès que les économies de congestion sont supérieures au coût d'augmentation de l'offre. En résumé, le but n'est pas le « zéro congestion » mais un niveau optimal de congestion, où le coût marginal de la congestion pour la collectivité (pertes de temps) s'égale à celui de son évitement (coût des reports ou suppressions de déplacements, ou coût des investissements supplémentaires).

Cependant, la théorie ne dit rien sur l'affectation des recettes de la tarification de la route : c'est un aspect relevant de la faisabilité politique de tels programmes.

Le péage routier peut prendre plusieurs formes, selon la base tarifaire (au kilomètre, au passage, au forfait, à la durée), selon la configuration spatiale (sur un axe routier, en traversée d'un cordon d'accès, ou en circulation dans une zone), selon l'heure du déplacement (pointe versus hors pointe), et selon l'affectation des recettes. Voilà pourquoi on parle de péages urbains.

Ces diverses formes de péages peuvent avoir des effets très différents sur la circulation dans son ensemble, et sur le niveau des recettes : selon qu'il existe ou non un itinéraire routier

concurrent non payant, et selon la qualité de service qu'il offre ; selon le niveau de prix dans le cas du péage de cordon ou de zone, et la qualité de l'offre des alternatives non routières ; selon la durée de la pointe tarifaire, une durée plus courte facilitant le changement d'heure des déplacements.

Mes travaux sur le péage urbain se sont poursuivis selon deux axes essentiels, l'un consacré à l'évaluation de l'efficacité du péage urbain, à l'aide de modèles, l'autre consacré à la faisabilité et l'acceptabilité sociale de ce type d'instrument.

L'efficacité de politiques de péage urbain est entendue ici au sens de l'évaluation des impacts sur la circulation automobile, sur le partage modal entre voiture particulière et autres modes de transport, sur l'accessibilité aux emplois ou aux aménités urbaines, ainsi que sur l'environnement. Nous avons évalué dans quelle mesure des scénarios de péages urbains élaborés pouvaient satisfaire aux objectifs de politiques d'agglomération : ces objectifs font référence aux trois contraintes de financement, de qualité d'environnement, et d'équité spatiale et sociale, contraintes le plus souvent difficilement compatibles entre elles (**Raux et Andan, 1999**).

Nous avons donc élaboré des systèmes techniques de péage permettant de traiter à la fois les objectifs de maintien de l'accessibilité à différentes échelles géographiques, et les trois contraintes précitées : il s'agit de péages de cordon ou de péages de zones, avec des tarifs variés. Les effets de ces scénarios ont été calculés à l'aide du « modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise » (cf. 3.1.2, supra page 40), dans le cadre limité de la réalisation d'une demande donnée de déplacements, telle que mesurée par l'enquête de déplacements auprès des ménages de l'agglomération.

Des conclusions en ont été tirées quant à la pertinence de différents scénarios de péages, en termes de véhicules-kilomètres parcourus, de durées de déplacement, d'émissions atmosphériques et de recettes de péage. D'une manière générale, l'amélioration conjointe de ces précédents critères nécessite au minimum la mise en place d'un péage de zone, réduisant l'usage de la voiture particulière par les automobilistes résidant dans l'agglomération, et permettant de financer des offres de transport alternatives. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans un article de la revue *Recherche Transports Sécurité* (**Raux et Andan, 2002 ; cf. Annexe 6**).

Ces résultats restent valides dans le cadre limité de la simulation mise en œuvre, à savoir l'absence de modification des origines et destinations des déplacements, et ne peuvent être extrapolés en dehors de ce domaine. Cette restriction est imposée par les limites de nos connaissances en matière d'interactions entre transport et urbanisation. On peut alors se poser la question, au moins sur le plan qualitatif, de savoir de quelle manière ces résultats seraient changés par la prise en compte de ces interactions. La réponse ne va malheureusement pas de soi, au vu de la multiplicité des effets potentiels jouant en sens contraires les uns des autres, effets dont on peut donner quelques exemples : l'augmentation des vitesses consécutive à la baisse du trafic dans la zone à péage a un effet contraire à celui de l'augmentation des coûts monétaires, d'où il découle que le coût généralisé des déplacements automobiles (combinant coût monétaire et durée du déplacement valorisée par une valeur du temps) peut stagner voire diminuer ; à moyen et long terme, les citoyens peuvent changer plus facilement d'emploi et aller travailler en périphérie, ce qui peut avoir un effet supplémentaire sur la diminution du trafic à destination du centre, et à l'intérieur de ce dernier ; mais inversement, si la ville « roule » mieux, les entreprises peuvent être incitées à y maintenir voire accroître les emplois. Il y a donc là autant de mécanismes dont l'effet combiné net est incertain.

En bref, on ne peut savoir *a priori* si tel ou tel scénario de péage urbain entraînera une contraction ou une dilatation de l'espace urbain. Cela nécessite la construction d'outils de

simulation de la dynamique du système transport-urbanisation au cours du temps, œuvre de longue haleine à laquelle nous nous sommes attaché depuis et que nous entendons poursuivre (cf. perspectives de recherche, 5.2 infra page 66).

Une manière d'évaluer l'efficacité (au sens économique du terme) du péage urbain est de juger sur pièces. Cela a été rendu possible dans le cas de Londres, le péage y ayant été ouvert en mars 2003 et des données ayant été publiées par *Transport for London*. Cette expérience est sujette à controverse, au moins chez les économistes si ce n'est chez les londoniens concernés : j'ai eu l'occasion de répondre dans un article de *Transport Policy* (**Raux, 2005**) à une évaluation très critique d'économistes... français, Rémi Prud'homme et Juan Pablo Bocajero. J'y montrai notamment que les résultats de l'évaluation du surplus des usagers (automobilistes et usagers des bus) étaient extrêmement sensibles à de faibles variations dans les vitesses enregistrées entre avant et après la mise en place du péage ; que les valeurs du temps utilisées normalement pour l'évaluation des gains de temps pouvaient être sous-estimées, compte tenu de la particularité de cette zone centrale concentrant de riches résidents et des emplois à hauts salaires ; que l'absence de valorisation de la fiabilité accrue des temps de parcours était un facteur supplémentaire de sous-estimation du surplus ; enfin, que d'autres modes de contrôle et de perception du péage, à l'instar du système utilisé dans les péages norvégiens – à base d'équipements électroniques embarqués à bord des véhicules –, pouvaient réduire les coûts de collecte et accroître ainsi le surplus net.

Une autre manière d'évaluer est d'aller voir sur place comment les systèmes fonctionnent et par quel processus politique ils ont pu être mis en place. C'est ce que nous avons fait, pour la Norvège, avec des collègues du CERTU²⁸, de la DREIF²⁹ et de l'IAURIF³⁰, en nous rendant à Oslo et Trondheim pour rencontrer les responsables des péages urbains de ces agglomérations, et apprécier de visu le fonctionnement et l'impact des dispositifs mis en place. Dans le rapport (CERTU et al, 2002) je relevai les quatre raisons principales avancées pour expliquer l'acceptation de ces projets³¹ :

- Les avantages de ces programmes d'amélioration des routes étaient évidents pour tout le monde, et en particulier pour les automobilistes. Bien qu'il n'y ait pas eu d'évaluations socio-économiques complètes des projets d'infrastructure, leur nécessité se faisait sentir après des années de forte croissance de la circulation automobile et de faible amélioration de l'offre routière en milieu urbain. Il s'agissait donc d'apporter un financement supplémentaire, et nullement de chercher à réduire la circulation, comme en témoignent la modicité des tarifs pratiqués et les rabais offerts aux abonnés. Cependant, la canalisation du trafic automobile dans ces nouvelles infrastructures, a permis de regagner de l'espace et de la qualité de vie en centre-ville au détriment de l'automobile.
- Les recettes de péage étaient complétées par des fonds gouvernementaux qui autrement n'auraient pas été obtenus. En effet, le gouvernement norvégien avait conditionné sa participation au bouclage financier des projets, à la mise en œuvre d'un système de redevances auprès des usagers du réseau routier existant, pour en financer les extensions futures.

²⁸ Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports et l'Urbanisme.

²⁹ Direction Régionale de l'Équipement de l'Ile de France.

³⁰ Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Ile de France.

³¹ même si la proportion des opposants reste élevée au fil des ans : 50 à 60% encore d'opinions « contre » à Oslo 10 ans après l'ouverture du péage, de 35 à 45% « contre » à Trondheim mais 25% « indifférents ».

- Les opposants au développement du réseau routier (notamment les écologistes) appréciaient que les automobilistes aient à payer pour circuler en ville, et qu'une part du financement du programme aille aux transports publics.
- Les partis politiques s'accordèrent pour ne pas faire de cette question un enjeu de controverse politique entre eux. Les projets de péage en Norvège débutent en général par des initiatives locales, sur la base d'accords politiques locaux, et sont ensuite approuvés par le parlement national. Dans le cas des péages urbains, l'accord entre les deux plus grands partis, conservateur et travailliste, a été un facteur essentiel d'aboutissement de ces projets.

Une autre caractéristique commune à ces péages urbains – et facteur supplémentaire d'acceptabilité – est qu'ils ont été mis en place pour une durée limitée, celle prévue pour la réalisation des mesures financées. Bergen, qui voyait son système de péage expirer fin 2001, a décidé de le prolonger. Celui d'Oslo doit expirer en 2007 et les discussions et études sont en cours. Par contre, en ce qui concerne le péage de Trondheim qui devait expirer en 2005, la décision a été prise d'un arrêt du péage au 1^{er} janvier 2006 avec démontage des portiques.

Bien que les travaux des premiers économistes démontrant les bienfaits du péage datent d'environ un siècle et demi, cette panacée n'a pas emporté les suffrages, loin de là. Aux succès emblématiques de Singapour (1975), des péages de cordon norvégiens (depuis 1986 pour le premier d'entre eux), et du péage de Londres (2003), peuvent être opposés, entre autres, les échecs de Hong-Kong (années 80), Stockholm (années 90)³², le semi-échec du boulevard périphérique nord de Lyon (1998) et, dernièrement, le refus net de la population au référendum d'Edimbourg (2005).

Comment rendre acceptable les modifications de la tarification de l'usage de la route en milieu urbain ? Mes travaux sur l'acceptabilité de la tarification routière en milieu urbain ont démarré avec une petite équipe du LET dans le cadre d'un projet de recherche soutenu par la Commission Européenne, le projet PATS (*Pricing Acceptability in the Transport Sector*). Ces travaux se sont ensuite étendus à plusieurs études de cas et ont fait l'objet de plusieurs publications (**Raux et Souche, 2001a, 2001b, 2003**).

Avec ma collègue Stéphanie Souche, nous avons développé un cadre théorique d'analyse de l'acceptabilité des changements tarifaires dans le secteur des transports. Ce cadre combine les dimensions de l'efficacité économique (orienter efficacement la demande), de l'équité territoriale (garantie d'accessibilité), de l'équité horizontale (principe usager-payeur), et de l'équité verticale (bien-être des plus défavorisés).

Afin d'en démontrer les potentialités, cette approche théorique a été appliquée au cas du Boulevard Périphérique Nord de Lyon en France. Ce cas est tout d'abord celui d'un échec politique dans les premiers mois qui ont suivi l'ouverture du boulevard à péage en 1997, suivi d'une profonde refonte du projet, qui a permis son intégration effective dans le réseau routier de cette agglomération. L'ouverture de l'infrastructure à péage, avec un tarif perçu comme élevé, s'accompagna de la suppression de la liberté de choix d'un itinéraire alternatif gratuit : la situation pouvait s'assimiler à un péage de congestion, et suscita une vive opposition sociale et politique. Les différentes dimensions de l'efficacité et de l'équité mises en jeu dans ce projet, ont été analysées et illustrées par des résultats quantitatifs en termes de variations de surplus, à l'aide du modèle stratégique (cf. 3.1.2 supra page 40). L'analyse montre comment ces différentes dimensions se sont conjuguées, en se renforçant les unes les autres dans leurs aspects négatifs. Cette étude de cas montrait que les différentes dimensions de l'équité ne

³² Stockholm vient de lancer une expérience de péage de cordon pour 7 mois, jusqu'en juillet 2006.

pouvaient être ignorées sous peine d'échec. Ces résultats ont été publiés en 2004 dans le *Journal of Transport Economics and Policy*³³ (**Raux et Souche, 2004 ; cf. Annexe 7**).

Cette recherche sur les conditions d'acceptabilité de nouvelles mesures tarifaires en transports urbains s'est prolongée depuis, avec mes collègues Odile Andan et Stéphanie Souche, dans le cadre de travaux financés par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), dont les publications sont en cours (notamment un article soumis à une revue internationale d'économie publique). Enfin, nous avons réfléchi à la manière dont le calcul économique pourrait mieux intégrer ces diagnostics en matière d'équité redistributive, notamment en identifiant les « gagnants » et les « perdants » suite à la mise en place de nouvelles infrastructures de transport ou de nouvelles mesures de régulation du transport. Ces travaux devraient faire prochainement l'objet d'une publication dans un chapitre d'ouvrage sur le calcul économique.

4.2 Les permis transférables

Un autre volet de mes travaux est relatif à la conception de politiques innovantes de régulation de la demande. Il s'agit de l'application des permis (ou quotas) transférables dans le secteur des transports, plus communément appelés « permis négociables » ou parfois « droits à polluer ». La réponse standard des économistes est de considérer que, dans le secteur des transports, face à la multiplicité des sources concernées, de tels systèmes seraient beaucoup trop coûteux à administrer par comparaison, par exemple, avec les taxes sur les carburants. Malgré cet *a priori*, j'ai proposé de lancer des travaux sur la question à partir de 1998, dans le cadre d'un programme de recherche sur le changement climatique financé par le Ministère de l'Environnement.

L'intérêt théorique pour les marchés de droits à polluer remonte aux travaux de Coase (1960) sur les externalités, de Dales (1968) sur la réglementation des usages de l'eau, et à la formalisation des marchés de permis par Montgomery (1972). Selon une définition générale donnée par Godard (OECD, 2001), les permis transférables désignent un éventail d'instruments allant de l'introduction d'une flexibilité dans la réglementation classique à l'organisation de marchés concurrentiels de permis. Ces instruments ont en commun : (1) de comporter la fixation de contraintes quantifiées (les quotas) ; (2) d'allouer initialement ces quotas (ou droits) aux agents indépendamment des obligations environnementales qui leur sont imposées ; (3) d'autoriser les agents à transférer ces quotas entre activités ou entre lieux (*averaging*), entre périodes de temps (*banking*) ou vers d'autres acteurs (*trading*) ; (4) de faire respecter par des mécanismes de sanction *ad hoc* la conformité entre les comportements émetteurs des agents et les droits ou quotas qu'ils détiennent.

J'ai analysé les acquis théoriques et pratiques ainsi que les potentialités des permis transférables dans le secteur des transports, dans un article paru dans *Transportation Research D* (**Raux, 2004 ; cf. Annexe 8**). Les permis transférables présentent des caractéristiques particulièrement intéressantes dans le cas des transports.

- Il subsiste en effet une incertitude non négligeable dans la fonction de réponse des agents aux prix : par exemple, dans le cas des émissions de CO₂ directement liées à la consommation de carburant, on sait que la demande de carburant est faiblement élastique

³³ une revue classée 4 étoiles par la section 37 « Economie et Gestion » du CNRS.

aux prix à court terme ; l'obtention d'un objectif quantitatif d'émissions serait mieux assurée par un système de permis que par la taxation des carburants.

- Les permis avec allocation gratuite sont vus par les agents comme un moyen d'échapper à une taxe supplémentaire, ce qui peut être un facteur d'acceptabilité du nouvel instrument, étant donné le haut niveau de taxation des carburants en Europe.
- Les systèmes de quotas sont les seuls à permettre un traitement explicite des aspects distributifs, séparément du problème de l'allocation économiquement efficace des efforts de réduction des atteintes à l'environnement³⁴ : étant donné le rôle fondamental que jouent les transports dans le droit à la mobilité, ce traitement des impacts distributifs requiert une attention particulière.
- Dans l'application au cas des émissions de gaz à effet de serre (GES) émis par les transports, il est possible de fixer des objectifs quantitatifs précis à chaque agent, puisque c'est la somme des outputs individuels des agents qui produit l'output global ; comme le lieu d'émission des GES importe peu à l'échelle planétaire, ces émissions sont équivalentes à cette même échelle.

Les quelques cas d'application effective des marchés de permis au secteur des transports incluent le marché sur les additifs de plomb à l'essence, entre raffineurs, qui visait la suppression totale de ce composant aux USA (de 1982 à 1988), la mise aux enchères des certificats d'importation de véhicules à Singapour, et, encore balbutiant, le marché de crédits de véhicules à zéro-émission de polluants atmosphériques entre constructeurs d'automobiles en Californie. Cependant, comme discuté dans l'article, selon les nuisances considérées – émissions de GES, pollution régionale et congestion –, d'autres cibles peuvent être envisagées – et sont d'ailleurs envisagées dans la littérature –, puisque plus appropriées : par exemple, si l'on veut maîtriser la congestion il est plus approprié d'établir des quotas sur les déplacements ou les véhicules-kilomètres parcourus en zone congestionnée que de viser l'équipement en véhicules, ce dernier ne reflétant qu'indirectement l'utilisation effective des véhicules selon les heures et les lieux ciblés ; de même, pour la pollution atmosphérique locale, il est préférable de cibler la consommation finale de carburant, tandis que les normes sur les carburants, les émissions unitaires des véhicules, les véhicules-kilomètres parcourus ou les quotas sur les logements à construire selon les zones seraient des options de deuxième rang. L'ensemble est résumé dans le tableau suivant (cf. Tableau 1).

<i>Cibles</i>	Emissions unitaires des véhicules	Normes sur les carburants	Equipement en véhicules	Véhicules-kilomètres parcourus ou déplacements	Consommation par l'utilisateur final	Occupations du sol / étalement urbain
<i>Nuisances</i>						
émissions de GES	xx		x	x	xxx	xx
pollution locale / régionale	xx	xx	x	xx	xxx	xx
congestion			x	xxx		xx

De x = faiblement à xxx = hautement approprié

Tableau 1 : Adéquation des permis transférables aux cibles selon différentes nuisances

³⁴ Cependant Stavins (1995) a montré qu'en présence de coûts de transaction – recherche de partenaires pour l'échange, négociation, prise de décision, suivi et conformité à la réglementation – l'allocation initiale des droits affecte l'équilibre final et le coût total de réduction des émissions.

Au titre des arguments en défaveur de l'utilisation des systèmes de permis dans le secteur des transports, se trouve en premier lieu la question des coûts d'administration de tels systèmes, quand il s'agit de viser une multiplicité de sources mobiles. Cela peut expliquer pourquoi, en ce qui concerne les émissions de GES, les seules applications ou propositions dans la littérature s'arrêtent à des systèmes visant les émissions unitaires des véhicules. Néanmoins, ces systèmes ont l'inconvénient d'ignorer l'autre composante qui contribue au total des émissions, à savoir la consommation de carburant à travers l'usage effectif du véhicule.

C'est pourquoi nous avons proposé et décrit, avec Grégoire Marlot, ce que pourrait être une mise en œuvre concrète d'un marché domestique de quotas de consommation de carburant fossile, appliqué aux automobilistes. Les coûts marginaux de réduction de cette consommation sont suffisamment différents entre automobilistes selon leurs lieux de résidence (urbain / péri-urbain / rural) pour envisager des échanges effectifs de permis. L'évaluation économique d'un tel système nous a permis de donner des résultats en termes de surplus, pour le gouvernement central et les différents groupes d'automobilistes selon leurs lieux d'habitat. Cet article a été publié en 2005 dans *Transport Policy* (**Raux et Marlot, 2005 ; cf. Annexe 9**).

Nous avons également discuté les questions de coûts de transaction d'un tel système, coûts que nous avons cherché à minimiser par la conception technique du système décrit dans l'article. Il n'en reste pas moins que sa mise en œuvre demeure complexe, et de toute façon plus coûteuse au plan administratif qu'un simple alourdissement des taxes sur le carburant.

Pour autant, ce système présente l'intérêt de créer des incitations fortes à la réduction des consommations, du fait de l'avantage concret, palpable, perçu par ceux qui réduiront leurs émissions au-delà de leur allocation initiale. L'allocation gratuite des permis permet en outre de s'affranchir en grande partie des problèmes d'acceptabilité que poserait une nouvelle taxe venant grever un produit déjà lourdement taxé comme le carburant.

Enfin, les avantages et inconvénients en termes d'acceptabilité sociale et d'équité ont été discutés. Ce système sanctionnerait plus lourdement les ménages à plus hauts revenus : les données de 1997 (INRETS, 1999) montrent en effet que le kilométrage moyen annuel par voiture augmente assez régulièrement selon les tranches de revenus. En outre, l'allocation initiale gratuite évite de faire peser une charge trop lourde sur les consommateurs, particulièrement les plus démunis. Nos estimations montrent que la mobilité « obligée » (i.e. pour les trajets domicile-travail) serait pour l'essentiel préservée. Cependant, ces données en moyenne ne doivent pas occulter l'existence éventuelle de situations de fragilité, comme par exemple les « ruraux pauvres » sans alternative autre que l'automobile, situations qui appelleraient des compensations *ad hoc*.

Outre les publications scientifiques précitées, ces travaux ont fait l'objet de vulgarisations, que ce soit au niveau national avec un rapport au Conseil National des Transports, dont j'ai tenu la plume pour l'essentiel (CNT, 2001), et au niveau international avec un séminaire de l'OCDE dont les travaux ont été publiés (**Raux, 2002**).

Cela dit, ces premiers résultats n'épuisent pas la question de l'acceptabilité sociale de ce type de régulation, et la question de la simulation expérimentale du fonctionnement d'un tel marché : comment les automobilistes adapteraient concrètement leurs comportements ? Sur cette dernière question pourrait être mise en œuvre une méthode de « réponses déclarées » telle que celles discutées au Chapitre 2 (cf. 2.2 supra page 29).

Enfin, l'aventure des permis transférables dans le secteur des transports continue, puisque qu'une recherche est en cours, sous ma responsabilité et subventionnée par l'ADEME, pour concevoir ce type de marché de permis pour le transport de marchandises, et en explorer

l'application. Ce thème fait partie de mes perspectives de recherche que je présente dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Les perspectives de recherche que je propose comportent deux axes, l'un autour des politiques innovantes de régulation de la demande – au sujet des quotas transférables dans le secteur des transports –, l'autre relatif à la modélisation de la ville comme système complexe.

5.1 La régulation par les quotas transférables dans le secteur des transports

J'ai la conviction que ce type d'instrument est promis à un certain avenir dans ses applications au sein du secteur des transports, en tout premier lieu en réponse à la contrainte pesant sur les émissions de GES. Les permis transférables ont un double rôle, à l'instar de la taxe, d'orientation de la demande et d'accélération de l'introduction d'innovations techniques (nouveaux systèmes de propulsion) et sociales (nouveaux services de transport et nouvelles pratiques de déplacement). A la différence de la taxe, ils offrent des garanties d'effectivité quant à l'objectif quantitatif de réduction des émissions. Ils présentent l'intérêt de créer des incitations fortes à la réduction des consommations de quotas, du fait de l'avantage concret, palpable, perçu par ceux qui réduiront leurs consommations au-delà de leur allocation initiale. A travers la politique d'allocation (gratuite ou non) des permis, les autorités régulatrices peuvent traiter explicitement les effets distributifs, en relative indépendance de l'efficacité allocative.

Cependant, le principal défi à relever est, on l'a vu, de minimiser les coûts d'administration et plus généralement de transaction d'un tel système. Cela suppose, comme nous l'avons montré pour le cas des quotas de carburant pour les automobilistes (cf. 4.2 supra), une conception technique et institutionnelle assez minutieuse du système.

Cette thématique se prolonge actuellement dans une recherche en cours au sujet de la conception, la faisabilité et les potentialités d'un marché de quotas de carburant fossile dans le cas du transport de marchandises : le défi est assez stimulant puisqu'il faut prendre en compte l'extrême diversité d'un secteur d'activité (celui du transport routier de marchandises), généralement en position de faiblesse face aux donneurs d'ordre (i.e. les chargeurs), ces derniers devant être intégrés dans le système en tant que générateurs de la demande de transport. Cette recherche a fait l'objet d'une présentation au séminaire de recherche francophone à Istanbul en juillet 2004, en marge de la conférence mondiale sur la recherche dans les transports (WCTR). Ce travail, qui a permis de mobiliser une petite équipe du LET, et particulièrement des seniors experts du secteur du transport routier de marchandises, implique de nombreuses rencontres avec les professionnels du secteur, opérateurs et chargeurs, dans le cadre de la mise en œuvre d'une enquête de type « réponses déclarées » (cf. 2.2 supra).

En outre, les quotas transférables sont susceptibles d'applications assez nombreuses dans le cadre d'une problématique de transport et d'aménagement du territoire durables. Ils peuvent s'appliquer par exemple à la régulation de la congestion à travers les « droits à circuler » (en alternative ou en complément au péage urbain), ou à la régulation de l'étalement urbain à travers les « droits à construire » (cf. 4.2 supra). Il reste cependant beaucoup à faire pour

affiner les schémas d'introduction technique et institutionnelle de tels instruments, et évaluer leur performance environnementale, sociale et économique.

Par ailleurs, dans le cas des quotas de carburant pour les automobilistes, nous n'avons pu faire que des estimations grossières des adaptations de comportement de consommation, à partir des connaissances parcellaires que nous avons des élasticités de la demande de carburant au prix. Il nous manque une connaissance plus fine des réactions des ménages à des scénarios de quotas de carburant échangeables³⁵ : j'ai pour projet de creuser cette question à l'aide de méthodes d'enquêtes de « réponses déclarées ».

5.2 Modélisation multi-agents et ville-modèle stylisée

Le projet de recherche que je propose de développer s'appuie sur mon expérience de modélisation, appliquée particulièrement au domaine de la mobilité quotidienne en milieu urbain. Cette activité vise à articuler, dans le cadre de modèles économétriques, les évolutions des comportements de mobilité, les transformations de l'espace urbain, l'offre de transport et les tendances socio-démographiques. Cette modélisation est couplée à des méthodes d'évaluation socio-économiques afin d'éclairer les conséquences économiques, sociales et environnementales de différentes politiques urbaines, dans un contexte socio-économique en perpétuelle évolution.

En effet, comme on l'a vu plus haut, le transport est au centre de nombreuses préoccupations concernant les performances des réseaux de transport en milieu urbain, leur coût pour la collectivité, les inégalités sociales et spatiales d'accès au transport et aux aménités urbaines, ou encore la croissance continue de ses émissions de gaz à effet de serre, pour ne citer que les principales. Face à ces préoccupations de plus en plus pressantes, les nouvelles politiques envisagées de régulation de la demande (exemple du péage urbain) ou de régulation de l'urbanisation, demandent à être mieux évaluées pour répondre aux inquiétudes des citoyens quant aux conséquences de ces politiques (exemple, les « gagnants » et les « perdants »).

Face aux difficultés rencontrées dans la modélisation de la rétroaction du transport sur les localisations d'activités en milieu urbain, l'objectif de ce projet de recherche est de renouveler la modélisation de l'interaction du système de transport (réseaux et flux) avec les diverses localisations de la population, des emplois et des aménités urbaines. On pourra ainsi analyser les impacts des politiques de transport (offre d'infrastructures et de services, réglementation, tarification et fiscalité) sur les comportements de mobilité et de localisation de la population et des emplois, notamment. Qui plus est, pour répondre à la question de l'identification des « gagnants » et des « perdants », il importe de développer des modèles de micro-simulation permettant de repérer ces différences entre groupes sociaux.

Dans mes travaux sur la mise en œuvre de l'approche de dynamique des systèmes (DS) dans la modélisation de la mobilité quotidienne en zone urbaine, je m'étais heurté à la difficulté de représenter dans un formalisme DS les comportements des individus de manière désagrégée. Certes, j'ai montré qu'il était possible d'intégrer des modèles micro-économiques comme le modèle « prix-temps » ou le modèle de choix d'heure de départ dans une maquette DS, mais cela au prix d'une agrégation factice, parce que impliquant d'écarter toute considération d'hétérogénéité des comportements à l'intérieur de ces agrégats.

³⁵ Des travaux ont été réalisés sur la question au Canada dans les années 80 par Martin Lee-Gosselin avec la méthode CUPIG, mais il s'agissait de scénarios de rationnement *pur* du carburant.

C'est cette difficulté qui m'a amené à m'intéresser à d'autres approches, particulièrement celles mettant en œuvre la micro-simulation d'agents économiques en interaction (*agent-based modelling*), notamment chez les économistes avec la modélisation *Agent-based Computational Economics* (ACE). C'est sur ce thème qu'en 2003 j'ai encadré une stagiaire élève de l'ENSAE, afin d'explorer les potentialités d'application de ce type de modélisation en économie des transports et de l'espace.

La problématique des comportements de mobilité quotidienne en milieu urbain, avec ses différentes dimensions de choix, la formation des pointes d'activités et de la congestion dans les réseaux de transport, les choix de destinations, les localisations d'activités, de résidences et d'emplois, est clairement d'une problématique de système complexe : un très grand nombre de composants différents, interagissant selon des interactions non linéaires et enchevêtrées, ce qui empêche leur résolution analytique par des systèmes mathématiques linéaires et nécessite la simulation numérique.

J'ai donc poursuivi mon investissement dans ce domaine, en participant à une école de formation interdisciplinaire de quinze jours sur les modèles, concepts et méthodes des systèmes complexes pour leurs applications aux sciences humaines et sociales, en mars 2004, suivie d'une autre en juillet 2004 : ces deux écoles étaient organisées sous l'égide du CNRS et de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

Parallèlement, une équipe s'est peu à peu mise en place sur ce thème au sein du LET, à partir de 2004, avec l'implication de Pablo Jensen, physicien à l'ENS-Lyon et directeur de recherche CNRS, puis fin 2004, Margaret Edwards, postdoctorante dont nous avons obtenu le financement du CNRS pour deux ans, puis Fabrice Marchal, chargé de recherche CNRS recruté en 2005 et ayant choisi le LET.

Les premières activités de cette équipe ont pu être financées dès 2005 avec des financements obtenus de l'Action Concertée « systèmes complexes en SHS » et du Predit, pour le projet ILOT (Interactions Localisations Transports), en co-responsabilité entre moi-même et Pablo Jensen.

Mon projet consiste à appliquer la modélisation multi-agents aux rapports entre mobilité locale et transformation des espaces dans les aires urbaines. Il vise à répondre au besoin d'une meilleure connaissance des dynamiques urbaines et à intégrer différents modèles dans une approche ancrée dans la dynamique des systèmes complexes, à l'instar de ce que j'ai déjà développé en approche DS (cf. 3.3 supra).

Les premiers modèles intégrés transport-urbanisation ont été développés au début des années 60 et ont suscité de fortes attentes, notamment pour la planification urbaine à l'échelle de régions-villes : leur appétit de données, leur lourdeur de mise en œuvre et leurs insuffisances théoriques ont abouti à leur abandon en une dizaine d'années. Ce type de modèle a connu un regain d'intérêt à la suite d'un premier changement majeur de paradigme qui a marqué la discipline à la fin des années 70 : l'émergence de la théorie micro-économique des choix discrets (une fiction théorique mais utile telle que discutée supra en 1.4). Cette théorie est à l'origine du développement des modèles de choix discret à utilité aléatoire (cf. supra page 46), centrés sur l'individu ou le ménage pour les choix de mobilité quotidienne et résidentielle. Néanmoins, si l'interprétation des modèles à partir d'une théorie sous-jacente unique en a renforcé la robustesse, les progrès en matière économétrique n'arrivent pas à masquer la faible pertinence des hypothèses comportementales liées au modèle de l'homo œconomicus rationnel et parfaitement informé, représentatif d'un groupe d'individus homogènes.

Le second changement majeur de paradigme, amené par la géographie humaine, a consisté à prendre en compte le « schéma d'activités » qui décrit la chaîne d'activités et de déplacements

effectués par les individus tout au long de la journée (cf. 2.1 supra). Ce paradigme a plus de difficulté que le premier à se traduire en modèles achevés. Il est toutefois potentiellement plus fécond, car à l'origine d'un champ de recherche très actif dans la communauté internationale des économistes des transports et de l'espace, des géographes et des sociologues (réseaux IATBR, International Association for Travel Behaviour Research, et IATUR, International Association for Time Use Research). Ce champ émergent concerne les modèles de micro-simulation des comportements d'activités-déplacements de ménages et d'individus dans les espaces urbains. Ces nouvelles approches disposent d'un fort potentiel pour répondre aux critiques énoncées ci-dessus. Elles permettent notamment de développer des cadres théoriques des comportements de localisation ainsi qu'une meilleure intégration des processus de choix de localisation et de déplacement. Elles utilisent des méthodes de modélisation plus pertinentes, telles les automates cellulaires ou les systèmes multi-agents, inspirées à l'origine par les théories de la complexité et de l'auto-organisation.

Les méthodes multi-agents ont jusqu'ici surtout été développées par les géographes dans la simulation de l'usage des sols, ou dans la modélisation des systèmes de peuplement ou de villes (exemple de SIMPOP de l'équipe PARIS). En général, la composante transport y reste faible car les flux de déplacements n'y sont pas simulés.

Les grands progrès accomplis ces dernières années dans l'étude des « systèmes complexes », grâce notamment aux apports de la physique statistique et des outils de simulation numérique, désignent d'évidentes pistes de renouvellement de la modélisation en économie des transports et de l'espace. On évitera toutefois le « transfert sauvage » (Walliser) qui consisterait à appliquer des modèles de systèmes physiques à des systèmes socio-économiques. Le « transfert sauvage » n'est pas pertinent parce que les interactions entre agents cognitifs ne sont pas de même nature qu'entre les atomes, et qu'il existe de plus un bouclage fondamental entre le niveau microscopique (celui des agents) et le niveau macroscopique (exemple, le système de prix).

Dans un premier temps sera développé un ensemble de « briques » théoriques susceptibles de représenter de manière pertinente l'émergence de comportements collectifs en matière de rythmes temporels d'activités et de localisation. A plus long terme, ces « briques » théoriques seront le matériau de base pour élaborer des modèles appliqués à la simulation du fonctionnement d'agglomérations urbaines.

Il s'agit de construire une ville modèle qui permette de comprendre l'émergence du fait urbain à travers la dynamique temporelle et de localisation des activités intra-urbaines. J'envisage de suivre une méthodologie à la Epstein & Axtell (« can you grow it ? »), en partant de modèles de la ville (localisation des habitants et emplois, cf. par exemple les modèles théoriques de l'économie urbaine), des réseaux de transport et des règles minimalistes de comportement pour les agents. Il s'agirait d'explorer en détail ces modèles, simples au départ, puis progressivement complexifiés à mesure qu'ils seraient maîtrisés. L'objectif est, dans une logique de parcimonie, de définir le jeu minimal d'hypothèses de comportement permettant de faire émerger des « faits stylisés » tels que l'étalement urbain, la formation des pointes d'activités et de trafic, la concentration ou la dispersion des activités (externalités d'agglomération), etc.

La micro-simulation des comportements de mobilité des agents passe par la simulation des « schémas d'activités » qui décrivent la chaîne d'activités et de déplacements effectués par les individus tout au long de la journée. Ces schémas d'activités sont le fruit, d'une part d'interactions sociales de personnes entre elles et avec des institutions, d'autre part d'interactions avec l'espace construit et les réseaux physiques : ces réseaux sont caractérisés par des capacités (ou vitesses) variables avec les encombrements, et par des coûts de

déplacement ou de connexion. On cherchera également à rendre compte de l'interaction entre un niveau méso (contraintes temporelles et de localisation s'imposant aux individus) et le niveau micro qui peut venir en retour modifier ou non ces contraintes (flexibilité des horaires, choix d'autres lieux, etc.). Par exemple, il s'agit de simuler l'effet des contraintes de « co-présence » des individus en certains lieux et à certaines heures (exemple, au travail ou à l'école, à la maison pour les enfants, pour les accompagnements, etc.) sur les schémas d'activités individuels. Il en résulte entre autres la formation de phénomènes d'encombrement dans les réseaux et d'« aires de chalandise » spatiales et temporelles qui déterminent la localisation des centres d'activité comme les commerces.

On peut distinguer deux niveaux (Nagel et Marchal, 2003) : (a) le niveau « physique » où s'opèrent les interactions dans l'espace construit, qu'il s'agisse des réseaux de transport ou d'autres infrastructures communes ; (b) le niveau « stratégique » où les agents cognitifs élaborent leurs stratégies dans un environnement qu'ils perçoivent à travers un filtre cognitif : choix de mode de déplacement et d'itinéraire, horaires des activités, réactions à la congestion, choix de résidence ou de lieu de travail, choix de localisation des autres activités (loisirs, achats, etc.).

Les modèles de trafic les plus récents présentent déjà un niveau de sophistication élaborée pour décrire le niveau physique. Comme il est nécessaire de transmettre au niveau stratégique une représentation réaliste du niveau physique (i.e. la structure du réseau et le niveau de congestion), le travail consistera à interfacer des modèles ou simulateurs de trafic déjà développés par ailleurs ou, de préférence pour en avoir la maîtrise, à développer nos propres modèles à partir de l'état de l'art le plus récent.

Je pense que la priorité doit être accordée au niveau stratégique. La génération de stratégies fait référence à un système d'apprentissage par lequel les agents apprennent à modifier et améliorer leurs stratégies. Pour mieux appréhender les interactions évoquées précédemment, l'activité peut être définie comme une interaction continue entre les agents entendus au sens large (à la suite de Rindt et al, 2002). Un agent est une entité discrète qui interagit avec les autres agents. Ils peuvent être des personnes, des groupes sociaux (ménages, institutions), des lieux ou des agrégats de lieux (logement, quartier, centre commercial, sous-système de localisation ou de transport). Les propriétés de ces lieux peuvent être définies par les aménités (urbaines et environnementales), le voisinage (social), l'accessibilité (transport) et les valeurs foncières.

Parmi ces agents, certains sont cognitifs, notamment les personnes et les groupes sociaux. Un agent cognitif a une représentation partielle de son environnement et peut communiquer avec les autres à l'intérieur d'une portée spatiale et sociale variant d'un agent à l'autre. Le comportement d'un agent cognitif résulte de ses observations, de sa connaissance et de ses interactions avec les autres agents. Il peut agir sur lui-même et sur son environnement.

L'intérêt de cette nouvelle approche de l'activité est de pouvoir introduire la modélisation multi-agents dans la simulation des « schémas d'activité » et des phénomènes collectifs qui en résultent. Cette nouvelle approche me semble riche de potentialités pour dépasser les limites de la modélisation classique en économie des transports et de l'espace, incapable de manipuler un objet aussi complexe que le schéma d'activités.

Enfin, pour mettre en œuvre ces approches, je souhaite privilégier une règle méthodologique particulière. En effet, deux approches extrêmes peuvent être adoptées dans l'élaboration de systèmes multi-agents : une approche « biophysique » où des agents très simples (exemple des automates cellulaires) réagissent de manière conditionnée à des stimuli ; une approche « sociale » où les agents plus « riches » exhibent un comportement cognitif. Je pense qu'il est souhaitable pour le moment d'éviter un écueil : ce dernier consisterait à enrichir à l'infini les

règles de comportement des agents, dans l'espoir vain de répliquer la « réalité ». Le risque serait d'aboutir à une boîte noire où l'on ne maîtrise plus grand chose, critique souvent faite aux modèles économétriques complexes. Au contraire, on utilisera les nombreuses observations empiriques disponibles selon les agglomérations (par exemple les enquêtes de déplacements auprès des ménages, les données sur les localisations intra-urbaines des établissements et des emplois) pour en déduire des règles évolutionnaires générales, dont on cherchera à modéliser l'émergence à partir de modèles d'interaction les plus simples possible.

La ville est donc représentée comme un système adaptatif complexe résultant de l'interaction d'agents hétérogènes, à rationalité limitée (Simon, 2004) et en situation d'information incomplète. Les « briques » théoriques ainsi élaborées seront le matériau de base pour élaborer des modèles appliqués (confrontés) à des situations réelles.

Ce projet a un positionnement résolument interdisciplinaire, puisqu'il fait appel aux mathématiques, à la physique statistique, à l'informatique, mais aussi à des sciences sociales comme l'économie, la sociologie et la géographie. Il s'agit d'une première forme d'interdisciplinarité au cœur de la problématique de la « science des transports » évoquée en introduction. Dès à présent des collaborations sont engagées avec des équipes de recherche mettant en œuvre des méthodologies similaires sur une problématique proche, à savoir le projet MIRO piloté par des géographes, Arnaud Banos à l'Université de Pau, et informaticiens, Christophe Lang à l'Université de Franche-Comté, et le projet MOBISIM-SMA mis en œuvre par la société ATN (Philippe Casanova et Vladimir Koltchanov).

Ce projet rejoint également une seconde forme d'interdisciplinarité, celle de la nouvelle science des systèmes complexes, un domaine de recherche actuellement en croissance rapide : cette science part de questions fondamentales partagées par de nombreux domaines disciplinaires et cherche à développer des méthodes à même de répondre à ces questions. On s'attend à ce que cette approche transdisciplinaire fasse émerger une nouvelle science de l'ingénierie intégrant les sciences sociales, les sciences de la nature et les sciences formelles et empirico-formelles. Il faut mentionner également notre participation aux activités de l'Institut des Sciences de la Complexité de Lyon et au réseau interdisciplinaire SMASHS (créé en 2005) qui a pour objectif de favoriser la coordination et le dialogue interdisciplinaire dans le domaine des systèmes multi-agents appliqués aux SHS.

Enfin, une retombée du projet concerne la possibilité d'enrichir de manière significative le calcul économique. En effet, dans le cadre de nos travaux sur l'acceptabilité sociale des politiques de transport (cf. 4.1 supra), nous avons eu l'occasion de montrer concrètement comment la pratique standard du calcul économique pourrait être enrichie de manière à mieux identifier les « gagnants » et les « perdants », suite à la mise en œuvre de ces projets. La modélisation microscopique décrite ci-dessus est un moyen de simuler les effets micro-économiques de politiques de transport, en suivant des catégories particulières d'agents à un niveau très désagrégué. Elle permettrait d'identifier finement les gagnants et les perdants de la politique testée, que ce soit sur le plan spatial ou social, sous réserve bien sûr de la production de données socio-économiques spatialisées avec traitement ad hoc au moyen de SIG.

Ce commentaire sur le calcul économique me permet d'insister sur ce qui me semble être une évidence, à savoir la nécessité de produire – à côté de la production académique – des connaissances utiles à la société : dans notre champ appliqué, il s'agit d'accompagner efficacement les autorités publiques dans leur processus décisionnel. Les modèles que je propose de développer ont vocation à être appliqués dans les agglomérations urbaines pour produire des diagnostics de performance socio-économique des politiques de transport envisagées. De même, la conception de nouveaux instruments de régulation comme les permis transférables ne vise pas seulement un intérêt académique mais, comme je l'ai déjà

évoqué, une application effective dans le cadre de la lutte contre les émissions de GES. Tout cela implique donc des prestations de service et des échanges avec les milieux professionnels et les administrations en prise avec la politique des transports sur le terrain.

CONCLUSION

En conclusion, je proposerai une autre grille de lecture, plus personnelle. En effet, le fil directeur de mes travaux trouve sa source dans ma formation scientifique initiale d'ingénieur et un goût pour la « chose publique ».

Cette formation scientifique initiale explique un certain souci de scientificité et ce passage que j'ai cru obligé, au début de ce mémoire, par le terrain de l'épistémologie et de la méthodologie des sciences. Les messages-clés que j'en retire sont la rigueur opératoire, le rôle irremplaçable de l'expérimentation contrôlée, fût-ce-t-elle fictive dans notre discipline, le refus du relativisme même s'il faut admettre que les normes de scientificité puissent évoluer, et enfin, les perspectives offertes par la démarche des laboratoires virtuels des sociétés artificielles, qui proposent une nouvelle conception du déterminisme en sciences sociales.

Ce goût pour la « chose publique » a motivé chez moi un complément de formation d'économiste à l'Université, et s'est concrétisé, au hasard d'une rencontre, par un intérêt pour les politiques publiques de transport et d'aménagement de l'espace. C'est cette démarche d'économiste qui m'a entraîné sur les terrains de la régulation économique, avec la conception et l'évaluation d'instruments tels que le péage urbain ou, dernièrement, les permis transférables.

Mais pour évaluer les adaptations comportementales à de nouvelles politiques de régulation, il m'a fallu mettre en œuvre une approche opératoire de la mobilité et de l'univers de choix des individus, et développer une méthode d'enquête interactive de simulation, une sorte d'expérimentation contrôlée fictive, mais qui reste en rapport avec la réalité des comportements. Cette démarche illustre comment une question appliquée – le péage urbain – a généré de nouvelles interrogations théoriques sur les comportements, et de nouvelles méthodes d'exploration des processus de changement de ces comportements. En outre, le développement de ces méthodes d'enquête, piloté par une curiosité transdisciplinaire, s'est fait au risque de l'aventure dans des champs disciplinaires mal maîtrisés voire inconnus : l'épreuve du jugement par les pairs, à travers les publications scientifiques, a permis d'en vérifier la pertinence.

Dès le départ, mon appétence d'ingénieur s'est exercée sur le formalisme mathématique et la simulation informatique appliqués à la modélisation du système de déplacements urbains. Les modèles que j'ai développés m'ont servi comme outils de recherche pour, par exemple, évaluer des scénarios de régulation par le péage. Mais ces modèles ont en même temps une assise micro-économique comme le montre l'exemple du modèle de choix modal prix-temps.

Ma curiosité en matière de modélisation s'est essayée, au risque de la nouveauté, à la modélisation dynamique du système de déplacements urbains, avec des essais assez concluants, à travers les exemples d'un modèle de régulation des transports publics et d'un modèle de choix d'heure de départ fondé sur un mécanisme de file d'attente.

C'est donc ce fil directeur qui donne une cohérence au projet de recherche que je propose en deux axes, l'un sur les politiques innovantes de régulation de la demande dans le secteur des transports – les quotas transférables –, l'autre relatif à la simulation de la ville comme système complexe, sur la base de la modélisation multi-agents.

Enfin, je ne conçois de développement fructueux de ces recherches que dans le cadre d'une vision stratégique interdisciplinaire, telle que je l'ai évoquée au début de ce mémoire, sans renier mon ancrage disciplinaire d'économiste.

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.
- ANDAN O., ASKEVIS F., CURRAT C., MATALON B., POITEVINEAU J., REICHMAN S., SALOMON I., 1984, *Mobilité et espace urbain. Etude longitudinale des comportements de mobilité en fonction d'un changement de résidence*, rapport pour la Mission de la Recherche du Ministère des Transports, Laboratoire Analyse de l'Espace, Paris, 200 p et annexes.
- ANDAN, O., RAUX, C. (1997) L'univers de choix et les leviers de changement des comportements : l'apport d'une méthode interactive de simulation. In BONNEL (P.), CHAPLEAU (R.), LEE-GOSSELIN (M.), RAUX (C.), *Les enquêtes de déplacements urbains. Mesurer le présent, simuler le futur*. Editions du Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, Centre Jacques Cartier, Lyon, 1997, p. 417-435.
- ANDERSON, S.P., DE PALMA, A., THISSE, J.F. (1992) *Discrete choice theory of product differentiation*, The MIT Press, 423 p.
- 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.
- ASHLEY, D.J. (1981) Uncertainty in interurban highway-scheme appraisal. In New Horizons in Travel-Behavior Research, Stopher, P.R., Meyburg, A.H., Brög, W. (eds) Lexington Books, pp. 599-615, 1981
- ASTRA (2000) *Assessment of Transport Strategies*, Final Report for the European Commission, 48 p. (<http://www.iww.uni-karlsruhe.de/ASTRA>)
- AVEROUS B., MATALON B., 1979, *Recherche sur la mobilité des personnes en zone urbaine. Exploitation de l'enquête Dijon*. Motorisation et usage individuel de la voiture, IRT, Arcueil, rapport n°38, tome II, 53 p et annexe.
- BACHELARD, G. (1938) *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin, 2004, 306 p.
- BATES, J., BREWER, M., HANSON, P., McDONALD, D., SIMMONDS, D. 1991. *Building a strategic model for Edinburgh*, PTRC Summer Annual Meeting, Sept 1991.
- 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.
- BLAUG, M. (1994) *La méthodologie économique*. 2^{ème} édition, Economica, Paris, 285 p.
- BONNAFOUS, A. (1973) *La logique de l'investigation économétrique*. Dunod, Paris, 307p.
- BONNAFOUS, A. (1985) Simulation du financement du transport urbain : le modèle QuinQuin, *Transports Urbains* n°54, janvier-mars 1985.
- BONNAFOUS, A. (1989) *Le siècle des ténèbres de l'économie*. Economica, Paris, 184 p.
- BONNAFOUS, A. TABOURIN, E. (1995) *Modèles de simulation stratégique*. Communication à la 7^{ème} WTCR, Sydney, Juillet 1995, 17 p.
- BONNAFOUS, A., PUEL, H. (1983) *Physionomies de la ville*. Les Editions Ouvrières, Paris, 168 p.
- BONNEL, P. (2004) *Prévoir la demande de transport*. Presses de l'ENPC. Paris, 425 p.
- BONNEL, P., CHAPLEAU, R., LEE-GOSSELIN, M., RAUX, C. (1997) (sous la direction de) *Les enquêtes de déplacements urbains. Mesurer le présent, simuler le futur*. Editions du Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, Centre Jacques Cartier, Lyon, 1997, 513p.
- BOUDON R. (2002) Théorie du choix rationnel ou individualisme méthodologique ? *Sociologie et société*, 39, 1, [p.9-34]. Réédité dans *Revue du MAUSS* (2004) n°24.
- BOUDON, R. (1970) *L'analyse mathématique des faits sociaux*. Mouton, Paris.

- BOUF, D. (1989) *Un nouvel instrument d'analyse stratégique pour la RATP : le modèle Gros Quinquin*. Thèse de l'Université Lumière-Lyon2, Laboratoire d'Economie des Transports, Lyon.
- BOURGIN C. (1978) *Les évolutions dans l'usage des modes de transports - Influence des moments de transition dans le cycle de vie*, IRT, Arcueil, rapport n°36, 38 p.
- BROG W., HEUWINKEL D., NEUMANN K. (1977) Motifs psychologiques qui guident les usagers in *Rapport pour la 34ème table ronde*, CEMT, Paris.
- CAIRNS, S., HASS-KLAU, C., GOODWIN, P. (1998) *Traffic Impact of Highway Capacity Reductions: Assessment of the Evidence*. Landor Publishing, 1998, 261 p.
- CERTU, DREIF, IAURIF, LET (2002) *Les péages urbains en Norvège : Oslo et Trondheim*. CERTU, Lyon, 39 p.
- CHALMERS, A.F. (1987) *Qu'est-ce que la science ?* (traduction de la 2nde édition anglaise de 1982). La Découverte, Paris, 238 p.
- CHALMERS, A.F. (1999) *What is this thing called science?* (3rd edition). Open University Press, 266 p.
- CHALMERS, A.F. (2000), Author's Response, in *What is This Thing Called Philosophy of Science?* Review Symposia, AAHPSS, pp. 198-202.
- CLARKE M., DIX M.C. (1983) Stage in lifecycle - A classificatory variable with useful properties, in *Recent advances in travel demand analysis*, CARPENTER S., JONES P., eds., Gower, pp 215-231.
- CNT (2001) *L'effet de serre et les transports : les potentialités des permis d'émission négociables*. Rapport au Conseil National des Transports. BONNAFOUS, A. (président), RAUX, C., FRICKER, E. (rapporteurs), Paris, 117p. (en ligne <http://www.cnt.fr>)
- COASE, R. (1960) The problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 3: 1-44.
- DALES, J.H. (1968) Land, water and ownership. *Canadian Journal of Economics*, 1: 797-804.
- 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.
- DUPUIT, J. (1849) De l'influence des péages sur l'utilité des voies de communication, *Annales des Ponts et Chaussées*, n°207, p.170-248.
- DUPUY, G. (1975) *Une technique de planification au service de l'automobile : les modèles de trafic urbain*. Paris.
- DUPUY, J.-P. (2004) Vers l'unité des sciences sociales autour de l'individualisme méthodologique complexe. *Revue du MAUSS*. n°24, pp. 310-328.
- EPSTEIN, J.M., AXTELL, R. (1996) *Growing Artificial Societies. Social sciences from the bottom up*. Brookings Institution Press, Washington, D.C., The MIT Press, Cambridge, Mass. 208 p.
- FAIVRE D'ARCIER, B., ANDAN, O., RAUX, C. (1998) Stated Adaptation Surveys and Choice Process : Some Methodological Issues, *Transportation* 25, pp. 169-185, 1998.
- FEYERABEND, P. (1979) *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*. Seuil, Paris, 350 p.
- FRIEDMAN, M. (1953) *Essays in Positive Economics*. The University of Chicago Press, 328 p.
- FRIEDMAN, M. (1995) *Essais d'économie positive*. Traduction de l'ouvrage original « Essays in Positive Economics » (1953) par G. Millière. Editions Litec, Paris, 1995, 303 p.
- 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. (1988) *Evidence on car and public transport demand elasticities 1980-1988*, TSU Ref 427, Oxford, June 1988.

- 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.B. (1995) Road Pricing or Transport Planning ? In Johansson, B. and Mattsson L.-G. (eds) *Road Pricing : Theory, Empirical Assessment and Policy*. Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 143-158.
- GOODWIN, P.B. (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.
- GUILLAUME, M. (1971) *Les modèles économiques*. PUF, Paris.
- HAGERSTRAND, T. (1970) What about people in regional science? in *Papers and Proceedings of the RSA*, vol 24, pp.7-24
- HANSON S. (1979) Urban travel linkages : a review, in *Behavioral travel modelling*, HENSHER D.A., STOPHER P.R., eds., Croom Helm, London, pp 81-100.
- HAUMONT A. (1980) Social structure, employment and everyday mobility, in *Proceedings of the conference "Social aspects of transport : how to use social research in transport policy making"*, West Dean (GB).
- HEMPEL, C. (1972) *Eléments d'épistémologie*. Armand Colin, Paris, 184 p.
- HOROWITZ, J.L. (1981) Sources of Error and uncertainty in behavioural travel-demand models. In *New Horizons in Travel-Behavior Research*, Stopher, P.R., Meyburg, A.H., Brög, W. (eds) Lexington Books, pp. 543-558, 1981
- HORTON F.E. (1971) Effects of urban spatial structure on individual behavior, *Economic Geography*, janvier.
- INRETS (1999) L. HIVERT. Le parc automobile des ménages. Etude en fin d'année 1997. Rapport de convention INRETS-ADEME. Inrets, Arcueil, Juin 1999, 151 p.
- 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.
- JONES, D., MAY, T., WENBAN-SMITH, A. (1990) Integrated transport studies: lessons from the Birmingham study. *Traffic Engineering+Control*. Nov.1990, pp.572-576.
- JONES, P.M., DIX, M.C., CLARKE, M.I., HEGGIE, I.G. (1983) *Understanding travel behaviour*, Oxford Studies of Transport, Gower, Aldershot, England, 241 p et annexes.
- KIRMAN, A.P. (1992) Whom or What Does the Representative Individual Represent? *The Journal of Economic Perspectives*, Vol. 6, No. 2 (Spring, 1992), 117-136.
- KNIGHT F. (1924) Some fallacies in the interpretation of social cost. *Quarterly Journal of Economics*, vol 38.
- KOPPELMAN, F.S. (1981) Uncertainty in methods and measurements for travel behavior models. In *New Horizons in Travel-Behavior Research*, Stopher, P.R., Meyburg, A.H., Brög, W. (eds) Lexington Books, pp. 577-583, 1981
- KOSTYNIUK L.P., KITAMURA R. (1986) Household lifecycle : predictor of travel expenditure, in *Behavioural Research for Transport Policy*, Ministry of Transport and Public Works eds., pp.343-62, VNU Science Press, Utrecht, The Netherlands.
- KUHN, T. S. (1983) *La structure des révolutions scientifiques*. (édition anglaise de 1970). Flammarion, Paris, 285 p.
- LAKATOS, I. (1994) *Histoire et méthodologie des sciences*. PUF, Paris, 268 p.
- LEE-GOSSELIN, M. (1995) The Scope and Potential of Interactive Stated Response Data Collection Methods. *Transportation Research Board Proceedings*.
- LEE-GOSSELIN, M., BONNEL, P., RAUX, C. (1998) Guest Editorial, *Transportation* 25, pp. 121-127, 1998.
- LENNTORP, B. (1978) Les déplacements considérés comme une part de la vie : un cadre conceptuel pour l'analyse de la distinction des possibilités de déplacement au sein d'une population, in *Actes de la conférence internationale sur la mobilité dans la vie urbaine*, IRT, Arcueil, 28-30 septembre, pp 153-172.

- LIPSEY, R.G., LANCASTER, K.J. (1956) The general theory of second best, *Review of Economics Studies*, pp.11-32, 24.
- MALINVAUD, E. (1990) Fondements micro-économiques de la macro-économie. In GREFFE, X., MAIRESSE, J., REIFFERS, J.-L. (éds) *Encyclopédie Economique*. Economica. Paris, Tome 1, pp. 583-607.
- MAS-COLELL, A., WHINSTON, M.D., GREEN, J.R. (1995) *Microeconomic Theory*. Oxford University Press. 981 p.
- MASSON, S. (2000) *Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*. Thèse pour le doctorat de sciences économiques (économie des transports) : Université Lumière Lyon 2. 475 p. + annexes.
- MAYO, D.G. (1996) *Error and the Growth of Experimental Knowledge*. The University of Chicago Press. 493 p.
- MAYO, D.G. (2000) in *What is This Thing Called Philosophy of Science?* Review Symposia, AAHPSS, pp. 179-188.
- McKINDER, I.H., EVANS, S.E. (1981) *The predictive accuracy of British transport studies in urban areas*, LGORU, Working Note 20.
- MILLER, H. J. (2003) What about people in geographic information science? in D. Unwin (ed.) *Re-Presenting Geographic Information Systems*, John Wiley.
- MONTGOMERY, W.D. (1972) Markets and licenses and efficient pollution control programs. *Journal of Economic Theory*, 5: 395-418.
- MOUGEOT, M. (1989) *Economie du secteur public*. Economica, 485 p.
- NAGEL, K., MARCHAL, F. (2003) *Computational methods for multiagent simulations of travel behavior*. 10th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR), Lucerne.
- OECD (2001) *Domestic Transferable Permits for Environmental Management. Design and Implementation*. OECD, Paris.
- OLDFIELD, R.H. (1993) *A Strategic Transport Model for the London Area*, Research Report 376, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- ORFEUIL, J.-P. (2000) *L'évolution de la mobilité quotidienne. Comprendre les dynamiques, éclairer les controverses*. Synthèse INRETS, Arcueil, 146 p.
- ORTUZAR, J. (1992) (ed). *Simplified transport demand modelling*. PTRC, London, 153 p.
- ORTUZAR, J.d.D., WILLUMSEN, L.G. (1994) *Modelling Transport*, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- PIGOU, A.C. (1920) *The Economics of Welfare*, MacMillan, Londres.
- POPPER, K.R. (1973) *La logique de la découverte scientifique*. Bibliothèque scientifique Payot. Paris, 480 p.
- QUINET, E. (1998) *Principes d'économie des transports*, Economica, Paris, 419 p.
- RAUX (C.), ANDAN (O.), BONNEL (P.) 1988, *Les analyses des comportements de mobilité individuelle quotidienne. Une synthèse bibliographique*. Rapport pour le compte du Service des Etudes, de la Recherche et de la Technologie, Ministère des Transports, Juillet 1988, 118 p.
- RAUX, C. (1983) *Modèles et prévision des comportements de mobilité quotidienne*, Thèse pour le Doctorat de Docteur-Ingénieur en Economie des Transports, Université Lyon 2 et ENTPE, 256p. +annexes, Novembre 1983, Lyon.
- RAUX, C. (2002) The Use of Transferable Permits in the Transport Sector. In OECD (ed), *Implementing Domestic Tradeable Permits. Recent Developments and Future Challenges*. OECD Proceedings, Paris, 2002, pp. 141-185.
- RAUX, C. (2002) Uncertainties in Forecasting: The Role of Strategic Modeling to Control Them. In H.-S. MAHMASSANI (ed), *In Perpetual Motion. Travel Behavior Research Opportunities and Application Challenges*. Pergamon, Elsevier Science, Oxford, 2002, pp. 505-526.
- RAUX, C. (2004) The use of transferable permits in transport policy. *Transportation Research Part D*. Vol 9/3, pp 185-197.

- RAUX, C. (2005) Comments on "The London congestion charge: a tentative economic appraisal" (Prud'homme and Bocajero, 2005). *Transport Policy*, 12 (2005) 368-371
- RAUX, C., ANDAN, O. (1999) Road use conflicts: tolling strategies to preserve accessibility. In H. MEERSMAN, E. VAN DE VOORDE, W. WINKELMANS (eds), *World Transport Research, Selected Proceedings from the 8th World Conference on Transport Research, Volume 2: Planning, Operation, Management and Control*. Elsevier Science, 1999.
- RAUX, C., ANDAN, O. (2002) Comment les péages urbains peuvent-ils satisfaire une politique d'agglomération ? *Recherche Transports Sécurité* 75 (2002) 115-130.
- RAUX, C., ANDAN, O., GODINOT, C. (1998) The simulation of behaviour in a non-experienced future : the case of road-pricing. In ORTUZAR, J. de D., HENSHER, D.A and JARA-DIAZ, S.R. (Eds.), *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*. Pergamon, Oxford, 1998, pp. 67-86.
- RAUX, C., LEE-GOSSELIN, M. (1992) (sous la direction de), *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Editions du Programme Rhône-Alpes de Recherches en Sciences Humaines, septembre 1992, 363 p.
- RAUX, C., LHOMET, E., MASSON, S. (1996) Un modèle stratégique de simulation des déplacements urbains. Conception et aspects méthodologiques. *Recherche Transports Sécurité*, n°52, juillet-septembre 1996, pp. 31-43.
- RAUX, C., MARLOT, G. (2005) A System of Tradable CO₂ Permits Applied to Fuel Consumption by Motorists. *Transport Policy*, 12 (2005) 255-265.
- 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., SDIKA, M., HERMENIER, V. (2003) *Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains : une plate-forme de modélisation*. Rapport pour la DRAST (Ministère des Transports). Février 2003. 166 p.
- RAUX, C., SOUCHE, S. (2001a) Comment concilier efficacité et équité dans la politique tarifaire des transports ? Le cas de TEO à Lyon. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*. n° 40, pp. 27-52.
- RAUX, C., SOUCHE, S. (2001b) L'acceptabilité des changements tarifaires dans le secteur des transports : comment concilier efficacité et équité ? *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, vol 4, pp. 539-558.
- RAUX, C., SOUCHE, S. (2003) An Analytical Framework of Pricing Acceptability: Application to Four Case Studies. In J. SCHADE and B. SCHLAG (eds). *Acceptability of Transport Pricing Strategies*. Elsevier. pp. 153-168.
- RAUX, C., SOUCHE, S. (2004) The acceptability of urban road pricing: A theoretical analysis applied to experience in Lyon. *Journal of Transport Economics and Policy*. Vol 38, Part 2, May 2004, pp. 191-216.
- RAUX, C., TABOURIN, E. (1992) Congestion et crise du financement des transports à Lyon : vers un péage urbain ? In RAUX C. et LEE-GOSSELIN M. (eds), *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?*, éditions du PPSH, 1992, Lyon.
- RAWLS J. (1987) *Théorie de la justice*, Le Seuil, p.665.
- RINDT, C.R., MARCA, J.E., MCNALLY, M.G. (2002) *Toward Dynamic, Longitudinal, Agent-Based Microsimulation Models of Human Activity in Urban Settings*. Working Paper. Institute of Transportation Studies. Center for Activity Systems Analysis. University of California, Irvine.
- 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 (1997a) *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements. Guide de l'utilisateur*. Février 1997, 33p.
- SEMALY, LET (1997b) *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.
- SIMON, H.A. (2004) *Les sciences de l'artificiel* (traduction de la 3^{ème} édition anglaise de 1996, *The Sciences of the Artificial*). Gallimard, Paris, 464 p.

- SMALL K.A. (1992) *Urban Transportation Economics*, Harwood Academic Publishers, Luxembourg, 181 p.
- STOPHER, P.R., HARTGEN, D., Li, Y. (1996) SMART : simulation model for activities, ressources and travel. *Transportation* 23 :293-312, 1996
- TABOURIN, E. (1989) *Un modèle de simulation du financement des transports collectifs urbains à l'an 2000 : le modèle QuinQuin, Application à l'agglomération lyonnaise*. Thèse d'Université, Université Lumière Lyon 2, septembre 1989.
- TALVITIE, A.P. (1981) Inaccurate or incomplete data as a source of uncertainty in econometric or attitudinal models of travel behavior. In *New Horizons in Travel-Behavior Research*, Stopher, P.R., Meyburg, A.H., Brög, W. (eds) Lexington Books, pp. 559-575, 1981
- TARRIUS, A. (1978) Organisations sociales, structures urbaines et mobilité, in *Actes de la conférence internationale sur la mobilité dans la vie urbaine*, IRT, Arcueil, 28-30 septembre, pp 51-54.
- 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.
- ULLMO, J. (1969) *La pensée scientifique moderne*. Flammarion, 315 p.
- VICKREY W.S. (1963) Pricing in urban and suburban transport, *American Economic Review : Papers and Proceedings*, 53 (2), p.452-465, May.
- 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.
- WALLISER, B. *De l'individuel au collectif : émergence de structures*. Contribution au séminaire de prospective SHS-CNRS. Non publié, 9p.
- WALTERS, A.A. (1961) The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, vol 29, n° 4.
- WORRALL, J. (2000) in *What is This Thing Called Philosophy of Science?* Review Symposia, AAHPSS, pp. 172-179.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. UNE CONCEPTION DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE	7
1.1 Le critère de démarcation de la science.....	8
1.2 Théorie et expérience, comment la science progresse-t-elle ?	10
1.3 Une marche inéluctable du rationalisme vers le relativisme ?	14
1.4 De l'instrumentalisme au réalisme opératoire : l'expérimentation contrôlée en sciences sociales.....	16
1.5 De la causalité « à l'œuvre » au déterminisme partiel	20
1.6 Conclusion.....	24
CHAPITRE 2. DU CONCEPT DE MOBILITE A L'EXPLORATION DE L'UNIVERS DE CHOIX COMPORTEMENTAL	25
2.1 Le concept de mobilité : de la mesure au modèle	25
2.2 L'exploration de l'univers de choix par les enquêtes interactives de simulation.....	29
CHAPITRE 3. MODELISER ET SIMULER LE SYSTEME DE DEPLACEMENTS URBAINS	37
3.1 Le modèle stratégique	38
3.1.1 Pourquoi un modèle stratégique ?.....	38
3.1.2 Le principe du modèle stratégique développé à Lyon	40
3.1.3 De l'incertitude en matière de prévision.....	42
3.2 Limites du modèle stratégique, développements récents.....	43
3.2.1 Le décryptage de l'univers de choix modal	43
3.2.2 Le dépassement des limites statistiques et de l'artefact du zonage	44
3.2.3 Un modèle de répartition modale « prix-temps »	45
3.3 La simulation dynamique du système de déplacements urbains	49
3.3.1 Un modèle de régulation du financement des transports publics	50
3.3.2 Le modèle conjoint d'affectation et de choix d'heure de départ	52
3.3.3 Le couplage entre la répartition modale et le choix d'heure de départ.....	54
CHAPITRE 4. LA REGULATION DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS : PEAGE URBAIN, PERMIS TRANSFERABLES.....	55
4.1 De la tarification aux péages urbains	55
4.2 Les permis transférables.....	60
CHAPITRE 5. PERSPECTIVES DE RECHERCHE	65
5.1 La régulation par les quotas transférables dans le secteur des transports	65
5.2 Modélisation multi-agents et ville-modèle stylisée	66

CONCLUSION.....	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	75