



HAL
open science

Modélisation de comportements dans les systèmes dynamiques : Application à l'organisation et à la régulation de stationnement et de déplacement dans les Systèmes de Trafic Urbain

Jean-Marie Boussier

► **To cite this version:**

Jean-Marie Boussier. Modélisation de comportements dans les systèmes dynamiques : Application à l'organisation et à la régulation de stationnement et de déplacement dans les Systèmes de Trafic Urbain. Génie logiciel [cs.SE]. Université de La Rochelle, 2007. Français. NNT : . tel-00411272

HAL Id: tel-00411272

<https://theses.hal.science/tel-00411272>

Submitted on 23 Dec 2009

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.

Numéro :

Université de LA ROCHELLE

Ecole Doctorale ED 0374

Laboratoire Informatique - Image - Interaction

Jean-Marie BOUSSIER

Thèse présentée pour obtenir le grade de :

DOCTEUR de l'Université de LA ROCHELLE

Mention INFORMATIQUE

Modélisation de comportements

dans les systèmes dynamiques :

Application à l'organisation et à la régulation de stationnement
et de déplacement dans les Systèmes de Trafic Urbain

soutenue le 03 mai 2007

Jury :	Mr Alain BOUJU	, Examineur
	M. Michelle CHABROL	, Examineur
	Mr Pascal ESTRAILLIER	, Directeur de thèse
	Mr Philippe MATHIEU	, Rapporteur
	Mr Gérard SCEMAMA	, Rapporteur
	Mr Paul TERRIEN	, Examineur

Directeur de thèse :

Pascal ESTRAILLIER



Laboratoire Informatique-Image-Interaction

page blanche

Titre de la thèse :

Modélisation de comportements dans les systèmes dynamiques : application à l'organisation et à la régulation de stationnement et de déplacement dans les systèmes de trafic urbain

Résumé

L'objectif de nos travaux est de développer un cadre méthodique afin de modéliser les préférences, les changements de comportement des individus ainsi que leurs impacts sur l'état d'un système complexe dans un contexte dynamique. L'utilisateur doit simuler les conséquences des politiques de transports et d'urbanisme sur l'offre et demande de stationnement, étape essentielle. Modéliser les préférences hétérogènes des usagers, intégrer des connaissances, selon des logiques comportementales différentes, ont justifié l'approche multi agents. Afin d'avoir des représentations adaptatives et évolutives des comportements des agents individus, les processus décisionnels et d'apprentissage sont modélisés au moyen d'un panier d'outils issus de l'optimisation des procédés industriels, des techniques Data Mining, de marketing. L'emploi personnalisé du simulateur avec l'interactivité utilisateur-simulateur a motivé l'adaptation de ce cadre méthodique à la simulation des systèmes complexes sociétaux.

Mots-clés : systèmes complexes, simulation par ordinateur, simulateur 3D de trafic urbain multimodal, intelligence artificielle distribuée, systèmes multi agents, systèmes d'aide à la décision, systèmes adaptatifs, modèles décisionnels, mécanismes d'apprentissage, négociation, enquêtes à préférences déclarées, optimisation centralisée, plan d'expérience, plans factoriels, analyse de variance, théorie de Dempster-Shafer, théorie mathématique de l'évidence, logique floue, UML, réseaux de Petri, transports urbains, parcs de stationnement, coefficient de robustesse

Thesis title :

Design of behaviour models in dynamic systems: applied to the organization and the regulation of parking and displacements in urban traffic systems

Abstract

Our research work objective is to design a methodical framework for modelling preferences, behaviour changes of people and their impacts on the state of a complex system in a dynamic context. End-user may simulate the consequences of transport and town planning policies based on supply and demand of parking needs. A multi agent approach, had to be used to model the strongly heterogeneous preferences of road network users, and to integrate the knowledge obtained, this was done according to different behavioural logics. In order to get adaptive and evolutionary representations of individual agent behaviours, decision-making and learning processes are modelled thanks to a set of tools. These tools result from the industrial process optimization, data mining and marketing techniques. The personalized use of a computerized tool and the interactivity between end-user and simulator were important aspects to adapt this methodical framework for the simulation of complex systems used in society.

Keywords: complex systems, computer simulation, 3D simulator of multimodal urban traffic, distributed artificial intelligence, multi agent systems, decision support systems, adaptative control systems, decision models, learning mechanisms, negotiation, stated preference surveys, centralized optimization, experimental design, factorial experiment designs, analysis of variance, Dempster-Shafer theory, mathematical theory of evidence, fuzzy logic, UML, Petri nets, urban transportation, parking facilities, signal-to-noise ratio

Remerciements

Ces deux pages pour remercier toutes celles et ceux qui m'ont aidé, soutenu et apporté de la fraîcheur tout au long de ces années mettant un "peu" de côté ma vie privée.

Je ne saurais jamais assez remercier mon directeur de thèse Pascal Estrailier, professeur d'université et directeur du laboratoire, pour m'avoir soutenu, encouragé lors de ce défi, surtout quand je n'y croyais plus, quand je n'en pouvais plus. Me manqueront sûrement nos échanges insolites : des coups de téléphone lors de déplacements ou de réunions, des samedis passés au téléphone (quand ce n'était pas chez lui, avec des problèmes d'eau en parallèle). Aussi, pour la confiance qu'il m'a laissée par une large autonomie dans mes orientations en veillant, en recadrant si nécessaire et en m'aidant à la progression de la thèse dans le bon sens.

Je tiens particulièrement à remercier Philippe Mathieu, professeur d'université et responsable de l'équipe SMAC du Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (LIFL), pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse, pour ses conseils avisés et les orientations qu'il m'a suggérées dans la poursuite de mes travaux.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que je me tourne vers mon autre rapporteur, Gérard Scemama, directeur de recherche à l'INRETS et directeur de l'unité de recherche GRETIA, qui m'a sacrifié beaucoup de son temps et m'a fait des remarques très pertinentes sur des points qui méritaient d'être approfondis dans ce document.

Je suis également touché par l'intérêt porté à mes travaux et par l'honneur que me font les autres membres du jury, Michelle Chabrol, chercheur au LIMOS (Laboratoire de recherche d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des systèmes) et maître de conférence à l'université de Clermont-Ferrand, Alain Bouju, chercheur au L3i et maître de conférence à l'université de La Rochelle, et Paul Terrien, directeur du CEREVEH (Centre d'Etudes et de Recherches sur les véhicules électriques et hybrides) et du pôle de compétitivité MTA (Mobilité et Transport Avancés).

Je n'oublie pas mes compagnons d'OSPDU (ou PAVU), David Sarramia (ayant eu aussi le "plaisir" de relire le premier jet), Michel Augeraud, Ronan Champagnant et Pascal pour les moments passés ensemble, sur un coin de table, au téléphone pour la rédaction d'articles ; Ah la gestion des versions ! Et les vacances ! Leur reviendra l'honneur de poursuivre ce que je viens de commencer et trouvons un nom au simulateur.

Comme peuvent être rassurants les avis des spécialistes quand on marche sur des terres inconnues. Merci à Michel Menard du L3i pour ses avis dans l'application de la logique floue, au Professeur H. Timmermans de TUE (Eindhoven) une référence dans la modélisation des comportements, à F. Smarandache à qui je transmets un « multumesc » (*en roumain*) pour avoir pris le temps de valider mes travaux en fusion de données. Merci à Schérazade Benhabib, professeur de mathématiques à l'EIGSI, pour avoir passé du temps à m'expliquer tous les mystères statistiques dont je n'ai jamais su ou pu avoir la maîtrise, même pas à une variance près. Et aussi, un merci à Frédéric Bertrand du L3i pour son cours de C++.

Je remercie Yanys E. Wessels, mon mentor dans le cadre de « valorisation des compétences, un nouveau chapitre de la thèse » proposé par l'ABG, avec qui j'ai pu faire un bilan de cette période et de cette expérience afin de valoriser ce travail et acquérir une autre vision en considérant la thèse comme un projet.

J'ai une pensée pour l'école EIGSI (qui m'emploie), pour tous ceux qui ont cru en moi, m'ont soutenu, m'ont supporté (dans les deux sens du terme), m'ont accordé du temps et de la confiance. Merci à tous mes collègues de travail, les membres du L3i et étudiants (EIGSI, Univ. La Rochelle) qui se sont impliqués activement et avec passion dans ce projet : certains ont élaboré des enquêtes, d'autres ont récolté et traité des réponses et, enfin, d'autres, plus chanceux, ont élaboré, effacé ou débuggé des programmes. Merci à Iwan Fux, étudiant de HEVs - Suisse pour son travail que j'ai encadré pour son stage de fin d'études d'ingénieurs. Nicolas Malhené, un collègue, à qui j'avais promis de le citer pour avoir répondu aux questionnaires de mes enquêtes. Hello, Mister Philip Harvard, thank you.

Aussi, je pense à d'autres personnes qui ne sont pas citées mais que je n'oublie pas pour leur réconfort et leur soutien.

Je remercie ma filleule, Sophie Gantch, que j'ai sollicitée tardivement, pour son aide et ses "cours" d'anglais par téléphone d'Angleterre pour la relecture d'articles écrits en anglais. Hello, Johnattan, how are the musics for the game « Colin McRae Rally » ? One day, perhaps, you will product the sound for Mitsubishi motor.

Mes proches, ma famille, mes amis, que j'ai peu vus ces dernières années en raison de mon travail et de ma thèse en parallèle, mais avec qui je souhaite « combler le temps perdu ».

... en fin et enfin, le meilleur ou plutôt la meilleure pour la fin, ma femme, sans qui cette aventure aurait été bien difficile à mener à son terme, à moins que je l'eusse connue après avoir fait une thèse et que je fusse célibataire à ce moment-là, sûrement que d'autres n'auraient pas suivi. Beaucoup de mérites lui reviennent.

Mon fils, qui m'a procuré des rayons de soleil et de la joie dans des moments parfois bien difficiles, à qui je pensais pour m'endormir après de longues journées et à d'autres moments.

Je souhaite bonne lecture à celles et ceux qui s'intéresseront à ce mémoire.



Table des Matières

Introduction générale.....	14
Chapitre 1 - Modèle conceptuel pour l'organisation des déplacements urbains.....	23
1.1 Introduction.....	24
1.2 Cahier des charges d'un simulateur de trafic urbain.....	25
1.3 Réponses aux attentes d'un régulateur trafic.....	27
1.4 Modélisation de la chaîne de déplacements.....	44
1.5 Conclusion.....	58
Chapitre 2 - Modèle informatique pour l'organisation des déplacements urbains.....	60
2.1 Introduction.....	61
2.2 Choix d'une approche et d'outils de modélisation.....	62
2.3 Transport urbain et technologie multi agents.....	64
2.4 Architecture de notre simulateur trafic multi agents.....	68
2.5 Le régulateur et le SMA.....	82
2.6 Conclusion.....	85
Chapitre 3 - Processus décisionnel d'un agent individu.....	88
3.1 Introduction.....	90
3.2 Comportement d'un agent utilisateur du réseau routier urbain.....	91
3.3 Changements de logique de comportement d'un usager du réseau routier.....	98
3.4 Processus décisionnel d'un agent "individu".....	105
3.5 Procédure de classement par fonction "score".....	108
3.6 Etapes d'élaboration d'un modèle décisionnel.....	113
3.7 Processus d'apprentissage collectif.....	136
3.8 Vue globale de notre approche de modélisation des comportements des agents "individus".....	139
3.9 Conclusion.....	142
Chapitre 4 - Le parking, début et fin d'une chaîne de déplacements d'un "individu".....	144
4.1 Introduction.....	146
4.2 Les parkings dans la chaîne de déplacements.....	147
4.3 Choix de la destination pour une activité "multi sites".....	150

4.4	Choix d'un mode de transport pour une certaine catégorie sociodémographique et pour une certaine ville	160
4.5	Choix d'un parking pour une certaine catégorie sociodémographique et pour une certaine ville	177
4.6	Comportements des agents "individus" lors de l'absence d'une place de parking	183
4.7	A la recherche d'une place de stationnement	186
4.8	Conclusion.....	191
Chapitre 5 - Le régulateur intégré au système.....		193
5.1	Introduction	194
5.2	Simulation de l'activité de stationnement	195
5.3	Démonstrateur initié.....	198
5.4	Exploitation du démonstrateur par le régulateur	205
5.5	Interactivité régulateur - démonstrateur	215
5.6	Conclusion.....	224
Conclusions générales		225

Bibliographie

230

Table des Annexes

ANNEXE A - Approches et environnements pour la modélisation des déplacements	265
ANNEXE B - Outils et techniques de modélisation	279
ANNEXE C - Simulateurs à base d'activités utilisant les SMA	295
ANNEXE D - Mécanismes d'apprentissage	299
ANNEXE E - Plans orthogonaux, fusion d'informations et indicateur de robustesse	303
ANNEXE F - Etude de cas : ville de La Rochelle	310
ANNEXE G - Tests et validation d'un modèle	338
ANNEXE H - Quelques pistes pour aborder les phases préliminaires au déplacement	343

Liste des Figures

<i>Figure 1-1.</i> Niveaux d'analyse et de simulation	28
<i>Figure 1-2.</i> Représentation en 2D de la ville étudiée La Rochelle	29
<i>Figure 1-3.</i> Représentation d'un rond-point avec 4 entrées et 4 sorties [Augeraud2005]	29
<i>Figure 1-4.</i> Exemple de la correspondance entre une plaque 2D et la vue en 3D	31
<i>Figure 1-5.</i> Schéma de principe de notre simulateur 3D	32
<i>Figure 1-6.</i> Relation parfois antagoniste entre régulateur et usagers du réseau urbain	33
<i>Figure 1-7.</i> Cycle de vie d'un outil logiciel pour l'aide à la décision [Nance1994]	37
<i>Figure 1-8.</i> Phases de modélisation d'un système complexe [Ray2003]	37
<i>Figure 1-9.</i> Schéma de [DePalma2004] adapté pour les interactions urbanisme-transport à étudier	38
<i>Figure 1-10.</i> Interrelations entre modules en fonction de l'échelle temporelle	40
<i>Figure 1-11.</i> Description du modèle à 4 étapes	45
<i>Figure 1-12.</i> Modèle à 4 étapes avec rétroactions [Thevenin2002]	47
<i>Figure 1-13.</i> Schéma d'un modèle basé sur les activités	50
<i>Figure 1-14.</i> Chaîne d'activités périurbaines (dans [Thevenin2002])	50
<i>Figure 1-15.</i> Exemple d'une zone de cheminement potentiel [Hägerstrand1970]	52
<i>Figure 1-16.</i> Entrées et Sorties pour les modules liés au stationnement	56
<i>Figure 1-17.</i> Notre modèle 4 étapes à base d'activités intégrant la phase stationnement	57
<i>Figure 2-1.</i> Les 3 axes pour des outils de modélisation [Mazouzi2001]	63
<i>Figure 2-2.</i> Notre proposition pour l'architecture du simulateur [Augeraud2005]	68
<i>Figure 2-3.</i> Les principaux paquetages d'agents, interactions et modules de notre simulateur	70
<i>Figure 2-4.</i> Diagramme de classes de la réalisation d'activités par les agents "individus"	71
<i>Figure 2-5.</i> Diagramme de classes décrivant les agents "individu"	72
<i>Figure 2-6.</i> Diagramme d'états d'un agent "individu"	73
<i>Figure 2-7.</i> Modèle d'un agent autonome [Augeraud2006] adapté de [Richard2001]	74
<i>Figure 2-8.</i> Diagramme de classes décrivant les agents "points d'attraction"	74
<i>Figure 2-9.</i> Diagramme d'états d'un agent "points d'attraction"	75

<i>Figure 2-10.</i> Relation entre le point adresse, le bâtiment et la rue [Castro1999]	77
<i>Figure 2-11.</i> Schéma entité-relation décrivant la notion d'adresse [Castro1999]	77
<i>Figure 2-12.</i> Diagramme de classes des modes de transport	78
<i>Figure 2-13.</i> Diagramme d'états d'un agent "véhicule" (modes de transport)	79
<i>Figure 2-14.</i> Diagramme de classes de l'offre de stationnement (agents "parking")	80
<i>Figure 2-15.</i> Diagramme d'états d'un agent appartenant à la catégorie "offre de stationnement"	81
<i>Figure 2-16.</i> Diagramme de classes du paquetage information	82
<i>Figure 2-17.</i> Diagrammes de cas d'utilisation généraux pour nos travaux	83
<i>Figure 2-18.</i> Diagramme de cas d'utilisation "Définir les comportements des individus"	83
<i>Figure 2-19.</i> Diagrammes de cas d'utilisation "Etablir agenda" et "Exécuter l'agenda"	84
<i>Figure 2-20.</i> Relation entre les 3 acteurs concernant les modèles décisionnels	85
<i>Figure 3-1.</i> Structure générale interne d'un agent [Briot2001]	92
<i>Figure 3-2.</i> Boucle perception-décision-exécution d'un agent immergé dans le trafic	93
<i>Figure 3-3.</i> Choix d'un agent "individu"	96
<i>Figure 3-4.</i> Processus décisionnel individuel [Stern2002]	102
<i>Figure 3-5.</i> Apprentissage par renforcement avec récompenses venant de l'environnement [Hait2000]	104
<i>Figure 3-6.</i> Etapes du processus décisionnel [Cirillo2005]	105
<i>Figure 3-7.</i> Notre processus de choix préliminaires et d'apprentissage	106
<i>Figure 3-8.</i> Démarche décisionnelle incluant la phase de choix préliminaires et le mécanisme d'apprentissage	107
<i>Figure 3-9.</i> Principaux modèles à choix discrets [Afsa Essafi2003]	109
<i>Figure 3-10.</i> Architecture de l'exploitation du modèle décisionnel	112
<i>Figure 3-11.</i> Analogie entre maximisation d'un score et optimisation d'un procédé	115
<i>Figure 3-12.</i> a- Variabilité naturelle de la réponse / b- Interaction entre les paramètres A et B	116
<i>Figure 3-13.</i> Table de préférences déclarées	117
<i>Figure 3-14.</i> Tables de scores attribués par un individu pour divers scénarios décrits par des variables pour des conditions de trafic différentes	118
<i>Figure 3-15.</i> Plan factoriel (trait épais) issu d'un plan complet (tous les traits)	119
<i>Figure 3-16.</i> Exemple de la table orthogonale $L_{27}(3)^{13}$ avec ses interactions	120

<i>Figure 3-17.</i> Combinaison de M sources d'information selon la loi de Dempster	125
<i>Figure 3-18.</i> Démarche d'évaluation des alternatives hétérogènes	129
<i>Figure 3-19.</i> Effets moyens du paramètre A rapportés à la moyenne des résultats	131
<i>Figure 3-20.</i> Plans croisés pour l'étude de l'indicateur de robustesse.....	136
<i>Figure 3-21.</i> Architecture logicielle pour le processus décisionnel évolutif	139
<i>Figure 4-1.</i> Chaîne de déplacements incluant le stationnement.....	147
<i>Figure 4-2.</i> Modèles de choix de destinations et de parkings [Zhang2005].....	148
<i>Figure 4-3.</i> . . . suite de [Zhang2005]	148
<i>Figure 4-4.</i> Modèles de choix de destinations [Hammadou2004].....	150
<i>Figure 4-5.</i> Importance des destinations les unes par rapport aux autres [Pozsgay2001]	151
<i>Figure 4-6.</i> Description des étapes pour l'obtention de l'"affinité d'un site".....	153
<i>Figure 4-7.</i> Représentation de l'attractivité	153
<i>Figure 4-8.</i> Table de vérité des règles pour déterminer le niveau d'affinité d'un site.....	154
<i>Figure 4-9.</i> Architecture d'une démarche décisionnelle avec des niveaux flous.....	155
<i>Figure 4-10.</i> Comparatif des résultats "calculés" et les données mesurées pour le nombre de trajets entre parkings (figure b : jours du week-end)	160
<i>Figure 4-11.</i> Panorama des modèles existants de choix modal [Szeto2005].....	161
<i>Figure 4-12.</i> Diagramme d'activités du processus d'exécution de l'agenda	163
<i>Figure 4-13.</i> Diagramme du processus d'élaboration de l'agenda final avec ou sans négociation	164
<i>Figure 4-14.</i> Interactions entre partenaires concernant l'élaboration de l'agenda individuel hebdomadaire	165
<i>Figure 4-15.</i> Interactions entre deux agents pour la décision de covoiturage.....	166
<i>Figure 4-16.</i> RdP : Interactions entre agents "individus" de différent groupes	167
<i>Figure 4-17.</i> Etats possibles d'un agent "individu" en phase de négociation.....	168
<i>Figure 4-18.</i> Scénarios amenant au covoiturage ou à un choix de déplacement individuel. 170	
<i>Figure 4-19.</i> Algorithme de la fonction "Attribution de la voiture"	171
<i>Figure 4-20.</i> Architecture décisionnelle pour le choix du mode de transport.....	174
<i>Figure 4-21.</i> Scénarios pour le choix du parking de destination [Boussier2005b].....	179
<i>Figure 4-22.</i> Comportements de 2 catégories de conducteurs pour le choix des parkings (pourcentage de restitution de voitures pour les 2 stations-parkings).....	183
<i>Figure 4-23.</i> Comportements de l'agent "conducteur" arrivant sur le lieu de stationnement	184

<i>Figure 4-24.</i> Processus décisionnel au niveau de chaque intersection	188
<i>Figure 4-25.</i> Scénarios de recherche d'une place de stationnement autour du parking.....	189
<i>Figure 4-26.</i> Table de vérité pour le cas d'une activité fixe	190
<i>Figure 5-1.</i> Diagramme de classes des interrelations entre les parkings et les autres agents	197
<i>Figure 5-2.</i> Représentations des parkings à l'échelle macroscopique et microscopique.....	198
<i>Figure 5-3.</i> Grille du démonstrateur représentant une zone urbaine.....	200
<i>Figure 5-4.</i> Calcul des distances aux entrées du parking.....	201
<i>Figure 5-5.</i> Directions admises pour un véhicule (association d'agents "voiture-individu") au niveau d'une intersection	201
<i>Figure 5-6.</i> Actions possibles pour une voiture	202
<i>Figure 5-7.</i> Etapes "entrée-sortie" d'un parking	202
<i>Figure 5-8.</i> Description d'un scénario testé avec le démonstrateur	203
<i>Figure 5-9.</i> Relations entre les modules d'organisation des déplacements	206
<i>Figure 5-10.</i> Graphes de distribution des choix des individus par étape	207
<i>Figure 5-11.</i> Démonstrateur simulant une zone possédant des parkings.....	210
<i>Figure 5-12.</i> Ensemble des courbes décrivant l'activité d'une zone possédant deux parkings	213
<i>Figure 5-13.</i> Vue décrivant un scénario pour le démonstrateur version N+1	214
<i>Figure 5-14.</i> Boîtes de dialogue de paramétrage des parkings et voitures	215
<i>Figure 5-15.</i> Interaction du régulateur avec le démonstrateur	216
<i>Figure 5-16.</i> Effets de la mise en place des stratégies	217
<i>Figure 5-17.</i> (a) Vision "boîte noire" - (b) Vision séquentielle	218
<i>Figure 5-18.</i> Exemple (fictif) des effets moyens et des rapports signal/bruit en fonction des variables d'entrée	219
<i>Figure 5-19.</i> Le régulateur est dans la boucle.....	223

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1-1.</i> Comparaison entre les approches analytique et systémique (adapté à partir de [Ray2003])	39
<i>Tableau 1-2.</i> Synthèse de modèles "comportementaux" de déplacement urbain.....	54
<i>Tableau 3-1.</i> Plan complet pour 2 paramètres à 2 niveaux	117
<i>Tableau 3-2.</i> Relation entre les masses selon les 3 principales théories de l'évidence.....	127
<i>Tableau 3-3.</i> Tableau de l'analyse de la variance (ANOVA).....	133
<i>Tableau 3-4.</i> Classement des actions selon le test de Fisher-Snedecor	133
<i>Tableau 3-5.</i> Les 3 formes standards du rapport s/n [traduit de Al-Aomar2002].....	135
<i>Tableau 4-1.</i> Variables et valeurs floues pour l'"Affinité d'un site"	154
<i>Tableau 5-1.</i> Légende des couleurs pour les mobiles se déplaçant sur la grille	199
<i>Tableau 5-2.</i> Légende des couleurs utilisées dans la plaque 3D du démonstrateur	199
<i>Tableau 5-3.</i> Plan réduit soumis à des régulateurs et des catégories d'individus pour l'exemple d'implantation d'un "Park&Ride"	221

Introduction générale

I - Cadre général

Les systèmes complexes sociétaux (entreprises, systèmes urbains, systèmes de transport, ...) sont d'autant plus difficilement abordables, qu'ils opèrent avec des entités qui raisonnent, choisissent, interagissent et peuvent, selon le contexte, changer de préférences et donc de comportement.

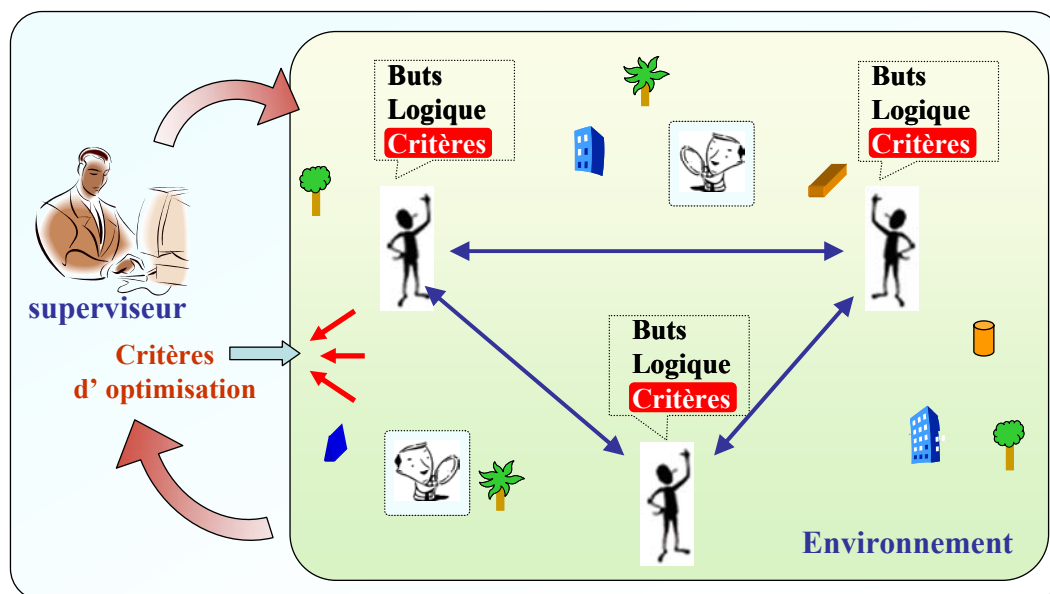
Pour répondre à leurs propres objectifs, les individus sont confrontés à une multitude de choix dont les implications sont bien souvent difficilement mesurables. Dès lors qu'on se préoccupe de "choix", il est naturel de chercher à modéliser comment comparer en terme de préférence les objets de la décision. Chaque individu commence par évaluer les différentes possibilités qui s'offrent à lui en se basant sur certains critères et perceptions, puis choisit la solution qui lui paraît la plus adéquate en accord avec ses objectifs, ses contraintes et ses expériences antérieures.

Si généralement les systèmes complexes sont aussi qualifiés d'être dynamiques (l'état à un instant donné dépend des paramètres courants mais également des états antérieurs), un système sociétal se démarque par sa complexité. Son état (n'étant pas obligatoirement chaotique) et ses fluctuations (qui ne sont pas accidentelles mais ont un rôle central) peuvent être attribués à deux causes qui sont de plus difficilement dissociables : la diversité des interactions entre les individus agit sur les décisions des individus avec des répercussions à des échelles temporelles différentes ; souvent, l'environnement d'un système fluctue faisant que des perturbations ou des variations de celui-ci peuvent venir affecter un équilibre déjà précarisé par l'hétérogénéité des comportements.

L'effet est encore plus drastique lorsque des actions volontaires sont menées, par exemple, lorsque des superviseurs envisagent un nouvel investissement ou une nouvelle stratégie ; à ce niveau le décideur prend une décision en fonction des priorités qu'il accorde à l'enjeu de la décision (poids) et au risque pris (confiance). Cette décision n'a pas toujours, ni comme but ni comme effet principal, l'amélioration de la qualité d'un service (telle qu'elle est perçue par l'individu), elle peut même être franchement antagoniste. Cela peut se traduire par un changement de préférences et de comportement de l'individu et, au niveau global, cela peut induire des effets imprévisibles, irréversibles, en total désaccord avec les objectifs fixés par le superviseur.

Pour ces raisons, la simulation informatique est devenue un outil très sollicité par les superviseurs pour évaluer les effets de leurs stratégies en fonction des comportements des individus dans un contexte fortement dynamique. Celle-ci est communément appelée démarche d'aide à la décision, bien que l'approche par simulation cherche plutôt à reproduire le comportement du système, à voir de quelle manière il est susceptible de réagir, puis à utiliser des modèles pour tester des scénarios (l'approche « what ... if ? »).

Or, ces dernières années, les attentes des utilisateurs de ces outils se sont étendues à la recherche d'une sorte d'optimisation centralisée qui doit mettre d'accord superviseurs et bénéficiaires des services, en satisfaisant au mieux les objectifs des uns et les préférences des autres [Avrillon2005]. C'est une démarche que nous appelons du type « how ... if », où c'est bien le simulateur qui suggérerait des scénarios à tester ou des rectifications de stratégies. Une sorte d'aide ... à l'aide à la décision.



L'objectif principal de nos travaux est de **proposer**, dans un contexte applicatif, **un cadre méthodique permettant de simuler le comportement d'un système complexe dynamique** dans lequel évoluent et interagissent des entités autonomes ayant des perceptions, des buts différents et des comportements adaptatifs. Nous accordons une attention particulière à l'exploitation personnalisée et interactive dont doit bénéficier un outil de simulation utilisé par un superviseur : tester des scénarios à variables dont il souhaite connaître les impacts, dans un contexte particulier, et envisager des stratégies qui satisferaient au mieux son cahier des charges ainsi que les exigences des utilisateurs d'un service.

II - Contexte applicatif de notre Recherche

Les évolutions du transport urbain sont étroitement liées aux changements des modes de vie et aux transformations des formes urbaines. Non seulement la structure et la performance du système de transport fournissent des opportunités à la mobilité, mais sur le long terme, elles influencent les schémas spatiaux de croissance et le niveau de l'activité économique à travers l'accessibilité qu'elles procurent.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre du développement d'un simulateur urbain de trafic multimodal. Le champ d'application de ce que nous concevons comme un outil d'aide à la décision, 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 sociodémographique. L'idée de base est de prendre en considération la causalité transport – urbanisation dans les deux sens : la répartition de la population et des activités conditionne la formation des déplacements, cependant la structure urbaine est une donnée qui, dans la durée, peut jouer sur l'offre de transport.

Dans ce contexte à fortes interrelations, nous nous sommes focalisés sur l'organisation de la chaîne des déplacements des usagers d'un réseau routier urbain avec comme maillon indissociable, l'activité de stationnement soumise à l'hétérogénéité des choix en amont et en aval, cause de congestion dans les villes. Pour ce faire, ces travaux manipulent des concepts propres à trois domaines différents qui concourent à la spécification des objectifs : la modélisation des systèmes complexes, la modélisation d'entités à comportements adaptatifs et le système de classification.

Problématique 1-) **modélisation d'un système complexe**

Le degré de complexité d'un système est souvent défini à partir du nombre de niveaux d'organisation, d'éléments par niveau, de relations entre les niveaux, de relations entre les éléments par niveau et de la nature ou de la complication des relations [Ray2003]. Rien que ce point de vue permettrait de classer un système de transport, avec ses routes, usagers, intersections, parkings, feux, ... comme un **sous-système complexe d'une ville** pouvant être étudié à des niveaux de granularité différents. Or l'évolution temporelle d'un tel système, aussi bien que les échanges avec le monde qui l'entoure, lui confère également un **caractère ouvert et évolutif**. Sujet à des nombreuses fluctuations dues aux accidents, phénomènes de congestion, modifications des infrastructures, absence de places de stationnement, ..., le système de transport urbain est aussi **fortement instable**. En ajoutant la diversité des interactions entre les éléments statiques ou dynamiques, on conclut aisément qu'il s'agit d'un système sur lequel les études sont difficiles à affiner et les prédictions souvent hasardeuses.

Pour modéliser les états et les interrelations entre les entités, nous avons utilisé des diagrammes UML et des réseaux de Petri (sans et avec l'extension colorés) qui possèdent les avantages d'une formalisation simple et claire des éléments de modélisation et des interactions.

Problématique 2-) **modélisation d'entités à comportements adaptatifs (agents)**

La complexité de modélisation d'un système complexe est également liée à la difficulté de prédire des comportements des usagers du réseau routier dans un certain contexte. Les limites des lois mathématiques sont bien connues lorsqu'il s'agit de modéliser le comportement d'une entité individuelle devant un choix (itinéraire, parking, ...) ou une situation imprévue (accident, information en temps réel, ...).

Simuler le comportement fortement hétérogène des usagers d'un système de transport multimodal, intégrer des expériences acquises et ce, selon des perceptions variées, illustrer la dynamique globale du système, voici quelques aspects qui suggèrent l'emploi d'une approche individu-centré. Le paradigme multi agents convient particulièrement à une exécution distribuée de la simulation et à la reproduction des interactions entre les entités du système de

transport. L'acquisition des connaissances et l'apprentissage sont des atouts qui peuvent donner une forte connotation comportementale aux entités décisionnelles.

Reste à établir la manière dont l'agent évalue les différentes possibilités qui s'offrent à lui, les critères sur lesquels son choix est basé et comment, tout en intégrant un nombre élevé de critères, ne pas induire un fort coût calculatoire au niveau du simulateur.

Problématique 3-) système de classification intégré dans un outil d'aide à la décision pour le Système de Trafic Urbain

Le Système de Trafic Urbain (STU) a pour objet de définir les principes généraux de l'organisation des transports, de la circulation et du stationnement, ainsi que les livraisons de marchandises dans le périmètre des transports urbains d'une agglomération. Six objectifs sont fixés par la loi :

- la diminution du trafic automobile ,
- le développement des transports collectifs et des modes économes et les moins polluants (marche à pied, deux roues) ,
- l'aménagement et l'exploitation du réseau principal de voirie ,
- la réorganisation et l'aménagement du stationnement ,
- le transport et la livraison de marchandises ,
- l'encouragement aux entreprises et aux collectivités publiques à favoriser le transport de leurs employés par les transports publics ou le covoiturage .

Cependant tout changement désiré risque d'avoir des impacts imprévus comme de rendre la situation, dans certains cas, irréversible (par exemple l'étalement urbain, la croissance de la motorisation, les villes « propres visuellement » sans tramway, etc.). Ceci explique l'intérêt grandissant de la part de politiques, spécialistes en urbanisme ou en ingénierie trafic pour des outils permettant la détection de ces risques et de leurs conséquences.

En regard de ces exigences, les outils opérationnels existants sous forme de logiciels n'offrent que peu de réponses et se prêtent mal à des simulations de stratégies, surtout pour la mise en place de nouvelles alternatives de transport.

Les modèles, la démarche, le cadre méthodique et l'outil que nous envisageons de développer doivent permettre au régulateur de répondre aux questions suivantes :

- *Quels sont les effets de mesures de politiques de transport sur la redistribution modale des flux ?* Afin de répondre à cette question, l'outil doit être capable de simuler l'évolution de la masse des déplacements, de leur répartition modale, de leur répartition géographique. Il doit être basé sur une approche prenant en considération le partage modal et les interactions entre les modes individuels et les modes collectifs (notamment les conflits d'usage sur la voirie).

- *Quel est l'effet des modifications de structures urbaines et de localisation des activités ?* La demande de transport est une demande intermédiaire liée à la réalisation d'activités économiques ou privées. La mobilité est induite par la distribution des activités sur un

territoire. L'outil doit intégrer l'impact de la modification des formes urbaines et de la localisation des points d'attractivité sur la mobilité.

- *Quels sont les effets de mesures de politiques de stationnement sur les déplacements en voiture ?* Dans ce but, il faut traiter les activités de stationnement, peu abordées dans la littérature de spécialité, comme des éléments incontournables dans la modélisation d'un système de transport et non pas comme des constantes de calibration pour assurer un équilibre entre flux entrant et sortant d'un tronçon routier.

- *Quel est le rôle du contexte socio-économique dans l'évolution du système des déplacements urbains ?* La sensibilisation pour la pollution atmosphérique et sonore, l'augmentation du prix de carburant, la fermeture des entreprises sont quelques événements qui risquent d'affecter les mentalités, le niveau de vie d'un ménage et donc les habitudes (le covoiturage, l'emploi des modes de transport propres, ...). L'outil doit permettre à l'utilisateur de manipuler l'ensemble des caractéristiques sociodémographiques afin de dégager un caractère évolutif de la demande de déplacement.

- *Quels sont les scénarios que le régulateur devra tester afin de satisfaire au mieux ses propres buts et les préférences des utilisateurs du réseau de transport ?* Il s'agit, à travers la modélisation des comportements des individus, de prévoir des tendances majeures dans leurs réactions devant un changement de l'environnement urbanisme/transport. Le simulateur devra fournir au régulateur, dans la mesure où ce dernier le souhaite, des éléments lui permettant de faire un tri préliminaire de stratégies à tester par simulation.

Pour une représentation réaliste des comportements des usagers du réseau de transport, le processus décisionnel doit être issu d'une analyse comportementale réelle qui s'appuie sur des variables d'entrée aussi bien quantitatives (prix, distance, ...) que qualitatives (facilité d'accès, attractivité, ...). L'approche doit permettre une perception différente de leurs effets selon la catégorie sociale à laquelle appartient un individu, aussi bien que selon les particularités d'une agglomération urbaine, qui font que la perception de certaines variables est différente.

Pour ce faire, nous avons réuni un panier original de concepts et d'outils issus de domaines variés : la modélisation de la demande de déplacement (ingénierie trafic), l'optimisation des procédés industriels (plans orthogonaux, modèles de Vigier et de Doehlert), les techniques de Data Mining (théorie de Dezert-Smarandache, logique floue), les concepts qualité (indicateurs de robustesse), les démarches marketing (enquêtes à préférences déclarées) ou encore les approches de la théorie micro-économique (maximisation de l'utilité). Leur emploi a essayé de reproduire, de façon réaliste, l'enchaînement décision-apprentissage auquel est sujet un certain type d'agents "individus" placés dans un certain contexte. Le choix des stratégies d'un régulateur s'appuie, également, sur cet ensemble d'outils et de concepts.

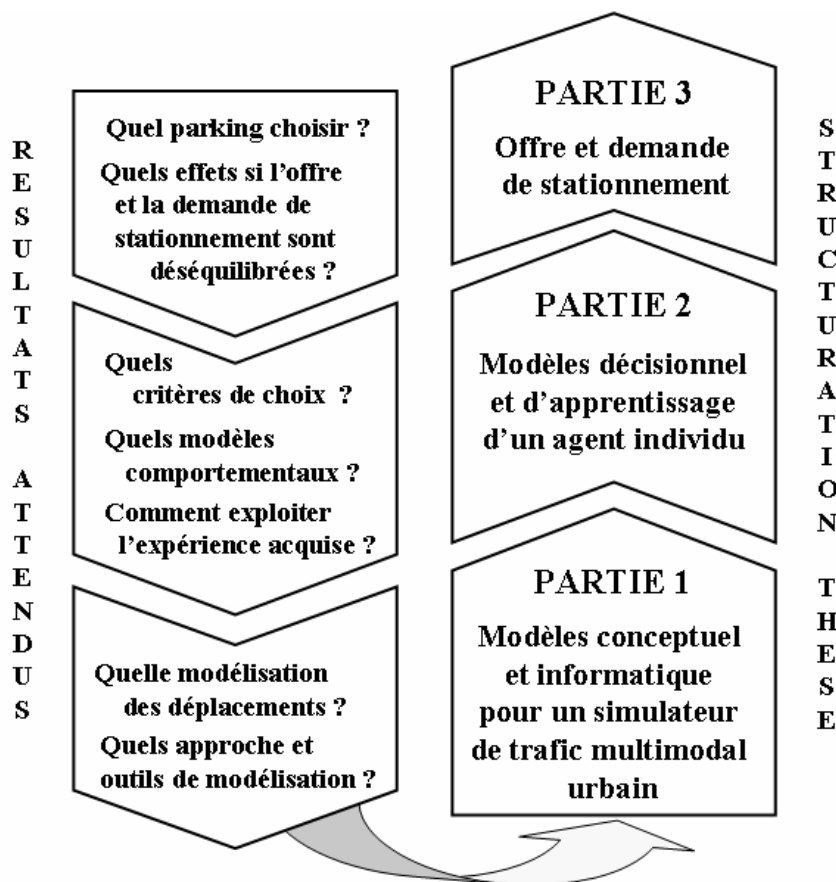
III - Structuration du document

Ces problématiques sont réunies dans la simulation des activités de stationnement et des effets du déséquilibre offre-demande de stationnement sur le degré de congestion des routes

dans une zone urbaine. A la recherche d'une représentation réaliste des comportements, nous nous sommes d'abord intéressés à la façon de modéliser et de différencier les logiques comportementales des divers usagers du réseau routier urbain. Pour illustrer l'évolution des comportements dans un contexte transport-urbanisation fortement dynamique, nous avons intégré le stationnement dans un modèle de la chaîne des déplacements en ville.

Notre travail a donc été structuré en trois parties.

La **première** a pour objet de fournir une approche pour la modélisation de la demande de déplacement et sa mise en œuvre pour une architecture multi agents. Une attention particulière est portée aux phases liées à la demande de stationnement. La **seconde** partie propose une démarche de modélisation des mécanismes décisionnels et d'apprentissage des agents "individus" dans un contexte fortement dynamique. L'application de ces approches est présentée dans la **troisième** partie pour illustrer le choix d'un parking aussi bien que les conséquences du déséquilibre offre-demande de stationnement.



Partie 1 : Modèles conceptuel et informatique pour un simulateur de trafic multimodal urbain :

L'objet du **chapitre 1** de ce document est l'analyse des modèles existants et l'élaboration d'un modèle conceptuel pour la demande de déplacement dans un environnement urbain. A partir de la modélisation traditionnelle à quatre étapes (génération, distribution spatiale, choix modal et affectation sur les réseaux) que nous employons conjointement avec les modèles à base d'activités, nous proposerons une architecture modulaire qui définit le

stationnement comme une étape incontournable dans l'analyse de la demande de déplacement [Litman2006].

L'**annexe A** offre en complément une **synthèse de modèles et outils** que nous avons analysés, retenus ou adaptés afin de répondre au mieux aux attentes d'un régulateur trafic.

Le **chapitre 2** est consacré au choix d'une approche de modélisation et de simulation informatique des entités qui composent les systèmes urbain et transport et de leurs interactions. Nous retenons le point de vue des modèles de simulation dits comportementaux ou "individu-centrés", dont la conception repose sur les principes multi agents. Les états ou les interrelations des agents sont décrits en s'appuyant sur les formalismes UML et les Réseaux de Petri avec l'extension Colorés.

Nous avons proposé une architecture multi agents pour la partie concernant l'activité des parkings de notre simulateur basé sur des agents "physiques" (ayant des correspondances avec le monde réel) et un agent "sous-traitant" (pexavvi) dédié à la manipulation des modèles décisionnels. Ceci offre un cadre détaillé de simulation de l'activité de stationnement et des effets du déséquilibre offre-demande.

Les **annexes B, C et D** viennent apporter des compléments sur les formalismes UML et Réseaux de Petri pour la représentation des états et interrelations d'un système complexe, ainsi que sur la technique multi agents pour la simulation de comportements adaptatifs, en particulier pour les simulateurs de trafic urbain.

Partie 2 : Modèles décisionnel et d'apprentissage d'un agent "individu" :

Le **chapitre 3** est consacré à l'élaboration d'une approche de modélisation des comportements d'un agent "individu" qui, face à des choix multiples, doit pouvoir évaluer, classer, choisir l'action qui satisfait au mieux ses buts.

Nous proposons un cadre méthodique d'élaboration de modèles décisionnels adaptatifs basée sur un couplage entre les enquêtes à préférences déclarées, les techniques d'optimisation des procédés industriels et les techniques de "Data Mining" (théorie des croyances, logique floue). En fonction de variables quantitatives ou qualitatives, plus ou moins bien spécifiées, cette approche permet d'évaluer la "qualité" des alternatives perçues par un agent lors d'une étape trafic. Dans un contexte dynamique, la fiabilité d'un modèle décisionnel est liée aux fluctuations (voire changements) de comportements des usagers, souvent dus aux contextes exogènes au jeu de variables qui ont généré le choix.

Notre solution repose sur l'élaboration d'un modèle évolutif permettant de réactualiser systématiquement la base de données avec les préférences des usagers et d'intégrer de nouveaux choix potentiels sans générer des coûts calculatoires prohibitifs.

Un mécanisme de négociation est également exploité pour favoriser l'apprentissage par partage d'expérience au sein d'un groupe.

Dans l'**annexe E**, nous avons réuni l'ensemble des concepts à la base de l'approche et du cadre méthodique que nous proposons, du fait de leurs caractères hybrides.

Partie 3 : Offre et demande de stationnement :

Le **chapitre 4** est consacré à la mise en œuvre de ce cadre méthodique (modèles de choix préliminaire, mécanismes de négociation et apprentissage) tout au long de la chaîne de déplacements pour laquelle le stationnement est un maillon indissociable (choix de destinations, choix modal, négociation pour co-voiturage, choix de parking, comportement en l'absence d'une place disponible et choix d'itinéraire autour d'un parking). Des études de cas effectuées auprès de catégories sociodémographiques spécifiques et dans une certaine ville permettront, d'une part, de tester la validité et la flexibilité du cadre méthodique et, d'autre part, d'alimenter une application logicielle destinée à un régulateur trafic.

Les **annexes F et G** montrent l'application de notre cadre méthodique à travers des études de cas pour un environnement réel (ville de La Rochelle) tout au long de la chaîne des déplacements avec le traitement statistiques des données, des tests de validité et de sensibilité vérifiant notre approche.

Le **chapitre 5** est consacré à la problématique de stationnement [Litman2006], sujet à part entière, dont la prise en compte nous démarque par rapport aux travaux classiques du domaine. Nous montrons comment, à partir des décisions individuelles et évolutives des usagers, un régulateur peut disposer des informations globales sur la distribution des flux par mode de transport, par destination et par parking. Des indicateurs "parking" seront reliés à des indicateurs "trafic" afin de traiter l'activité de stationnement comme une partie intégrante de la chaîne de déplacements. Placé devant une série de stratégies à tester, le régulateur peut disposer des informations séquentielles sur les choix potentiels des usagers et peut choisir une stratégie qui satisferait au mieux à ses buts et aux attentes des usagers des réseaux de transport urbain. Finalement, nous suggérons l'emploi de ce cadre méthodique au développement des outils d'aide à la décision opérant dans l'étude des systèmes complexes sociétaux.

Dans l'**annexe H**, nous avons proposé des pistes pour poursuivre ces travaux, certains aspects devant être abordés et/ou approfondis, comme par exemple une autre manière de considérer les comportements des usagers ds systèmes de trafic urbain.

Les **conclusions** et les **perspectives** résument notre contribution pour le développement du simulateur, ce qui a été fait, ce qu'elle peut apporter, ce qui n'a pu être fait, et une description des perspectives et de développements possibles. Comme dans la plupart des cas, lorsque le sujet est en lien avec un projet novateur, nous avons le sentiment d'avoir, au travers d'une contribution modeste, apporté que peu de choses, ceci étant toujours perfectible.

Partie 1 : Modèles conceptuel et informatique
pour la phase d'organisation des
déplacements urbains

Chapitre 1 - Modèle conceptuel pour l'organisation des déplacements urbains

Chapitre 1 -	Modèle conceptuel pour l'organisation des déplacements urbains	23
1.1	Introduction	24
1.2	Cahier des charges d'un simulateur de trafic urbain	25
1.2.1	Les attentes relatives aux problématiques abordées.....	25
1.2.2	Les attentes relatives à la forme des outils employés.....	27
1.3	Réponses aux attentes d'un régulateur trafic.....	27
1.3.1	Cahier des charges et éléments de différenciation de notre simulateur	27
1.3.1.A	L'utilisateur construit et modifie la ville étudiée	29
1.3.1.A.1	Représentation 2D de la ville étudiée.....	29
1.3.1.A.2	Représentation 3D de la ville étudiée.....	30
1.3.1.B	Le régulateur est un utilisateur passif ou acteur.....	31
1.3.1.C	L'utilisateur agit sur l'organisation des déplacements et le stationnement..	32
1.3.2	Problématiques pour le développement du Module Organisation des Déplacements	34
1.3.3	Premiers cadrages pour la modélisation de la demande de déplacements	36
1.3.3.A	Spécification.....	37
1.3.3.B	Description du système	39
1.3.3.C	Dynamique	40
1.3.3.D	Conception	41
1.3.3.E	Validation.....	43
1.4	Modélisation de la chaîne de déplacements	44
1.4.1	Etat de l'art : modèles "comportementaux"	44
1.4.1.A	Modèles à quatre étapes	45
1.4.1.B	Modèles à choix discrets ou désagrégés.....	47
1.4.1.C	Modèles basés sur les activités (activity-based models).....	49

1.4.1.D	Modèles dynamiques.....	51
1.4.1.E	Modèles espace-temps-activité	52
1.4.2	Notre choix pour la modélisation de la phase « organisation des déplacements » : un modèle hybride.....	53
1.4.3	Les étapes du modèle d'organisation des déplacements en lien avec l'activité de stationnement.....	55
1.5	Conclusion.....	58

1.1 Introduction

Ces trente dernières années, les tendances caractérisant le système de déplacements urbains sont l'allongement des distances parcourues et une forte croissance de la mobilité avec usage d'un véhicule privé, au détriment des transports collectifs. Face aux problèmes de congestion principalement corrélés à celui du contexte économique de raréfaction des ressources publiques, à la multiplication des accidents, les solutions qui s'imposaient au début des années soixante, reposaient essentiellement sur un élargissement des voies ou sur la réalisation de rocades de contournement [Masson2000]. L'investissement affecté à l'élaboration de telles infrastructures pour la collectivité étant loin d'être négligeable, il apparaissait indispensable de cerner au mieux les besoins des usagers et de définir ainsi les principales priorités.

Ces évolutions justifient un nombre significatif de recherches consacrées à l'étude d'un système de transport urbain et ses impacts (voir les travaux de [Scemama-siteWeb]). Pour l'étudier, différents moyens peuvent être mis à contribution mais néanmoins la modélisation est l'instrument privilégié.

Un projet de recherche RATP-PREDIT portant sur l'évaluation des outils de prévision trafic en France [Predit2000] fait apparaître que la modélisation du trafic est généralement perçue par les utilisateurs (les "régulateurs") de ces outils comme ayant pour seule ambition de proposer un calcul des flux attendus aux heures les plus chargées avec, comme motif de déplacement, la chaîne domicile-travail aux heures de pointe. Si cette approche est acceptable dans une logique de dimensionnement, elle ne l'est plus dans une logique d'aide pour la prise de décision, où les comportements de mobilité doivent être bien compris afin de guider les choix et définir des scénarios stratégiques pertinents.

Les interactions urbanisme-transport font apparaître le besoin d'un outil d'aide à la décision que pourraient se partager aussi bien des ingénieurs trafic, des spécialistes en aménagement du territoire que des démographes. Par manque de polyvalence, la barrière reste encore étanche entre ces trois types de régulateurs potentiels. Les premiers n'ont en général qu'une approche mathématique, microéconomique de la simulation de trafic. Les seconds n'ont, en général, qu'une approche qualitative des aspects trafic car, pour eux, les transports ne sont qu'une branche de l'urbanisme. Quant aux troisièmes, ils raisonnent essentiellement

en terme de migration de populations au niveau d'une ville et ne prennent pas en compte l'accessibilité et la desserte par les transports.

Lorsqu'on se lance dans l'élaboration d'un tel outil, il convient, dans un premier temps, de faire un inventaire des attentes d'un potentiel régulateur de trafic urbain (l'utilisateur visé) et de les exprimer en termes d'objectifs opérationnels du simulateur. Ce sera l'occasion de cadrer nos travaux dans le contexte de développement de ce simulateur et de distinguer les premiers verrous à lever.

Après une brève présentation des éléments de différenciation du simulateur, ce chapitre décrira l'architecture modulaire qui est en lien avec l'offre et la demande de stationnement en ville. Une analyse porte sur des approches dont l'aspect comportemental est plus ou moins marqué, afin de proposer un modèle hybride modélisant la chaîne de déplacements des usagers comme étant le résultat des activités à mener et intégrant l'activité de stationnement comme maillon indissociable, bien que souvent négligée par les modèles ou outils.

1.2 Cahier des charges d'un simulateur de trafic urbain

Pour l'expert chargé de l'organisation et de la régulation, l'objectif opérationnel d'un simulateur de trafic urbain est de tester, à l'échelle d'une région urbaine, l'impact des politiques en matière de développement du réseau de transports ou les conséquences de la modification du plan d'occupation des sols. Il se doit de répondre à l'étude des actions ponctuelles visant la modification de certains indicateurs (rendre le trafic plus fluide, modifier la vitesse de circulation, aménager une zone piétonne, intégrer un parking, ...) aussi bien qu'à des cibles plus globales (réguler l'ensemble du système des transports en harmonie avec l'urbanisation, réduire la circulation routière et ses effets néfastes, ...).

Afin de mieux cerner les raisons expliquant la méfiance d'un régulateur trafic (en France) à l'égard d'un tel outil, nous avons consulté des représentants du Service des Transports de la communauté d'agglomération de La Rochelle [Boussier2003], ainsi que des bilans, des documents de travail élaborés par des groupes de recherche rattachés à l'INRETS [Bhourri2002] ou des études, par exemple, pour le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement [DPdoc1997], [Raux1998], [Bartolomei2002], [Kolski2004], [Anli2005].

1.2.1 Les attentes relatives aux problématiques abordées

La complexification d'un système de transport urbain a considérablement alourdi la tâche des experts du transport et des décideurs publics qui doivent faire face à plusieurs problématiques. Outre les préoccupations d'investissement et de congestion, ils doivent intégrer les problèmes de sécurité, d'efficacité du système de transport, d'équité et d'environnement durable. Leurs attentes en matière de performances d'un simulateur ont également suivi :

- **l'amélioration du traitement de la multi modalité** : elle est relativement mal appréhendée par les outils existants et le plus fréquemment associée à l'unique optimisation de la valeur du temps (gain du temps des usagers) [DePalma2001]. On ne peut reprocher que partiellement aux modélisateurs d'avoir abordé de manière insuffisante l'aspect multimodal des déplacements urbains, car depuis plusieurs décennies

la dynamique urbaine est orientée de telle sorte qu'elle contraint à un usage accru de l'automobile. Un rapport québécois élaboré par la Société de Transport fait apparaître "une vraie dépendance à l'automobile" [STMontréal2002]. Les outils d'analyse étaient là pour étudier les conséquences des scénarios appropriés comme la construction de routes, l'ajout d'infrastructures ou encore la tarification.

- **la prise en compte des interactions transport-urbanisme** : dans la plupart des modèles, cette dimension n'est pas prise en compte, ce qui conduit à penser que les modèles sont souvent construits sur une fiction n'ayant guère de rapport avec la réalité. Cette attente est là pour rappeler et corriger, en quelques sortes, les conséquences de la perception simpliste et souvent confuse qui s'était instaurée lors des années soixante-dix entre l'étalement urbain et la croissance urbaine. L'aménagement urbain a développé une telle complaisance face à certains modes de transport que c'est la ville qui s'est adaptée et non le contraire.
- **l'analyse plus approfondie des comportements des usagers des réseaux routiers** : comparé au nombre de facteurs effectivement pris en compte par les usagers, le nombre de facteurs intégrés dans les modèles est faible. De ce fait, la plupart des outils reproduisent difficilement les changements de comportement des usagers du réseau routier devant de nouvelles alternatives (introduction du tramway, des péages, des zones d'accès contrôlés). Cet effort semble d'ailleurs d'autant plus pressant pour les régulateurs trafic que ces déplacements se sont fortement diversifiés sur le plan spatio-temporel (désynchronisation des horaires de travail, complexification des boucles de déplacement, ...) ainsi que par l'introduction de divers services : information en temps réel, covoiturage, partage de véhicules ("car-sharing" [Enoch2002], "car-pooling"[Huang2000], "park&rides" [Blain1997], etc. Voir rapport CERTU pour les définitions [Patrice1999]).
- **la prise en compte des problématiques de micro-simulation** : souvent, les outils de simulation ont été élaborés puis enrichis pour répondre à des problématiques de dimensionnement selon une approche macroscopique [DePalma1996], [El Hmam2006]. Or, dans les décisions qu'ils sont amenés à prendre, les régulateurs trafic sont souvent confrontés à des problématiques d'une échelle spatiale restreinte comme la gestion des feux, les changements des sens de voiries, la construction de ronds-points, l'aménagement d'un nouveau parking, etc.
- **la prise en compte des problématiques de stationnement** : l'absence d'outils permettant de simuler les conséquences d'un déséquilibre offre-demande de stationnement est flagrante. Admise d'abord comme un objet de tarification, actuellement sans intérêt évident aux Etats-Unis, l'offre de stationnement a récemment été reconnue en Europe comme indicateur inévitable de l'accessibilité à une zone de la ville qui affecte le taux d'attractivité et, de ce fait, l'offre de logement, les commerces et autres activités [Still2000]. Le stationnement est aussi une variable importante dans les comportements de report modal [Litman2006]. La disponibilité ou non d'une place de stationnement sur le lieu de travail peut être un déterminant beaucoup plus significatif du choix modal des pendulaires que la qualité de l'offre de transport public [Masson2000].
- **l'intégration de modules d'étude des impacts environnementaux** : les outils actuels doivent être capable de fournir des données (trafic, déplacement, ...) permettant

d'alimenter des modèles indépendants d'évaluation des pollutions atmosphérique, sonore ou visuelle. Cette attente ne peut être négligée dans le contexte du développement durable, où toute mesure en matière de transport visant à améliorer la mobilité urbaine ne peut être dissociée de ses impacts environnementaux. L'effet inverse existe aussi : la multiplication des difficultés de circulation auxquelles s'ajoutent de nombreux effets négatifs comme le bruit, la pollution ont entraîné une délocalisation de nombreuses activités qui, s'expatriant en périphérie, se traduisent par la désertisation des centres-villes.

1.2.2 Les attentes relatives à la forme des outils employés

Concepteurs et utilisateurs d'outils se sont mis d'accord sur le fait que la modélisation du trafic routier urbain est une modélisation globale : on ne sait pas tout, on ne peut pas tout savoir et de toute façon, on ne veut pas tout savoir. Mais cela ne justifie pas, selon les utilisateurs, le fait que l'interprétation des résultats d'une simulation issue d'un scénario à tester brille le plus souvent par son opacité. Cette demande d'un outil convivial, flexible et facile à manipuler passe essentiellement par :

- **la simplification ou à défaut, l'explication des concepts abstraits manipulés par les modèles** ; ces derniers apparaissent souvent comme des boîtes noires, dont seul le modélisateur comprend le fonctionnement, ceci expliquant la méfiance des régulateurs.
- **une certaine transparence pour la fiabilité des résultats**, qui doit passer par une évaluation des incertitudes dues aux modèles ou à la base de données. Il est rare qu'un modèle soit tout à fait satisfaisant car il est, par définition, une schématisation de la réalité.
- **l'amélioration de la convivialité des outils**, là où les éditeurs de logiciels ne sont pas prêts à investir. En effet, la conservation d'une certaine "technicité" de leurs produits leur permet de bénéficier de la situation ; les outils sont perçus alors comme un enjeu d'une course à la sophistication.
- **l'amélioration de la lisibilité des résultats** car, entre la décision prise par un régulateur et les résultats très techniques des modèles, il semble en effet qu'il existe un vide qui rend difficile la valorisation du travail des modélisateurs et le choix d'une décision. Dans ce sens, les modes graphiques et analogiques peuvent jouer un rôle non négligeable (SIG).
- **l'affichage des résultats intermédiaires de la simulation**, leur permettant de suivre pas-à-pas l'évolution des indicateurs liés au trafic ou aux impacts environnementaux dans un contexte spatio-temporel. Ceci s'explique par le fait qu'un régulateur trafic souhaite disposer d'un outil d'aide à la décision et non pas d'un outil de prise de décision.

1.3 Réponses aux attentes d'un régulateur trafic

1.3.1 Cahier des charges et éléments de différenciation de notre simulateur

Les attentes d'un régulateur trafic sont reprises en termes d'objectifs opérationnels pour notre simulateur. L'idée est de fournir à l'utilisateur la possibilité de tester des scénarios selon les niveaux opérationnel, tactique et stratégique (voir *Figure 1-1*).

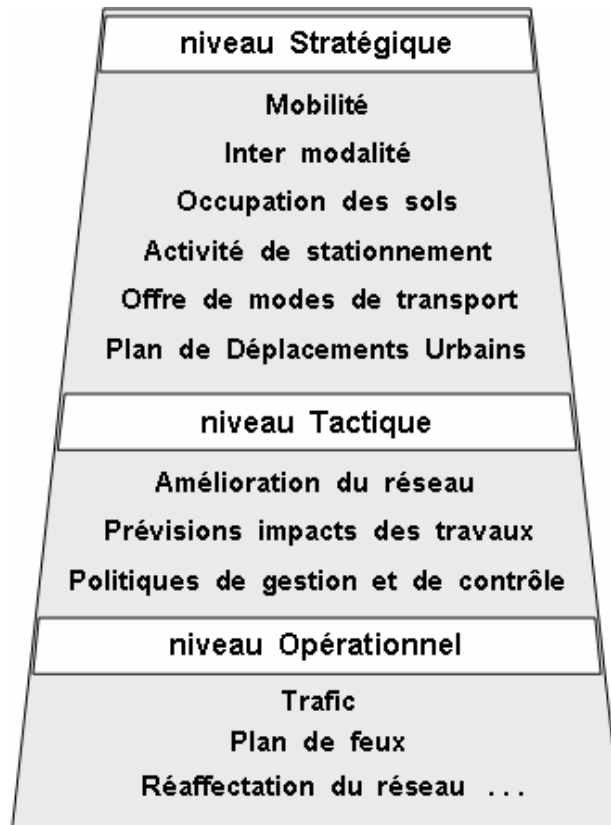


Figure 1-1. Niveaux d'analyse et de simulation

Il s'agit donc d'une granularité spatio-temporelle qui couvre un large spectre : plan local ou urbain, à court ou moyen terme. Pour ce faire, notre proposition se distingue des autres simulateurs et/ou outils de trafic urbain par les aspects suivants :

- **L'utilisateur construit et de modifie la ville de son choix** (dans une certaine limite). Cela a comme objectif non seulement une utilisation personnalisée de l'outil de simulation mais également, offre un cadre spatial évolutif pour tester des changements d'infrastructure (dimensionnement, changements de sens de circulation, ...) aussi bien que des innovations en terme d'aménagement du territoire (ajout de points d'attractions, aménagement de nouveaux parkings, ...)
- **Le régulateur est un utilisateur passif ou acteur.** Ceci permet de suivre les effets de la mise en place d'un scénario devant un écran aussi bien qu'en s'immergeant dans le trafic en tant qu'utilisateur du réseau routier.
- **Le régulateur agit sur l'organisation des déplacements et le stationnement.** Ceci implique la possibilité d'intégrer des aspects dynamiques dans la chaîne de déplacements (modes de transport, itinéraires, destinations) et d'intégrer l'activité de stationnement comme un maillon de cette même chaîne.

1.3.1.A L'utilisateur construit et modifie la ville étudiée

1.3.1.A.1 Représentation 2D de la ville étudiée

Chaque réseau urbain peut être modélisé en utilisant des blocs carrés (30m x 30m). Une représentation cartographique 2D d'une partie de la ville de La Rochelle est présentée dans *Figure 1-2*.

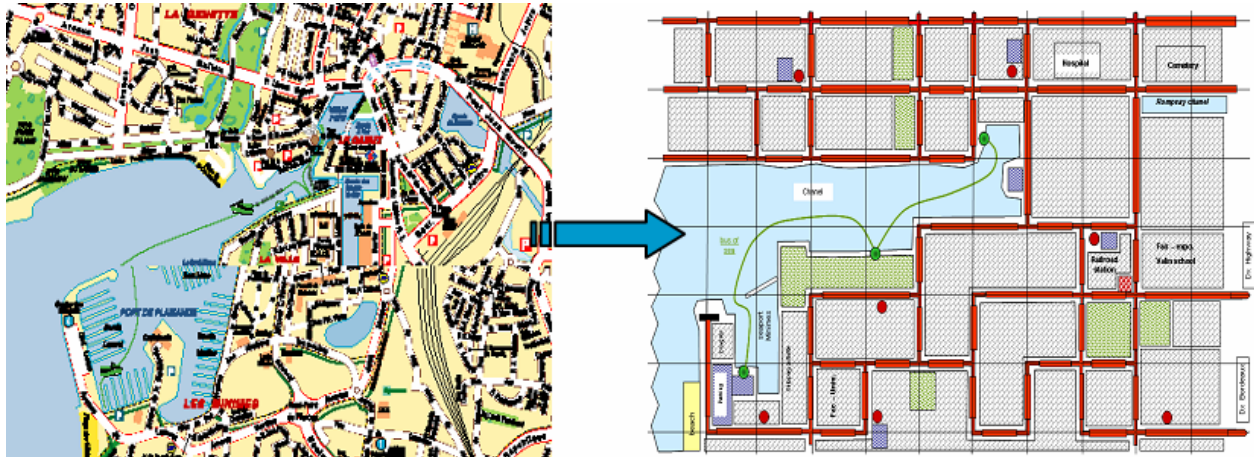


Figure 1-2. Représentation en 2D de la ville étudiée La Rochelle

Chaque bloc représente une partie du système étudié avec des propriétés définies, des infrastructures ainsi que des règles de fonctionnement (exemple présenté dans *Figure 1-3* [Augeraud2005]).

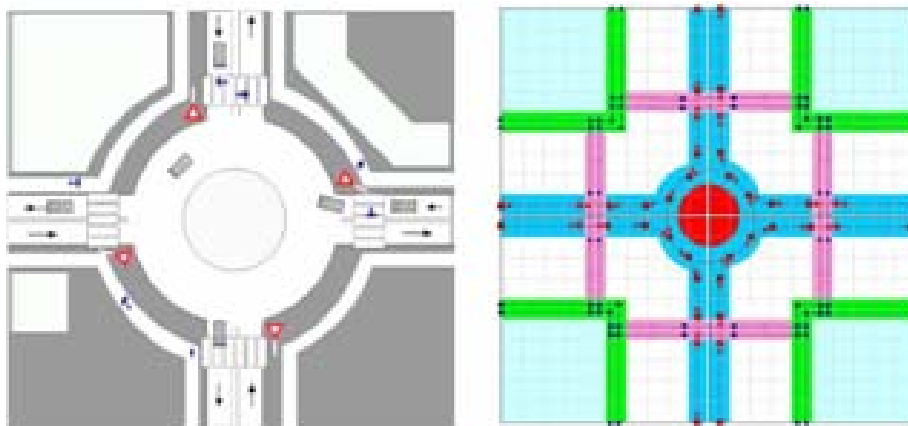


Figure 1-3. Représentation d'un rond-point avec 4 entrées et 4 sorties [Augeraud2005]

Dans *Figure 1-3*, le dessin de gauche illustre une vue aérienne de ce que pourrait être un rond-point dans notre simulateur. A ce jour, les intersections à angle droit sont implémentées mais pas les ronds-points. A droite, quatre plaques élémentaires et identiques sont assemblées (collage, connexions des nœuds des différents réseaux, etc.) afin de construire un rond-point couramment rencontré dans une ville.

La finalité de cette représentation 2D est de proposer à l'utilisateur une bibliothèque de plaques lui permettant de construire sa propre ville afin de pouvoir étudier l'effet global des changements d'infrastructure (comme la construction d'une voie rapide) ou des effets locaux de circulation (changement du sens de circulation ou construction des parkings).

Chaque plaque possède un quadrillage permettant de positionner sur celle-ci des éléments comme des voies, des bâtiments, des parkings, la signalisation (panneaux, feux tricolores, panneaux à messages variables, ...).

Pour notre simulateur, l'idée de base est que les conducteurs des voitures prennent des décisions seulement à certains points fixes du réseau routier. Cela permet également de prendre en compte des contraintes liées aux feux, stops, ... Les aires de parkings sont vues comme des composants du réseau avec ses règles de fonctionnement et ses panneaux en indiquant leur position géographique ainsi que le nombre de places disponibles.

Le jeu **City Life**, commercialisé très récemment, adopte une autre manière de faire grâce à son moteur 3D. Sur le site Internet, on peut lire : « City Life se débarrasse également de la grille orthogonale imposée par la plupart des City Builders classiques afin d'offrir une totale liberté de construction. La souplesse et les incroyables possibilités de son moteur 3D permettent les agencements les plus complexes. (...) » [JeuxCityLife].

1.3.1.A.2 Représentation 3D de la ville étudiée

Dans les années 80 sortait un jeu, de la société américaine Maxis, intitulé **SimCity** [JeuxSimCity]. Il allait devenir un immense succès, engendrant de véritables fans clubs à travers le monde. Le pari de SimCity est d'amener le joueur, grâce à son ordinateur, à simuler dans l'espace et dans le temps, la croissance d'une ville. Depuis, d'autres jeux de type CityBuilder (comme **CityLife** de Monte Cristo [JeuxCityLife]) ont fait leur apparition.

C'est en quelque sorte l'idée qui a animé notre équipe avec, en supplément, la possibilité d'élaborer les stratégies transport et d'en évaluer les impacts (voir annexe Anx. A-1 pour plus de détails sur les modèles urbanistes et les interactions trafic-urbanisme).

Le premier intérêt d'une représentation cartographique, urbaine, informatisée et en 3D est de permettre, du fait même du rôle particulier de la vision comme outil de perception, une augmentation importante du nombre d'informations sur la ville qu'il est possible de transmettre en une image [De Vries2002].

Une autre application est la simulation des projets paysager tels que la plantation d'arbres le long d'un boulevard par exemple et d'en mesurer l'impact (ombre, vue bouchée, encombrement) tout en intégrant la quatrième dimension que représente le temps (simulation de la croissance dans la longue durée mais également de l'aspect selon les saisons).

Une application moins ludique mais capitale reste la possibilité d'étudier les pollutions atmosphérique ou sonore. Ces dernières sont très complexes selon la géométrie de la rue et des bâtiments (phénomènes de diffusion, d'interférences, de réverbération, ...). Par exemple, l'idée d'établir une carte de "bruit" trouve un grand intérêt. Les calculs de propagation du bruit doivent être faits en tenant compte des volumes présents aux alentours du projet (type, hauteur, emplacement des bâtiments, nature des matériaux, végétation, etc.), mais également des caractéristiques de la circulation prévue (nombre et vitesse des véhicules, pourcentage de camions) et de la voie (largeur, feux). Ces cartes de bruit aident à optimiser l'aménagement

d'ouvrages antibruit ou à déterminer le site propice à la construction de tel bâtiment, des matériaux isolants à utiliser, etc.

L'idée est d'associer à chaque plaque 2D une représentation en 3D (Figure 1-4).

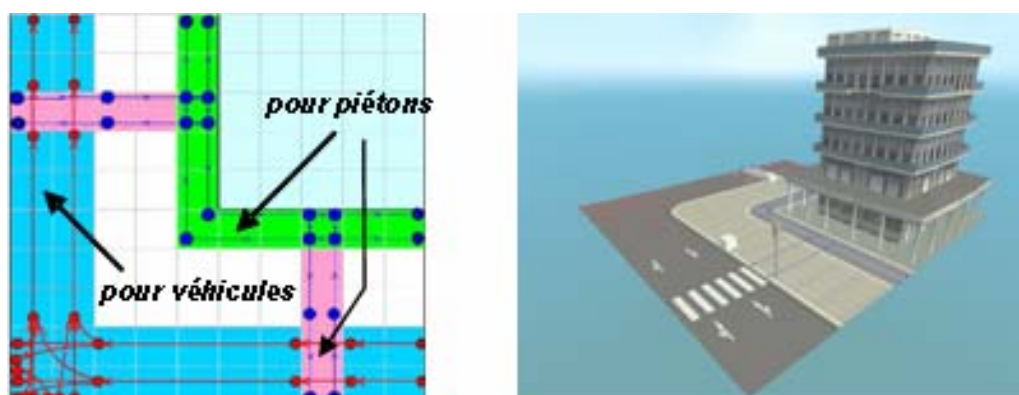


Figure 1-4. Exemple de la correspondance entre une plaque 2D et la vue en 3D

Un module appelé **module Organisation des sols** est en cours de développement avec la collaboration de la société SUCCUBUS (Nantes). Il contient l'ensemble des procédures visant à représenter une partie du système étudié avec des propriétés définies, l'infrastructure ainsi que des règles de fonctionnement. Il ne concerne nos travaux que dans la mesure où il fournit un cadre de représentation visuelle et justifie certaines démarches dans le modèle décisionnel que nous allons développer (génération des activités, choix des parkings et des destinations).

1.3.1.B Le régulateur est un utilisateur passif ou acteur

Il peut, en effet, être devant l'écran en tant que superviseur aussi bien que "joueur" (en s'immergeant) dans un environnement virtuel 3D, avec une mise en situation qui lui permet de suivre en temps réel les impacts prévisibles des scénarios à tester. Un tel environnement expérimental permet au régulateur d'adopter une démarche basée sur des scénarios à tester et, par son réalisme, fait office d'outil d'aide à la décision.

Le schéma de principe est présenté dans Figure 1-5 [Sarramia2005].

Un usager du réseau routier ou un décideur immergé dans le système peut se déplacer et donc observer sous tous les angles, mais également zoomer à tout moment et obtenir des vues instantanées à toutes les échelles (voir nos travaux [Augeraud2005], [Augeraud2006]).

Ce module ne s'intéresse pas à la manière dont les destinations, les choix modaux sont effectués, ni à la distribution des usagers sur le réseau. Les interactions entre les entités du système (usagers, usagers et éléments de l'infrastructure) se font en temps réel. Il contient des modèles descriptifs des déplacements des usagers du réseau routier (piétons, conducteurs, usagers des transports publics) qui s'attachent à reproduire les effets du mouvement avec respect des propriétés dans l'infrastructure (nombre de voies, ronds-points, ...) et des règles de circulation (feux, stops, passages piétons, ...).

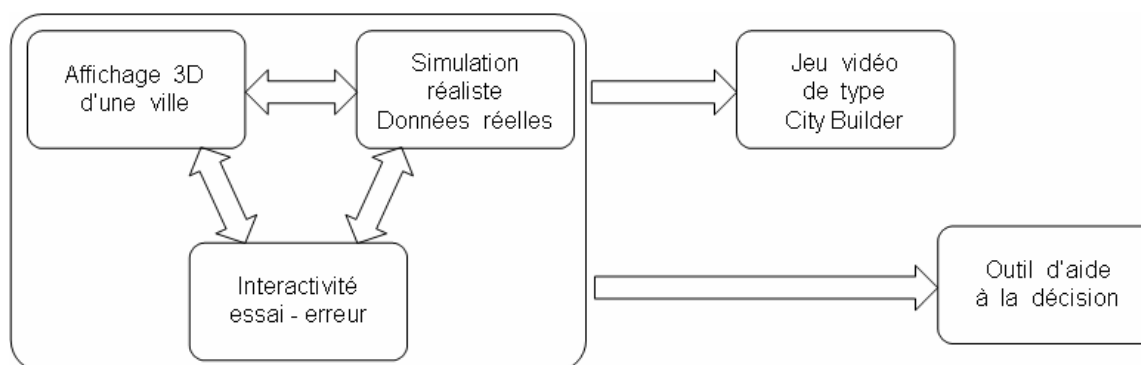


Figure 1-5. Schéma de principe de notre simulateur 3D

Pour les conducteurs des véhicules, parmi les approches les plus employées en ingénierie trafic, un modèle poursuite (ou "car following") a été adopté. Il s'agit d'un modèle microscopique pour lequel chaque entité (véhicule par exemple) possède ses caractéristiques : vitesse, destination, position absolue dans l'espace et relative par rapport aux voies du réseau routier, accélération, ... Le modèle adapté à notre simulateur a été largement discuté et développé lors de travaux de Chabrol [Chabrol2003] et Sarramia [Sarramia2002].

Le principe est basé sur trois étapes distinctes : générer un nombre de voitures et leur affecter une vitesse, affecter une voie aux véhicules générés, calculer des grandeurs macroscopiques de la zone microscopique utilisée pour les transferts (par exemple, la concentration et l'offre du tronçon microscopique) (voir annexe Anx. A-2 pour une brève revue concernant les modèles trafic et des précisions supplémentaires sur le modèle choisi).

Cette approche permet d'appréhender progressivement la complexité d'un système trafic et permet de passer facilement d'un niveau microscopique à un niveau macroscopique. Sa mise en œuvre a permis la construction d'un environnement de modélisation auquel est associé un processus de modélisation intégrant des aspects incrémentiel et multiple. Elle permet de déterminer les différents types de flux à traiter par le système et leur cheminement, puis d'identifier et de spécifier les règles de priorité et la régulation utilisée. Compte tenu de la finesse de modélisation envisagée, la réglementation associée au trafic (code de la route) et aux transports sera prise en compte. La construction d'un modèle générique a abouti à l'élaboration d'une bibliothèque de composants logiciels à partir desquels peut être construit un modèle de simulation dont les composants ne possèdent pas tous le même type de spécification, les composants pouvant travailler à des niveaux de détail différents.

Ce module, appelé **module trafic**, est dans un état de développement avancé et ne concerne que partiellement nos travaux. L'algorithme de déplacements des voitures développé mettra en évidence l'effet de congestion des routes à la recherche des places de stationnement.

1.3.1.C L'utilisateur agit sur l'organisation des déplacements et le stationnement

Nos travaux se sont focalisés sur le point absent dans la plupart de simulateurs opérationnels, **la gestion du stationnement**, avec comme principal objectif, le développement d'une méthodologie pour simuler les impacts de diverses stratégies d'un régulateur sur :

- l'activité des parkings urbains,
- les conséquences du déséquilibre offre-demande de stationnement, de la tarification et de l'emplacement des parkings sur les conditions de trafic autour d'un parking.

A la recherche d'une représentation réaliste des comportements, nous nous sommes tout d'abord heurtés à la difficulté de différencier les préférences des divers usagers lors de la recherche d'une place de stationnement.

La tâche devient encore plus difficile lorsqu'il s'agit de simuler les impacts d'une nouvelle stratégie car, en agissant sur les composants du système trafic/urbanisme, le régulateur induit des changements de comportements des usagers du réseau routier ; ceci se répercute ensuite sur l'état du trafic d'une manière qui peut non seulement être imprévisible, mais parfois en désaccord avec les attentes de certains usagers (Figure 1-6).

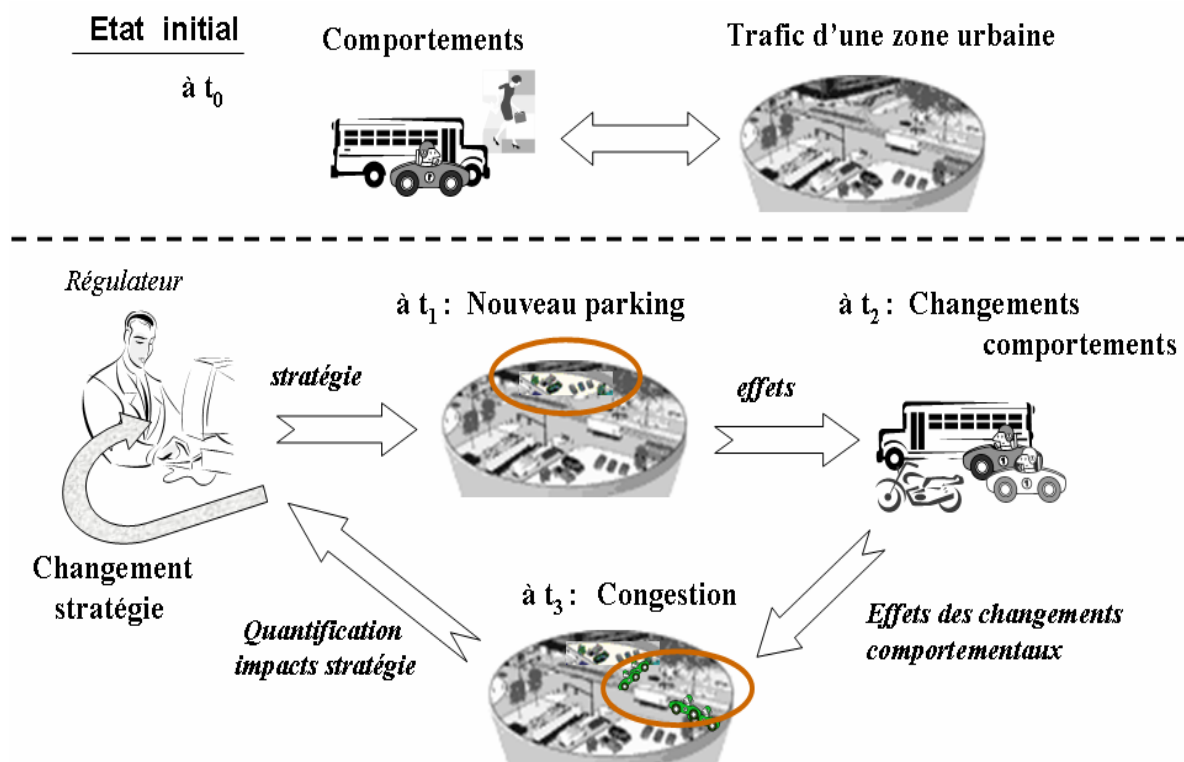


Figure 1-6. Relation parfois antagoniste entre régulateur et usagers du réseau urbain

Le caractère peu prévisible de telles stratégies s'explique surtout par deux aspects :

- **la complexité de la chaîne de déplacement** : Les motifs de déplacement sont nombreux, (domicile-travail, loisirs, shopping ...). Chaque activité étant plus ou moins urgente, de durée variable, le comportement d'un conducteur en dépend, aussi bien pour le choix du parking que pour celui d'une alternative en l'absence d'une place disponible (faire des tours autour du parking en attendant qu'une place se libère, chercher un autre parking, se garer illicitement ou reporter son activité). En outre, contrairement au trafic interurbain, il s'agit de réseaux très maillés, qui permettent un grand nombre de choix d'itinéraires

différents et qui rendent ainsi la congestion induite autour des parkings difficilement prévisible.

- **la perception différente des usagers concernant la qualité d'un service** : A cette diversité des motifs de déplacement, d'itinéraires, s'ajoute la grande diversité sociale des usagers. Une étude de synthèse [DPdoc1997] a montré qu'il est impossible de prévoir de manière précise des flux en tenant compte uniquement des choix d'un consommateur représentatif. De plus, pour l'analyse de l'activité des parkings, il doit être possible de distinguer les réactions des usagers en fonction de l'horizon d'étude. A la fermeture d'un parking, la seule réaction des usagers pourrait être un changement de parking. A moyen terme, les usagers auront intégré dans leurs comportements les nouvelles conditions de stationnement, et dans certains cas, ils modifieront leurs destinations, dans la mesure où l'activité peut s'effectuer sur différents sites (faire les courses, les loisirs, ...). Enfin, à très long terme, l'effet prédominant à considérer est que, selon la facilité de se garer et/ou d'y accéder, l'utilisateur peut utiliser un autre mode de transport.

Dans ce cadre complexe, il nous a semblé évident que le succès de la modélisation des comportements des conducteurs à la recherche d'une place de stationnement repose sur la compréhension des processus de choix, tout au long de la chaîne de déplacement. Le module appelé **module Organisation des déplacements** concerne plusieurs sous-modules liés à la demande de transport (choix des destinations, modes de transport, parkings ...).

Notre contribution réside dans le choix d'une **démarche de modélisation** de ces étapes et dans le **développement de modèles décisionnels** applicables à l'ensemble de ces phases, avec la définition de certaines variables de perception de la qualité d'un déplacement comme l'**accessibilité** et l'**attractivité**.

1.3.2 Problématiques pour le développement du Module Organisation des Déplacements

Tester des comportements évolutifs de catégories d'utilisateurs du réseau routier de la ville étudiée, permet de prendre en considération des perceptions particulières de certains indicateurs (attractivité, accessibilité, ...) qui diffèrent d'une ville à une autre, d'une catégorie sociale à une autre. Il est donc envisagé de tester des changements de comportements typiques, dès la mise en place de nouvelles offres de transport (par exemple, le tramway), de services de partage (park&ride, car-sharing, car pooling, ...) ou de changements remarquables au niveau de l'aménagement du territoire (mise en place de nouveaux quartiers, instauration de nouveaux points d'attraction, ...).

Cela nous confronte à plusieurs problématiques scientifiques :

- **choix et/ou adaptation d'une approche de modélisation de la demande de déplacement**, afin d'établir la destination, le mode de transport puis le parking pour des usagers et des activités différents. Des études de synthèse effectuées par le groupe "Transports urbains et calcul économique" ont montré [DPdoc1997] que la demande de transport en milieu urbain est très hétérogène.

Suite à une première revue dans la littérature de spécialité, nous constatons qu'une multitude de travaux ont abordé le sujet : déplacements pour des activités récréatives [Pozsgay2001], [Bhat2003], [Bhat2004], [Itami2004] durant les week-ends [Doherty2002], pour le "shopping" [Newmark2005], pour des activités effectuées par les travailleurs [Misra2003], des travailleurs et non-travailleurs [Cirillo2002]. Dans la plupart des cas, ces travaux s'arrêtent au processus d'enchaînement des activités [Doherty2000]. Il n'existe pas, à notre connaissance, des modèles opérationnels permettant de distinguer les préférences de plusieurs catégories d'utilisateurs à la fois et cela pour plusieurs types d'activités.

- **prise en compte de variables pertinentes de choix** : le processus décisionnel d'un consommateur, avec tous ses problèmes propres, est au centre de l'attention dans la littérature sur la théorie comportementale de prise de décision. Dans la plupart des cas, les principales variables d'intérêt sont le coût et le temps du déplacement [Schnetzler1999]. Ainsi, par exemple, des éléments comme l'environnement dans lequel s'insère le déplacement aussi bien que des facteurs liés aux conditions de déplacement (sensation de sécurité, ...) sont rarement pris en considération. Les attitudes, les perceptions du voyageur ont été identifiées en tant que causes déterminantes du comportement. En dépit de l'intérêt considérable pour ces types de variables, l'utilisation a été limitée et ceci peut être attribué à deux raisons. Premièrement, les préférences ne sont pas souvent rassemblées en enquêtes traditionnelles de déplacement des ménages excluant, de ce fait, la capacité d'exécuter des analyses de comportement rigoureuses. Deuxièmement, l'effet de ce type de variables ne peut pas être facilement quantifié donc elles ne sont pas considérées utiles (d'un point de vue pratique) pour des modèles prévisionnels de demande de déplacement.
- **prise en compte du caractère évolutif des données** : lors de l'exécution, la simulation est conditionnée par l'utilisation de paramètres et de données à traiter qui en constituent le point d'entrée, et ce, afin de produire des résultats de sortie. Comme pour tout outil de modélisation, les données nécessaires sont une question épineuse. Généralement, les approches trafic reposent sur une grande masse de données (dont les résultats sont souvent obsolètes à cause du coût engendré). Pour illustrer les processus décisionnels qui expliquent le comportement différent des usagers du réseau routier devant plusieurs choix potentiels (itinéraire, mode de transport, etc.), les modèles sont alimentés par des données qui sont le plus souvent issues de surveillances des comportements des habitants d'une ville donnée ([Stefan2005] pour Calgary, [Hunt2001] pour Oregon) ou d'un pays ([Simma2003] pour l'Autriche, [Raney2003] pour la Suisse). Certains modèles sont calibrés avec des enquêtes-ménages anciennes [Masson2000], ou sont parfois incomplètes [DPdoc1997]. Aussi réaliste soit la représentation de l'offre et de la demande de déplacement, dans ce cas, le comportement des usagers du réseau urbain est lié directement aux caractéristiques d'une ville, à la perception de certaines valeurs (accessibilité, attractivité, ...) qui font que le modèle devient "périmé" sans le souci de réactualisation de la base de données et n'est que rarement transposable à une autre ville.
- **prise en compte de l'effet apprentissage** : les fortes interactions existantes entre les différentes phases de déplacement (choix de mode de transport, de parking, ...) font qu'un changement lors d'une de ces phases (par exemple, introduction d'un nouveau mode de

transport) peut modifier les préférences observées ou déclarées des usagers. L'utilisateur peut se retrouver devant des choix potentiels pour lesquels il a une perception similaire en terme de "qualité" (par exemple, un individu peut considérer que le vélo et le bus sont deux alternatives plausibles s'il n'y a pas de contrainte particulière.). Lorsque l'action s'est déroulée, l'utilisateur doit pouvoir assimiler l'expérience passée et changer éventuellement ses choix.

- **prise en compte d'alternatives ou de services nouveaux** : la mise en service d'un nouveau transport (par exemple, tramway) ou d'une infrastructure d'un nouveau type (voirie urbaine à péage) soulève des difficultés de fond. Dans l'étude ORLYVAL (décrite dans [DPdoc1997]), les auteurs ont proposé d'introduire des bonus et donc d'"estimer" le bonus applicable au nouveau mode. On peut se demander s'il n'aurait pas été plus opportun de considérer ensemble les modes publics les plus performants (bus et nouveau mode) et de répartir le trafic entre eux en fonction des qualités et des coûts propres de chacun. Avertis de la grande difficulté de prévoir le trafic engendré par un nouveau mode de transport et des conséquences financières majeures d'une erreur importante de prévision, les responsables de Prado-Carénage [DPdoc1997] ont fait confirmer, par des enquêtes très approfondies de type "préférences déclarées", les prévisions établies antérieurement par des modèles de demande.

A notre connaissance, aucun modèle de demande ne permet de traiter convenablement ces aspects si les caractéristiques ne peuvent pas être décrites en se référant aux services existants ayant servi à l'estimation, c'est-à-dire par une démarche comparative.

Au-delà de ces aspects liés au trafic, nous nous sommes attachés à généraliser notre démarche à la simulation de tout système complexe qui place au centre de ses préoccupations la satisfaction de l'individu dans un contexte géré par des contraintes, des objectifs globaux souvent en désaccord avec des préférences individuelles (entreprises, économie de marché, ...).

1.3.3 Premiers cadrages pour la modélisation de la demande de déplacements

Comme la demande de déplacements est gérée par des prises de décisions des usagers se faisant avant le trajet, le module Organisation des déplacements est, à lui tout seul et indépendamment des deux autres modules développés par notre équipe (Occupation des sols, Trafic), un outil d'analyse et d'aide à la décision abordant l'ensemble de choix et de changements de choix auxquels sont soumis les usagers d'un réseau routier.

Pour définir les étapes de développement de ce module, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Galland [Galland2001]. Le cycle de vie d'un système logiciel employé comme outil d'aide à la décision structuré peut être décrit comme dans *Figure 1-7* [Nance1994].

Compte tenu des interrelations entre les phases de la chaîne de déplacements, nous allons consacrer ce chapitre à l'élaboration d'un modèle conceptuel associé au système des déplacements urbains afin d'aboutir à une architecture modulaire intégrant la demande de stationnement.

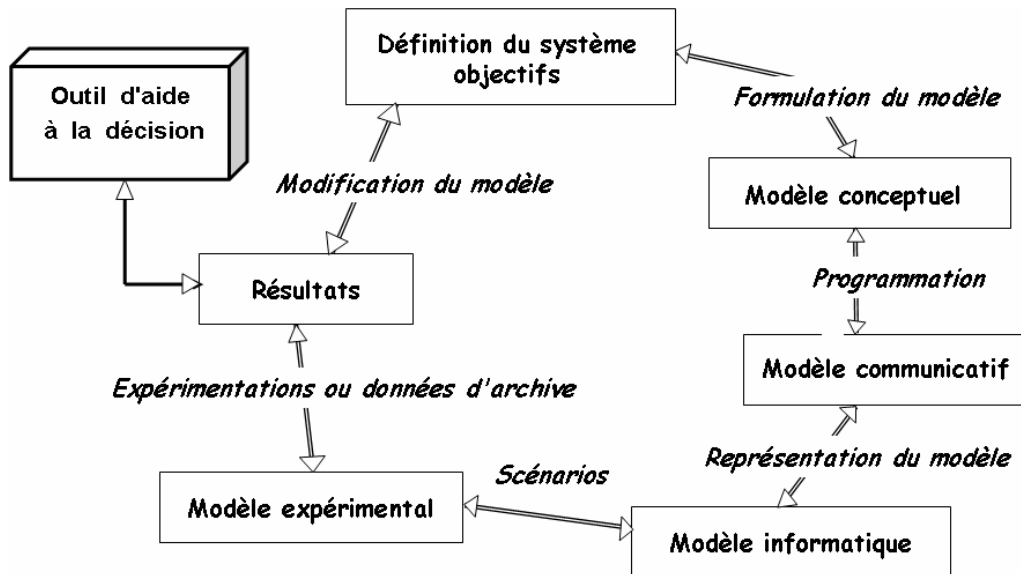


Figure 1-7. Cycle de vie d'un outil logiciel pour l'aide à la décision [Nance1994]

Avec ses routes, usagers, véhicules, feux, carrefours, parkings, un système de transport est indiscutablement un système complexe qui peut être perçu comme un sous-système du système urbain. L'étude d'un système complexe, par sa modélisation, peut être abordée de différentes manières et ce, en fonction de ses propriétés, de sa complexité, du type de modèle retenu, des besoins et des techniques disponibles.

Malgré la diversité des approches, il est concevable de définir une démarche de modélisation dans laquelle un certain nombre d'étapes, pour la construction d'un modèle, est incontournable [Ray2003] (Figure 1-8):

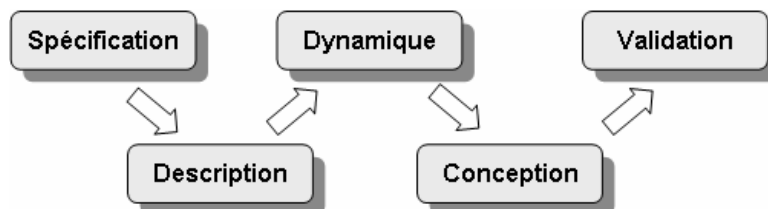


Figure 1-8. Phases de modélisation d'un système complexe [Ray2003]

1.3.3.A Spécification

Il s'agit donc, en premier lieu, d'identifier un problème en situant le système complexe par rapport à son environnement extérieur et de préciser de manière informelle quels sont les éléments qui seront modélisés et quelles sont les données exogènes.

L'objectif d'un modèle conceptuel est avant tout de permettre la compréhension du phénomène étudié par rapport à un objectif donné. Toutefois dans la mesure où celui-ci est soumis à une simplification de la réalité, il y a donc une différence, acceptable ou non, entre le niveau de détail réel et celui décrit dans le modèle. Si trop peu de détails sont inclus, le modèle risque de ne pas fournir de comportements émergents satisfaisants pour la compréhension du système complexe. Si au contraire trop de détails sont inclus, le modèle peut devenir trop compliqué à formaliser, à implémenter et à analyser dans un état donné de

connaissances. L'idée de prendre en considération toutes les interactions à la fois est très alléchante mais surtout risquée.

La tentation est d'autant plus grande qu'il n'y a pas, à notre connaissance, en France, un outil opérationnel permettant d'intégrer les interactions urbanisme-transport dans les deux sens. Cependant, devant la réalité, on est vite confronté à la multitude d'interactions qu'il faudrait prendre en considération, à l'explosion du nombre de données nécessaires et utilisées pour le calibrage des modèles, mais surtout par la dimension temporelle qui correspond à des périodes discrètes de temps entre 1 et 10 ans, ce qui sort du cadre de nos objectifs.

Notre choix : nous avons retenu les interactions présentées dans Figure 1-9, où tout aspect lié à des effets à très long terme est négligé (contexte économique, lois, ...). Notre schéma est adapté de celui de l'équipe IAURIF (Cergy Pontoise) ayant dressé l'inventaire exhaustif des interactions (voir annexe Anx. A-1 et [DePalma2004]).

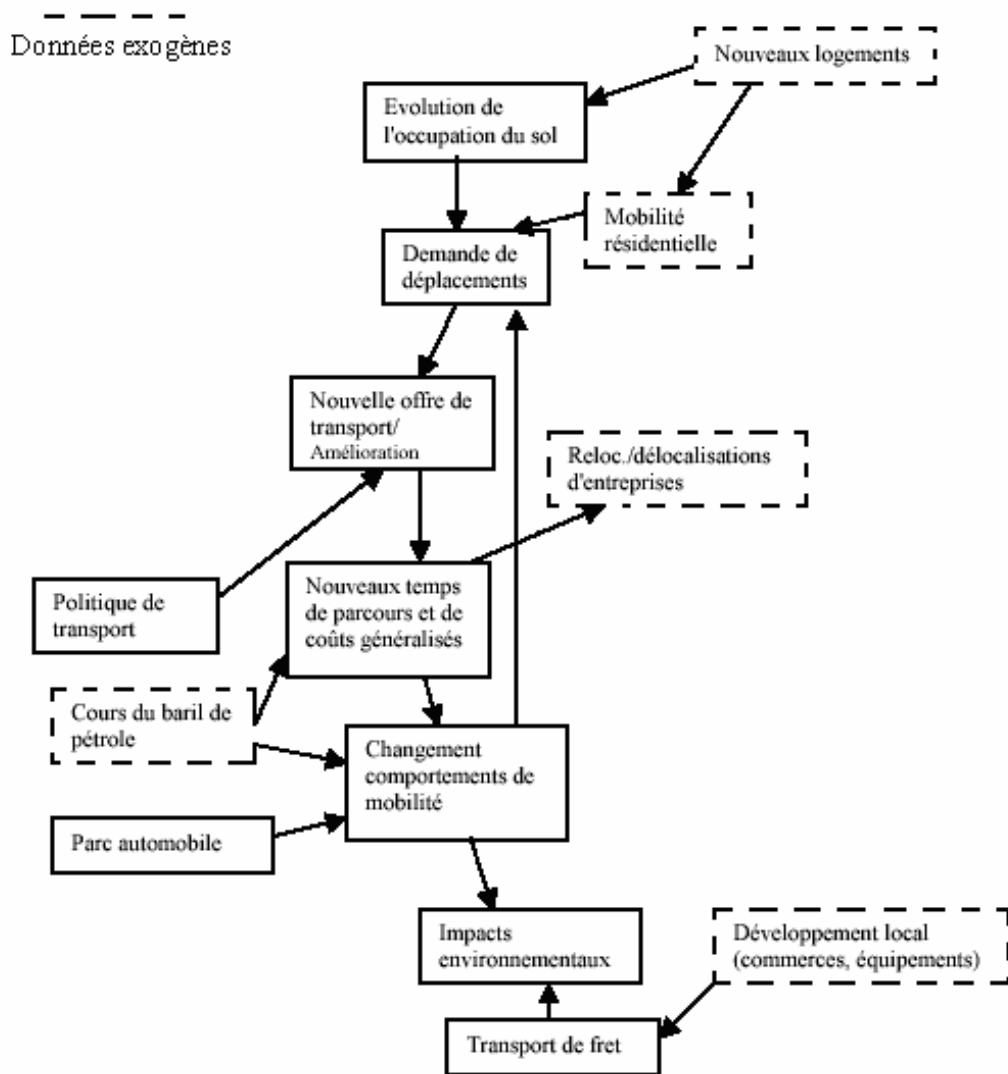


Figure 1-9. Schéma de [DePalma2004] adapté pour les interactions urbanisme-transport à étudier

On se réservera néanmoins la possibilité, dans un premier temps, d'étudier l'interrelation entre l'aménagement du territoire (en tant que variables d'entrée) et les déplacements multimodaux induits, et lors de l'élaboration du modèle conceptuel, on aura en vue le besoin de greffer dans le futur des modules associés aux autres sous-systèmes urbains.

Dans un premier temps, certains aspects comme la population, la localisation des ménages, les changements de comportements dus à l'âge et au métier, ... sont des données exogènes issues d'enquêtes ménages ou créées artificiellement pour tester des scénarios qui en dépendent.

1.3.3.B Description du système

La description consiste à mettre en relief le système étudié en dressant un inventaire formel de l'aspect fonctionnel et structurel. Il existe généralement deux approches qui sont comparées dans *Tableau 1-1* (adapté à partir de [Ray2003]) :

Tableau 1-1. Comparaison entre les approches analytique et systémique (adapté à partir de [Ray2003])

Approche Analytique	Approche Systémique
se concentre sur les éléments (isole)	se concentre sur les interactions entre les éléments (relie)
considère la nature des interactions	considère les effets des interactions
s'appuie sur la précision des détails	s'appuie sur la perception globale
modifie une variable à la fois	modifie des groupes de variables simultanément
indépendance de la durée (phénomènes réversibles)	intègre la durée (phénomènes irréversibles)
modèles précis et détaillés difficilement utilisables dans l'action	modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissance, mais utilisables dans la décision et l'action
approche efficace lorsque les interactions sont faibles et linéaires	approche efficace lorsque les interactions sont fortes et non linéaires
la validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie	la validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité
connaissance des détails et buts mal définis	connaissance des buts et détails flous

L'approche analytique (cartésienne) est une démarche descendante qui vise à expliquer la nature des systèmes en descendant jusqu'aux niveaux d'organisation sous-jacents desquels une connaissance exhaustive est possible. Dans l'étude de la dynamique, l'approche analytique adopte ensuite un sens ascendant en élaborant la connaissance du système par additivité des

parties. Il s'agit finalement d'une démarche sommative qui ne prend pas en compte toute la nature implicite de la complexité et des interactions entre les parties.

L'approche systémique cherche à privilégier la connaissance des relations et des interactions entre les éléments qui constituent un système complexe. Cette approche postule qu'il est impossible d'atteindre la compréhension de l'ensemble comme un tout par l'étude exclusive de ses parties et focalise donc plus l'attention sur les propriétés constitutives et les facteurs émergents d'un système en s'appuyant sur la perception globale. Elle fournit ainsi des modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissances, mais est utilisable dans l'action et la décision car elle conduit à la connaissance des buts et à l'action programmée par objectifs au détriment d'une clarté des détails.

Notre choix : Du fait de la multiplicité et de la complexité des paramètres permettant d'expliquer et de comprendre le système de transport urbain en prenant en compte l'imbrication et l'interaction des éléments en fonction de leur environnement, notre choix porte sur une **approche systémique**. L'approche systémique pourra privilégier la connaissance des relations et des interactions entre les éléments qui constituent un système de transport en évitant d'atteindre la compréhension de l'ensemble comme un tout par l'étude exclusive de ses parties. Il sera possible de modifier des groupes de variables simultanément et d'introduire la notion de durée et d'irréversibilité. L'approche systémique s'avérera surtout efficace dans un contexte urbanisme-transport pour lequel les interactions sont non-linéaires, fortes et selon des échelles temporelles différentes (voir Figure 1-10).

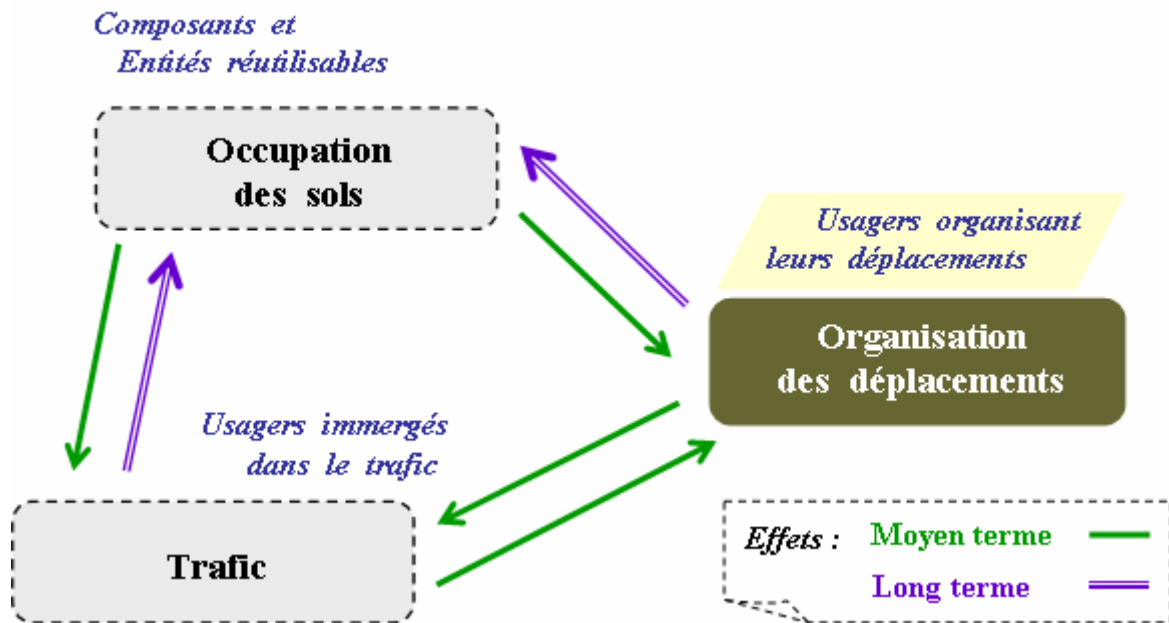


Figure 1-10. Interrelations entre modules en fonction de l'échelle temporelle

1.3.3.C Dynamique

Elle consiste à utiliser les informations recueillies lors des deux étapes précédentes pour déterminer la dynamique du système. La modélisation d'un système qui évolue dans le temps, au sens informatique du terme, réside dans l'association de vues d'un système formel

permettant de le décrire d'une façon plus ou moins affinée, pendant des instants discrets de son évolution. La notion d'état correspond aux caractéristiques du système à un instant t et elle peut être représentée par différentes entités informatiques (variables, structures de données, objets, agents, ...). Dans un système où s'effectuent des transformations, il y a des entrées (qui résultent de l'action de l'environnement sur le système) et des sorties (action du système sur l'environnement). Une rétroaction peut avoir lieu lorsque des informations sur les résultats d'une transformation sont acheminées à l'entrée du système (effet en retour).

Notre choix : Le système de transport est **dynamique**.

Nous essayerons de mettre en évidence que la modification des conditions de déplacement ou de stationnement pour un voyageur a des effets immédiats sur le choix d'itinéraire, des effets plus ou moins immédiats sur le choix du mode de transport et, dans l'ensemble, des effets à moyen terme sur la distribution spatiale des déplacements.

Sur le plan temporel, une discrétisation supplémentaire est nécessaire car un système de transport urbain est un système instable (le comportement n'est pas obligatoirement chaotique et les fluctuations ne sont pas accidentelles mais ont un rôle central). Ces nombreuses fluctuations dues aux accidents, phénomènes de congestion, modifications des infrastructures, absence de places de stationnement, modifications des structures urbaines, ... se répercutent sur les décisions individuelles qui se situent à des échelles de temps très différentes :

- **l'extrême court terme** pour les choix d'heure de départ d'un voyageur ou le changement de "dernière minute" suite à une information en temps réel,
- **le très court terme** pour les choix d'itinéraires ou de mode de transport,
- **le court-moyen terme** pour les choix de destination,
- **le moyen-long terme** pour les choix de localisation des activités,
- **le long terme** pour l'évolution de l'occupation du sol.

1.3.3.D Conception

La diversité des interactions entre les éléments statiques ou dynamiques peut nous amener à un système pour lequel les prédictions sont difficiles à réaliser. Cette étape, la plus laborieuse, porte sur le choix d'une méthodologie de modélisation, ce qui influence grandement la façon de représenter le système réel. Les critères de choix d'une méthodologie pour concevoir un modèle dépendent des caractéristiques du système complexe étudié et de la perception qu'en a le modélisateur.

Au-delà de l'échelle spatio-temporelle, on doit se mettre d'accord sur la manière de représenter les entités du système, en particulier les usagers du réseau routier. Là encore deux approches peuvent être distinguées :

- **une approche microscopique** qui se caractérise par deux éléments : d'une part, le recours à des données très détaillées, *a priori* individuelles, et d'autre part, la modélisation des comportements individuels. Elle se réfère à l'entité décisionnelle et dans ce cas, le véritable niveau microscopique est celui où il n'y a pas d'agrégation des données et où est identifiée la bonne entité élémentaire (le piéton, le conducteur, ...).

- **une approche macroscopique**, par opposition, travaille avec des données qui sont des agrégats. Outre ce niveau d'agrégation, l'approche macroscopique va tenter d'appréhender le système dans son ensemble. Du point de vue de l'analyse des comportements, l'approche macroscopique raisonne généralement sur des phénomènes globaux.

La théorie microéconomique résout cette difficulté de choix conceptuel de deux manières : soit elle raisonne sur une entité unique mais supposée *représentative* (il existe donc éventuellement une multitude d'entités, mais elles sont toutes identiques), soit elle pose comme condition qu'il existe un *continuum* d'entités hétérogènes.

Quel que soit le type de modèle, les besoins ou les outils, deux types de démarches sont distingués comme méthodes avec lesquelles l'organisation hiérarchique interne d'un système complexe est décrite :

- **top-down (descendante)** : selon Boulanger [Boulanger2003], une modélisation "top-down" est une approche dans laquelle la volonté est de définir l'organisation d'un système en formulant d'abord les principes généraux pour aller vers le détail. La notion de "top-down" renvoie au fait que les informations descendent du niveau le plus agrégé au niveau le plus désagrégé.
- **bottom-up (ascendante)** : inversement une modélisation "bottom-up" consiste à aborder la modélisation par les détails pour en produire les abstractions ou généralisations appropriées. Un modèle "bottom-up" est un modèle dans lequel l'information remonte, c'est-à-dire, passe du niveau le plus désagrégé au niveau le plus agrégé. Un modèle décrivant le parc automobile par type de cylindrée, type de conducteur et type de carburant va évidemment agréger toutes ces données pour déterminer la consommation totale de carburant liée au transport individuel (l'information remonte). L'avantage d'une structure "bottom-up" est qu'elle permet de tenir compte de changements structurels. Il est possible de faire apparaître une alternative nouvelle ou d'en faire disparaître une obsolète ; ce changement sera répercuté dans l'agrégat.

Lorsqu'un système complexe doit être modélisé, il convient de se mettre également d'accord sur le but recherché : optimisation ou simulation.

- *L'optimisation* consiste à utiliser des algorithmes de recherche opérationnelle pour minimiser ou maximiser une fonction objectif donnée. Il existe deux façons de l'aborder. Premièrement, l'optimisation *centralisée* qui repose sur le fait qu'une fonction *objectif unique* à l'ensemble du système est considérée. Cette approche est efficace pour autant que le système modélisé se situe sous la tutelle d'un centre de décision unique et centralisé. Deuxièmement, l'optimisation *décentralisée* qui distingue plusieurs entités, chacune cherchant à optimiser une fonction objectif individuelle (maximiser le confort, minimiser le temps d'un trajet).
- *La simulation* s'oppose à l'optimisation dans la mesure où elle ne correspond qu'à la résolution numérique d'un système d'équations (qui peuvent être simultanées ou pas) alors que l'optimisation recherche la solution à un problème borné sous certaines contraintes. Selon des travaux de synthèse portant sur le processus de simulation [RPG2000], l'approche par simulation cherche davantage à reproduire le comportement

du système, à voir de quelle manière il est susceptible de réagir, puis à utiliser le modèle pour tester des scénarios (l'approche « what ... if ? »).

Notre choix: La phase de conception est le cœur de la démarche de modélisation car, pour nous, elle doit répondre à deux problématiques : choix adéquat d'un modèle descriptif du système et choix d'une approche pour le modèle informatique. **L'approche est de type microscopique, par une démarche "bottom-up"**. Pour les phases d'organisation du déplacement (choix modal, itinéraires, ...), une discrétisation préliminaire sera faite par catégories sociodémographiques afin de pallier à la lourdeur d'une étude par entité décisionnelle. Chaque usager de la route tentera d'optimiser d'une façon décentralisée sa fonction objectif : en minimisant le temps de trajet et en utilisant son expérience pour individualiser par la suite les choix préliminaires (choisir une destination attractive, un parking facilement accessible, ...).

Le comportement du système sera testé à l'aide d'une série de scénarios faisant varier des variables liées à l'infrastructure (changement du sens de circulation, modification des tarifs parking), à l'aménagement du territoire (création de bâtiments résidentiels ou non, de nouveaux parkings, etc.).

Dans ce contexte, nous viserons non seulement la simulation des phases de la chaîne de déplacements mais également l'**optimisation multi-niveaux** lorsque de nouvelles stratégies en matière de transport et d'urbanisme seront envisagées.

1.3.3.E Validation

Cette étape a pour but de confronter le modèle à la réalité par vérification et validation. Les indicateurs correspondant aux résultats de la simulation sont comparés aux résultats réels. Pour les cas des systèmes de transport, il est possible d'utiliser, par exemple, une méthode systématique de certification technique développée à l'INRETS [Leurent1997], pour reconnaître l'erreur d'un modèle et si possible la réduire.

Il n'existe pas de procédure unique et formelle de validation, mais nous sommes alors confrontés à deux démarches différentes :

- le système n'existe pas (il s'agit de développer un outil d'aide à la création d'un système) : dans ce cas, il faut calculer analytiquement (statistiques, comparaison avec un système analogue existant, ...) un résultat de référence. Pour obtenir un modèle pouvant être analysé, celui-ci est simplifié. Cette simplification peut prendre plusieurs formes : retrait des aléas du modèle, gestion d'une seule entité par modèle, étude du régime permanent dans le cas où il y a un grand nombre d'entités. Une fois le résultat analytique mis en évidence, il peut être utilisé comme s'il s'agissait d'un résultat produit par un système existant [Galland2001].
- le système réel existe (il s'agit de développer un outil d'aide à la gestion d'un système) : cette comparaison aboutit rarement à la conclusion que le résultat réel est strictement identique au résultat de la simulation. Dans ce cas, il est donc indiqué d'introduire statistiquement la notion d'intervalle de confiance (une tolérance ou fenêtre de quelques pourcents). Dans le cas où le modèle ne correspond pas, il est toujours possible de le

rectifier, car ce qui nous intéresse, ce n'est pas le modèle en tant que tel, mais plutôt son comportement face à un ensemble de données d'entrée.

Nous nous plaçons pour l'instant dans le cas du développement d'un outil d'aide à la gestion d'un système existant. La validation d'une approche systémique est alors réalisée par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité. Cela nécessite l'obtention d'un modèle opérationnel, ce qui est fortement dépendant de l'existence d'une base de données. Ainsi, le choix des modèles sera dicté par la disponibilité des données et par le coût de leur obtention.

Le calage du modèle restera pour nous un problème de fond abordé tout au long de ces travaux. Comment faire pour pallier la non transposition parfaite de certains modèles à d'autres villes sur lesquelles les modèles n'avaient pas fait l'objet d'un premier calage du fait de la non disponibilité des données à un niveau de détail approprié pour satisfaire les performances du modèle ?

1.4 Modélisation de la chaîne de déplacements

Du point de vue conceptuel, pour nous, il y a deux démarches pour affecter des modèles :

- utiliser des modèles existants, identifier et mesurer leurs paramètres, les tester voire les critiquer, et s'en servir en terme de prévision si possible.
- mettre en place un modèle, soit parce qu'il n'en existe pas sur son sujet d'étude, soit parce que nous estimons que les modèles existants sont insatisfaisants.

L'évolution du contexte de la planification des transports urbains aura eu des répercussions sur la pertinence des modèles utilisés et sur la définition des instruments de simulation (voir [Goulias2004] pour un travail de synthèse sur les problématiques engendrés). Dans un premier temps, nous nous sommes efforcés d'examiner les pistes théoriques pertinentes susceptibles de répondre aux objectifs de notre simulateur et aux contraintes de validation. Etant une première pour nous, on ne peut qu'être noyés par la multitude de critères de classification, d'approches de modélisation, de points de vue ..., qui se sont développés depuis quelques décennies. Si nous pouvions l'expliquer par la complexité du système à étudier et la diversité d'objectifs à atteindre, on ne serait pas moins étonné par le nombre très limité d'outils opérationnels qui satisfont les utilisateurs par leur réalisme et par la convivialité d'utilisation.

1.4.1 Etat de l'art : modèles "comportementaux"

Après avoir présenté une micro ou macro analyse du comportement spatial des véhicules, différents courants de recherche ont commencé, dès les années 80, à s'intéresser à des comportements de groupes d'utilisateurs ou des comportements individuels. Leur développement s'explique par la nécessité de mieux comprendre les motivations exactes qui précèdent les choix de déplacement et donc la nécessité de passer d'une approche descriptive à une approche causale des phénomènes. C'est dans ce contexte que s'inscrivent nos travaux, c'est pourquoi nous avons consacré une

attention toute particulière aux travaux existants. Dans l'annexe Anx. A-3, nous avons réuni quelques approches et environnements basés sur ces modèles.

1.4.1.A Modèles à quatre étapes

- **Principe :**

Ces modèles ne tendent pas vers de "vraies" représentations des comportements décisionnels de déplacements, mais plutôt vers une approche pragmatique qui réduit de façon extrême le phénomène complexe des comportements de déplacements dans des composants. La structure standard de ces modèles schématisée ci-dessous est composée de quatre sous-modèles que certains décrivent comme étapes [Masson2000] (Figure 1-11).

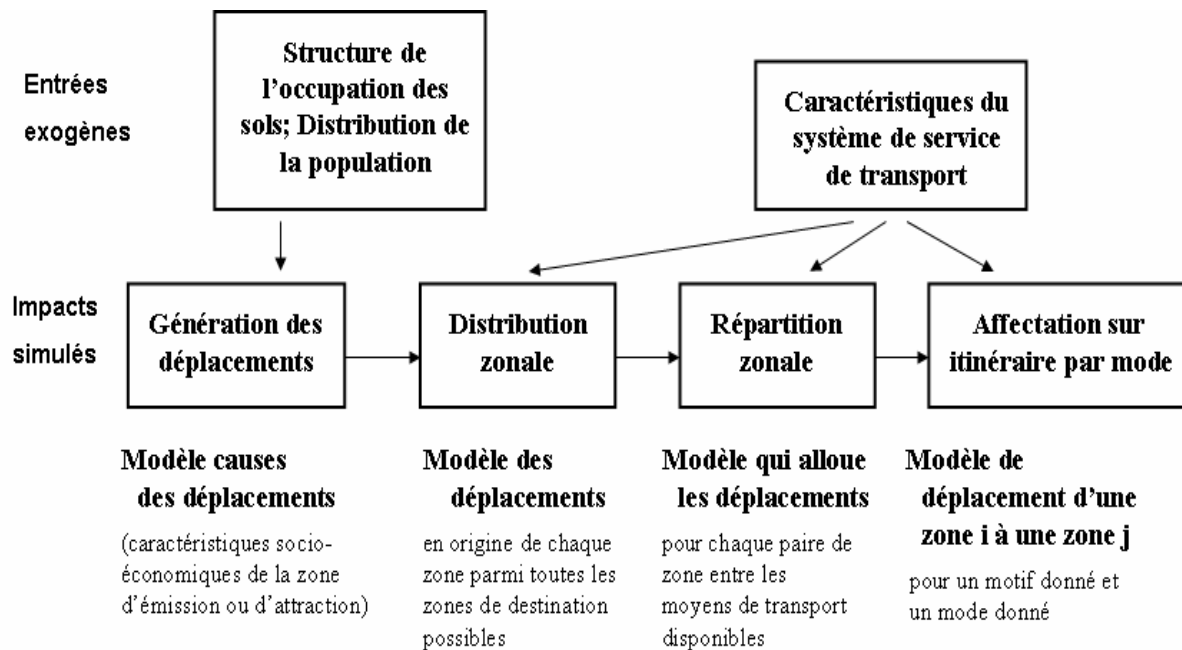


Figure 1-11. Description du modèle à 4 étapes

- **L'étape de génération :**

Le but de la modélisation de la génération des déplacements est de déterminer le niveau de demande agrégée pour les déplacements en origine et en destination de chaque zone de l'aire d'étude. Ceci est réalisé par motif de déplacement. Il est usuellement supposé que les déplacements émis ou reçus sont déterminés uniquement par des facteurs exogènes et plus particulièrement par les caractéristiques socio-économiques de la zone d'émission ou d'attraction.

- **L'étape de distribution géographique des déplacements :**

L'objectif de la modélisation de la distribution des déplacements est de distribuer le nombre total des déplacements en origine de chaque zone parmi toutes les zones de destination possibles. Les entrées du modèle sont les volumes d'émission et d'attraction des

déplacements par zone estimés dans la phase précédente, en relation avec des caractéristiques du service offert par le système de transport entre les deux zones.

- **L'étape de répartition modale :**

Le module de partage modal est certainement celui qui est le plus diversifié dans la pratique. Ce module alloue les déplacements pour chaque paire de zones entre les moyens de transport disponibles. Cependant, la diversité des modes est souvent ignorée ou appréhendée grossièrement en combinant tous les modes en deux modes (la voiture particulière et les transports collectifs).

- **L'étape d'affectation :**

Dans le sous-modèle d'affectation sur itinéraire, les déplacements d'une zone i à une zone j , pour un motif donné et pour un mode donné, sont affectés sur une représentation simplifiée du réseau routier ou du réseau des transports publics. Pour les déplacements en véhicule particulier, les déplacements de personnes doivent être convertis en déplacements de véhicules en utilisant un coefficient d'occupation moyen du véhicule.

- **Quelques critiques des modèles à quatre étapes :**

Certaines critiques particulières, adressées à ces modèles, peuvent être rapidement reprises :

- ***l'uni-directionnalité*** : La méthode classique part de l'hypothèse que le voyageur, pour se déplacer, effectue une série de "choix" successifs (génération, distribution, répartition modale et affectation). Dans la pratique, les modèles correspondant à ces étapes sont souvent mis en œuvre de manière rigide et linéaire, le processus commençant par le calcul du nombre de déplacements générés et/ou attirés et se terminant par l'affectation des flux sur les réseaux de transport. Les effets rétroactifs sont donc fréquemment négligés.
- ***la séquentialité*** : Un usager ne se trouve pas toujours confronté à la succession de choix proposée. La décision de se déplacer est parfois dépendante de la destination choisie, du mode de transport préféré ou même de l'itinéraire envisagé. Le choix du mode ou de l'itinéraire peut différer selon le créneau horaire et de l'individu lui-même.
- ***la lourdeur des modèles*** : La succession des différents modèles, l'importance des calculs impliqués, mais aussi les données nécessaires et les enquêtes à effectuer conduisent à des modèles dont la manipulation se révèle être lourde.
- ***l'agrégation des données*** : La procédure classique repose sur l'élaboration des modèles agrégés. Cela signifie qu'ils opèrent à partir de données agrégées, la plupart du temps selon un critère géographique.
- ***l'aspect "peu" comportemental*** : Les modèles ne sont pas fondés sur une théorie cohérente des comportements de déplacement. La représentation des comportements sous la forme de moyenne conduit les modèles à masquer l'hétérogénéité des habitudes de déplacement des ménages et des individus.

- **L'inadaptation à tester des politiques de transport et à prévoir à long terme** : Ce sont des modèles statiques. La mise en œuvre des rétroactions entre les étapes de simulation est très lourde à mener. Par ailleurs la structure de l'occupation des sols et la distribution géographique de la population sont introduites comme des données exogènes et supposées implicitement indépendantes de l'évolution du système de déplacements.

Malgré ces réserves, les modèles à quatre étapes semblent être largement utilisés en France et cela sous une forme quasi inchangée.

1.4.1.B Modèles à choix discrets ou désagrégés

- **Principe :**

Un des courants majeurs développés est celui des modèles de choix discrets ou modèles désagrégés qui se focalisent sur le concept de déplacement comme le résultat d'un processus de choix d'un décideur qui choisit d'effectuer une action particulière parmi un ensemble d'actions potentielles. Les choix relatifs au déplacement peuvent être la fréquence du déplacement, l'heure de déplacement, la destination, le mode de transport et l'itinéraire. L'ensemble du processus décisionnel est ici décomposé en une suite de choix élémentaires. Cette structure séquentielle n'est pas sans rappeler la forme du modèle classique (*Figure 1-12*). La différence est cependant bien réelle car chaque étape du processus de choix est à même de rétroagir sur les précédentes [Banos2005b].

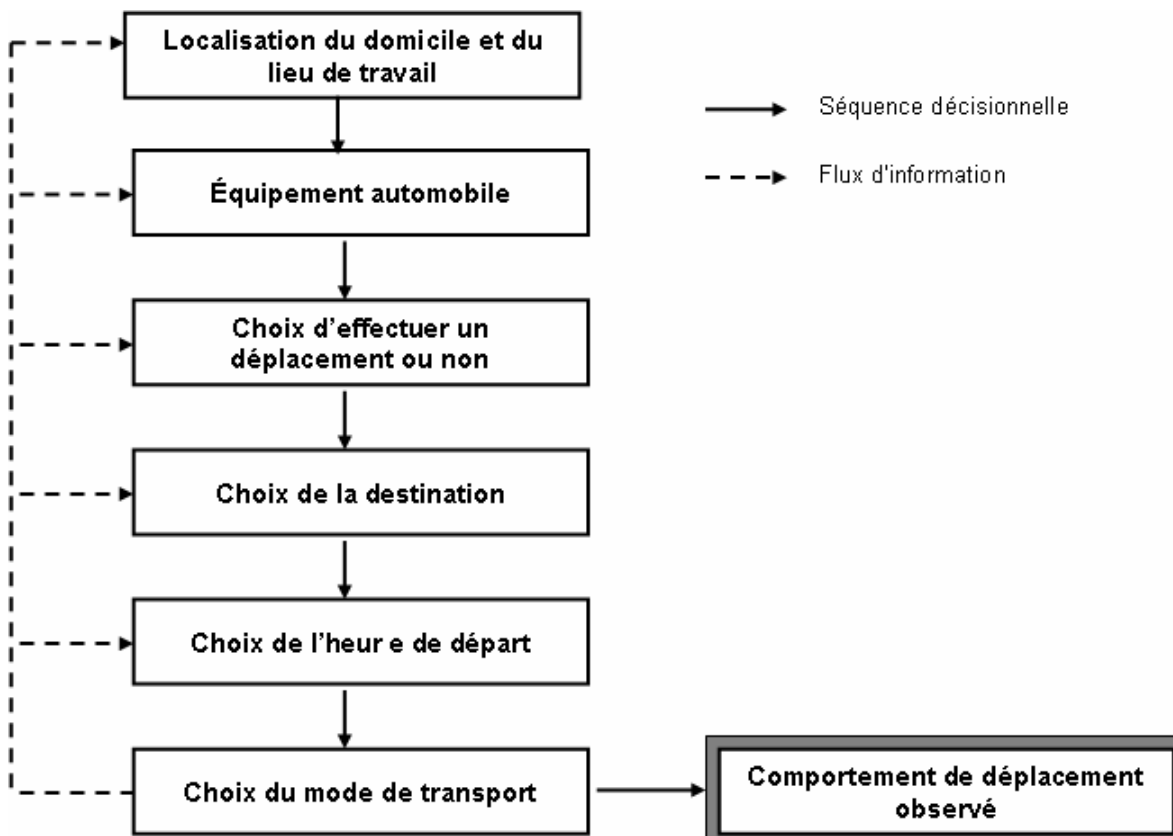


Figure 1-12. Modèle à 4 étapes avec rétroactions [Thevenin2002]

Les premiers travaux ont été menés par [Ben-Akiva1979] qui a formulé les problèmes de décision du mode de déplacement et de la localisation comme des problèmes de choix micro-économique du consommateur parmi des alternatives discrètes. Les modèles de choix discrets utilisés pour la modélisation des transports ont été spécifiés sous plusieurs formes. Le modèle probabiliste "logit" reste le plus utilisé.

[McFadden2000] présente une rétrospective de 30 ans sur le sujet. La caractéristique majeure des modèles désagrégés réside dans le changement d'unité d'observation, qui correspond non plus au comportement moyen d'un groupe de personnes mais aux habitudes individuelles de déplacement. Ce processus de choix est intégré dans le modèle à travers l'hypothèse qui fonde l'économie néoclassique : l'individu agissant de façon rationnelle est en mesure de classer les fonctions d'utilité de chaque possibilité et de choisir la solution la plus satisfaisante [Masson1998]. Cette vision déterministe est remise en cause par les psychologues qui considèrent que le processus de choix s'effectue de façon probabiliste [Ben-Akiva1998]. Par exemple, le choix modal d'un individu est en effet déterminé par des éléments directement mesurables comme le coût d'un voyage ou le temps d'un trajet. Cependant, il est aussi conditionné par des paramètres plus aléatoires comme le confort ou le temps perçu pour effectuer une correspondance. La fonction d'utilité pour un individu donné est une combinatoire de ces composantes élémentaires de nature hétérogène.

- **Quelques critiques des modèles de choix discrets :**

Cette méthodologie conduit à des progrès remarquables de l'analyse et de la prévision de la demande de transport. Cependant, elle n'est pas exempte de critiques diverses :

- ***collecte de données*** : La qualité des modèles de choix discrets est très étroitement liée aux données nécessaires à leur fonctionnement. Ainsi, il est souvent nécessaire de les produire (à l'aide d'enquêtes spécifiques) et/ou de faire appel à des outils informatiques performants. Ce type d'outils permet, par exemple, de dresser des matrices de temps existantes, ou de calculer des temps d'accès au réseau de transport collectif. Les modèles désagrégés, de façon générale, sont confrontés à la difficulté de la réagrégation des données.
- ***problèmes de stabilité des comportements*** : Parce que ces modèles traduisent des "lois de comportements", ils sont sensibles aux variations concernant les variables explicatives qui les caractérisent. Il est donc délicat de les utiliser sur le long terme, et d'effectuer des tests qui entraînent une "rupture" trop importante (par exemple, le test d'une nouvelle offre de transport collectif).
- ***cohérence*** : Les relations entre les variables socio-économiques caractéristiques des individus et les variables relatives au système de transport sont fondées sur des observations en coupe instantanée. Ainsi, si elles permettent d'estimer les effets de mesures à court terme, en revanche, elles rendent hasardeuse toute prévision à un horizon plus lointain.
- ***aspects conceptuels*** : Ces limites concernent le fait qu'on raisonne toujours "toutes choses égales par ailleurs". Le fait qu'un certain nombre de variables explicatives soient présentes au sein de ces modèles ne fait pas sortir de ce type de raisonnement. Ainsi, on

réfléchira toujours de la même manière, même si le nombre de variables est conséquent, certaines variables n'ayant de toute façon pas été intégrées dans la modélisation.

- **procédure de calage** : D'un point de vue pratique, on ne peut jamais dire que les résultats issus de la procédure de calage du modèle sont les meilleurs et ceci quelle que soit la procédure. Ceci peut correspondre à un calage à partir du principe des moindres carrés (l'écart entre l'observé et le prédit est minimisé) ou à partir du maximum de vraisemblance. La procédure de calage se résolvant par une méthode d'optimisation, un problème se pose : rien ne permet d'affirmer que son résultat est le meilleur (on obtient un optimum local et non un optimum global).
- **degré de pertinence** : Leur construction théorique cohérente est bâtie sur une formalisation mathématique qui nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. En particulier, l'hypothèse la plus critiquée est celle de l'indépendance entre les alternatives posée par l'utilisation du modèle "logit". La préférence d'un décideur entre deux alternatives ne dépend que de la différence des utilités mesurées entre ces deux alternatives. D'après cette hypothèse, l'introduction d'une nouvelle alternative dans un jeu donné d'alternatives modifiera les parts absolues de marché, mais laissera les parts relatives des alternatives considérées deux à deux. Il s'avère que cette propriété est loin d'être respectée dans la réalité. L'introduction du métro par exemple, aura tendance à enlever une part de marché plus importante aux autres modes collectifs plutôt qu'à la voiture particulière. Cette difficulté a été, cependant, partiellement levée par une proposition de Ben-Akiva [Ben-Akiva1999] consistant à modéliser le processus de choix selon une procédure emboîtée à deux (ou plusieurs) étapes.
- **aspects interrelationnelles** : La maximisation de l'utilité par un individu ne permet pas de prendre en considération les contraintes interrelationnelles auxquelles peut être soumis un usager du réseau routier, en particulier au sein de son ménage.

1.4.1.C Modèles basés sur les activités (activity-based models)

- **Principe** :

Un deuxième courant de recherche développé est à l'origine des modèles basés sur les activités (activity-based models) qui, non seulement prennent en compte les contraintes spatiales et temporelles des comportements, mais supposent également que les déplacements sont intimement liés à l'accomplissement d'un programme personnel d'activités (voir [Algers2001], [Guo2001], [Timmermans2002], [Bhat2003], [Buliung2005] pour une bonne synthèse de modèles opérationnels). Le schéma ci-après (*Figure 1-13*) montre que la demande pour le transport urbain est directement liée à la demande d'activités urbaines et découle de celle-ci [Kanafani1983].

Les activités telles que le travail, les achats, les affaires personnelles, les activités récréatives sont choisies dans un ensemble appelé "ensemble de demande d'activités" qui dépend des caractéristiques socio-économiques de l'individu ou du ménage (taille du ménage, revenu, nombre de personnes avec emploi) [Bhat2003b]. La réalisation des besoins dépend de la disponibilité des opportunités pour les accomplir. Dans un sens général, la disponibilité des

opportunités n'est pas seulement mesurée par la seule existence des activités, mais par leur présence à une certaine distance ou par le coût de transport.

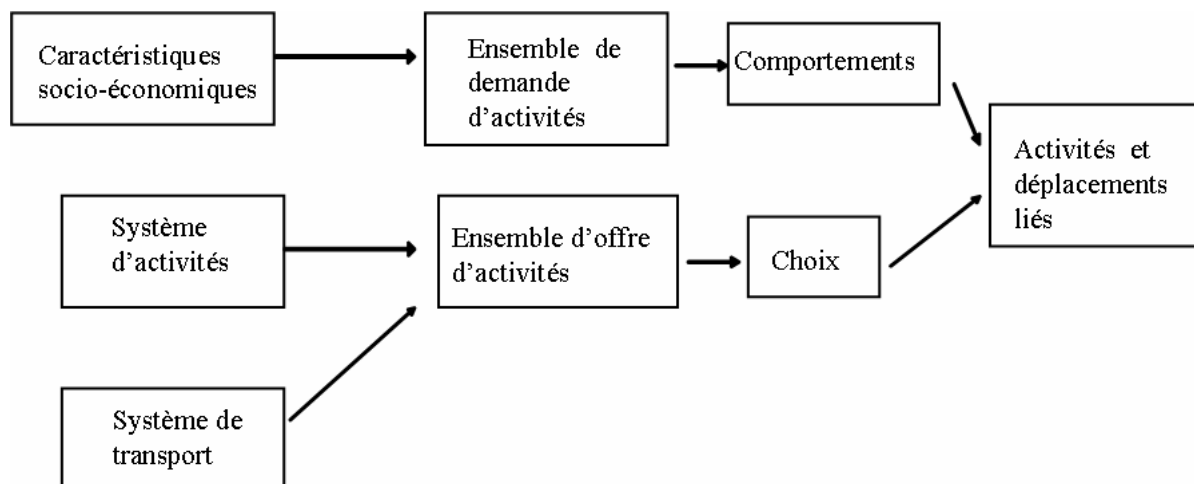


Figure 1-13. Schéma d'un modèle basé sur les activités

La complexité des déplacements urbains ne doit pas seulement être appréhendée en fonction d'une origine et d'une destination pour un motif donné. Il faut partir du constat que le retour au domicile entre les activités devient moins systématique, tandis que les enchaînements des activités s'effectuent sur des espaces plus étendus et à des horaires variés. Dans Figure 1-14, est illustrée la complexité d'un programme d'activités ainsi que l'étendue des déplacements pour une famille [Thevenin2002].

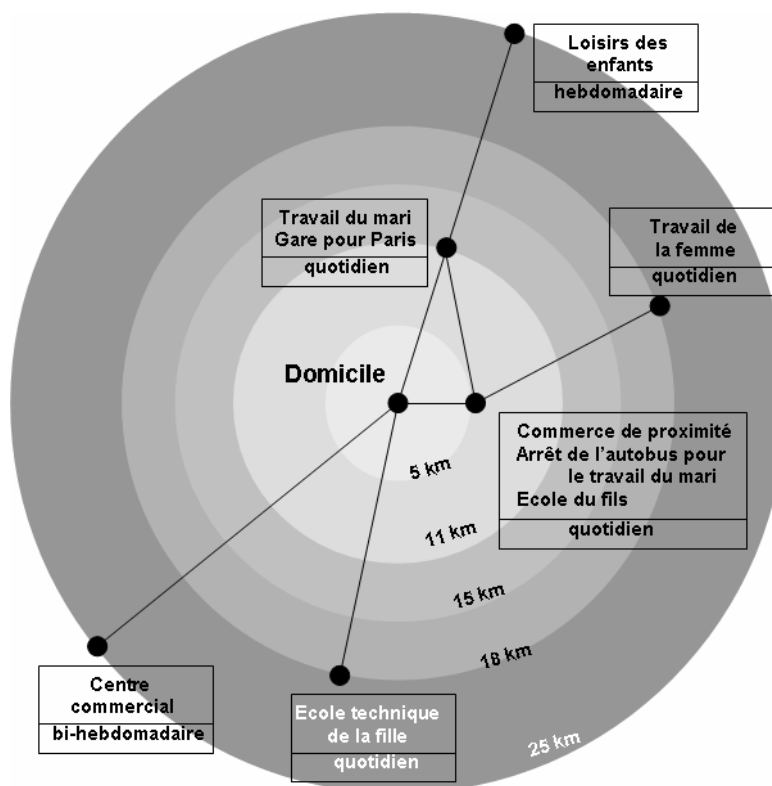


Figure 1-14. Chaîne d'activités périurbaines (dans [Thevenin2002])

- **Quelques critiques des modèles à base d'activités :**

- ***le caractère réducteur*** : L'ensemble d'offres d'activités est défini sur la base des schémas d'occupation des sols urbains et des caractéristiques du système de transport. Il n'existe pas d'élément prenant en compte le taux d'occupation de sols, la disponibilité de certaines activités selon le taux de fréquentation des bâtiments.
- ***le caractère "peu" prévisionnel*** : Tout comme les modèles désagrégés, ceux basés sur les activités répondent principalement à une problématique de planification à court terme.

1.4.1.D Modèles dynamiques

- **Principe :**

Les insatisfactions générées par les modèles précédents proviennent également des horizons temporels mal définis. En effet, si on considère une échelle temporelle de très court terme (durées inférieures à l'heure), les modèles des approches de modélisation de la demande de transport urbain standard, qu'ils soient agrégées ou désagrégées, sont mal adaptés car ils raisonnent sur des situations stationnaires et équilibrées. On sait bien que les conditions de circulation changent rapidement entre le moment du point de départ et celui d'arrivée, surtout dans les situations de congestion.

Certains modèles tentent de mieux intégrer la dimension temporelle [Han2004]. Il s'agit des modèles dynamiques à horizon temporel de court terme, qui intègrent explicitement les changements de la demande, c'est-à-dire, modélisent les comportements d'adaptation des usagers et les effets d'apprentissage. Les usagers s'adaptent par des processus d'apprentissage, utilisent leur expérience passée et l'information dont ils disposent pour faire face à des situations différentes. La prise en compte de ces éléments passe par le développement de modèles dynamiques qui intègrent explicitement les changements de la demande.

Ils tiennent compte explicitement des variations temporelles de la demande. Pour cela, le temps est découpé en intervalles de l'ordre de la minute ou fraction de minute, les flux entrant et sortant sur chaque arc sont datés, ainsi que les lois de conservation des flux. Proposer une matrice dynamique "origine-destination" veut dire, fournir au simulateur des données sur les véhicules qui transitent dans le réseau. Pour chaque véhicule, cela veut dire, connaître le type de véhicule, l'origine (point géographique de départ), la destination (point géographique de fin de trajet) et l'heure de départ.

- **Quelques critiques des modèles dynamiques :**

- ***l'application restreinte*** : la plupart des modèles restent à l'état de recherche et n'ont été utilisés qu'à titre expérimental sur des réseaux fictifs simplifiés.
- ***le caractère réducteur*** : selon les modèles, les usagers voient leur date de départ imposée ou au contraire la choisissent compte tenu des conditions de transport et de leur désir d'une date d'arrivée souhaitée, avec pénalités en cas de retard ou d'avance.

- **le caractère "peu" prévisionnel** : ils répondent principalement à une problématique de planification à court terme.
- **le manque de flexibilité** : ils ne s'appliquent, pour le moment, qu'au choix d'itinéraires et s'affranchissent de l'hypothèse de stationnarité.

1.4.1.E Modèles espace-temps-activité

- **Principe :**

Ce courant trouve ses origines dans des travaux issus de plusieurs disciplines des sciences sociales. T. Hägerstrand [Hägerstrand1970], le fondateur de la "Time geography", a tout d'abord mis en évidence les relations entre le programme d'activités des individus et les contraintes liées à l'espace et au temps. Son objectif a été de déterminer les possibilités de parcours en fonction des contraintes spatiales et temporelles. Dans ce but, le programme d'activités est projeté dans un graphique spatio-temporel à trois dimensions où l'espace est représenté dans les deux dimensions du plan et le temps défini par un axe vertical (*Figure 1-15* [Hägerstrand1970]).

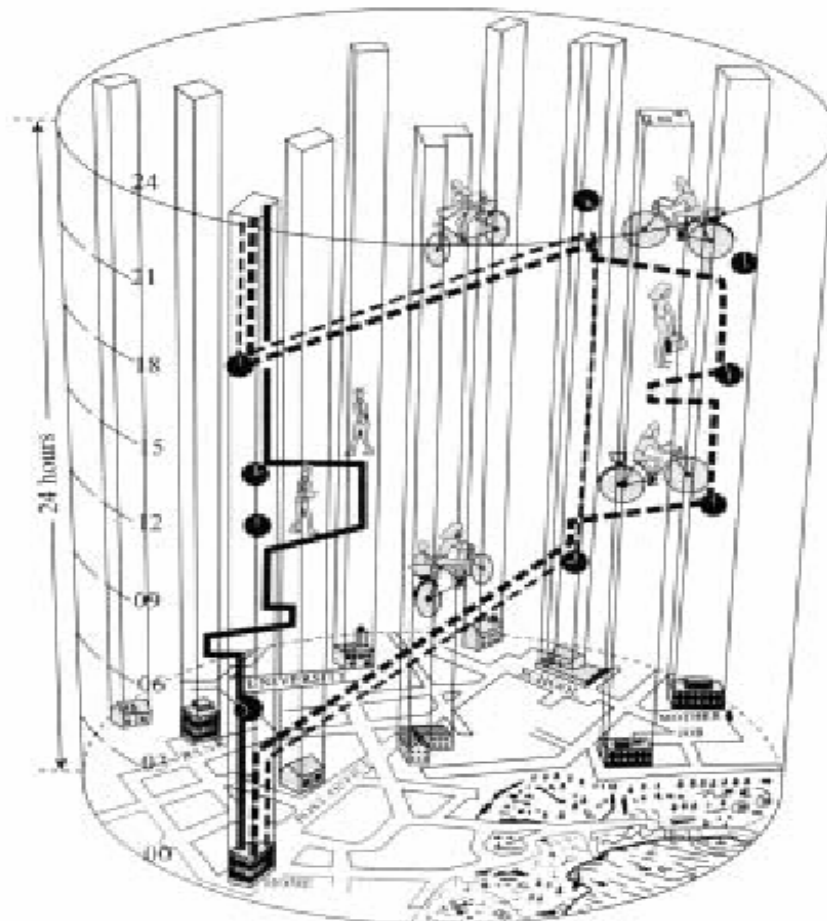


Figure 1-15. Exemple d'une zone de cheminement potentiel [Hägerstrand1970]

Cette structuration de l'information permet de localiser précisément les étapes d'un déplacement et de considérer le temps dans ses dimensions absolues et relatives. L'heure de départ, la durée, la fréquence, l'ordre de la séquence, tous ces éléments autorisent la constitution d'un cheminement spatio-temporel. De sorte, ces différents paramètres, associés aux contraintes propres aux modes de transport, permettent de déterminer, pour un individu donné, des zones de parcours potentielles représentées sous la forme d'un prisme spatio-temporel [Yamamoto2004].

CARLA, modèle développé à Oxford [Jones1990], a été conçu pour déterminer le nombre de cheminements spatio-temporels qu'un individu peut suivre pour effectuer son programme d'activités. STARCHILD (Simulation of Travel Activity Responses to Complex Household Interactive Logistic Decisions) [McNally1996] reprend un certain nombre de principes de la "Time geography" et de CARLA afin d'analyser les programmes d'activités des ménages en fonction d'attributs aussi variés que la durée du parcours, les temps d'attente et les différents types d'activités. STARCHILD est considéré comme le premier modèle opérationnel de l'approche Espace-Temps-Activité.

Plus récemment, un modèle de micro-simulation, baptisé AMOS, a été utilisé pour analyser les programmes d'activités sur la ville de Washington [Kitamura1998]. Dans le même temps, des approches économétriques ont été appliquées à Portland par Ben-Akiva [Ben-Akiva1998b] pour étudier les programmes d'activités au cours de la journée. Enfin, les mêmes auteurs participent à l'élaboration du modèle Espace-Temps-Activité destiné au simulateur TRANSIMS [Transims] dont l'objectif est de remplacer les outils de modélisation classiques [Nage12004].

- **Quelques critiques des modèles espace-temps-activité :**

- *l'application restreinte* : la plupart des modèles n'ont été utilisés qu'à titre expérimental sur des réseaux fictifs.
- *le caractère "peu" prévisionnel* : ils répondent principalement à une problématique de planification à court terme.
- *incomplet* : il n'y a pas, à notre connaissance, de tentatives abouties de modélisation des activités de stationnement.

1.4.2 Notre choix pour la modélisation de la phase « organisation des déplacements » : un modèle hybride

A l'analyse menée, aucune approche ne semblait répondre entièrement à notre problématique ou bien, exigeait des données statistiques non disponibles pour estimer les paramètres. Néanmoins, le modèle élaboré puise dans les principes des modèles existants.

Dans *Tableau 1-2*, nous présentons une synthèse des modèles sur lesquels s'appuie notre approche ainsi que nos ajustements pour les particularités conférées à notre simulateur.

Tableau 1-2. Synthèse de modèles "comportementaux" de déplacement urbain

<i>Points faibles</i>	<i>Commentaires</i>	<i>Nos ajustements</i>
<i>l'aspect "peu" comportemental</i>	La représentation des comportements sous la forme de moyenne conduit les modèles à masquer l'hétérogénéité des habitudes de déplacement des ménages et des individus. Cela revient à supposer que l'ensemble des individus se comporte globalement comme un individu représentatif moyen et induit une stabilité des comportements peu réaliste.	Constitution de groupes sociaux avec un comportement "moyen" représentatif qui va s'individualiser à la suite d'un processus d'apprentissage qui se reporte sur le choix de destination, modal, itinéraire. Une procédure de négociation sera développée afin de prendre en compte les interrelations entre partenaires de déplacement.
<i>l'aspect réducteur</i>	La plupart de variables explicatives, même si leur nombre est conséquent, sont de type quantitatif ; les variables liées à la perception qu'un usager a des conditions de trafic de sa ville, ne sont pas souvent intégrées dans la modélisation.	Elaboration de modèles s'appuyant à la fois sur les variables d'entrée quantitatives (prix, distances, nbre de personnes, ...) que qualitatives (accessibilité, attractivité, type d'activité, ...).
<i>l'aspect "peu" transposable</i>	La plupart des modèles sont généralement efficaces pour la ville pour laquelle ils ont été calibrés au départ, la génération de déplacements étant le plus souvent une variable exogène.	Introduction d'un taux de fréquentation des points d'attraction par créneaux horaires, jour et saison avec leur durée moyenne. Cela permet une distribution plus réaliste des activités pour chaque ville.
<i>la lourdeur des modèles</i>	La succession des différentes séquences, les calculs impliqués, mais aussi les données nécessaires conduisent à des modèles dont la manipulation se révèle lourde.	Une attention particulière sera accordée à la réduction du nombre de variables significatives par catégorie sociale, afin de ne pas affecter les performances calculatoires du simulateur.
<i>l'inadaptation à tester des alternatives</i>	L'introduction de nouveaux modes de transport et de nouveaux services est rarement prise en considération.	Développement de modèles comportementaux évolutifs, sans être contraints à reformuler le modèle décisionnel.
<i>la collecte de données</i>	Les relations entre les variables socio-économiques, les caractéristiques des individus et les variables relatives au système de transport sont fondées sur des observations en coupe instantanée. Ainsi, si elles permettent d'estimer les effets de mesures de court terme, en revanche, elles rendent hasardeuse toute prévision pour un horizon plus lointain.	Nous nous proposons d'assurer un caractère évolutif à la base de données utilisée pour la modélisation de choix afin de prendre en compte le caractère évolutif du comportement d'un usager du réseau routier, les conflits d'opinion au sein d'une même catégorie sociale et les particularités de perception de certaines variables selon l'environnement (la ville).
<i>le manque d'analyse de l'offre de stationnement</i>	Les modèles existants s'intéressent très peu à l'activité des parkings et aux déséquilibres de l'offre-demande de stationnement	Développement d'un modèle décisionnel pour le choix d'un parking couplé à un choix d'itinéraire en l'absence d'une place de stationnement pour mettre en évidence le phénomène de congestion induit.

Pour la phase organisation des déplacements, celles-ci sont :

- la possibilité de fournir une **vue macroscopique** sur l'activité de certaines zones urbaines à travers la fréquentation des points d'attraction, et cela, selon le mode de transport choisi et les facilités de stationnement.

Pour se faire, le principe directeur de notre démarche est basé sur les **modèles à base d'activités**. La demande de transport dépendra du programme d'activités élaboré par chaque individu ; les caractéristiques du ménage influenceront certaines étapes dans le processus d'organisation des déplacements (par exemple, choix modal). Le régulateur pourra également tester des stratégies comme l'emplacement des points d'attraction, introduction de nouveaux modes de transport, tarification pour les modes de transport publics, caractéristiques des parkings pour les véhicules publics et individuels, etc.

- la possibilité d'analyser d'une façon **microscopique** l'état de congestion de certaines zones urbaines, à travers les déplacements des individus.

Comme les modèles à base d'activités ne s'intéressent généralement pas à la façon dont les flux sont distribués sur le réseau, l'enchaînement des phases s'inspire des **modèles à quatre étapes**. Le régulateur pourra également tester des stratégies du type changement de sens de circulation, synchronisation des feux, aménagement de l'infrastructure, etc.

1.4.3 Les étapes du modèle d'organisation des déplacements en lien avec l'activité de stationnement

Dans *Figure 1-16* sont présentés d'une façon simplifiée les modules de notre futur simulateur en lien avec l'activité de stationnement. Les parties abordées dans cette thèse sont identifiées en gris.

Cela est justifié par le positionnement en terme de niveau de détail même si l'approche de modélisation est acquise. Dans la liste des entrées et sorties, loin d'être exhaustive, apparaît un besoin d'établir dès le début les types d'usagers auxquels nous nous intéressons, les données exogènes ou celles pouvant être renseignées par ailleurs, les hypothèses simplificatrices ou encore, les aspects qui seront omis dans un premier temps.

Nous partons de l'hypothèse que l'organisation des déplacements est basée sur l'ensemble de choix préliminaires (en amont) qu'un usager du réseau routier fait pour satisfaire à ses activités : choix modal, de destinations, de parkings. Une approche qui peut répondre à ce genre de problématiques est la modélisation des préférences communément appelée **modélisation des "comportements"** par les spécialistes transport (nous verrons plus tard, qu'en microsimulation, la notion de "comportement" n'a pas la même signification [Mathieu2005]). Il existe deux grandes catégories d'usagers du réseau routier, les locaux et les touristes (dont la particularité est de ne pas connaître la ville). Il en découle immédiatement deux logiques comportementales qui diffèrent dès la phase d'organisation d'un déplacement. Nous nous intéressons dans ces travaux aux déplacements des usagers locaux qui possèdent une base de connaissance (même si elle est approximative) permettant de faire un choix selon

une logique de classement. De ce fait, on leur attribuera une certaine connaissance des modes de transport existants, des emplacements des points d'attraction par rapport aux parkings existants, des caractéristiques des parkings (distance par rapport aux destinations, tarification, etc.) et des infrastructures permettant d'y accéder. En somme, en organisant leurs déplacements en amont, **les usagers locaux** sont considérés comme **omniscients (ou presque)**, hypothèse qui n'est pas sans justification en pratique.

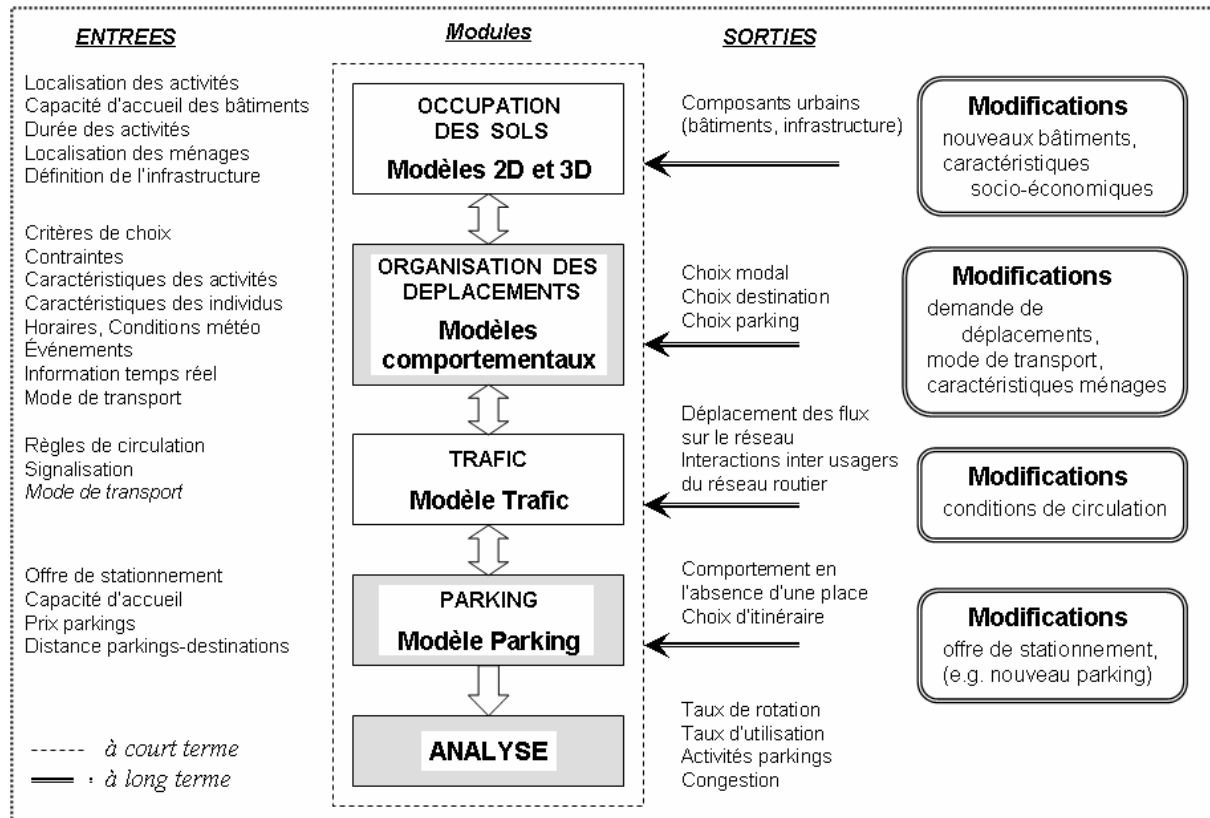


Figure 1-16. Entrées et Sorties pour les modules liés au stationnement

A la lecture des différentes approches, nous avons pu constater que la plupart des modèles n'intégraient que superficiellement la problématique de stationnement (voir l'état de l'art sur les outils de gestion dressé par Bhourri et Scemama [Bhourri2002b]). Nous considérons qu'un **trajet d'un conducteur local** est le **déplacement entre deux parkings** et que sa base de connaissances justifie un choix en amont. Cette phase doit précéder le choix d'itinéraire. Nous ne ferons pas de distinction entre les types de parkings (sur chaussée "on-street" ou hors chaussée "off-street") dans la mesure où les manœuvres pour stationner, ainsi que les changements de choix en temps réel (le conducteur aperçoit une place "on-street" qui se libère au voisinage d'un point d'attraction, ...) nécessiteraient le développement d'un module perception (intégré dans le module "trafic"), ce qui sort du cadre de nos travaux. Malgré la multitude d'approches existantes (voir [Henn2001]), il nous a semblé réducteur d'omettre le fait qu'un trajet peut s'ajuster en temps réel selon les conditions de trafic. Pour cette même raison, le choix d'itinéraire entre le parking d'origine et celui de destination ne sera pas abordé ; par contre ce sera le cas pour celui de recherche d'une place de stationnement autour d'un parking.

Le modèle retenu pour la modélisation de la demande de déplacement est illustré dans Figure 1-17. Chaque phase, sujet à part entière, répond à deux aspects : la possibilité d'**intégrer les spécificités d'une ville**, de **tester de nouvelles stratégies** en matière de transport et urbanisme ainsi que de prendre en compte des phases qui peuvent affecter à moyen terme et court terme l'**activité de stationnement**.

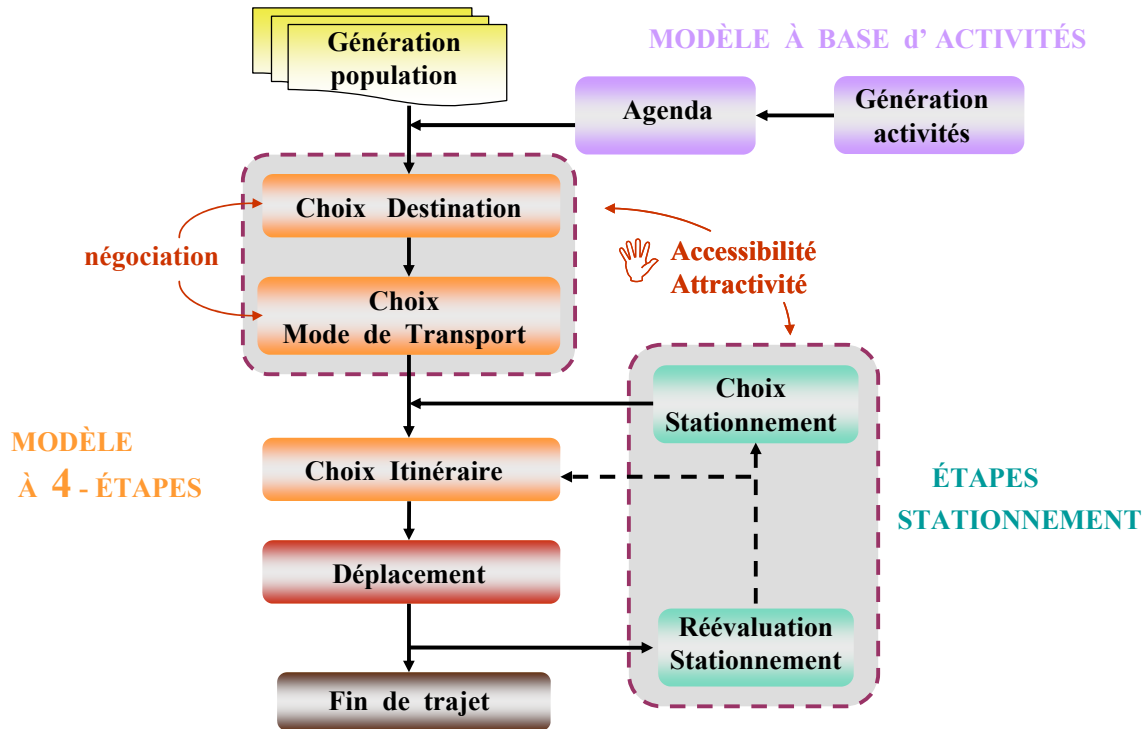


Figure 1-17. Notre modèle 4 étapes à base d'activités intégrant la phase stationnement

Dans un contexte dynamique de développement durable, des décideurs testent de nouveaux modes de transport et s'interrogent sur l'emplacement et la multiplication des points d'attraction répondant au même type d'activités (activités pouvant être effectuées sur des sites au choix comme les magasins ou les lieux de loisirs, ...). Dans le cas d'un choix portant sur la voiture personnelle, ces changements sont les principales causes qui affectent d'une façon drastique l'équilibre offre-demande de stationnement et les états de congestion induits, raisons pour lesquelles nous nous y intéresserons particulièrement.

Les autres étapes de notre modèle (n'étant pas abordées dans nos travaux de thèse) vont faire l'objet de quelques hypothèses de départ. Une de nos hypothèses de départ sera que, quelle que soit la ville, l'agenda d'un individu est "universel". Selon la catégorie sociodémographique à laquelle appartiendra un individu, elle intégrera le même type d'activités (emploi, école, "shopping" ou récréatives). Comme nous l'avons montré, la littérature de spécialité est abondante et des outils de planification et de hiérarchisation d'activités selon les heures de départ sont opérationnels et faciles à intégrer, raison pour laquelle nous ne nous attarderons pas sur ces aspects. Quant aux destinations "mono site" (mairie, préfecture, gare, ...), ce sont des données exogènes qui seront renseignées par l'utilisateur du simulateur (le régulateur).

Les problèmes de stationnement ne doivent pas, cependant, être imputés uniquement à une capacité insuffisante des parkings.

Dans la problématique des transports, le stationnement est considéré par les décideurs comme un levier de régulation des flux de véhicules (une sorte de péage urbain). Les réglementations axées sur la tarification et la limitation des durées de stationnement améliorent la rotation des véhicules. Elles permettent ainsi de faciliter l'accès des centres-villes pour les visiteurs aux dépens des personnes y travaillant. Mais de par leur aspect contraignant, ces réglementations sont susceptibles d'inciter les résidents motorisés à fuir vers les périphéries des villes. Il faut donc, aussi offrir à ceux-ci la possibilité de stationner leur véhicule à proximité de leur domicile et de leur travail sans que ceci devienne un défi insurmontable pour les urbanistes en charge de l'aménagement du territoire.

Il en découle deux problématiques, que nous aborderons en fin de thèse, qui sont : comment exploiter les résultats d'une simulation et comment opérer un optimum collectif visant à satisfaire au mieux les cahiers des charges des uns (urbanistes, spécialistes en transport) et les préférences des autres (usagers du réseau routier).

Du point de vue conceptuel, nous allons proposer une **démarche unique** de modélisation des phases de la chaîne de déplacements abordés.

Du point de vue comportemental, la particularité de notre travail est d'envisager d'inclure une **modélisation du comportement par groupe d'usagers**, et d'individualiser ces comportements par une **procédure d'apprentissage** à l'issue de l'évaluation du choix antérieur. La superposition des comportements individuels fournira un comportement global du trafic au niveau de la ville entière. Parallèlement, ce niveau de trafic influencera en retour le choix des acteurs sur les différentes étapes.

Nous allons essayer d'intégrer explicitement les changements de la demande, c'est-à-dire modéliser les **comportements d'adaptation** des usagers, en particulier devant l'introduction de nouvelles alternatives (modes de transport, offre de stationnement, destinations, ...).

1.5 Conclusion

Le développement d'un simulateur de trafic multimodal urbain 3D est un sujet récent au sein de notre équipe de recherche. Nous l'avons abordé à travers les attentes recensées des régulateurs de trafic urbain, attentes ayant été ensuite reprises en terme d'objectifs à atteindre. Nous avons présenté les spécificités de notre simulateur qui se démarque par la volonté de fournir un outil personnalisé pour la construction d'une ville à l'aide de composants réutilisables, par la possibilité de tester d'une façon interactive des comportements évolutifs des usagers du réseau routier dans un contexte dynamique transport-urbanisation.

Au stade actuel de développement de notre simulateur, nous nous sommes d'abord intéressés au choix d'une démarche de modélisation des phases qui sont intrinsèquement liées à la problématique offre-demande de stationnement (choix des modes de transport, des destinations, des itinéraires autour d'un parking).

Une proposition d'architecture modulaire visant à décrire la demande et le déroulement des

déplacements nous a permis de placer nos travaux de thèse dans le cadre du développement des modules d'organisation des déplacements et de stationnement.

Pour l'organisation des déplacements, nous avons proposé une approche hybride, utilisant à la fois le modèle à base d'activités qui permet de différencier les comportements des usagers dès la phase d'élaboration d'un programme d'activités et le principe de base du modèle à quatre-étapes avec des boucles de réitération à intégrer. Devant l'absence quasi-totale dans la littérature de spécialité d'un modèle opérationnel pour décrire l'activité des parkings, un modèle conceptuel est développé lors de cette thèse.

Ce chapitre rend surtout compte du besoin d'opérer avec des entités décisionnelles au niveau individuel ou des catégories sociodémographiques, afin de quantifier la perception de la qualité d'un service, intrinsèquement à l'origine des prises de décision en amont d'une chaîne de déplacements, des comportements et des changements de comportement d'un utilisateur du réseau urbain. Ce type d'approche a vocation à simuler d'une façon réaliste les effets à court et moyen terme des politiques de transport urbain et sera, par conséquent, la principale raison de notre choix du modèle informatique présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 - Modèle informatique pour l'organisation des déplacements urbains

Chapitre 2 -	Modèle informatique pour l'organisation des déplacements urbains.....	60
2.1	Introduction	61
2.2	Choix d'une approche et d'outils de modélisation.....	62
2.2.1	Approche Orientée Système Multi Agents (SMA)	62
2.2.2	Outils de modélisation.....	63
2.2.2.A	UML (Unified Modeling Language).....	63
2.2.2.B	Les réseaux de Petri (RdP) avec l'extension Colorée (RdPC).....	63
2.3	Transport urbain et technologie multi agents.....	64
2.3.1	Simulateurs d'ingénierie de trafic à base de SMA.....	64
2.3.2	Simulateurs trafic à base d'activités utilisant le paradigme SMA	65
2.3.2.A	Simulateur TRANSIMS	66
2.3.2.B	Simulateur ALBATROSS	66
2.3.2.C	Commentaires sur TRANSIMS et ALBATROSS	67
2.4	Architecture de notre simulateur trafic multi agents.....	68
2.4.1	Vue d'ensemble.....	68
2.4.2	Partie du SMA concernée par l'activité de stationnement	69
2.4.3	Agents "individus"	72
2.4.4	Agents "point d'attraction"	74
2.4.5	La notion d'adresse et d'emplacement d'un lieu	76
2.4.6	Agents "mode de transport"	77
2.4.7	Agents "offre de stationnement"	79
2.4.8	Agents "information"	81

2.4.9	Agent « pexavi »	82
2.5	Le régulateur et le SMA	82
2.6	Conclusion.....	85

2.1 Introduction

Dans le domaine du système de transport, la simulation est considérée par certains spécialistes comme étant le moyen privilégié de prédire avec fiabilité la tendance comportementale (sous réserve d'y entrer tous les facteurs susceptibles d'influencer l'évolution du système, ce qui, en fait, demeure difficile). Le succès d'une démarche de simulation est lié à la façon de représenter le système, de le découper en entités, de faire varier à chaque instant des variables pertinentes ou des règles de changement d'état, etc. Bien qu'aucun choix ne soit anodin, il faut admettre que la démarche lors des choix de méthodes ou d'outils n'est pas sans lien avec l'appartenance à une certaine communauté scientifique.

Nous allons montrer que ce n'est pourtant pas sans argument que notre choix s'est porté sur une architecture multi agents afin de développer notre simulateur trafic, en particulier le module organisation des déplacements. L'idée de base est de considérer le trafic comme le produit des interactions des conducteurs de véhicules dans une infrastructure routière et non uniquement comme un flux. Ce point de vue est celui des modèles de simulation dits comportementaux ou "individu-centrés", dont la conception repose sur les principes multi agents issus de la recherche en intelligence artificielle distribuée.

La terminologie "simulation multi agents" est utilisée par toute une communauté de chercheurs faisant usage de simulations exploratoires, utilisant des concepts de programmation dont l'aspect agent est plus ou moins marqué. Ce domaine, cependant, semble souffrir d'un manque de formalisme au niveau méthodologique et au niveau des techniques de simulations utilisées ainsi que des représentations des interactions. Nous allons tout d'abord faire le choix de formalismes permettant de décrire le système, d'assurer une description des interactions entre les agents et de pouvoir énoncer des propriétés de manière formelle.

Pour le développement de l'architecture de notre simulateur, nous allons nous intéresser aux performances et limites des simulateurs opérationnels existants ou en cours de développement, ayant des objectifs proches du nôtre, basés sur des modèles conceptuels de déplacement similaires (modèles de déplacement basés sur les activités des usagers du réseau routier) et utilisant la technologie multi agents. Des modèles descriptifs seront dégagés afin d'approfondir et représenter les briques des

démarches de conception du modèle informatique de notre simulateur et plus particulièrement du module organisation des déplacements.

2.2 Choix d'une approche et d'outils de modélisation

2.2.1 Approche Orientée Système Multi Agents (SMA)

Simuler le comportement fortement hétérogène des usagers d'un système de transport multimodal, intégrer des connaissances acquises et ce, selon des points de vue variés, illustrer la dynamique globale du système, voilà quelques exigences qui suggèrent un niveau de granularité élevé. Le terme individu-centré est utilisé pour qualifier la démarche consistant à décrire une population à travers les comportements des individus qui la composent. Il n'y a pas de règle qui doit régir la population dans sa globalité, l'évolution de celle-ci étant le résultat des interactions des individus dans leur environnement. Ce type d'approche est approprié à l'étude de systèmes complexes qui reposent sur une multitude d'interactions induites par des variations de conditions environnementales. Comme la plupart des systèmes réels, le système de transport urbain est distribué, décentralisé et formé d'entités de natures diverses.

L'approche individu-centré semblant répondre à nos attentes, il convient maintenant de s'interroger sur la manière de la mettre en œuvre. En la matière, il est souvent fait référence aux notions d'objets, d'objets actifs, d'agents et de systèmes multi agents (voir annexes Anx. B-1 et Anx. B-2). Ces considérations n'ont que peu d'importance du point de vue de l'organisation logique du modèle mais au moment de passer à la réalisation, il devient nécessaire de faire des choix techniques.

Les systèmes multi agents sont adaptés à l'étude des systèmes dynamiques complexes et connaissent un grand essor comme alternative des approches classiques dans la modélisation. En fonctionnement, ils peuvent produire des comportements typiquement adaptatifs. En simulation, ils permettent de décrire le comportement de systèmes réels, pour lesquels les modèles équationnels ne sont pas suffisants.

Notre choix est conforté par des travaux récents qui montrent que l'approche orientée système multi agents (avec des agents fixes ou mobiles) est de plus en plus employée pour simuler les systèmes complexes [Ferrand1997], [Lamy1999], [Fianyo2001], [Nielsen2006]. Dans notre cas, nous nous servons d'agents pour faire apparaître des individus, des emplacements de stationnement (parkings), des groupes socio-économiques, des représentants des pouvoirs publics. Dans ce sens, les agents ajoutent un élément comportemental amélioré aux modèles ; leur dynamisme inhérent peut aider à surmonter des faiblesses traditionnelles dans des modèles de trafic et d'occupation des sols. Ils sont particulièrement à même de manipuler les systèmes urbains à un niveau détaillé, tout en maintenant la capacité de mesurer jusqu'à des niveaux globaux. Aujourd'hui, la technologie multi agents existe et permet de rendre visible des simulations richement détaillées d'environnements urbains, ceci afin de faciliter la compréhension d'interaction.

2.2.2 Outils de modélisation

Le principal objectif d'une méthode de spécification est de modéliser et décrire un système soit en termes de fonctions soit en termes de données (approche fonctionnelle ou informationnelle). Dans le cas d'un SMA, on doit introduire une troisième dimension liée à l'aspect dynamique (voir la position sur chacun des trois axes de *Figure 2-1* des méthodes de spécification les plus utilisées [Mazouzi2001]). Il existe deux démarches envisageables : soit proposer une méthode unique prenant en compte les trois aspects (mais pour cela, aucune ne répond aux trois axes), soit combiner plusieurs méthodes pour obtenir une description complète.

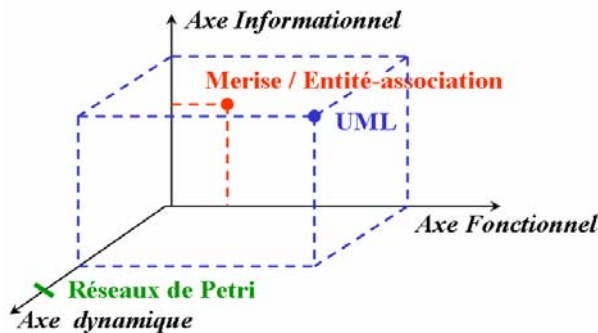


Figure 2-1. Les 3 axes pour des outils de modélisation [Mazouzi2001]

2.2.2.A UML (Unified Modeling Language)

UML n'est pas une méthode mais se veut un langage (et formalisme) universel pour spécifier, construire, décrire et documenter des systèmes logiciels.

UML dispose d'une sémantique suffisamment complète et riche pour une représentation assez exhaustive de la partie statique d'un système (voir annexe Anx. B-3). En revanche, UML doit être enrichi de formalismes permettant la vérification et la validation des modèles conçus. UML doit être aménagé pour une meilleure représentation des aspects dynamiques du système que nous étudions.

2.2.2.B Les réseaux de Petri (RdP) avec l'extension Colorée (RdPC)

Nous avons utilisé en parallèle un autre outil [Eshuis2003] qui permet de combler le manque en matière de représentation dynamique, de vérification et de validation d'un modèle. Notre attention s'est tournée vers un langage plus formel, les réseaux de Petri introduit par Carl Adam Petri dans sa thèse après une première communication [Petri1962].

Les réseaux de Petri sont des modèles très appropriés pour représenter des processus parallèles. Ils sont à la fois un formalisme mathématique et un langage graphique pour modéliser les systèmes complexes.

En plus des avantages des réseaux de Petri classiques, les réseaux de Petri colorés ([Jensen1997], [Bjorner2006]) permettent de faire communiquer aisément des agents ayant la même sémantique, par exemple, les agents "individus". Egalement, ils permettent de réaliser une modélisation paramétrée, par exemple, un RdPC peut modéliser un protocole avec n agents participants (où n est une variable). En général les places représentent les états des agents dans le cadre d'une conversation et les transitions modélisent des unités de traitement comme des envois, réceptions et traitements de messages ([Etraillier2002]). Se reporter à annexe Anx. B-4 pour des détails sur cette partie.

2.3 Transport urbain et technologie multi agents

2.3.1 Simulateurs d'ingénierie de trafic à base de SMA

Dans un rapport PREDIT pour le développement du simulateur trafic/urbanisme SIMAURIF (modèle dynamique de SIMulAtion de l'interaction Urbanisation-transports en Région Ile-de-France) [DePalma2004], De Palma, le concepteur du simulateur trafic METROPOLIS, affirme « pour les praticiens qui seraient un peu familiarisés avec les jeux vidéo ludiques, il serait souhaitable de trouver sur le marché un logiciel comparable au jeu SimCity mais à destinée professionnelle ».

Pour cela, on s'appuie sur le paradigme multi agents qui devient un outil privilégié des modélisateurs dès qu'il s'agit de simuler le comportement d'un système complexe évoluant dans un contexte dynamique (entreprises, transport, urbanisme, ...).

Ces dernières années, de nombreux travaux ont porté sur les problèmes de trafic en s'appuyant sur la technologie multi agents [Bazzan1999], [Breckle2000], [Hernandez2001], [Garcia-Serrano2003]. Cela va de la gestion du trafic au sol dans un système aéroportuaire [Nguyen2004] jusqu'à la simulation des mouvements pédestres [Schelhorn1999], Dijkstra [Dijkstra2000], [Kukla2001], [Batty2003], [Gloor2003]. Dans le cadre de la simulation du trafic routier urbain, les travaux [Roozmond1999], [Manikonda2001], [DeSchutter2003], [Wiering2004], [Zhang2004], [Van Katwijk2005] ont pour objectif de proposer une solution à la problématique de la coordination du trafic. Dans le même registre, Doniec [Doniec2006] utilise l'approche de Demazeau [Demazeau2001] dans le cadre du développement du simulateur ARCHISIM.

Les travaux de Chabrol et de Sarramia [Sarramia2002], [Chabrol2003] sur lesquels s'appuie notre démarche de simulation du trafic utilisant l'approche "car following" que nous avons évoquée dans le paragraphe §1.3.1.B, ont permis l'écriture de modèles de simulation pouvant exécuter simultanément différents niveaux de détails, grâce à la méthodologie ASCI-mi. Un exemple d'application est l'étude de l'impact d'une nouvelle grande voie de circulation à l'entrée d'une ville, nécessitant un modèle agrégé, combiné à la modélisation très fine, au niveau du véhicule, pour les infrastructures permettant d'accéder à la ville.

De plus en plus de travaux se focalisent sur les systèmes d'accompagnement à la conduite. Par exemple, le projet du simulateur de conduite SCANeR II de Renault axe ses travaux sur les agents autonomes [Champion1999], tandis que d'autres auteurs se sont penchés sur le couplage agents, données en temps réel et GIS (Geographic Information

Systems) [Itami2000] ou encore sur la manière de fournir des informations d'itinéraire aux conducteurs [Schleiffer2002]. Paruchuri [Paruchuri2002] et Bonté [Bonte2006] recherchent une forte coloration comportementale afin de différencier le comportement des conducteurs (prévoyant, normal, agressif, fous du guidons, ...).

Le paradigme multi agents est également employé pour la simulation des impacts de l'aménagement du territoire [Ferrand1997], [Vanbergue2000], [Noth2003], [Bellomo2004] avec une coloration agent plus ou moins marquée. Certains tentent d'intégrer le système de transport, mais il semble qu'aucune approche globale et structurée ne réponde aux problèmes communs apparaissant dans les systèmes urbains du trafic.

2.3.2 Simulateurs trafic à base d'activités utilisant le paradigme SMA

Il existe des simulateurs opérationnels à divers stades de développement qui sont basés sur la technologie multi agents (voir [Guo2001] pour une synthèse sur ces travaux), mais nous nous intéressons uniquement à ceux qui sont basés sur une approche de modélisation des déplacements similaire à celle adoptée pour notre simulateur (modèle basé sur les activités). Lors de ces dernières années, certaines recherches en matière de simulation semblent s'orienter vers la reconstitution des schémas d'activités à l'aide des systèmes multi agents (voir des synthèses récentes faites par [O'Kelly2003], [Buliung2005]). Ceci permet d'introduire une structure itérative visant à atteindre l'équilibre entre l'offre et la demande de transport. Compte tenu de la complexité et l'individualisation de la chaîne des déplacements, un besoin de discrétisation justifie l'intérêt croissant des outils orientés agents, qui se focalisent sur le comportement des entités décisionnelles.

Cependant, contrairement à la littérature abondante sur les modèles et l'analyse des activités (paragraphe §1.4.1.C), il existe très peu d'outils de simulation qui soient opérationnels et basés sur la technologie multi agents.

A notre connaissance, il n'existe pas d'outil opérationnel développé en France, mais juste des projets en cours dont nous rappellerons un des plus avancés, le projet MIRO (Modélisation Intra-urbaine des Rythmes quOtidien) dans le cadre PREDIT [MIRO2005]. Le but est de concevoir un simulateur basé sur les activités afin d'assister les décideurs dans la définition de nouvelles politiques urbaines temporelles. L'approche "Time-Geography" est employée (comme pour FAMOS [Pendyala2005]) pour prendre en considération le dynamisme spatio-temporel des activités des agents. L'approche est centrée individu afin de prendre en compte un enchaînement de déplacements et non plus des déplacements simples et segmentés, tout comme les contraintes de tout ordre qui orientent les choix des individus. Le caractère innovant de ce projet tient à son ambition de contribuer à une approche renouvelée des rythmes urbains, à la fois par un apport de connaissances nouvelles issues d'enquêtes spécifiquement mises en place, par la création de protocoles méthodologiques reproductibles et par la mise au point d'outils informatiques aptes à être diffusés. Les dernières avancées [Banos2005] concernent les interactions entre voitures et piétons.

Nous avons focalisé notre analyse sur deux simulateurs opérationnels, deux projets ambitieux qui sont réactualisés en permanence afin d'améliorer leurs performances et le

réalisme de la représentation comportementale. Le choix n'est ni anodin, ni réducteur, en effet leurs bases et leurs objectifs sont proches de ceux que nous nous sommes fixés.

2.3.2.A Simulateur TRANSIMS

TRANSIMS (TRansportation ANalysis SIMulation System, développé par Los Alamos National Laboratory) [Transims] utilise la technologie multi agents pour modéliser les usagers du réseau routier comme des agents qui effectuent des activités indépendamment des autres [Raney2002], [Nagel2003], [Nagel2004].

L'objectif est de fournir aux utilisateurs des informations complètes sur les impacts du trafic, la congestion, la pollution et les conséquences de l'évacuation en urgence. TRANSIMS crée une région métropolitaine virtuelle avec une représentation exhaustive de la population, des activités journalières et de l'infrastructure de transport. Il simule le mouvement multimodal des voyageurs (voiture, camions, piéton, vélo).

Une autre ambition de l'outil est d'évaluer les impacts des changements de stratégies trafic ou des caractéristiques démographiques (minorités, regroupements à revenus modérés) sur la distribution modale, l'heure de départ et les comportements en général des utilisateurs du réseau transport. TRANSIMS remplace le processus à quatre étapes par une approche multi agents et travaille avec des voyageurs individuels dans tous les modules.

2.3.2.B Simulateur ALBATROSS

ALBATROSS (A Learning Based Transportation Oriented Simulation System), [Arentze2000], [Arentze2000b] est également basé sur les activités et est le résultat d'une complexe interaction entre les besoins individuels d'un ménage et diverses contraintes. Il est basé sur un des modèles dits informatiques (Computational Process Models - CPM) qui s'intéressent davantage à une modélisation comportementale du système activités/trafic [Gärbling1993]. Un CPM est un programme informatique basé sur un ensemble de règles du type condition-action (IF-THEN) qui spécifie comment une tâche se déroule (voir [Arentze2000] pour des discussions et des applications détaillées au sujet de ces méthodes). L'approche de modélisation se focalise sur le processus de décision et utilise des heuristiques contrairement aux méthodes basées sur la maximisation de l'utilité pour TRANSIMS.

Une raison pour démarrer le projet a été le besoin d'évaluer l'impact des stratégies en matière économique (comme le changement des heures de travail ou d'ouverture des magasins, par exemple). Une autre raison a été l'évaluation des stratégies de transport en matière de congestion, pollution, bruit ou sécurité des usagers.

Le système est formé d'agents qui manipulent les données, les résultats *des choix heuristiques* et des modèles de simulation, les calculs des indicateurs et l'évaluation des divers scénarios. La classification plutôt détaillée des activités, l'inclusion d'un ensemble complet d'espace-temps et des contraintes d'établissement du programme sont les points forts du modèle comparés à la plupart d'autres modèles. ALBATROSS prévoit quelles sont les activités à effectuer, où, quand, pour combien de temps, et selon quel mode de transport. Les activités sont du type "in-home" et "out-of-home" et également obligatoires (travail, école, ...)

ou non obligatoires (récréatives, magasins). Chaque individu possède un agenda avec des activités, réunies dans un programme d'activités, qu'il doit effectuer dans une période de temps. La génération de l'agenda des activités est dépendante des décisions à long terme liées au statut de la famille, du travail, de résidence et de propriété de voitures. Les modes disponibles sont choisis en accord avec des contraintes spatio-temporelles et démographiques comme le nombre d'heures de travail, les horaires d'ouverture des commerces, l'âge de l'individu.

2.3.2.C Commentaires sur TRANSIMS et ALBATROSS

La description des modules, des performances et limites ainsi que les dernières réactualisations de ces deux simulateurs figurent dans ANNEXE C -.

Ici, nous commenterons quelques aspects étant en inadéquation avec nos objectifs fixés.

- **Au niveau des agents humains :**

- *Modèles décisionnels* : les processus décisionnels, qu'ils soient de nature probabiliste ou heuristiques, ne peuvent pas reproduire un certain ressenti ou perception particulière des notions d'accessibilité, d'attractivité, de sûreté, qui sont, de plus, intimement liées aux caractéristiques d'une ville.
- *Dynamique du comportement* : au niveau agent, le mécanisme d'apprentissage n'est pas approfondi, ce qui peut affecter des choix dans la destination, le mode, l'heure de départ.
- *Interactions interindividuelles* : des interactions parmi des agents devraient prendre la forme de participation commune à certaines activités, tel que, faire des déplacements ensemble ou s'engager dans des activités récréatives, activités de covoiturage et d'accompagnement. De telles interactions peuvent mener aux contraintes qui peuvent être très importantes au niveau du trafic.

- **Au niveau de la structuration des activités :**

- *Génération des activités* : Bien que certains modèles partent de choix d'activités en relation avec les caractéristiques sociodémographiques des individus, à notre connaissance, ne sont pas pris en compte les caractéristiques des points d'attraction autres que les horaires d'ouverture ou le nombre de personnes employées. Cela peut mener à des incohérences importantes. Ainsi, il est possible de voir une centaine d'agents constituer leurs agendas et choisir la même destination et cela dans le même créneau horaire, alors que le taux de fréquentation du bâtiment ne doit pas excéder 15 personnes par heure.
- *Unité de temps pour l'analyse* : L'unité de l'analyse typiquement utilisée est le jour de la semaine, sous prétexte qu'il y a peu de variation en fonction des jours de la semaine. Cependant, des travaux se concentrant sur des aspects simples (tel que la fréquence de déplacement, le nombre et le type d'arrêts effectués pendant les trajets) ont indiqué la variabilité considérable selon les jours de la semaine (voir [Prasetyo2003]).

- **Au niveau de l'analyse :**

- *Difficulté de transposabilité* : Les scénarios sont figés, avec des variables d'entrée qui ne sont pas toujours celles que voudraient tester un régulateur. Ainsi, la difficulté de tester de nouvelles alternatives (modes de transport, points d'attraction, etc.) demeure.
- *Absence d'analyse de l'activité des parkings* : Comme dans la plupart des simulateurs d'ingénierie de trafic, et selon l'état actuel de développement, l'analyse de l'activité de stationnement est très peu abordée.

2.4 Architecture de notre simulateur trafic multi agents

2.4.1 Vue d'ensemble

La description des unités de notre simulateur (*Figure 2-2*) a été faite lors des premiers travaux précédents menés par notre équipe [Augeraud2005]. Nous les rappelons brièvement dans la mesure où elles constituent le cadre dans lequel s'inscrivent les propositions de ce mémoire.

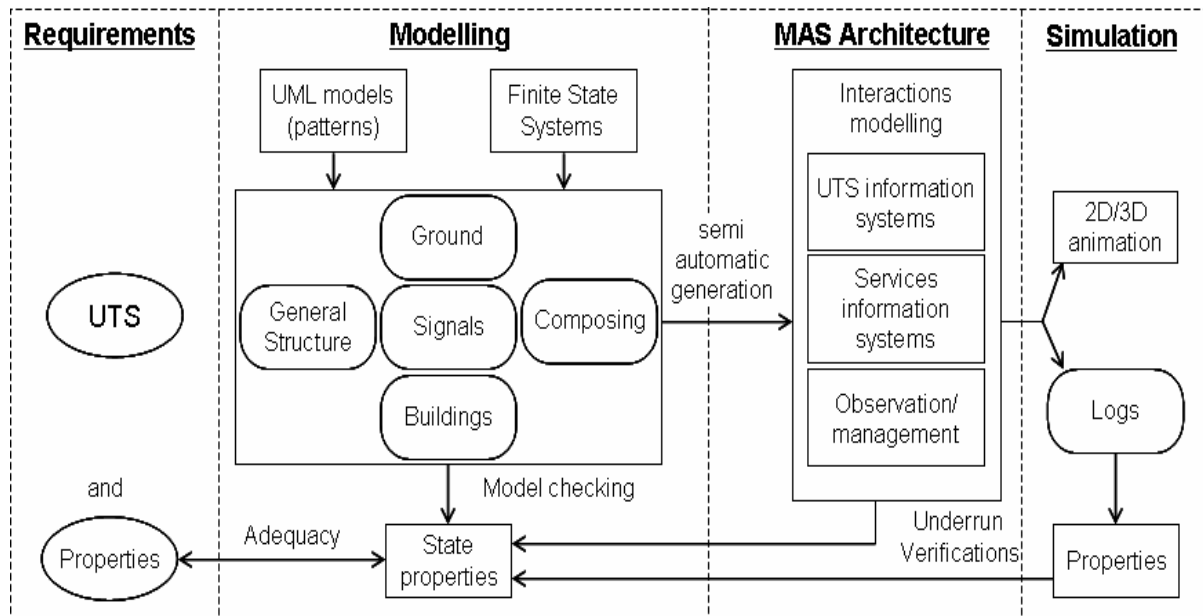


Figure 2-2. Notre proposition pour l'architecture du simulateur [Augeraud2005]

Le système multi agents est divisé en trois sous-ensembles. Chacun d'eux est consacré à un aspect du problème : simuler le monde réel urbain avec ses trafics, contrôler les services que certains peuvent consulter comme les systèmes d'information et gérer ces systèmes d'information afin d'améliorer la qualité des services à offrir aux utilisateurs :

- le premier concerne la **simulation urbaine du trafic**. Les agents participent à l'activité de la ville (véhicules, bicyclettes, piétons ...). Leurs comportements doivent reproduire des activités réelles très proches de celles existantes dans la ville.

- le second concerne les comportements des **services de système d'information**. Dans la présente partie, les agents sont les utilisateurs et le système d'information lui-même. Les actions des agents appartenant à ce sous-ensemble sont le résultat des interactions entre les agents de la simulation du système urbain du trafic. Ces interactions peuvent produire des nouveaux véhicules, nouveaux piétons ... dans le système.
- le troisième est consacré à **l'aide à la décision**. Ce sous-ensemble est organisé pour des buts d'observation et d'analyse sur des services étudiés. Le système produit une synthèse de l'analyse entière tenant compte des statistiques voulues par l'utilisateur et en rassemblant des données de simulation des autres sous-ensembles.

Chaque voyageur et, potentiellement, chaque entité de la simulation, comme les feux de circulation, la signalisation, les ronds points, les points d'attraction, etc. sont représentés en tant qu'objets ou agents qui prennent des décisions concernant leurs actions. En exécutant leurs plans de voyage, les conducteurs de véhicule accélèrent, ralentissent, tournent, changent de voies, passent et interagissent avec les autres véhicules, les signaux et la signalisation. Les interactions entre les agents vont faire émerger, autant que possible, une représentation réaliste du trafic multimodal.

Au niveau trafic, plusieurs modèles d'interactions sont distingués :

- **entre les entités homogènes** comme, par exemple, entre les véhicules où trois modèles sont appliqués: un modèle "car following" (décrivant des réactions de véhicule qui en suit d'autres), un modèle décrivant les règles à suivre aux jonctions et un dernier conçu pour des actions de dépassement.
- **entre les entités hétérogènes** comme, par exemple, entre véhicules et signaux (feux de circulation, signaux statiques ...), contrôleurs urbains du trafic (UTC) au niveau local et au niveau global (communication avec le système de gestion central), ou encore entre des piétons et des véhicules (un piéton peut devenir un conducteur).

Pour la conception du SMA, nous avons abordé une organisation à un seul niveau, intéressante pour son autonomie, utilisable pour les systèmes ouverts. L'univers virtuel n'est en fait constitué que de composants autonomes en interaction dont les actions conjointes aboutissent à un fonctionnement cohérent du système dans sa globalité. Le fait qu'il n'y ait pas de contrôle global des entités permet de faciliter les modifications du système et de faire cohabiter dans le même environnement des systèmes conçus séparément.

2.4.2 Partie du SMA concernée par l'activité de stationnement

Un des problèmes majeurs dans la construction d'un SMA est le nombre important d'agents qu'on est tenté de créer. Nous avons identifié comme agent toute entité matérielle ou physique capable d'agir d'une façon directe ou indirecte sur l'activité de stationnement.

Nous avons des agents "physiques" qui trouvent des correspondances dans l'environnement réel d'une ville (offres de stationnement, points d'attraction, système de signalisation, modes de transport, agents information et agents "individus"). Certains sont des objets "évolués" qui réagissent directement aux stimuli et ont une perception locale de

l'environnement, mais à qui nous donnons la possibilité d'améliorer leurs performances et leurs communications. Pour le cas de la signalisation, un agent contrôle un ensemble de feux d'une zone.

Créer un agent juste pour déléguer une tâche, tel qu'un calcul, ne se justifie pas forcément car un agent possède une occupation mémoire et engendre des coûts de communication. Cependant la création d'un agent peut se justifier si l'agent a parfois l'alternative entre exécuter le travail lui-même ou le déléguer à un agent "sous-traitant". A cet effet nous avons créé un agent appelé "pexavvi" qui est détaillé dans un des paragraphes suivants (§2.4.9).

Les principaux agents, regroupés en paquetages avec leurs interactions, et affectés aux modules présentés dans *Figure 1-16*, sont présentés dans *Figure 2-3*, figure adaptée de celle de [Boussier2005b].

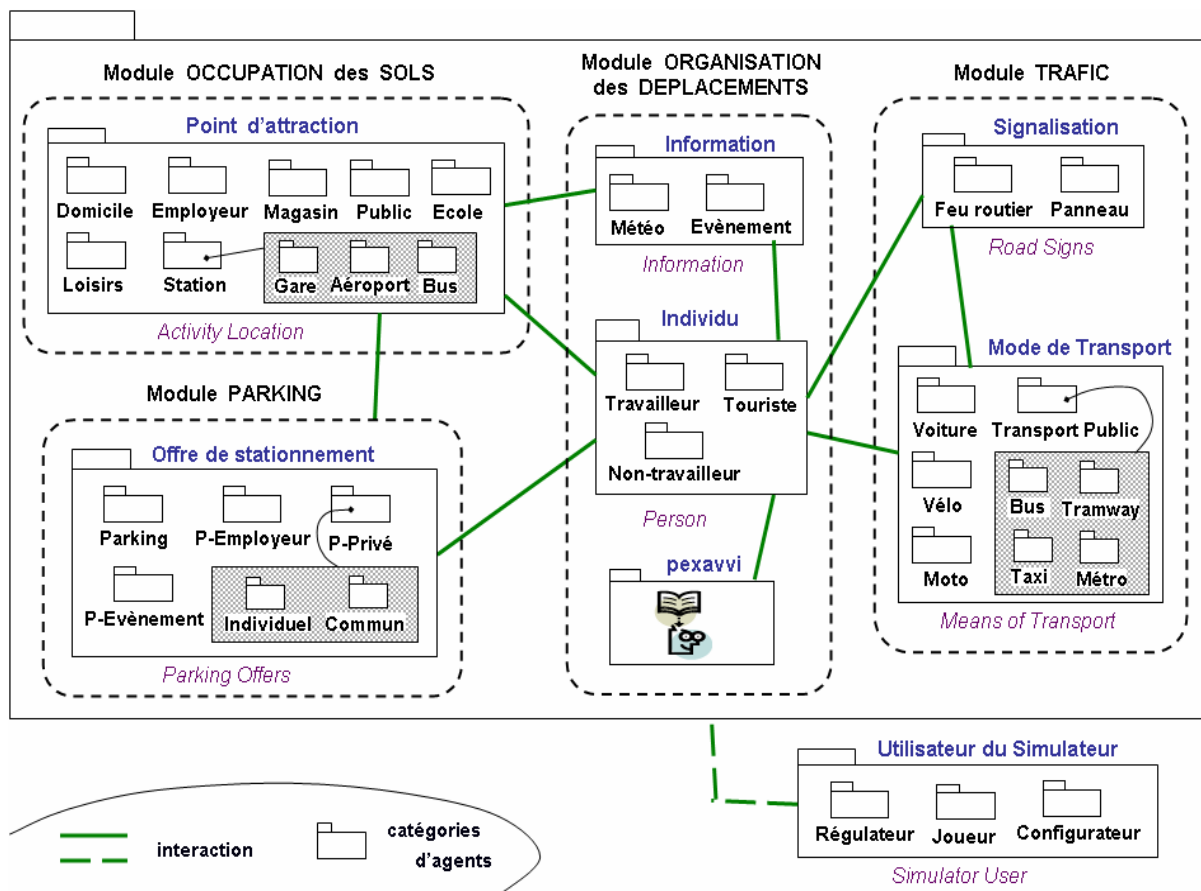


Figure 2-3. Les principaux paquetages d'agents, interactions et modules de notre simulateur

Les agents sont décrits de manière plus détaillée dans les paragraphes suivants de ce chapitre.

Nous présentons dans *Figure 2-4* un diagramme de classes comme la vue synthétique montrant les principales classes agents pour la planification des activités afin de pourvoir les déplacements. Nous avons l'activité (quoi), le moment passé, présent et futur (quand, combien de temps), le mode de transport (comment), le parking (comment, où), le lieu de l'activité (où), les personnes (qui), etc.

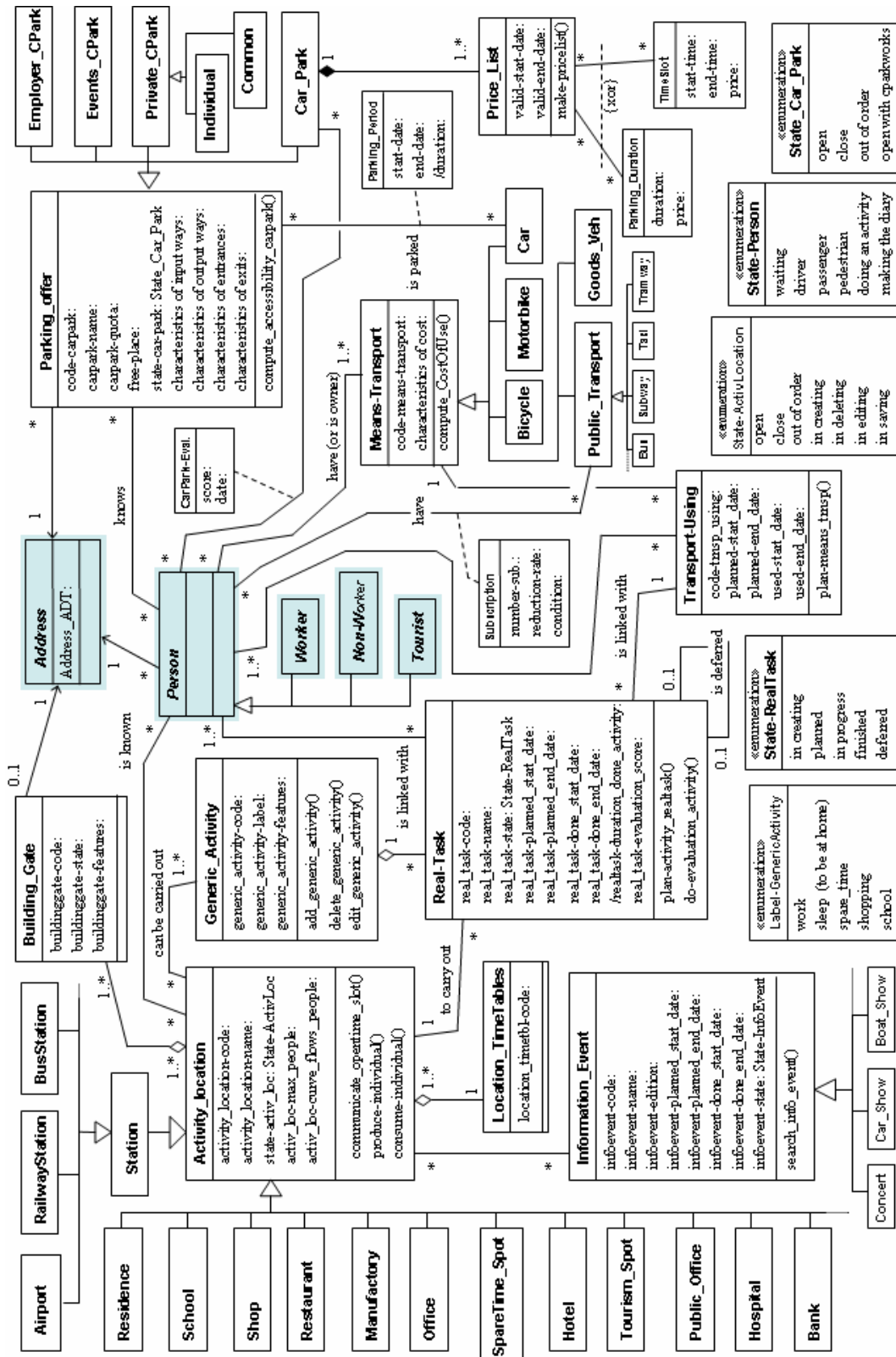


Figure 2-4. Diagramme de classes de la réalisation d'activités par les agents "individus"

L'agenda en tant que tel n'existe pas (pas de classe portant le nom), c'est un ensemble de tâches planifiées. Dans ce diagramme, nous pouvons remarquer que les activités effectuées sont mémorisées, ainsi que celles qui ont été différées (annulées puis replanifiées).

2.4.3 Agents "individus"

Les agents usagers du réseau routier sont classés en groupes basés sur les caractéristiques sociodémographiques. Contrairement à d'autres travaux qui distinguent deux types d'usagers (travailleurs et non travailleurs), nous avons défini deux grandes catégories, les locaux ayant une connaissance de la ville et les "étrangers" (principalement les touristes) ne connaissant pas la ville, des sous-catégories comme les travailleurs, les non travailleurs et les étudiants (voir Figure 2-5). Nous verrons par la suite dans la description des agents "point d'attraction" (§2.5) et dans le paragraphe §2.5 les raisons pour lesquelles il existe des agents "enfant".

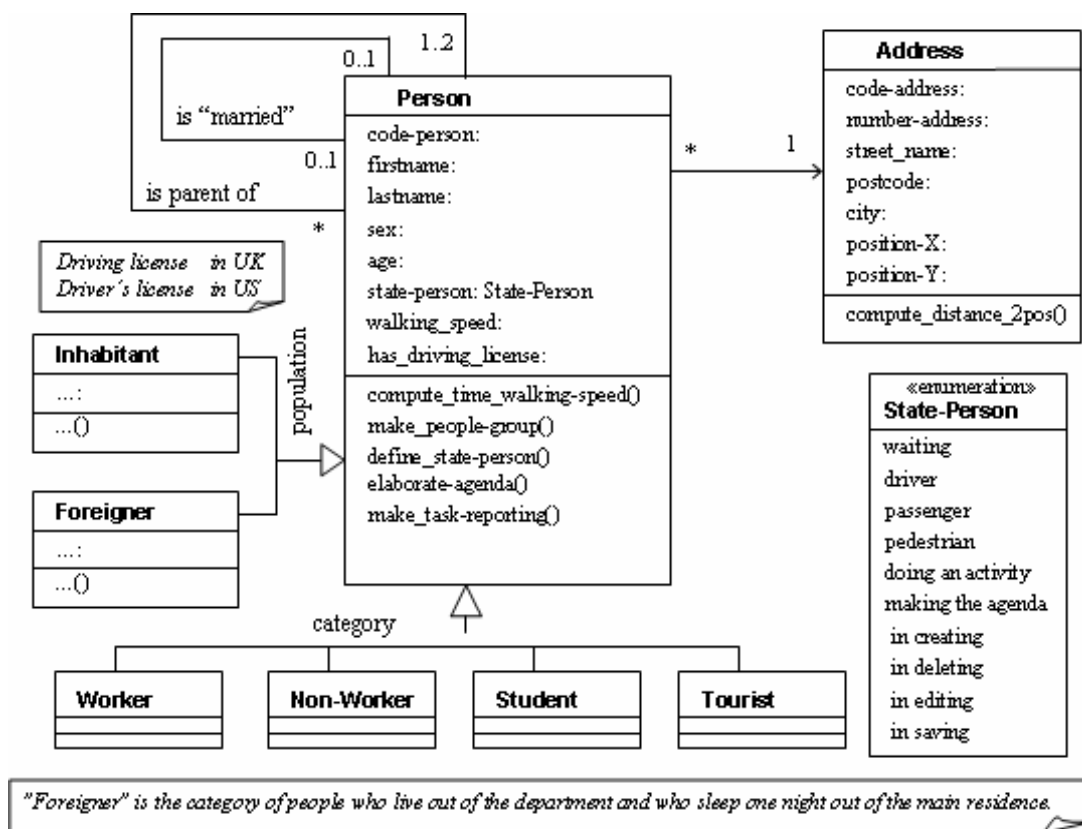


Figure 2-5. Diagramme de classes décrivant les agents "individu"

Il y a deux principales raisons pour ce découpage. Pour le choix du parking, les locaux disposent d'une mémoire et d'un vécu qui vont affecter le choix, alors que les touristes utilisent les informations ponctuelles. En revanche, selon le type d'activité à effectuer, les agendas des touristes ne contiendront pas les mêmes types d'activités, les contraintes ou les horaires des locaux travailleurs qui, à leur tour, diffèrent de ceux des non travailleurs. La règle veut que l'unité retenue pour analyser la mobilité dans l'espace soit le département et l'unité de temps la journée (24 h), qui correspond au champ du tourisme. En effet, selon les normes internationales, est touriste toute personne qui voyage, quel qu'en soit le motif, avec

au moins une nuit passée hors du domicile. Pour estimer, jour par jour, la population présente dans chaque département, on évalue d'une part les absences, ..., et d'autre part la présence ce même jour dans le département des touristes français ou étrangers. Cette estimation fait appel à des sources différentes, l'une portant sur la population résidant en France, l'autre sur les touristes étrangers. Le recensement de la population [INSEE-RP1999] sert de base à l'évaluation de la population résidente de chaque département.

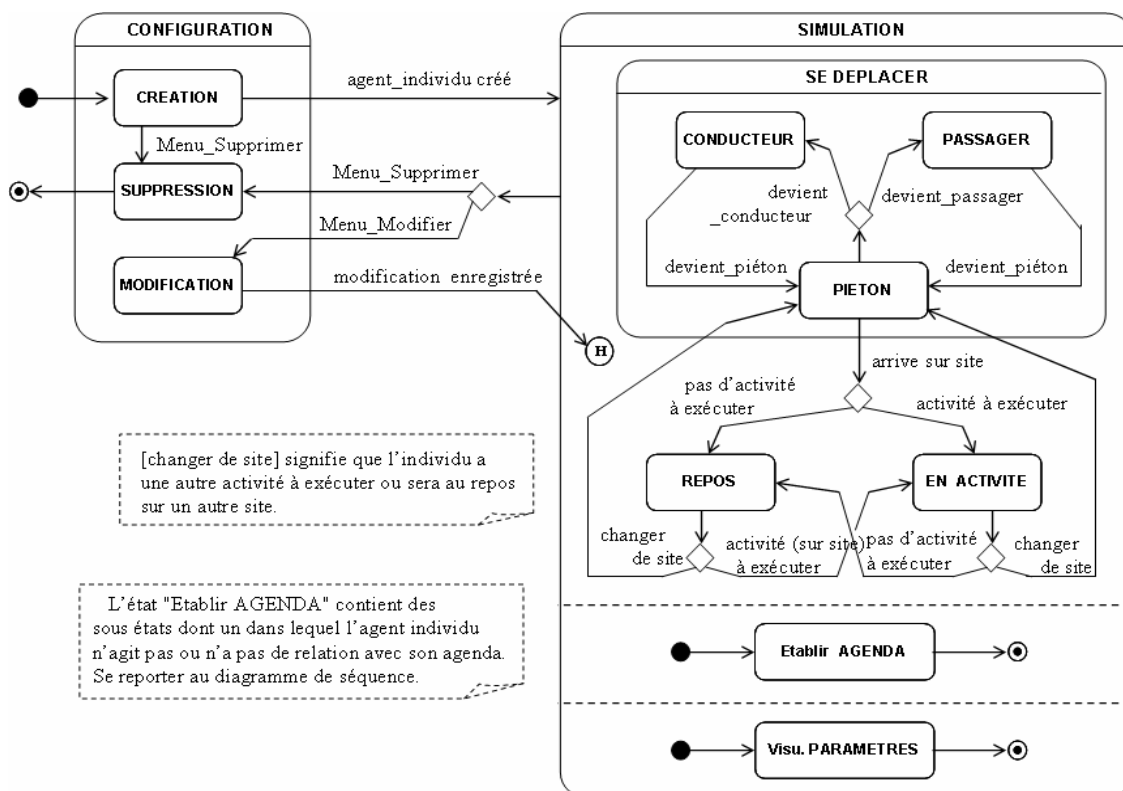


Figure 2-6. Diagramme d'états d'un agent "individu"

Un agent humain peut être au repos, en activité, conducteur, passager ou piéton. Pour l'état de repos, peu importe le lieu, le moment, il est considéré comme n'ayant pas d'activité et donc est en attente. Il faut comprendre que l'agent n'a pas d'activité parmi celles qui nous intéressent et renseignées au simulateur. Par exemple, un individu a terminé son activité et attend que son conjoint vienne le chercher car ils font du covoiturage. L'individu sera donc au repos.

Chaque agent humain a un avatar dans le monde virtuel graphique. La perception de l'environnement visuel est assumée par l'avatar graphique et transmise à l'agent. De la même manière, quand un agent veut effectuer des actions, elles sont envoyées comme ordre à son avatar. Les agents coopèrent en échangeant des messages. Un agent communique de ce fait avec d'autres agents situés dans l'environnement qu'il perçoit. Notre modèle (Figure 2-7) est adapté de celui proposé par Richard [Richard2001] qui définit des modules de contrôleur, de décision et de connaissance, et distingue les communications et les interactions. L'approfondissement de ces aspects ne fait pas l'objet de nos travaux de thèse.

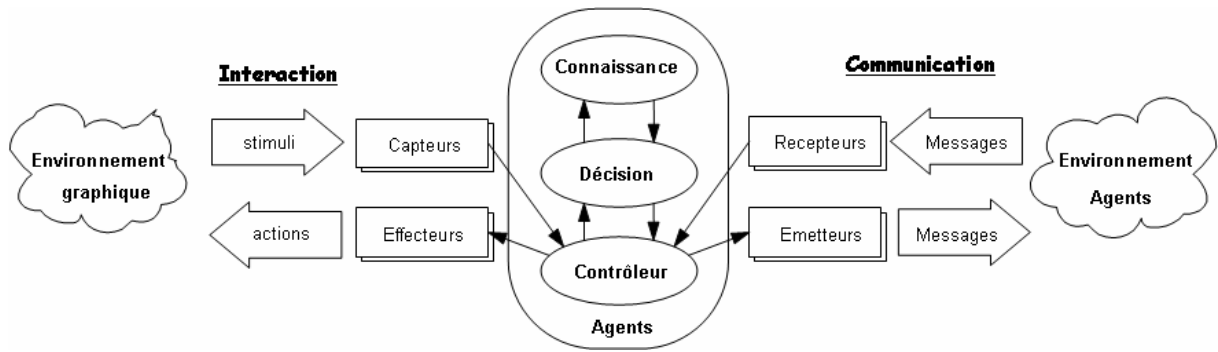


Figure 2-7. Modèle d'un agent autonome [Augeraud2006] adapté de [Richard2001]

2.4.4 Agents "point d'attraction"

Ce sont les bâtiments ou lieux où les activités vont pouvoir s'effectuer. Ce paquetage regroupe tous les points d'attraction de la ville, avec le lieu géographique, les horaires d'ouverture, la capacité d'accueil, le taux moyen de fréquentation (Figure 2-8).

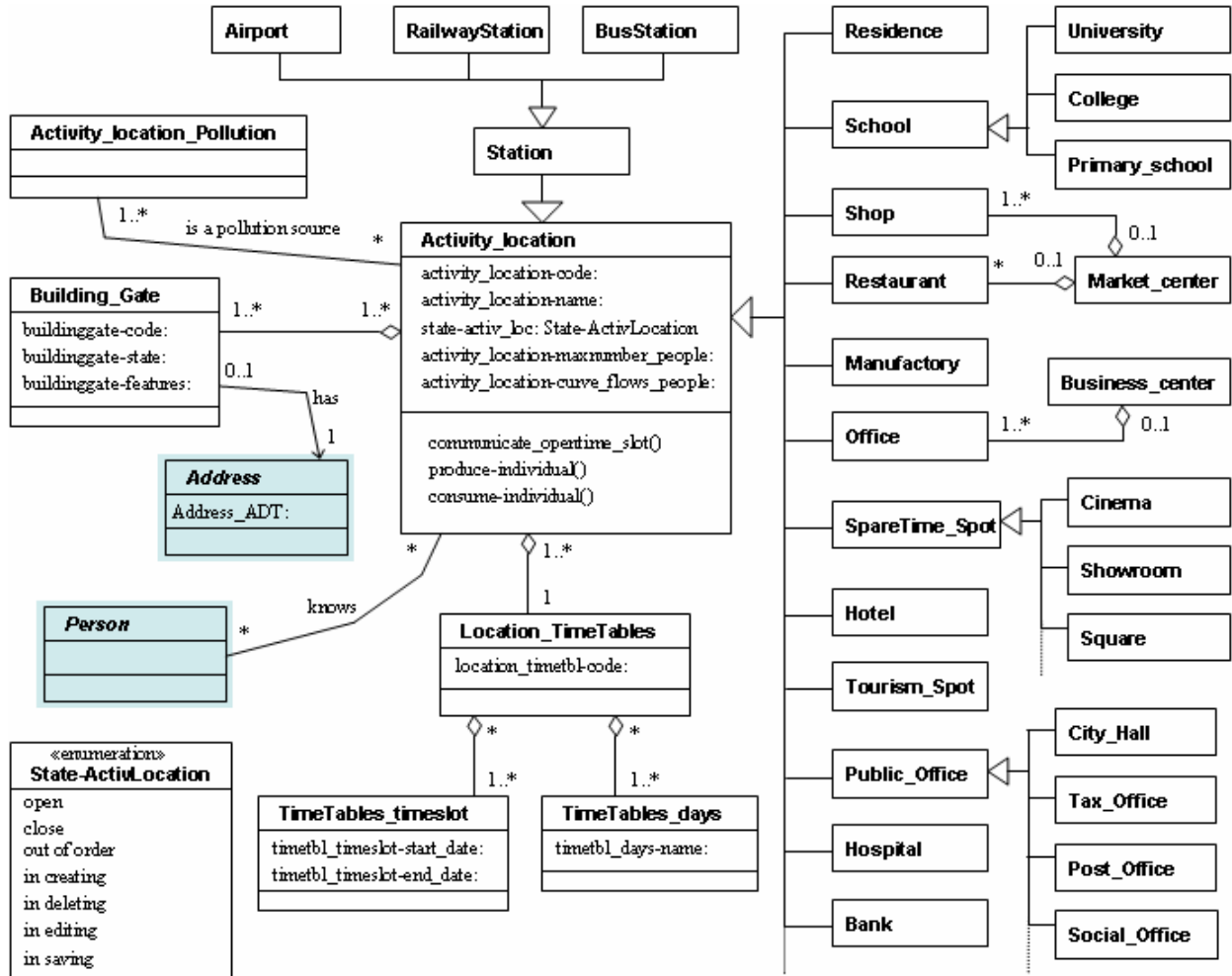


Figure 2-8. Diagramme de classes décrivant les agents "points d'attraction"

L'idéal serait que les agents "individus" soient "générés" et "consommés" par les points d'attraction selon des lois alimentées par des données provenant de fichiers d'enquêtes de la ville, de la C.C.I. etc. Pour l'instant, ce point n'a pu être approfondi.

Les points d'attraction sont les générateurs des activités menées par les agents humains et sont généralement classés en deux groupes : fixes (emploi, école) et flexibles (activités récréatives, "shopping", activités hors travail, etc.). Afin de prendre en compte la possibilité de choisir entre plusieurs sites (ce qui n'est pas le cas pour d'autres simulateurs trafic), nous avons introduit le concept d'unicité d'un point d'attraction. Nous classons les activités comme suit :

- Activités fixes : au domicile, travail, déplacements pour les enfants (à l'école) ...
- Activités flexibles avec lieux uniques : déplacements aux sites administratifs, ...
- Activités flexibles pouvant se dérouler sur un site parmi d'autres : activités récréatives, "shopping" ...

Pour une simulation réaliste, différents états pour les points d'attractions sont définis ; par exemple, seuls, certains individus ont accès à un bâtiment en construction (voir Figure 2-9).

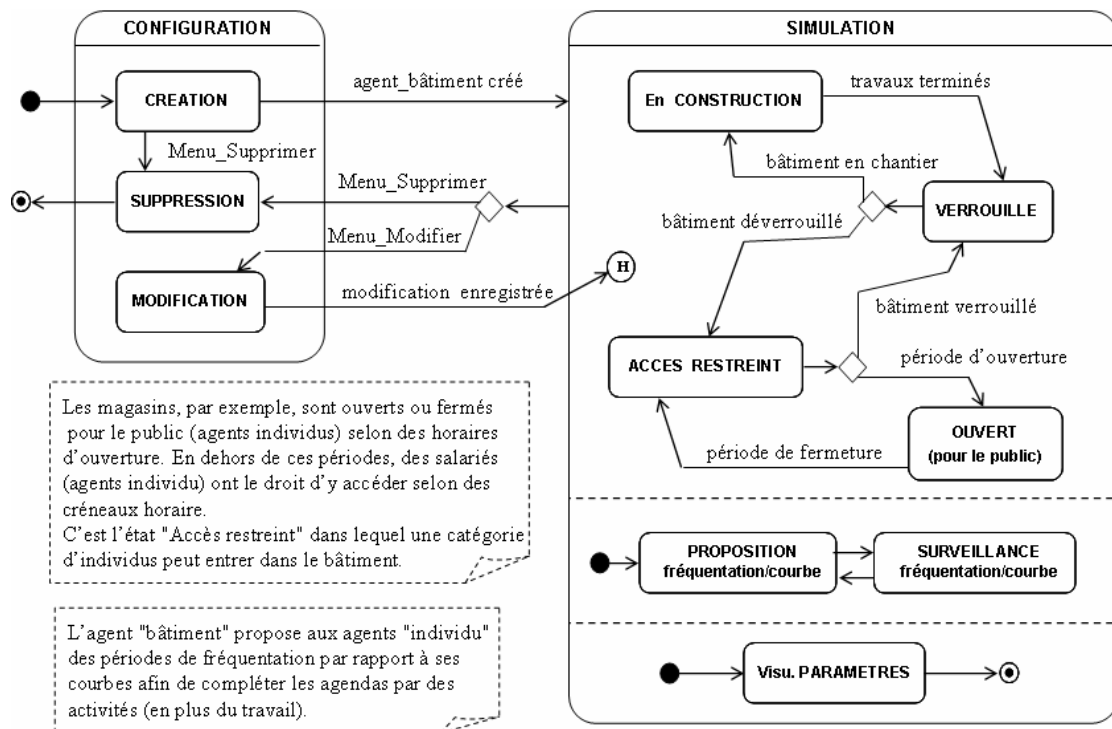


Figure 2-9. Diagramme d'états d'un agent "points d'attraction"

Les activités sont décrites par leur type (travail, shopping, ...), leur degré d'urgence, leur durée moyenne. Il nous faut avoir des points d'attraction avec des activités correspondant aux agents "individus" devant évoluer dans la ville étudiée. Aussi, notre simulateur doit être

capable de prendre en compte la spécificité d'une ville. Par exemple, des villes comme La Rochelle accueillent un nombre non négligeable de touristes affectant le trafic de véhicules et les transports communs donc les parkings. Les enfants vont être générateurs de déplacements en raison de leurs activités, ainsi des flux de véhicules vont migrer vers leurs points d'attraction. C'est pourquoi, dans un premier temps, nous avons listé ces points d'attraction. Une version évoluée de notre simulateur devra proposer au régulateur la possibilité de créer d'autres types de points d'attraction.

Le déplacement est également considéré comme une activité. Les activités fixes doivent être exécutées chaque jour à cause des engagements à plus long terme (c.-à-d. contrat du travail), des contraintes de ménage (par exemple, accompagner les enfants à l'école). L'établissement du programme implique de choisir les activités à ajouter au squelette constitué par ces activités fixes et ensuite, de déterminer la position dans l'agenda et le profil de chaque activité supplémentaire. Les agents "individus" habitant à la même adresse forment un ménage : selon l'âge, une des activités pourrait être l'accompagnement des enfants à l'école.

Chaque agent crée son propre agenda et hiérarchise ses activités avec leurs lieux d'exécution. Les déplacements sont programmés dans l'agenda et sont considérés comme des activités (voir le diagramme d'états de l'individu, *Figure 2-6*). Pour les activités à sites "multiples", le choix se fera selon une procédure qui sera détaillée dans le chapitre 4.

2.4.5 La notion d'adresse et d'emplacement d'un lieu

Cette notion a un aspect très important dans certains domaines de la recherche comme principalement les systèmes d'information géographique (SIG). La preuve en est par l'existence d'un consortium international, l'"Open GIS Consortium Inc." [OGC2005], et de documents faisant l'objet de référentiels après avoir été approuvés par une communauté. Pour nous, cette notion d'adresse est importante pour les aspects de covoiturage.

Le simulateur devant être "ouvert" et évolutif, il est intéressant qu'il puisse disposer de données spatiales d'une ville contenues dans un SIG afin d'améliorer le processus et la construction de la ville par le régulateur. En France, l'AFNOR a publié en 1997 une nouvelle norme de l'adresse référencée. Elle formalise en particulier les règles de coexistence des informations géographiques et postales. Elle définit précisément les composants de l'adresse, ses règles de structuration ainsi que les règles de transcription sur le courrier. Malheureusement, la norme n'aborde pas l'aspect des informations géographiques liées à l'adresse [Gilgen2000].

A travers nos brèves recherches menées, nous pouvons traduire la définition de l'adresse comme suit. L'adresse est séparée de la notion de bâtiment. Elle est représentée par un point (coordonnées X,Y) à l'intérieur de l'emprise du bâtiment (voir *Figure 2-10*). Elle permet, d'une part, de faire le lien entre les voies de communication et les bâtiments (elle possède des liens explicites avec ces entités) et d'autre part de localiser une personne dans l'espace, par son adresse postale (voir *Figure 2-10*).

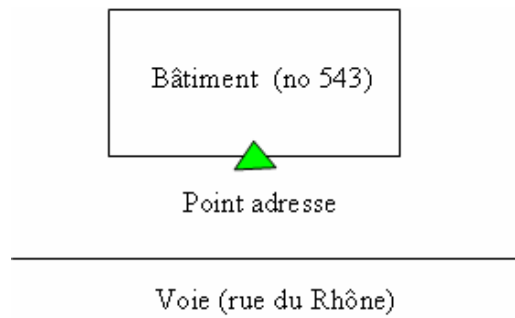


Figure 2-10. Relation entre le point adresse, le bâtiment et la rue [Castro1999]

Un schéma entité-relation a été élaboré à partir d'une synthèse de plusieurs modèles issus de travaux suisses [Castro1999] (voir Figure 2-11). Etant en correspondance avec notre besoin, nous l'avons retenu.

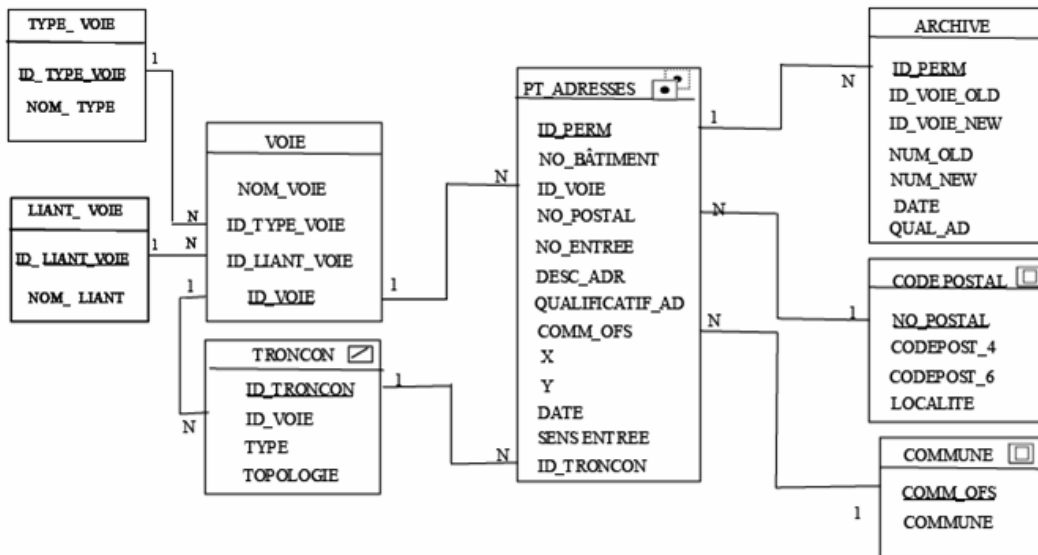


Figure 2-11. Schéma entité-relation décrivant la notion d'adresse [Castro1999]

2.4.6 Agents "mode de transport"

Ce bloc renseigne sur la provenance des moyens de transport motorisés (public, privé ou de transports de marchandises), les caractéristiques en terme de performances (puissance, type de combustible), les contraintes pour les transports public en terme d'horaires, aussi bien que sur les taux d'émission (CO, CO₂, NO_x, ...) et le niveau sonore moyen associé à chaque type de véhicule. Notre modélisation permet de prendre en compte l'aspect pollution des véhicules.

Souhaitant traiter les problèmes de multimodalité, on s'intéresse aux différents modes de transport de personnes dans la ville. A La Rochelle, il existe un passeur électrique (bateau) reliant deux rives ainsi qu'un système de partage de véhicules et un de vélos.

Le diagramme de classes est présenté dans Figure 2-12, celui d'états dans Figure 2-13.

Les véhicules de transport de marchandises apparaissent également car nous considérons que pour étudier la congestion, nous devons prendre en compte tous les flux (c.-à-d. les flux transitoires, les flux entrants, les flux sortants) de tous les véhicules. Il y a des véhicules transportant des individus locaux, des touristes (bus de touristes) et des marchandises.

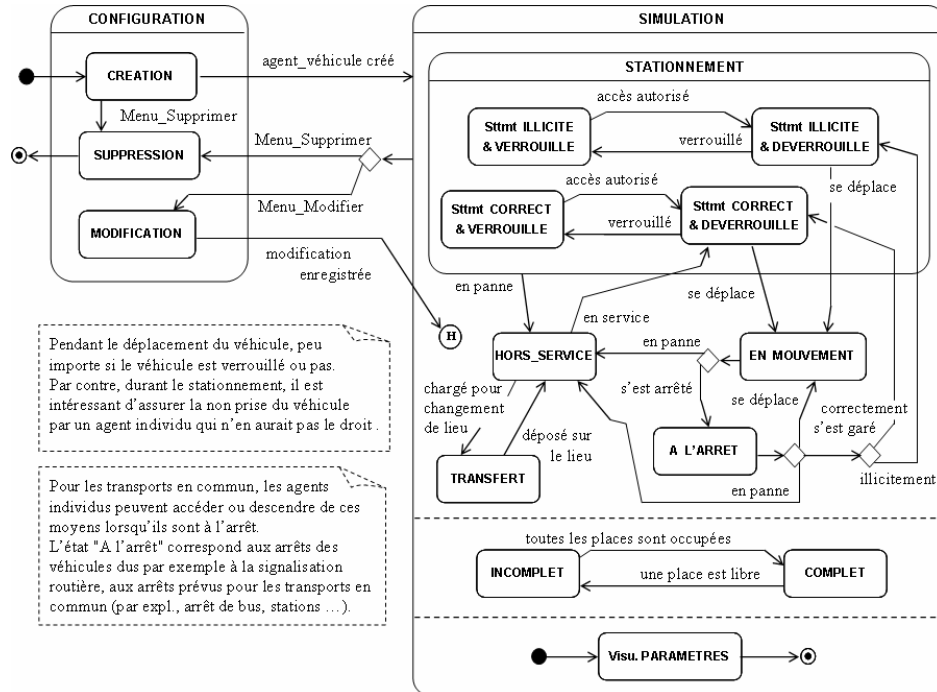


Figure 2-13. Diagramme d'états d'un agent "véhicule" (modes de transport)

Après d'éventuelle(s) négociation(s) avec un partenaire, chaque agent "individu" fait le choix du moyen de transport. Ces procédures seront détaillées dans le chapitre 4.

2.4.7 Agents "offre de stationnement"

Ces agents concernent la nature de l'offre de stationnement (public, privé, à places réservées), le type de parking (on-street, off-street, souterrain), le prix, la capacité d'accueil, la localisation. Cette modélisation a été retenue afin de prendre en compte ce qui a été défini auparavant (Figure 2-14).

Comme nous considérons qu'un déplacement s'effectue de parking à parking, nous devons représenter les parkings privés et publics ; par exemple pour les déplacements domicile-travail, nous avons les "parkings" du domicile et ceux des entreprises ou à proximité. Les principaux parkings sont destinés aux voitures, cependant des touristes arrivent par bus donc il faut considérer ces parkings pour ces véhicules. De même, il y a des flux de transport de marchandises, aussi, il faut des places pour les livraisons.

Des parkings réservés sont destinés aux services de type car-sharing. Certaines villes organisent des manifestations (foire, exposition, salon, ...) provoquant des flux importants de véhicules pouvant être générateur de congestion. Ainsi, pour l'occasion, des parkings sont mis en service et sont desservis par des navettes de bus.

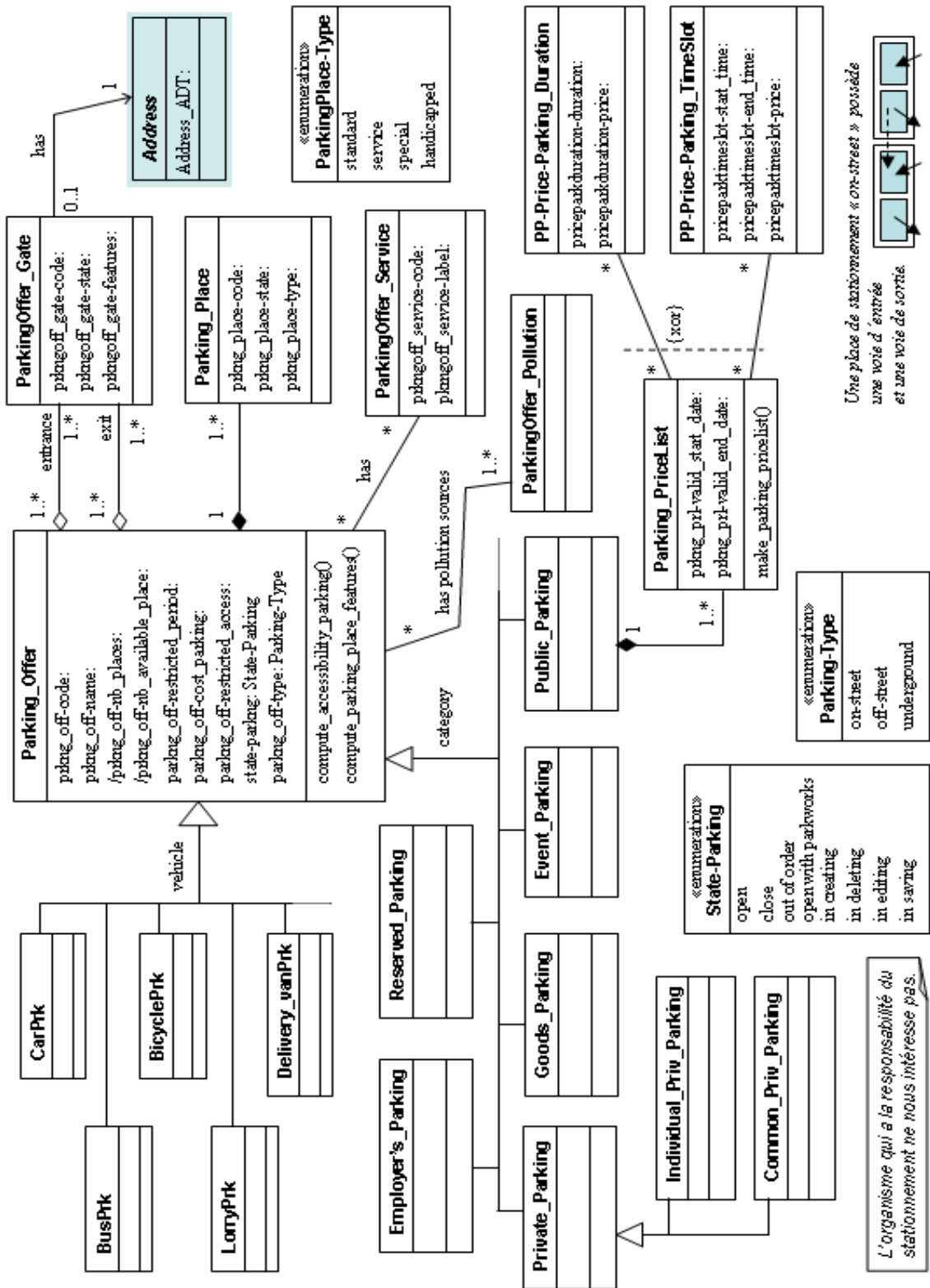


Figure 2-14. Diagramme de classes de l'offre de stationnement (agents "parking")

Des parkings pour les deux roues (très courant dans des villes en Hollande ou comme à La Rochelle pour les vélos jaunes) sont définis car des personnes se déplacent en vélo et doivent pouvoir devenir piétons.

Le simulateur offrira la possibilité au régulateur de créer ses propres parkings même si nos diagrammes ne le montrent pas. Un parking possède différents états de fonctionnement (Figure 2-15) sinon il serait considéré comme un lieu de stockage avec une capacité infinie.

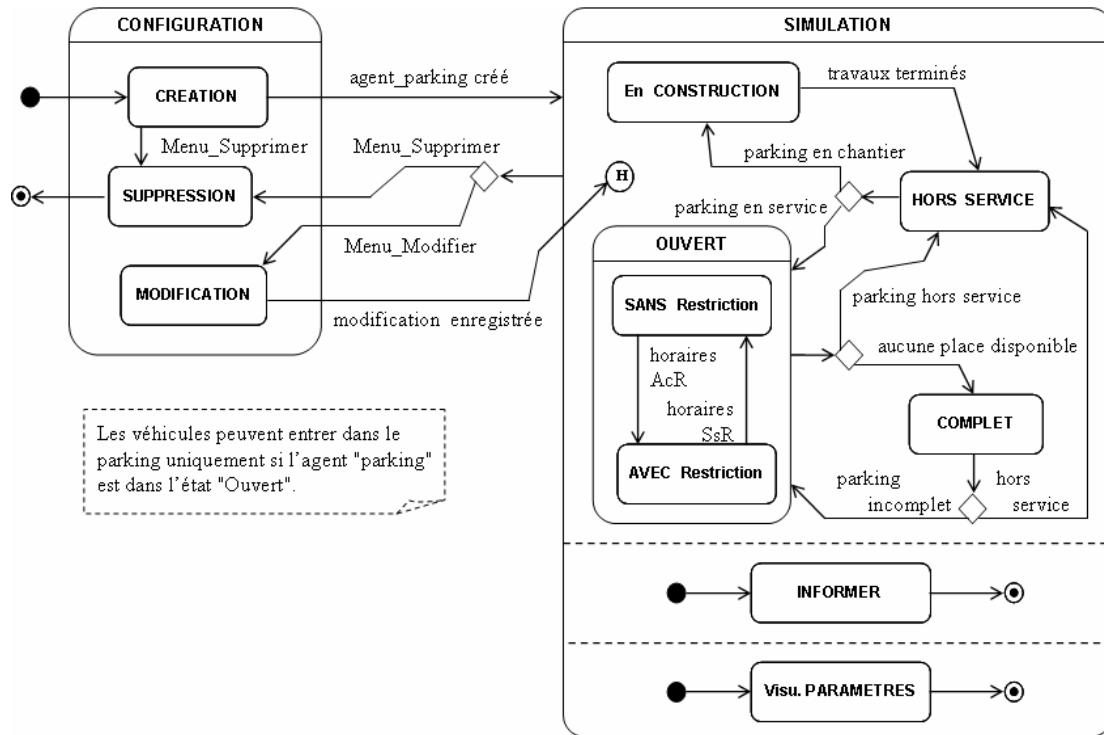


Figure 2-15. Diagramme d'états d'un agent appartenant à la catégorie "offre de stationnement"

Selon des préférences et des contraintes individuelles, chaque agent "conducteur" choisit un parking. Lors de l'absence d'une place de stationnement, il a la possibilité de se rendre au parking suivant (voir le classement) de sa liste de choix établie avant son déplacement, de tourner pour trouver une place disponible, de se garer illicitement ou encore de reporter son activité. Nous verrons dans le chapitre 4 comment ces choix sont reproduits ou pas lors d'un prochain déplacement dans des conditions identiques.

2.4.8 Agents "information"

Ces agents sont chargés de récolter des renseignements. Chaque agent "individu" va chercher pour organiser son déplacement des informations météorologiques, des événements particuliers. Egalement, des points d'attraction comme une gare (ferroviaire ou routière), un aéroport, etc. ont besoin de connaître les horaires respectifs d'arrivée et départ afin de générer et de "consommer" des agents "individus" dans les plages de temps corrélées à la ville étudiée (Figure 2-16).

La procédure de recherche de ces informations n'est pas encore développée, mais on peut imaginer une base de données, pour une partie, alimentée par les données des organismes de transport, pour d'autres, se réactualisant selon une période (par exemple, tous les jours pour la météo) via internet, auprès de laquelle s'informent les agents.

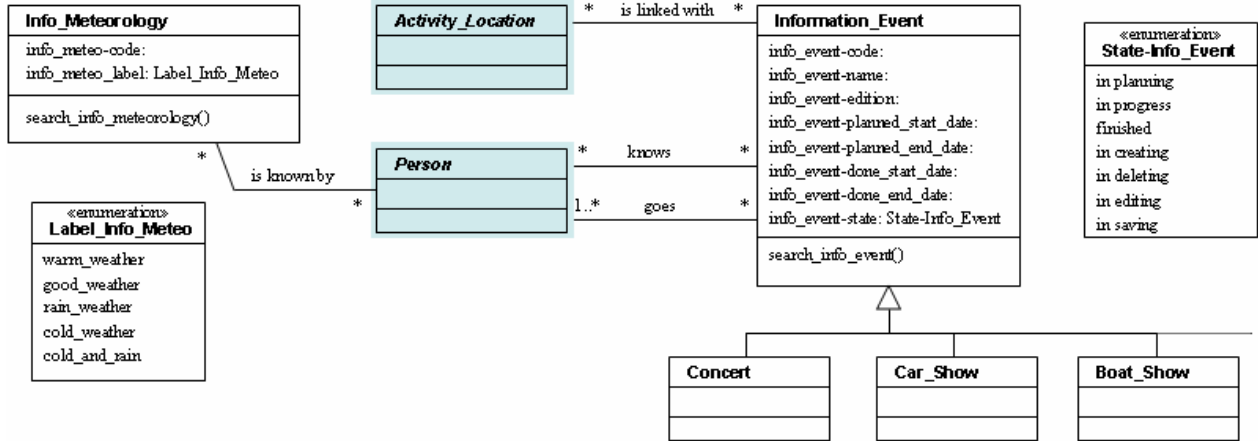


Figure 2-16. Diagramme de classes du paquetage information

2.4.9 Agent « pexavvi »

Mis à part ces agents dits "physiques", nous avons défini un agent (ou un groupe pour améliorer les performances du simulateur) "sous-traitant" chargé de proposer des questionnaires d'enquêtes à partir d'informations fournies par le régulateur, puis à partir des résultats, d'élaborer des modèles de comportements pour les agents "individus".

Afin de l'identifier, le nom donné à cet agent "sous-traitant" est « **pexavvi** » (pour modèles issus de Plans d'Expériences suivis de l'Analyse de la Variance et modélisation type VIgier).

2.5 Le régulateur et le SMA

Avant la phase d'utilisation du simulateur, il y a une phase de configuration par le régulateur. Dans Figure 2-17, sont dressés les principaux cas d'utilisation (la liste n'est pas forcément exhaustive).

Nous allons nous intéresser au cas d'utilisation "Définir les comportements des individus" de la phase configuration. Egalement, on s'intéresse, indirectement, à l'agenda des agents "individu" puisque nous traitons le problème de choix modal, de choix de parking lorsque l'agent "local - conducteur" prend un véhicule personnel (privé ou autre). Nous allons développer le cas d'utilisation "Etablir son agenda" et faire référence à celui de "Exécuter son agenda".

Nous avons concentré par la suite, nos travaux sur la modélisation du comportement des agents "individus" lors des étapes directement liées à l'activité de stationnement (Figure 2-18).

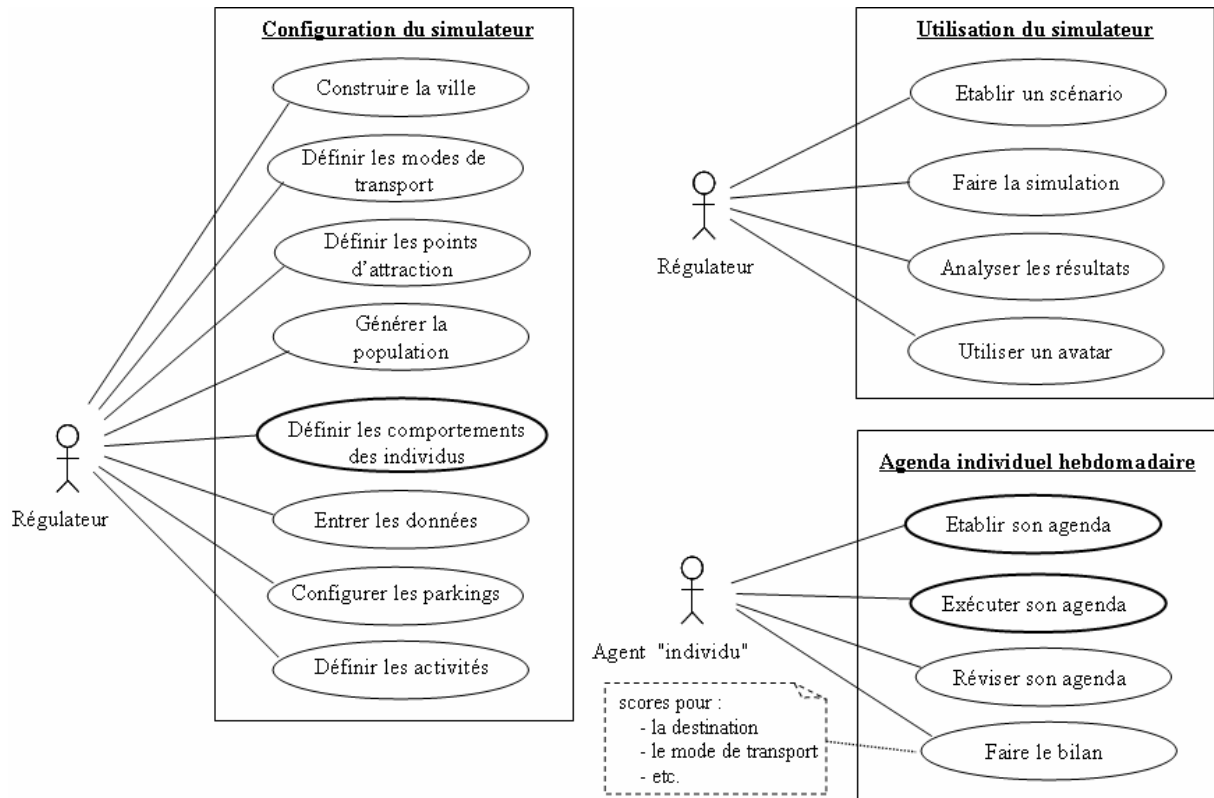


Figure 2-17. Diagrammes de cas d'utilisation généraux pour nos travaux

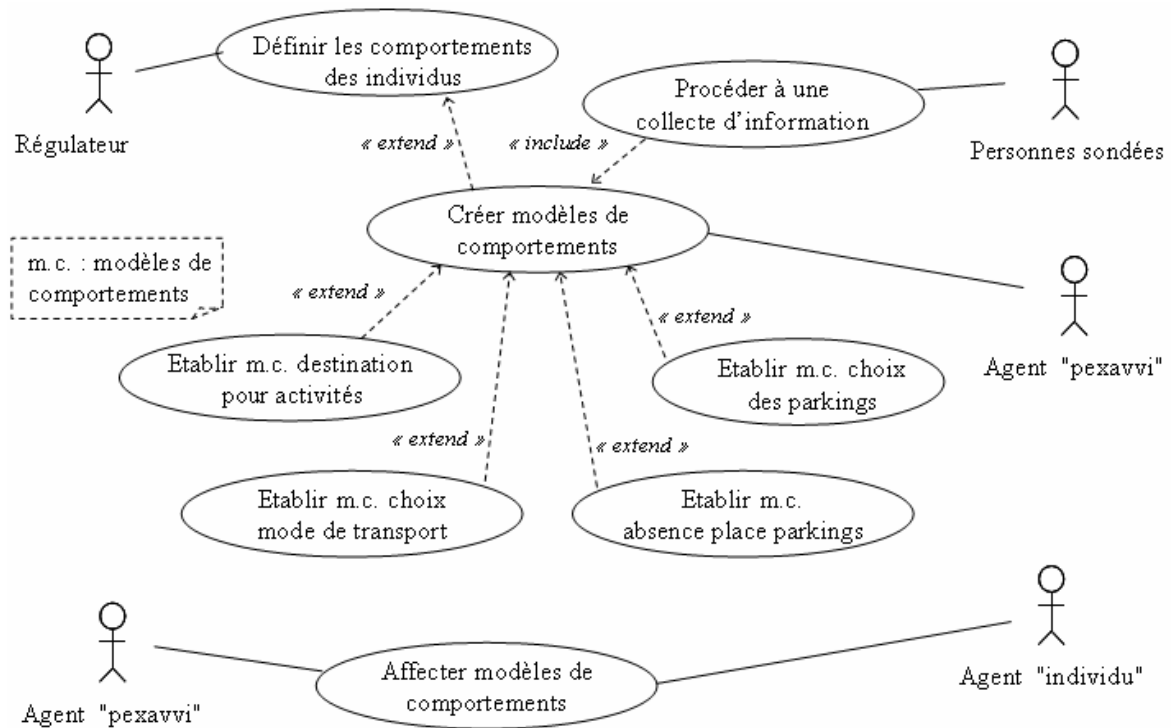


Figure 2-18. Diagramme de cas d'utilisation "Définir les comportements des individus"

Le régulateur peut se contenter de définir des comportements basiques pour les agents "individus". Par exemple, tous adopteront les mêmes comportements, quelle que soit la situation. Par contre, si le régulateur cherche à créer des modèles de comportements plus évolués en allant chercher des informations sur le terrain, dans ce cas, il sera épaulé par l'agent "pexavvi" lors de la création des modèles. L'agent "pexavvi" affectera les modèles établis aux agents "individus" afin que ces derniers puissent adopter des comportements réalistes.

Les agents "individus" vont faire partie de groupes selon différents critères. L'existence de ménages fait qu'il y aura des agents "enfants" engendrant, selon leur autonomie, des déplacements des parents pour des activités comme aller à l'école, faire du sport (en dehors de l'école), aller au cinéma, etc. L'âge est souvent pris comme critère pour définir l'autonomie pour se déplacer au moyen d'un vélo ou d'un véhicule motorisé (possession du permis de conduire en plus). Aussi, nous considérons que chaque agent "enfant" possède un agenda personnel qui sera prédéterminé mais ajusté (lors de la simulation) par les contraintes de ses tuteurs devant le véhiculer (Figure 2-19).

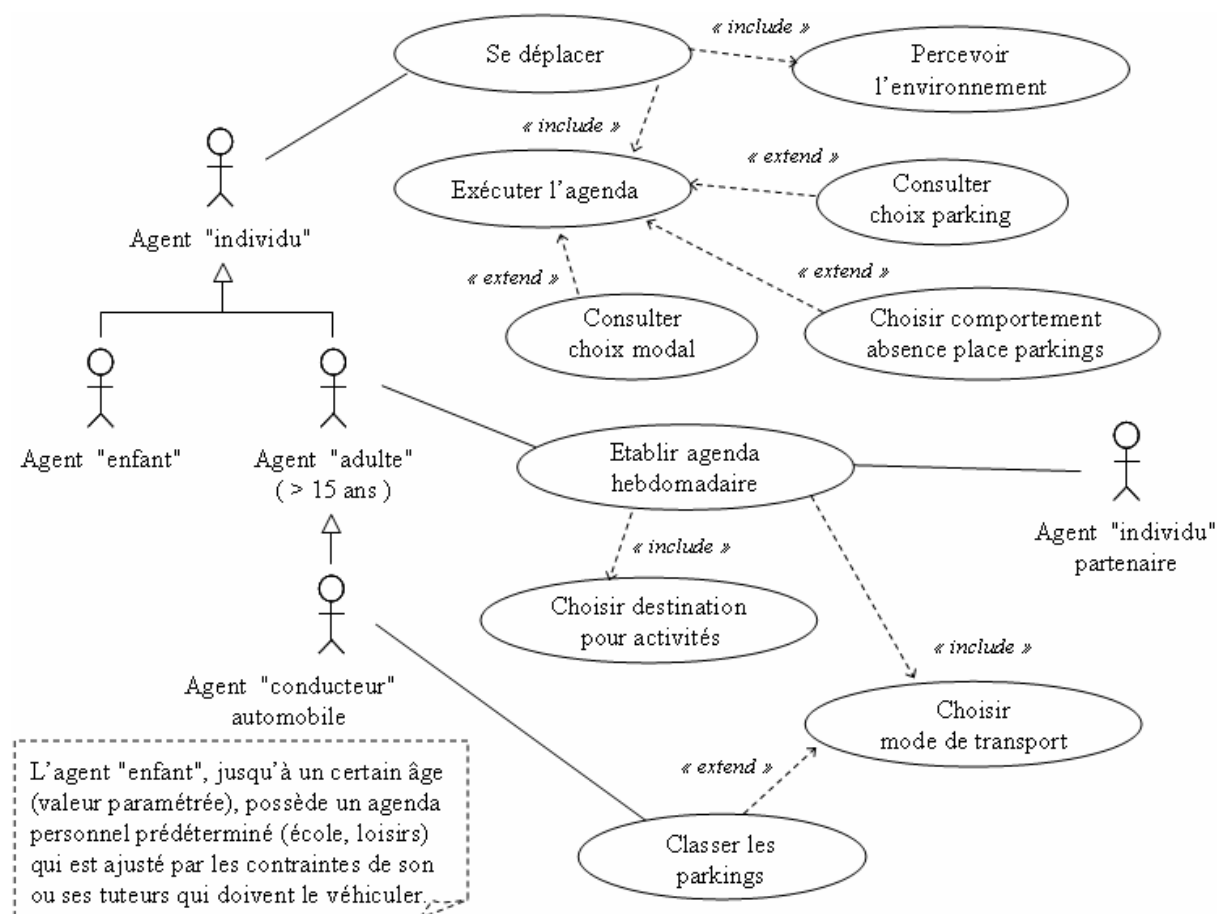


Figure 2-19. Diagrammes de cas d'utilisation "Etablir agenda" et "Exécuter l'agenda"

Il n'y aura donc que les agents "individus" ayant un certain âge (paramètre réglé par le régulateur) qui établiront un agenda hebdomadaire avec un possible partenaire (voir chapitre

4, paragraphe §4.4.2.A pour les deux propositions avancées).

Par contre, tous les agents "individus" vont se déplacer dans l'environnement afin d'exécuter leur agenda. Le cas d'utilisation "Choisir comportement absence place parkings" n'étant déclenché que par certains agents "conducteur" (et pas les autres) traite la situation où un conducteur a choisi avant son déplacement un parking mais arrivé à celui-ci, il constate qu'aucune place de stationnement est libre (voir chapitre 4, paragraphe §4.6.2).

Pour finir, *Figure 2-20* montre les relations et étapes qui existent entre les trois principaux acteurs concernant les modèles décisionnels des agents "individus".

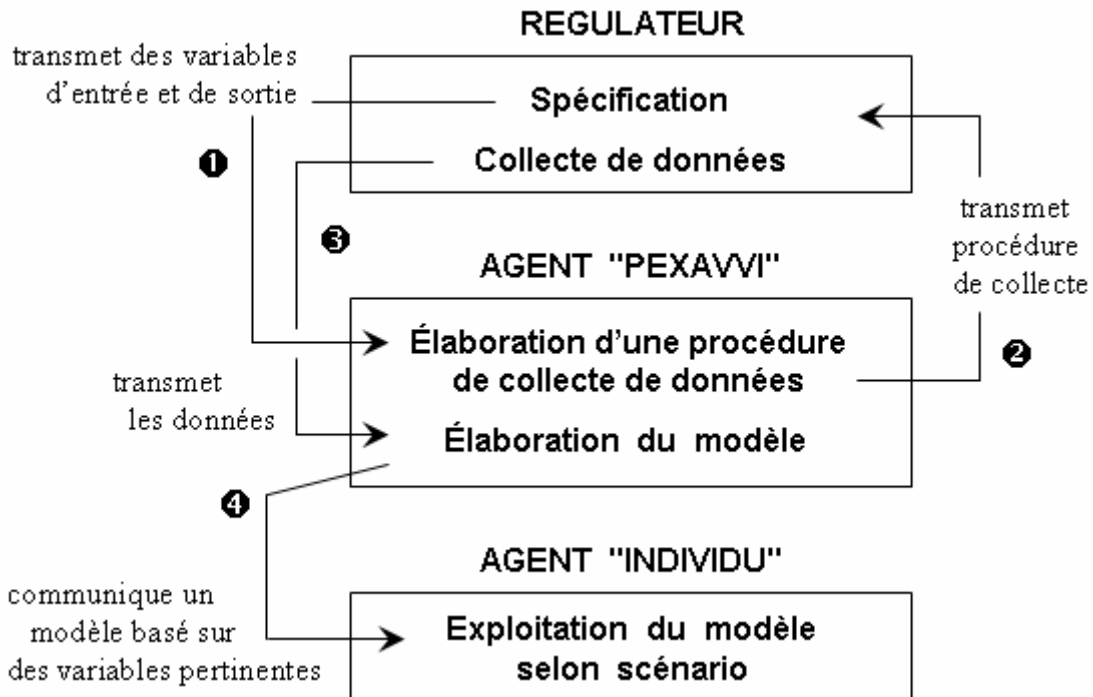


Figure 2-20. Relation entre les 3 acteurs concernant les modèles décisionnels

Selon le modèle à établir, le régulateur spécifie les variables d'entrée et de sortie puis les transmet à l'agent "pexavvi" afin d'élaborer la procédure de collecte de données. A partir de la collecte de données effectuée par le régulateur, l'agent "pexavvi" élabore le modèle qu'il met à disposition aux agents "individus" selon la catégorie sociodémographique ou autre définies par le régulateur. Lors de la simulation, les agents "individus" exploitent leur modèle avec les informations nécessaires fournies par les autres modules (trafic, occupation de sols) et des agents "information".

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la pertinence de l'approche multi agents pour la simulation du trafic urbain ; elle permet, en effet, d'exprimer l'adaptation à la réalité, la coopération, la résolution des problèmes complexes, l'intégration d'expertises, sa modularité et sa fiabilité. Cette approche de modélisation offre aussi plus de flexibilité dans la

représentation de la complexité des décisions de déplacements avec la prise en compte des interactions entre entités homogènes ou hétérogènes, de conflits entre les entités.

Dans un premier temps, nous avons décrit très sommairement l'approche et les outils de modélisation utilisés. Etant davantage focalisés par les aspects de prise de décision, nous avons choisi de représenter les états ou les interrelations des agents en nous appuyant sur les formalismes UML et les Réseaux de Petri avec l'extension Colorés.

Nous avons ensuite présenté les principes, les performances et les limites des simulateurs opérationnels existants et fonctionnant avec des modèles conceptuels similaires (modèles à base d'activités). Malgré une littérature récente et abondante dans les domaines de la technologie multi agents appliquée au trafic urbain, ainsi que sur les modèles de déplacement urbain à base d'activités, il existe très peu d'outils opérationnels réunissant les deux concepts. Nous avons donc distingué plusieurs aspects à approfondir au niveau des modèles décisionnels des agents humains, de la dynamique de leur comportement ainsi que pour la formalisation des interactions inter agents. Nous retenons surtout la difficulté de transposition des scénarios gérés par variables qui ne permettent pas de distinguer les particularités d'une ville ou d'une catégorie sociodémographique. Tout comme pour les modèles de tout genre abordant la demande de déplacement rappelés dans le chapitre précédent, les simulateurs existants n'abordent l'activité des parkings que d'une façon séquentielle.

Ensuite, nous avons proposé une architecture multi agents pour la partie concernant l'activité des parkings de notre simulateur basé sur des agents "physiques" (ayant des correspondances avec le monde réel) et un agent "sous-traitant" (pexavvi) dédié à la manipulation des modèles décisionnels. Des diagrammes de cas d'utilisation montrent comment un régulateur peut exploiter les performances d'un outil basé sur le paradigme multi agents.

La mise en œuvre d'un mécanisme de sélection de l'action est un problème central dès lors qu'il s'agit de simuler un usager du réseau routier évoluant dans un environnement dynamique, de négociations avec des partenaires ayant des buts identiques ou conflictuels. Il n'existe pas l'équivalent des lois physiques pour modéliser le comportement d'une entité individuelle. Percevoir, agir, utiliser son expérience sont des concepts difficiles à exprimer d'un point de vue mathématique et sont à la charge du programmeur. Cela fera l'objet de la deuxième partie de nos travaux de thèse.

Partie 2 : Modèles décisionnel et
d'apprentissage d'un agent individu utilisateur
du réseau routier

Chapitre 3 - Processus décisionnel d'un agent individu

Chapitre 3 - Processus décisionnel d'un agent individu.....	88
3.1 Introduction	90
3.2 Comportement d'un agent utilisateur du réseau routier urbain.....	91
3.2.1 Comportement fonction du type d'agents	91
3.2.2 Comportement d'un agent cognitif en fonction du type d'actions.....	92
3.2.2.A Agent immergé dans le trafic	93
3.2.2.B Agent "individu-local" initiant son déplacement	94
3.2.3 Comportement d'un agent "individu-local" en fonction du type de choix en amont du déplacement.....	95
3.2.4 Les approches classiques de choix préliminaire employées dans l'analyse de la demande de déplacements.....	96
3.2.5 Analyse des difficultés associées à la modélisation des choix.....	97
3.3 Changements de logique de comportement d'un usager du réseau routier.....	98
3.3.1 Changements de choix dans un contexte environnemental statique	98
3.3.2 Changements de choix dans un contexte environnemental dynamique.....	99
3.3.3 Les approches classiques de modélisation des changements de choix	100
3.3.4 Les approches multi agents de modélisation des changements de choix.....	101
3.3.5 Analyse des difficultés associées à l'apprentissage en trafic	103
3.4 Processus décisionnel d'un agent "individu"	105
3.4.1 Etapes d'un processus décisionnel	105
3.4.2 Etapes de notre processus décisionnel	106
3.4.2.A Comportement "moyenné" – choix préliminaire.....	106
3.4.2.B Comportement adaptatif – mécanismes d'apprentissage	107
3.5 Procédure de classement par fonction "score"	108
3.5.1 Définition de la fonction score	108
3.5.2 Démarche de conception de la fonction score.....	111

3.5.3	Démarche logicielle pour l'exploitation de la fonction score	112
3.6	Etapes d'élaboration d'un modèle décisionnel.....	113
3.6.1	Etape 1 : Phase de spécification	113
3.6.1.A	Choix des variables d'entrée	113
3.6.1.B	Choix des niveaux des variables	113
3.6.1.C	Choix des variables de sortie.....	114
3.6.2	Etape 2 : Phase d'élaboration des enquêtes.....	115
3.6.2.A	Optimisation industrielle ou modèle décisionnel d'un agent "individu" : problématiques identiques.....	115
3.6.2.B	Table d'essais pour un procédé industriel ou enquête pour analyse de trafic : démarches identiques	116
3.6.2.C	Elaboration de l'enquête à préférences déclarées par l'agent "pexavvi" ...	119
3.6.3	Etape 3 : Calcul des scores moyens pour une catégorie sociodémographique 121	
3.6.3.A	Alternatives homogènes : parkings, destinations	121
3.6.3.B	Alternatives hétérogènes : modes de transport, comportements autour du parking 121	
3.6.3.B.1	Choix d'un cadre de discernement	122
3.6.3.B.2	Méthode d'attribution de masses.....	123
3.6.3.B.3	Méthode d'affaiblissement de masses	124
3.6.3.B.4	Fusion d'informations.....	124
3.6.4	Etape 4 : Phase d'élaboration du modèle	129
3.6.5	Etape 5 : Phase d'identification des variables pertinentes	132
3.6.6	Etape 6 : Prise de décision.....	134
3.6.6.A	... pour les alternatives homogènes	134
3.6.6.B	... pour les alternatives hétérogènes.....	134
3.6.6.C	Cas particulier : choix d'une alternative dite robuste.....	134
3.7	Processus d'apprentissage collectif.....	136
3.7.1	Changement de choix dans un contexte environnemental statique.....	136
3.7.1.A	Négociation et apprentissage par partage d'expérience	136
3.7.1.B	Réactualisation des préférences	136

3.7.2	Changements de choix dans un contexte environnemental dynamique.....	137
3.7.2.A	Disparition d'une alternative.....	138
3.7.2.B	Apparition d'une alternative.....	138
3.8	Vue globale de notre approche de modélisation des comportements des agents "individus".....	139
3.8.1	Ses intérêts.....	139
3.8.2	Ses contraintes.....	140
3.8.3	Ses limites.....	141
3.9	Conclusion.....	142

3.1 Introduction

Durant sa vie, un individu est confronté à une multitude de choix dont les implications sont bien souvent difficiles à mesurer ; certains sont capitaux (la profession), tandis que d'autres sont secondaires (mode de transport pour un déplacement). Bien que certains choix puissent être plus ou moins difficiles à effectuer, il existe un certain niveau de rationalité dans le processus de choix de l'individu. Celui-ci commence par évaluer les différentes possibilités qui s'offrent à lui en se basant sur certains critères puis choisit l'alternative qui lui paraît la plus adéquate en accord avec ses objectifs, ses contraintes et ses expériences antérieures.

La modélisation du comportement d'un voyageur est l'aspect fondamental dans l'analyse de la demande de transport à base d'activités. S'ajoute, à sa complexité due au processus décisionnel en soi, le fait que la demande de déplacements est à évolution dynamique et est susceptible de varier à chaque instant dans sa logique.

Des travaux, notamment ceux de Goodwin [Goodwin1992] montrent qu'au moment où les comportements sont observés, bien souvent ceux-ci ne sont pas en équilibre avec les variables qui les influencent. Ainsi, il en découle que les comportements qui sont calés sont biaisés et qu'ils ne peuvent être utilisés pour décrire des équilibres différents qui seraient atteints avec des valeurs différentes de variables. Le problème devient encore plus compliqué dans la mesure où le nombre de choix potentiels évolue dans le temps. Donc si le régulateur veut prendre en compte des fluctuations d'inertie des comportements, aussi bien que des renversements des tendances à long terme par diverses mesures de politiques de transport ou d'aménagement urbain, il importe de développer des approches dynamiques pour les processus décisionnels.

Après une analyse des approches décisionnelles couramment utilisées dans le domaine du trafic urbain, nous présentons une méthode originale permettant l'élaboration d'un modèle de

choix avec des variables quantitatives et qualitatives, basé sur les enquêtes à préférences déclarées. Nous allons montrer que l'intérêt de son application est multiple.

Tout d'abord, notre modèle permet de comparer la qualité des alternatives ou des services mis à la disposition des agents usagers du réseau routier, aussi bien que de donner une forme analytique à des variables qualitatives difficilement quantifiables. Par ailleurs, le régulateur va pouvoir choisir par lui-même les variables dont il souhaite tester les impacts dans la ville étudiée. Egalement, le modèle est évolutif (car pouvant être réactualisé avec des résultats issus de nouvelles enquêtes).

Nous greffons des démarches d'apprentissage individualisé et collectif qui permettent de prendre en considération les fluctuations des comportements des agents "individus" avec les conditions de trafic (changements à court terme) et de simuler les effets des changements du nombre d'alternatives soumises au choix d'un agent (changements à moyen terme). Du point de vue informatique, l'intérêt se trouve dans la réduction du nombre d'informations pertinentes (et donc de communications) dont chaque agent "individu" a besoin pour évaluer la qualité d'un service ou pour faire un choix.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de cinq publications dans les domaines informatique et planification des transports [Augeraud2005], [Boussier2005], [Boussier2005b], [Augeraud2006], [Boussier2006].

3.2 Comportement d'un agent utilisateur du réseau routier urbain

3.2.1 Comportement fonction du type d'agents

Nous assimilons un comportement à une réponse à un événement ou une situation. Lorsque l'agent se trouve confronté à un choix, il doit l'analyser et l'évaluer pour produire une réponse adaptée. La décision d'un agent donnera lieu à une action. Il y a plusieurs façons d'évaluer une situation ou un événement en fonction de la nature de l'agent, dont nous retenons la suivante :

- pour un agent réactif, l'événement est analysé formellement et l'agent déclenche une procédure très particulière en réaction immédiate à cet événement. Il n'y a pas dans ce cas de réelle prise de décision. Un événement implique une action. On parle d'action réflexe.
- pour un agent cognitif, l'événement est analysé, puis l'agent va devoir décider d'une action à mener. Cette prise de décision peut prendre un certain temps et peut être le résultat de différents algorithmes.

Contrairement au comportement déterministe d'un agent réactif, celui d'un agent cognitif ne l'est pas véritablement puisque son état mental est une sorte de boîte noire difficile à explorer (sauf pour le modélisateur). En outre, contrairement à un agent cognitif, un agent réactif ne peut pas apprendre de nouvelles choses.

Nous nous intéresserons principalement aux **agents cognitifs** représentant les individus locaux (habitants de la ville étudiée) en tant que piétons, conducteurs d'un véhicule (voiture, vélo, etc.) ou usagers des transports publics (bus, taxi, etc.).

3.2.2 Comportement d'un agent cognitif en fonction du type d'actions

Le comportement d'un agent dépend de sa structure interne (croyances, intentions, connaissances) et de sa perception externe au sens large (perception, communication, interaction). Des techniques de raisonnement et de prise de décision (introspection, croyances, intentions, engagements, etc.) sont décrites dans [Briot2001] et [Chaib-Draa2001]. Ces techniques considèrent généralement qu'un agent possède des connaissances et un savoir. Cet agent interagit ou dépend d'autres agents du système pour exploiter ce savoir. Un ensemble de composants inaccessibles aux autres constitue la structure interne de l'agent (*Figure 3-1*).

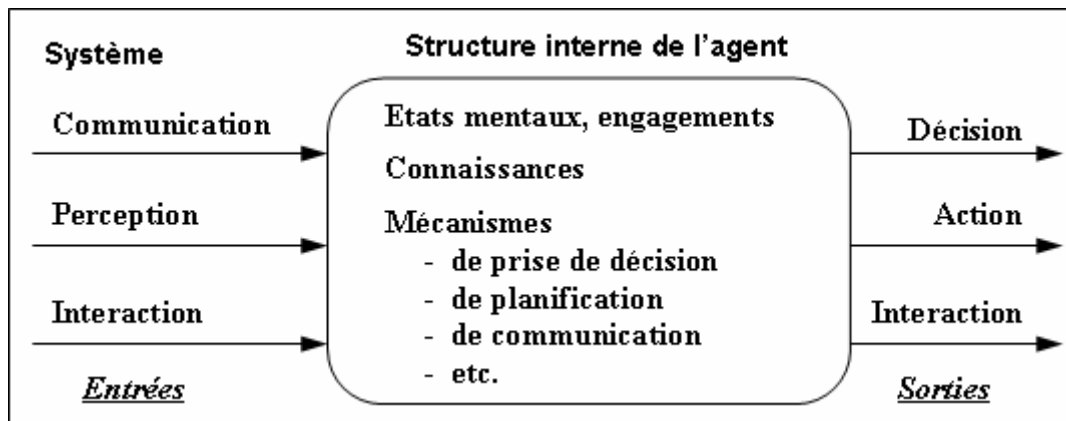


Figure 3-1. Structure générale interne d'un agent [Briot2001]

Il existe plusieurs formalismes pour décrire les comportements d'agents cognitifs basés sur des actions et leurs conséquences ; leur diversité s'explique par l'existence de deux courants majeurs en sciences sociales qui utilisent et exploitent différemment la notion de comportement : le **behaviorisme** (ou comportementalisme) et le **cognitivism**. Ces deux courants diffèrent essentiellement sur la manière dont l'individu traite l'information disponible.

Une reproduction réaliste du comportement des agents cognitifs ne se restreint pas à décrire l'agent et son comportement uniquement par les buts, les plans, et les actions dont il peut disposer ainsi que des décisions qu'il peut prendre. Nous devons aussi décrire comment et quand un agent utilisera ses connaissances, ses savoir-faire et ses facultés de perception de l'environnement ou de communication pour décider de ses actions.

C'est sur ce dernier point que, dans le domaine de la simulation du trafic, on peut distinguer deux démarches de modélisation du comportement des agents selon le moment où les décisions sont prises lors des phases de la chaîne de déplacements.

3.2.2.A Agent immergé dans le trafic

Le conducteur se base pour la prise de ses décisions sur les caractéristiques de ces zones (leur infrastructure, la réglementation qui les régit) ainsi que sur le comportement des autres agents individus qui s'y trouvent. Les modèles comportementaux sont basés sur la boucle perception-décision-action (*Figure 3-2*) et sont centrés sur ses facultés de décision et de raisonnement qui prennent place dans un contexte d'interactions et de contraintes.

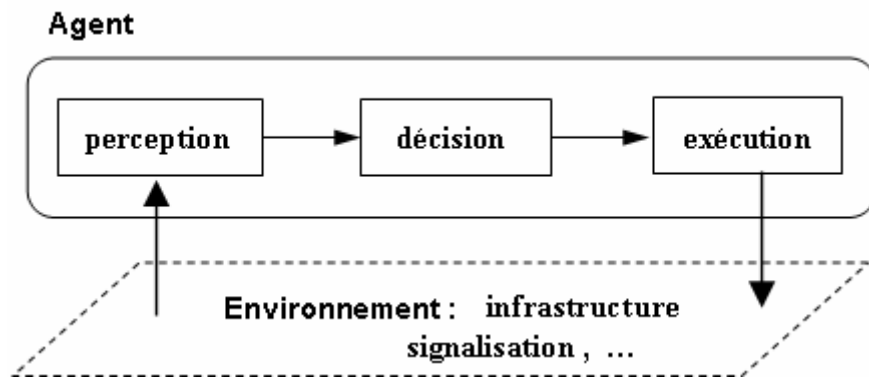


Figure 3-2. Boucle perception-décision-exécution d'un agent immergé dans le trafic

Les informations relatives à son comportement s'y trouvent et il n'a généralement pas besoin de communiquer avec les autres agents pour les acquérir, ni de les mémoriser. Les règles de décision associent une zone de perception à une ou plusieurs actions (changement de vitesse, de voie, etc.) organisées par ordre de priorité en fonction de la zone de perception. La simulation des comportements des agents nécessite le développement d'un modèle de vision et une représentation de l'environnement qui ne se limite pas à la géométrie de l'infrastructure, mais doit contenir des informations nécessaires au fonctionnement des modèles perceptifs et décisionnels des entités (informations topologiques, procédurales et sémantiques).

Lorsqu'on observe les techniques de mise en oeuvre des modèles décisionnels, deux générations de modèles apparaissent couramment. La première propose des systèmes fondés sur des réseaux de neurones et des bases de règles, tandis que la seconde s'appuie sur les automates et semble répondre au besoin de modéliser des comportements proches du comportement humain.

Outre les types d'agents (conducteurs de véhicules, deux roues, piétons, ...), la diversité des comportements est assurée par des attitudes particulières associées aux tempéraments des agents.

En France, un des simulateurs le plus élaboré est ARCHISIM [Espié1994], initié à l'INRETS il y a une vingtaine d'années par l'équipe d'Espé. L'approche mathématique est basée sur le recueil et la mise en équation de données en situation réelle, avec une reproduction du trafic à partir des lois de poursuites obtenues. L'approche comportementale s'appuie sur des résultats obtenus en psychologie de la conduite. Le trafic est le phénomène émergent résultant des interactions entre les différents acteurs de la simulation. Une des équipes du LIFL, sous la coordination de P. Mathieu, s'est récemment attachée à intégrer les

agents "motards" en les classant en pragmatiques, hédonistes, fous du guidon, désimpliqués, motards du dimanche. Leur comportement va jusqu'au non respect partiel du code de la route, ce qui se traduit par la mise en place de voies virtuelles de dépassement s'ajoutant aux voies réelles délimitées par le marquage [Bonte2006].

Ce type de modèles décisionnels permet la simulation de situations complexes (trafic dense dans le carrefour, congestion, occupation des zones de stockage) réduisant les coûts liés aux expérimentations sur le terrain et facilitant l'observation de phénomènes trafic bien particuliers (congestion, ralentissement, etc.). Ils offrent également la possibilité de tester des changements d'infrastructure, du système de signalisation, etc.

3.2.2.B Agent "individu-local" initiant son déplacement

Il s'agit de la phase d'organisation d'un déplacement (étape nous intéressant), qui comporte, modèle à base d'activités et à quatre étapes réunis, le choix des activités, des destinations, d'un mode de transport, d'une heure de départ ou encore d'un itinéraire (voir chapitre 1, *Figure 1-17*). Dans ce cas, il s'agit d'une modélisation des "intentions" avec les décisions se prenant en amont. Les techniques de modélisation font généralement l'hypothèse qu'un agent local, sans être omniscient, possède certaines connaissances (même imprécises).

L'approche comportementale s'appuie généralement sur des règles heuristiques, sur des décisions issues de lois probabilistes ou encore sur la théorie de l'utilité. Le niveau de détail de l'environnement virtuel n'est généralement pas élevé et il n'est pas indispensable que l'agent possède une représentation explicite de son environnement, tout en étant communicatif et doté d'une capacité à apprendre un modèle afin d'améliorer ses performances dans le temps.

Pour la simulation trafic, ce type de modèle décisionnel est utilisé pour simuler la distribution des flux sur le réseau routier et a vocation d'étudier des impacts de scénarios du type implémentation de points d'attraction, de nouveaux modes de transport, de changements majeurs au niveau de l'infrastructure.

Pris à part, aucun de ces deux modèles décisionnels ne permet de reproduire d'une façon complète le comportement d'un usager du réseau routier tout au long de la chaîne de déplacements.

Bien qu'un agent immergé dans le trafic dispose d'un but, d'un itinéraire, on ignore l'origine, la destination ou encore quand son déplacement se déroule. Par ailleurs, il n'est pas moins vrai que si le choix des destinations, l'heure de départ ou encore le mode de transport peuvent être considérées comme des décisions prises en amont, l'itinéraire peut toujours s'ajuster selon les conditions de trafic, ce qui n'est pas envisageable sans un module de perception. Le simulateur qui sera développé par une des équipes du L3i essaye d'intégrer ces deux aspects.

<p>Dans ces travaux, nous n'aborderons pas le modèle décisionnel qui doit gérer le comportement d'un usager lors de son déplacement (pour un conducteur, par exemple, sa réaction à l'approche d'un passage piéton, de feux, d'un rond-point, ...). L'approche comportementale typique du comportement d'un usager immergé dans le trafic fait l'objet des</p>
--

travaux de D.Sarramia pour la simulation microscopique du trafic [Chabrol2003], [Augeraud2005].

Le modèle décisionnel, que nous allons présenter dans ce mémoire, concerne les actions de préparation d'un déplacement (en amont), le comportement devant une action préméditée devenue impossible (en temps réel) et l'évaluation de la qualité du voyage (en aval).

3.2.3 Comportement d'un agent "individu-local" en fonction du type de choix en amont du déplacement

Lorsque le problème de choix en amont du déplacement est abordé, plusieurs aspects sont à clarifier comme hypothèses :

- **choix individuels ou non** : par exemple, les décisions liées à plusieurs étapes de trafic peuvent être le résultat d'une négociation dans un ménage ou entre des personnes appartenant à un groupe particulier.
- **choix soumis ou non à des contraintes** : par exemple, le choix d'utiliser une voiture privée est lié à la détention ou non d'un permis de conduire.
- **choix indépendants ou non** : par exemple, choisir un itinéraire est indépendant ou pas du mode de transport pressenti.
- dans le cas où les choix sont liés, quel est l'**ordre** et quelle est la **hiérarchie** ?
- **choix stationnaires ou non** pouvant changer en temps réel : ayant choisi un parking au préalable, et en raison de l'absence de places de stationnement, l'individu peut se reporter sur un autre parking ou adopter une autre décision.

De plus, la demande de transport est liée aux choix à long terme et à court terme, avec une coloration comportementale plus ou moins marquée (voir les travaux [Ben-Akiva1998b], [Al-Jammal2003], [Bhat2003b]). Ils regroupent généralement les choix en quatre catégories distinctes:

- le choix des destinations pour la réalisation d'activités,
- le choix du mode de transport,
- le choix des itinéraires,
- le choix d'horaires pour les déplacements.

Le premier choix intervient essentiellement à long terme (lorsqu'il s'agit d'une activité fixe comme le travail ou ayant un site unique comme, par exemple, la préfecture). Les autres choix s'ajustent plus volontiers lors de l'organisation des activités programmées dans un agenda dans lequel il est rarement pris en considération le choix conjoint (d'un ménage ou de partenaires d'activités). Il est important de noter que les décisions à court terme sont fonction des décisions à long terme, comme la détention d'une voiture ainsi que les lieux de domiciliation et de travail.

Pour étudier l'activité des parkings, nous nous intéressons d'abord au choix du mode de transport afin d'évaluer la demande de stationnement. Comme mentionné dans le paragraphe §1.4.3, nous considérons que les domiciles sont établis et connus, tout comme les lieux de travail et des écoles (activités fixes). Les agendas des agents "individus-locaux" contiennent les lieux de travail et des écoles avec une description suffisante des capacités de stationnement aux points de départ et de destination (chapitre 2, diagramme de classes dans *Figure 2-4*). Ce type d'activités n'induit pas de fluctuations particulières sur les activités de stationnement, mais ce sont plutôt les activités avec plusieurs lieux possibles (par exemple, aller dans les magasins, pratiquer un loisir, ...). Ce sont des choix d'activités à moyen terme dont le lieu peut être flexible. Ces choix sont conditionnés par des variables d'entrée dont certaines (comme l'attractivité et l'accessibilité d'un site) sont à formaliser. En l'absence d'une place de stationnement dans le parking choisi avant le déplacement, nous proposons un modèle décisionnel permettant d'intégrer les éléments de connaissances et perception pour le choix d'un itinéraire lors de la recherche d'une autre place de stationnement.

Après le trajet, l'agent "individu" évalue la qualité de ses choix qui pourra affecter ses choix futurs. Le comportement d'un agent immergé dans le trafic ne concerne pas nos travaux (*Figure 3-3*).

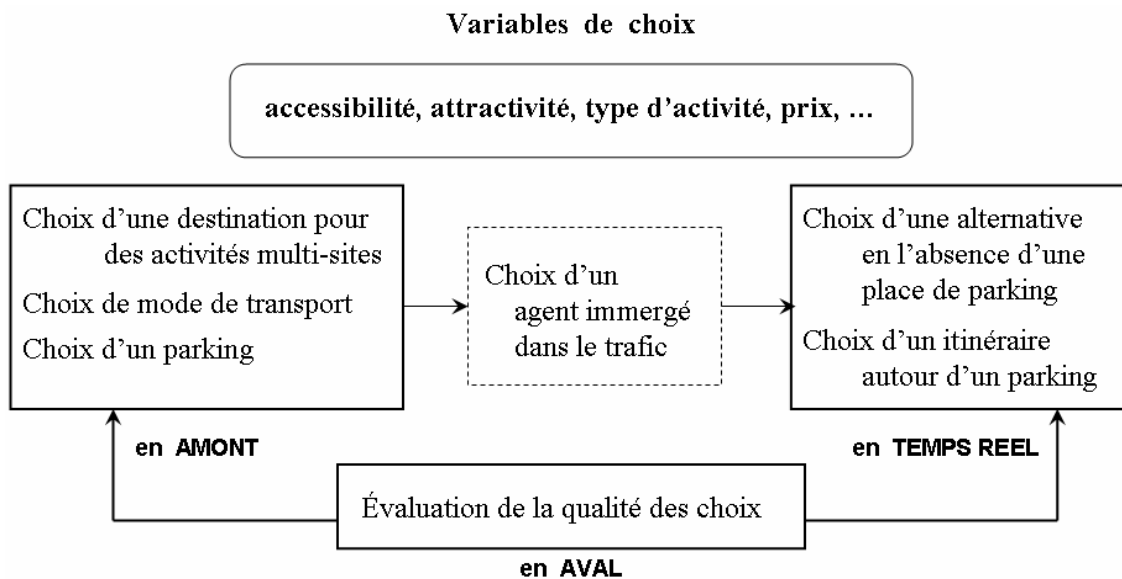


Figure 3-3. Choix d'un agent "individu"

3.2.4 Les approches classiques de choix préliminaire employées dans l'analyse de la demande de déplacements

Les **méthodes des choix discrets** : les critères motivant la décision d'un individu peuvent être très divers, mais lorsqu'ils sont quantifiables ou lorsqu'ils sont logiques (oui/non), alors il existe une théorie mathématique dite "à choix discrets" qui a fait le bonheur de plusieurs modélisateurs (voir [Ben-Akiva1998] pour une synthèse détaillée). C'est le modèle décisionnel qui est à la base du simulateur multi agents TRANSIMS [Raney2002] que nous avons présenté dans le chapitre 2 pour des similitudes conceptuelles avec notre simulateur.

Il existe plusieurs types de modèles développés, mais le principe de base est, qu'à chaque possibilité de choix i , est associée une fonction d'utilité supposée traduire le niveau de satisfaction que le choix procure à l'individu. Placé devant plusieurs alternatives, l'individu choisit celle qui le satisfait le mieux, c'est-à-dire, celle qui lui apporte la plus grande utilité.

Les **modèles stochastiques** reposent sur l'hypothèse que le processus de choix d'un individu est stationnaire. La méthode qui a eu le plus de succès consiste à combiner la modélisation multinomial logit et l'approche stochastique. La modélisation multinomial logit des probabilités de transition dans un modèle de Markov a également été proposée [Lahiri2002]. Nous remarquons pourtant que les variables explicatives ne sont pas censées avoir un effet rémanent sur les probabilités de choix.

Les **modèles hiérarchiques** ont été proposés pour modéliser les règles de décisions conjonctives et les processus de choix hiérarchiques. Il s'agit tout d'abord du modèle EBA (*Elimination by Aspects*) proposé dans [Krantz1971]. En s'écartant de l'hypothèse centrale d'une maximisation de l'utilité, ces modèles présentent un grand intérêt conceptuel. Toutefois, leur utilisation est limitée par la complexité des procédures d'estimation (arbre de décision, par exemple, pour le simulateur ALBATROSS [Janssens2004]). Par ailleurs, la généralisation du modèle EBA aux attributs continus a été à peine explorée.

Récemment, des techniques basées sur l'intelligence artificielle comme l'**approche bayésienne** [Verhoeven2005]) ou **réseaux de neurones** [Xie2003], [Yamamoto2002] ont été avancées afin de prendre en compte le processus d'apprentissage. A notre connaissance, leur développement reste à l'état embryonnaire.

3.2.5 Analyse des difficultés associées à la modélisation des choix

Il ne s'agit pas d'analyser la phase de spécification de certains modèles (choix de variables, ...) ou performances, mais uniquement d'étudier quelques aspects qui peuvent faire défaut à la pertinence de reproduire le comportement d'un agent "individu" placé devant plusieurs choix :

- **Prise en compte de l'effet de certains couplages entre variables :** C'est le grand danger de vouloir simplifier arbitrairement un modèle sur la seule base de propriétés mathématiques. Ceci ramène un modèle théorique à « une simple abstraction conceptuelle, plaisante à manipuler mais dont la fécondité a de fortes chances d'être faible » [Drogoul1993]. Nous y ajouterons la non-prise en compte des effets des interactions entre les variables d'entrée. Cela se traduit par des effets de non-linéarité qui ne sont pas analysables. Par exemple, le fait d'avoir un certain âge et en même temps un certain revenu n'est pas sans effet sur un choix modal.
- **Interprétation des fluctuations de choix :** Face à une même situation de choix, les individus ont parfois tendance à fluctuer dans l'évaluation de leurs actions et donc à ne pas choisir, en amont, toujours la même alternative. La tentation est grande pour s'en servir de termes aléatoires dans certains modèles afin de "noyer" ces aspects, ou de s'appuyer sur une forte interprétation psychologique pour les justifier.

- **Prise en compte des changements d'environnement :** C'est, de loin, l'aspect le plus frustrant pour tous les modèles. L'introduction ou l'annulation d'une alternative est quasi-inabordable par les modèles probabilistes (bien que cette difficulté a été partiellement contournée par une proposition dans [Ben-Akiva1999] consistant à modéliser le processus de choix selon une procédure emboîtée à deux ou plusieurs étapes). Dans l'ensemble, les modèles heuristiques rencontrent le même problème et engendrent en plus un coût calculatoire non-négligeable.

3.3 Changements de logique de comportement d'un usager du réseau routier

3.3.1 Changements de choix dans un contexte environnemental statique

Malgré des tentatives pour rendre les choix stationnaires et homogènes, il a été admis [Bhat2003b] que les individus ne vont pas toujours au même endroit, n'effectuent pas les mêmes activités d'un jour à l'autre, ne font pas le même nombre de déplacements chaque jour, changent de modes de transport, etc. Certains de ces écarts sont favorisés par la diversité des activités qu'ils effectuent et par la multitude des destinations envisageables. Si les activités que nous avons appelées "fixes" (emploi, école, ...) sont des activités répétitives et doivent être réalisées en respectant des contraintes de temps, il n'en est pas de même avec les activités dites "flexibles" (faire ses courses, pratiquer des activités de détente sur des lieux adéquats, remplir des formalités administratives, ...). Elles ne sont pas répétitives et n'ont pas un caractère absolu de devoir être effectuées. Elles peuvent être reportées dans le temps et donc ne nécessitent pas le respect absolu de la planification. Et même placés devant une situation identique de choix, les individus ont parfois tendance à fluctuer dans l'évaluation de leurs actions et donc à ne pas choisir toujours la même alternative :

- deux individus, ayant les mêmes attributs socioéconomiques et confrontés au même ensemble de choix, peuvent choisir deux options différentes ;
- certains individus peuvent ne pas choisir la meilleure (jugée par le concepteur !) des options, du point de vue des attributs considérés dans la modélisation.

Mis à part les erreurs liées à l'échantillonnage ou le choix de la relation fonctionnelle entre les caractéristiques observées et les choix offerts, Manski [Manski2000] a distingué deux autres sources d'incertitude :

- les caractéristiques inobservées des choix offerts ;
- les caractéristiques inobservées des individus.

Pour ce dernier cas, des travaux [Sunitiyoso2006] dans le domaine sociologique et psychologique vont jusqu'à expliquer les aléas dans les choix par les états mentaux des individus. Une façon de considérer le problème est de supposer que l'individu, dans certaines circonstances, oublie de prendre en compte certaines caractéristiques d'une activité ou se trompe sur l'importance d'une des caractéristiques associées. Les circonstances dans lesquelles

le choix est effectué sont susceptibles de perturber la perception et le souhait d'effectuer l'activité. Selon [Tallon2002], différentes explications peuvent être avancées :

- L'état d'esprit des individus varie au cours du temps. Par exemple, le même enseignant ne note pas de la même manière les mêmes copies d'examen selon le moment où elles lui sont soumises. Les états d'esprits peuvent aussi traduire une focalisation aléatoire sur certains aspects d'une alternative, suite à un phénomène de "mode" (par exemple, l'effet de court terme de la journée sans voiture à La Rochelle).
- L'individu ne connaît pas ses préférences ou elles sont floues, ce qui empêche l'individu de désigner sans ambiguïté ce qu'il veut.
- On peut aussi supposer que l'individu se trompe lors de son processus d'évaluation des actions possibles. Les capacités cognitives (de mémorisation, de calcul, ...) limitées des individus ne leur permettent pas de s'acquitter de cette tâche complexe de façon optimale. Cela peut provenir de la difficulté pour certains individus de traiter de grands ensembles d'informations.

Nous n'allons pas conférer à l'entité agent "individu" ce genre de "finesses" psychologiques, mais tenir compte uniquement du fait que son comportement peut changer en fonction des facteurs exogènes sans que, pour autant, ses préférences relatives aux caractéristiques soient modifiées. Un agent ayant appliqué son choix initial, doit être en mesure d'évaluer la qualité de son choix et, éventuellement d'y remédier pour un prochain trajet. Le but est de trouver ou de retrouver un niveau de satisfaction satisfaisant pour ses déplacements.

3.3.2 Changements de choix dans un contexte environnemental dynamique

Une grande partie de gens réagit aux changements dus aux contextes des déplacements comme la tarification des parkings, la réglementation, les offres de transport ou les modifications des infrastructures. Selon l'ampleur de la modification, les réactions peuvent être plus ou moins profondes :

- changement de l'heure de départ pour le déplacement,
- réorganisation des chaînes de déplacements,
- changement de destination,
- changement de mode de transport,
- abandon du déplacement.

Dans ce cas, la demande de déplacement est vue comme un investissement à long terme, impliquant un apprentissage : les jeunes et les personnes âgées réagissent différemment, même si elles ont les mêmes préférences et les mêmes motivations [Becker1987]. Ces changements de comportement ne se font pas instantanément mais avec un délai. Une personne qui a l'habitude d'aller au travail en voiture et de se garer gratuitement dans un parking, devra s'adapter lorsque les conditions de stationnement et de circulation changent fortement (par exemple l'introduction d'un péage). Cette phase d'adaptation peut se traduire, à très long terme, par le changement de domicile, de travail, etc. Dans le cas du changement

de domicile, il peut y avoir tant de raisons autres (par exemple, le voisinage). Ces derniers changements fondamentaux ne font pas notre objet d'étude.

Nous allons nous intéresser aux impacts de changements des offres de localisations des sites (changement de destination), des offres de moyens de déplacement (changement de mode de transport) ou encore des offres de stationnement (changement de parking).

3.3.3 Les approches classiques de modélisation des changements de choix

Il existe deux approches distinctes pour la prise en compte des changements des choix dans le temps :

- Admettre que le modélisateur est incapable d'appréhender les comportements individuels et d'incorporer les changements de choix dans une **approche probabiliste**. Il faut alors essayer d'identifier, parmi les interprétations possibles des probabilités, lesquelles sont les plus pertinentes. Le manque d'information conduit le modélisateur à utiliser des règles de choix probabilistes (cette interprétation est souvent du type "économétrique"). Autrement dit, le modélisateur peut au mieux prédire le comportement d'un individu à une fonction de probabilité près.
- Essayer d'identifier les facteurs responsables de ces changements de choix et les incorporer dans le programme de maximisation de l'utilité de l'agent en conservant une **approche déterministe**.

Becker [Becker1987] affirme que les changements de choix ne proviennent pas en général de changements de préférences mais plutôt d'une réactivité des individus à un environnement et qui est décroissante avec leur âge. Si l'explication en terme d'apprentissage peut paraître séduisante, elle n'explique assurément qu'une petite partie des changements de choix. Pour les autres facteurs, la démarche de "sophistication" croissante des fonctions d'utilité paraît peu prometteuse. Outre les problèmes de révélation de cette utilité, De Palma [DePalma1998] souligne que l'approche revient à considérer un nombre très élevé d'états, au point de devenir ingérable. Quant aux changements d'offres, les modèles qui manipulent la maximisation de l'utilité d'un usager ne peuvent pas traiter convenablement l'introduction de nouvelles alternatives (le problème IIA [Ben-Akiva1998b]). D'autres travaux [DPdoc1997] proposent, pour un nouveau projet de transport, le principe des modèles dits d'induction qui part de deux hypothèses :

- Le trafic induit étant par définition lié à l'introduction de la nouvelle offre sur le marché, le trafic supplémentaire porte sur le nouveau mode.
- Ce trafic supplémentaire est lié au changement de coût généralisé.

La méthode décrite précédemment présente de nombreux inconvénients d'un point de vue méthodologique. En effet, la représentation séquentielle du modèle de choix de mode et du modèle d'induction de trafic conduit à une incohérence dans la représentation des effets comportementaux. L'activation du modèle d'induction sur l'ensemble des modes de transport

contraint la valeur d'ajustement qui est déterminée empiriquement. Si cette valeur est en général issue d'autres expériences de développement de modèles avec un calibrage avant / après, il n'en reste pas moins que cette valeur est dépendante des fonctions d'utilité retenues pour l'étude en cours. Ainsi le recours à un transfert d'expérience n'est valable que si la forme structurelle et les formes fonctionnelles des utilités sont strictement identiques.

Toutes méthodes confondues, de sérieuses réserves sont à émettre quant au réalisme de représentation des changements de choix et de leurs conséquences.

3.3.4 Les approches multi agents de modélisation des changements de choix

Le paradigme multi agents apporte, de ce point de vue, une grande avancée par rapport aux techniques classiques. Un agent cognitif est censé trouver et apprendre de manière autonome les "comportements" nécessaires à sa prise de décision.

Pour la plupart des tâches que doit accomplir un système multi agents (SMA) et même si l'environnement paraît plus ou moins stable, il est extrêmement difficile et même impossible, à priori, de déterminer correctement le comportement et les activités concrètes de ce système au moment de sa conception [Hait2000]. Cela nécessite de connaître à priori la nature de l'environnement. Ces problèmes, qui résultent de la complexité des systèmes multi agents, peuvent être évités ou du moins réduits en octroyant aux agents la possibilité de s'adapter et d'apprendre avec la possibilité d'améliorer leur propre performance ou/et celle du système dans son ensemble.

L'apprentissage dans un système multi agents peut se retrouver sous deux formes.

- **Apprentissage mono agent** : Un agent impliqué dans un SMA peut apprendre de façon solitaire et indépendante des autres agents. Le problème associé à la plupart des méthodes d'apprentissage est celui de nouvelles situations.
- **Apprentissage multi agents** : Les agents dans un SMA peuvent apprendre de façon commune en échangeant des informations, en partageant des croyances lors de processus de communications et de négociations.
Dans la plupart des travaux, l'apprentissage des agents est basé sur l'enrichissement de leurs bases de cas respectives par l'ajout de nouveaux cas, récupérés des autres agents et adaptés à leur contexte d'usage individuel. Les agents se basent aussi sur la modélisation des compétences des autres agents pour améliorer leurs interactions. Ce mécanisme présente deux faiblesses. Premièrement, il ne peut fonctionner sous la forme proposée qu'entre agents homogènes sémantiquement. Deuxièmement, il n'y a aucune émergence de sens dans le collectif. Dans ce cas, le processus d'apprentissage des agents est basé sur la distribution de l'union des bases de cas, sur l'ensemble des agents. Chaque agent récupère ces bases, les cas les plus adaptés à sa situation, comme ceux correspondant aux problèmes qu'il ne sait pas résoudre par exemple. C'est un mécanisme distribué d'enrichissement des bases individuelles de cas qui peut être très lourd.

Comme pour alourdir la tâche d'un modélisateur, cette notion d'apprentissage est perçue différemment par des spécialistes des SMA. Dans un dictionnaire classique (de la langue française), l'apprentissage est défini soit comme une action d'acquérir des connaissances, soit

comme une transformation du comportement ayant pour but d'accroître l'adaptation d'une personne à son milieu. Bien que la différence puisse sembler floue, elle génère également deux manières différentes d'aborder un mécanisme d'apprentissage d'un agent.

Jars [Jars2005] considère qu'il y a apprentissage lorsqu'un agent acquiert de nouvelles connaissances et devient plus performant, alors qu'il y a adaptation lorsqu'un agent fait face à de nouvelles conditions sans, pour autant, devenir plus efficace ou apprendre de nouvelles choses. Lorsque des algorithmes d'apprentissage ou d'adaptation sont mis en place, la question de l'optimalité est très souvent soulevée.

Les méthodes à **base de classeurs** et d'**architecture de subsomption** sont très performantes et largement employées dans les travaux de microsimulation ([Laumonier2004] pour une synthèse des méthodes couramment employées et ANNEXE D -). Par rapport aux algorithmes d'**apprentissage par renforcement**, les premières méthodes possèdent un mécanisme de généralisation qui exploite les régularités dans la dynamique d'interactions entre l'agent et l'environnement.

Les architectures réactives ont l'avantage de la simplicité et de l'efficacité de calcul.

Dans l'analyse de la **demande de déplacements**, la notion d'apprentissage est de plus en plus convoitée, surtout lorsqu'il s'agit de modèles similaires à celui que nous utilisons, c'est-à-dire basé sur les activités. Dans l'approche Time-Geography, une représentation schématisée ([Stern2002]) du processus décisionnel individuel d'un voyageur intégrant la phase d'apprentissage est incluse (Figure 3-4).

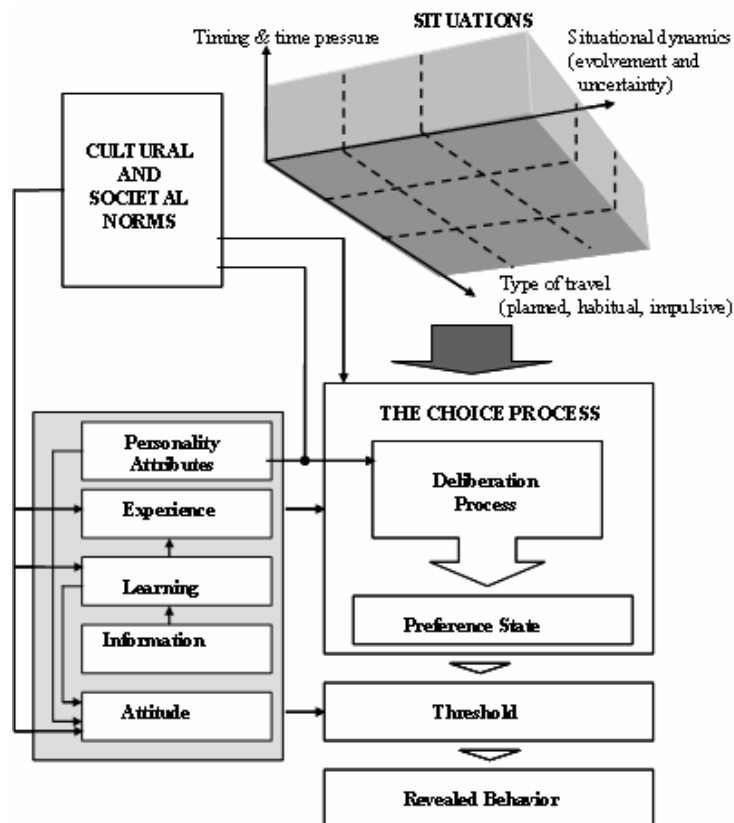


Figure 3-4. Processus décisionnel individuel [Stern2002]

Dans la modélisation de la demande de déplacement utilisant l'apprentissage par renforcement, la technique **Q-Learning** [Watkins1989] est la plus employée. Il s'agit d'une forme primitive d'apprentissage où l'agent teste une action à un état particulier et évalue ses conséquences en termes de récompenses immédiates ou de pénalités qu'il reçoit de l'environnement. Le mécanisme est basé sur trois fonctions : une d'évaluation, une de renforcement et une autre de mise à jour. A partir de la situation à l'instant t perçue par l'agent, la fonction d'évaluation propose une action en se basant sur la connaissance disponible au sein de la mémoire interne. Cette connaissance est mémorisée sous forme de valeur d'utilité associée à une paire "situation-action". L'action sélectionnée est celle qui présente la meilleure probabilité de renforcement positif, donc une récompense. Après l'exécution de l'action, la fonction de renforcement utilise la nouvelle situation pour générer la valeur de renforcement.

3.3.5 Analyse des difficultés associées à l'apprentissage en trafic

Les architectures réactives ont certaines limitations pour notre application, qui vise à "ajuster" des décisions prises en amont de la chaîne de déplacement, une fois le trajet effectué (par exemple, changer de mode de transport lors du prochain trajet).

- Si le système est très évolutif, il faut tenir compte de tous les niveaux inférieurs pour développer un nouveau niveau. Ainsi l'insertion d'un nouveau niveau au bas de la hiérarchie entraîne la modification de tous les niveaux supérieurs.
- Lorsque la complexité augmente, les interactions entre comportements font de même. Il devient alors difficile de prédire le comportement émergent.
- Les comportements sont efficaces quand la donnée qui leur est nécessaire est directement disponible. Généralement, seul l'environnement local intervient sur le choix de l'agent. Par contre, si celle-ci est plus complexe et évoluée, il devient difficile de la mettre en oeuvre dans ce type d'architecture.
- L'absence de réel pouvoir de décision par anticipation, oblige à expliciter celle-ci lors de la conception.
- Notre objectif est de conserver des règles explicites afin de les interpréter et de les modifier alors que la subsomption ne fonctionne que de façon implicite.

Initialement, par comparaison avec les approches développées par des simulateurs basés sur les mêmes principes conceptuels que le nôtre (paragraphe §2.3.2.C du chapitre 2) la méthode Q-Learning avait retenu toute notre attention [Watkins1992]. C'est le mécanisme d'apprentissage utilisé par Timmermans dans la conception du simulateur ALBATROSS [Arentze2000] et également testé par l'équipe de Nagel, un des concepteurs du simulateur TRANSIMS [Charypar2005]. Les principaux reproches pouvant être formulés sont :

- Les expériences collectées par les erreurs ne sont utilisées qu'une seule fois pour ajuster la Q-fonction puis "jetées". Ceci est fastidieux parce que certaines expériences sont coûteuses et d'autres sont rares.

- Comme dans la plupart des approches, il y a une évidente difficulté à l'appliquer de façon effective à des environnements fortement dynamiques.

Il existe encore une problématique difficilement contournable. Comme pour tout problème d'apprentissage, se pose le problème d'assignement de crédit (récompense ou pénalité) pour tous les changements de performances de l'agent "individu" (croissance ou décroissance). Cette mesure peut se déduire d'un signal de renforcement, évalué de manière numérique (éventuellement négative) et que l'agent cherche à optimiser à long terme.

Dans des travaux récents [Buffet2003], on peut voir une préférence pour les récompenses issues d'un jugement interne propre à l'agent.

Pour la plupart des approches, cette récompense est perçue comme venant de l'environnement [Hait2000]. L'agent choisit une action a_t parmi celles offertes à l'instant t et correspondant à un panier d'alternatives s_t . Il reçoit ensuite une récompense r_t (ou une pénalité) et le cycle continue à l'instant $t+1$. Le mécanisme d'apprentissage est décrit par *Figure 3-5* [Hait2000].

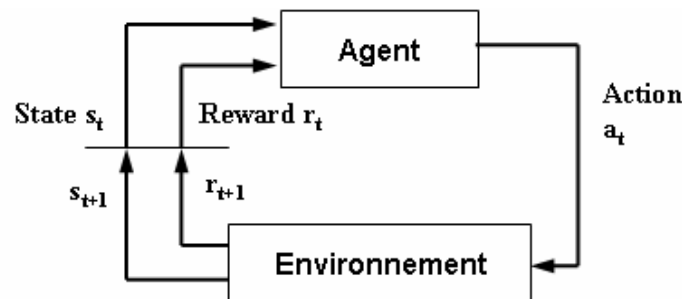


Figure 3-5. Apprentissage par renforcement avec récompenses venant de l'environnement [Hait2000]

Un agent doit exploiter ses connaissances antérieures, mais il doit également effectuer une opération d'exploration afin de faire la meilleure sélection d'actions dans le futur, c'est à dire qu'il doit essayer une variété d'actions et choisir progressivement celles qui paraissent les plus performantes. Un mécanisme d'apprentissage ne serait pas en agrément avec un contexte dynamique si l'agent est contraint à "exploiter" une situation et non pas d'"explorer" des situations. En effet, il existe des scénarios connus au préalable par l'agent qu'il sélectionne comme actions "fiables" ; l'agent exploite donc ces scénarios. Par ailleurs, il peut y avoir des scénarios qui n'ont pas été testés. La question est qui peut garantir qu'un scénario non favorable dans un contexte donné le restera dans un environnement dynamique ?

Dans le domaine du transport, quel que soit le type d'approche employée, la qualité des modèles est très étroitement liée aux données nécessaires à leur fonctionnement. Dans la plupart des cas, des enquêtes [Arentze2003b], des observations [Bhat2003b] ou encore des mesures expérimentales [Bauzer2006] sont utilisées pour la calibration des modèles, et de leur rigueur dépend la qualité du modèle.

3.4 Processus décisionnel d'un agent "individu"

3.4.1 Etapes d'un processus décisionnel

Quelle que soit la technique de modélisation employée, dans la plupart des travaux liés à la demande de déplacement [Cirillo2005], le processus décisionnel est décrit par les étapes illustrées ci-après (Figure 3-6).

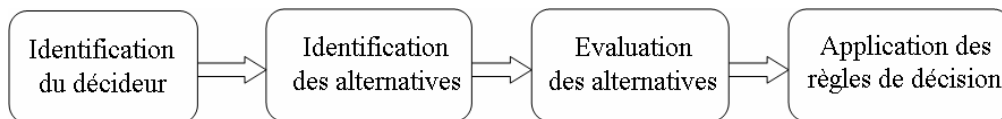


Figure 3-6. Etapes du processus décisionnel [Cirillo2005]

- **Identification de l'entité décisionnelle :**

Certains modèles peuvent opérer avec l'entité "individu". Pour expliquer la différence de préférences ou de contraintes, sont introduites des caractéristiques comme le niveau social, les revenus, le sexe, l'âge, etc. Certains auteurs (comme [Ben-Akiva1998b], [Schlich2003]) considèrent qu'il est possible d'élargir le concept d'entité individuelle à un groupe de personnes, comme par exemple, un ménage ou une organisation qui peuvent être perçus comme un décideur. L'avantage mis en avant par les auteurs est la possibilité d'ignorer les interactions internes d'un groupe.

- **Identification des alternatives :**

Il s'agit d'établir une liste finie de possibilités pour un choix potentiel (modes de transport, destinations, parkings, itinéraires, ...). Lister le nombre de moyens de transport ou de destinations avec le même type d'activité ne pose généralement aucun problème particulier. Qui plus est, le nombre d'alternatives étant faible, cela se répercute sur le caractère moins laborieux de la démarche employée pour établir le choix. De plus, pour réduire la liste, on peut souvent utiliser ce qui est appelée la "disponibilité de l'alternative" [Ben-Akiva1998b] (par exemple la possession ou non du permis de conduire pour l'individu, la disponibilité ou non d'un bus dans certains créneaux horaires, ...).

En revanche, s'il s'agit de lister les itinéraires entre un point origine et un point destination pour un mode donné, le problème prend une toute autre ampleur car l'identification de toutes les alternatives est cette fois-ci laborieuse. Ajoutons à cela le nombre d'alternatives qui évolue dans le temps, le problème devient alors souvent trop complexe.

- **Evaluation des alternatives :**

Evaluer une alternative signifie lui associer une réponse. Chaque alternative est caractérisée par un certain nombre de propriétés, certaines pouvant être communes à plusieurs alternatives, d'autres spécifiques, quantifiables ou non. Par exemple, le temps de trajet peut s'estimer en minutes, aussi bien que dans des équivalents prix ou encore avec des variables linguistiques du type "grand", "petit", etc.

- **Application des règles de décision :**

Des modèles stochastiques, heuristiques ou probabilistes peuvent répondre à des

problématiques liées aux types de choix qui nous intéressent. C'est de loin l'étape la plus délicate et, bien que de nombreux travaux les aient testés avec plus ou moins de succès, aucune méthode ne semble faire l'unanimité.

3.4.2 Etapes de notre processus décisionnel

Pour conserver la caractéristique d'un environnement évolutif, notre démarche est complétée par des rétroactions (afin que les décisions préliminaires puissent être modifiées dans un contexte urbanisme-transport statique) et par des étapes de réactualisations des alternatives (modification du nombre d'alternatives dans un contexte urbanisme-transport dynamique). Dans une simulation multi agents, ces deux aspects relèvent de processus d'apprentissage.

Notre processus décisionnel comporte donc une **phase de choix préliminaire** (comportement moyenné pour le premier déplacement) et une **d'apprentissage** (comportement adaptatif). Le schéma de principe est présenté dans Figure 3-7.

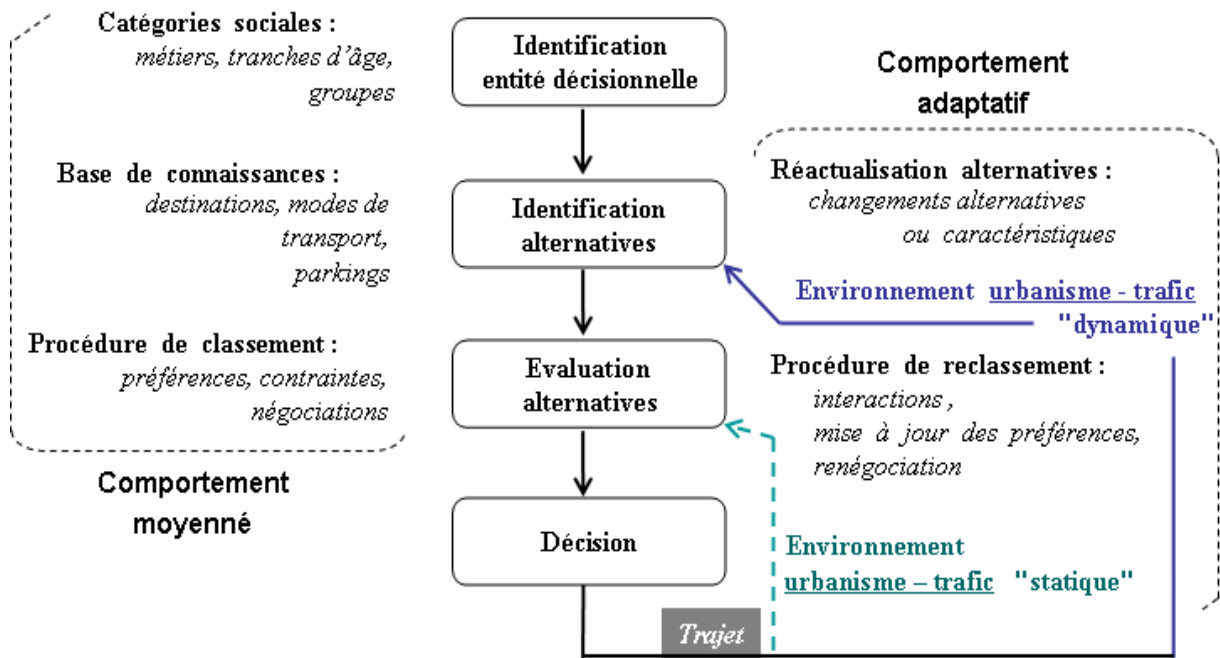


Figure 3-7. Notre processus de choix préliminaires et d'apprentissage

3.4.2.A Comportement "moyenné" – choix préliminaire

- Il n'y a pas d'entité de contrôle. Nous considérons que les préférences des agents appartenant à la même catégorie sont identiques. Un modèle de choix préliminaires sera affecté à chaque agent selon sa catégorie sociodémographique. Nous appliquerons le principe de l'approche évolutionniste qui considère des agents ayant initialement une très petite rationalité et des connaissances spécialisées de leur domaine d'action. A partir d'une base de connaissances liées aux caractéristiques des alternatives (modes, destinations, parkings, ...), chaque agent effectue un classement qui est à l'origine de ses

propres choix préliminaires, en fonction des critères identifiés comme pertinents pour son groupe sociodémographique.

- Pour classer les alternatives, nous avons distingué trois cas.
 - soit l'alternative est évaluée à l'aide d'une fonction "score", associée à la notion de qualité d'une alternative ou d'un service, et dans ce cas, le choix se fait par classement (en maximisant le score associé à la qualité de l'alternative) ;
 - soit l'alternative n'est pas évaluée directement et, dans ce cas, il faut établir un algorithme pour départager et classer les préférences.
 - soit l'alternative peut être choisie par une règle heuristique du type IF... THEN.

3.4.2.B Comportement adaptatif – mécanismes d'apprentissage

Nous présentons un exemple de démarche décisionnelle incluant la phase de choix préliminaires et le mécanisme d'apprentissage (Figure 3-8).

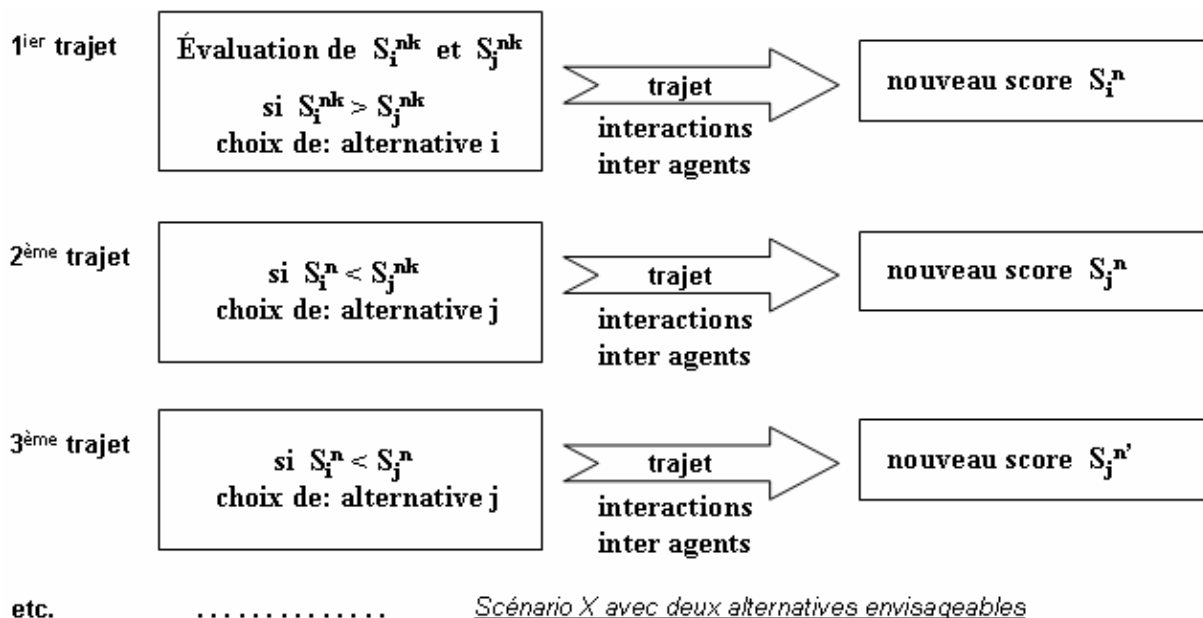


Figure 3-8. Démarche décisionnelle incluant la phase de choix préliminaires et le mécanisme d'apprentissage

- Pour une première simulation, devant un scénario hypothétique, les personnes d'une même catégorie obéissent au modèle correspondant. Suite à son trajet, l'agent comprend, apprend et révise la qualité de son choix. Après déplacement, le choix va s'individualiser suite à une procédure *d'apprentissage individuel*, ce qui peut se traduire par un changement de comportement. Dans un contexte urbanisme-transport statique, aucune forme d'apprentissage adaptatif collectif ne présente d'intérêt particulier. La satisfaction ou non de son choix est en fonction des conditions de déplacement ce qui n'a, au premier abord, rien de commun avec l'expérience vécue par un autre agent.
 - soit X un scénario (par exemple, se déplacer pour faire des courses en voiture)
 - soit deux alternatives possibles pour accomplir ce scénario i et j (par exemple deux

destinations).

- soit l'agent k appartenant à la catégorie sociodémographique n .
- Comme un nombre non négligeable de ménages ou de groupes sont tentés de pratiquer le partage de véhicules (covoiturage et autres), nous introduisons également **la négociation préalable** afin d'aboutir à un choix de mode de transport, suivie après déplacement par une étape **d'apprentissage par partage d'expérience**.
- Lorsque le nombre d'alternatives est modifié, le modèle décisionnel va s'enrichir par une phase **d'apprentissage collectif**.

Avant le premier déplacement, les scores attribués aux deux alternatives par l'agent "individu" sont ceux de sa catégorie sociodémographique, le choix portant sur celle maximisant ce score. En fin de trajet, le score associé à cette alternative est réévalué (personnalisé) et selon les conditions trafic (interactions interagents), le choix pour le deuxième déplacement peut changer et ainsi de suite ...

3.5 Procédure de classement par fonction "score"

3.5.1 Définition de la fonction score

Parmi les modèles couramment rencontrés en recherche opérationnelle, nous avons utilisé les principes de base des modèles à choix discrets. A chaque possibilité de choix i , est associée une fonction d'utilité supposée traduire le niveau de satisfaction que le choix de i procure à l'individu n : U_i^n . Placé devant plusieurs alternatives, l'individu choisit celle qui le satisfait le mieux, c'est-à-dire, celle qui lui apporte la plus grande utilité. Le modélisateur, qui observe le système, ne possède pas l'information complète sur tous les éléments pris en compte par l'individu qui fait un choix. La fonction d'utilité est la somme de deux composantes :

Équation 3-1 :

$$U_i^n = S_i^n + \varepsilon_i^n$$

S_i^n est une partie déterministe fonction des caractéristiques observables de l'individu n et de l'alternative i ; ε_i^n est une variable aléatoire de valeur inconnue, qui reflète les goûts (non mesurés) particuliers de chaque personne, ainsi que les erreurs de mesure ou d'observation faites sur les caractéristiques explicitement prises en compte dans S_i^n . En général, S_i^n est représentée par une fonction du type :

Équation 3-2 :

$$S_i^n = \sum a_{ik} x_{ik}^n = a_{i1} x_{i1}^n + a_{i2} x_{i2}^n + \dots + a_{im} x_{im}^n,$$

Autrement formulé, c'est une fonction linéaire des variables x_{ik}^n , caractéristiques de l'individu et de l'alternative. Les x_{ik}^n peuvent être soit des variables quantitatives (par

exemple pour le choix d'un mode de transport : temps de trajet, revenu des personnes, ...), soit des variables qualitatives (sexe, possession du permis de conduire, ...) exprimées sous forme de variables binaires (0 ou 1). Les coefficients a_{ik} traduisent, sous la forme d'un poids, l'importance relative de chacune des caractéristiques. Si l'utilité est aléatoire par manque d'information, en revanche la règle de décision qui conduit un individu à faire tel choix reste fondamentalement déterministe. Par contraste, des psychologues comme [Krantz1971] soutiennent que le processus de décision est aléatoire par nature, et ce, parce qu'un individu peut être influencé par le contexte ou se tromper dans ses choix. Ces débats ont abouti à l'élaboration de plusieurs modèles qui diffèrent essentiellement par la manière de définir la partie aléatoire de la fonction "utilité".

Dans *Figure 3-9*, sont présentées les deux principales classes de modèles [Afsa Essafi2003] qui diffèrent essentiellement par la façon dont les deux termes de la fonction utilité sont définis. Se reporter aux travaux [Antille2000], [Lemelin2005], [Munizaga2005] dans lesquels une présentation détaillée permet de différencier les modèles existants, leurs intérêts et limites.

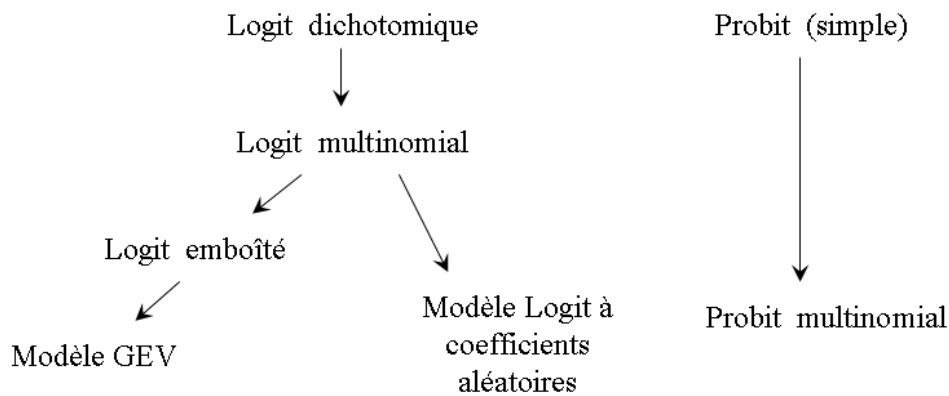


Figure 3-9. Principaux modèles à choix discrets [Afsa Essafi2003]

Dans le domaine du transport, le plus utilisé reste celui du multinomial logit (basé sur une représentation probabiliste de la partie utilité) qui possède une capacité assez satisfaisante pour prédire le choix des usagers du réseau urbain. D'autres modèles probabilistes ont été récemment proposés, avec l'élimination par attributs [Laurent2006]. Le modèle probit repose sur l'hypothèse d'une distribution normale des termes aléatoires et présente l'inconvénient majeur d'être difficile à estimer, particulièrement dans sa version multinomiale. De plus, il ne repose pas sur un axiome de choix comme le modèle multinomial logit. Pour terminer, ce type de modèles mathématiques relie des paramètres se situant tous au même niveau d'analyse. Autrement dit, pour cette notion, il n'est pas possible de relier la taille d'un effectif aux prises de décisions effectuées par les individus. On peut dire que ces niveaux d'organisation sont "étanches" puisqu'il n'est pas possible de faire correspondre des comportements effectués à un niveau microscopique à des variables globales mesurées à un niveau macroscopique.

Par ailleurs, des interactions entre les effets des variables ne sont pas prises en considération, un manque évident des approches classiques qui ignorent leurs effets

bénéfiques ou néfastes sur la perception de la qualité d'un service et donc sur le classement des alternatives.

Fonction score pour le choix préliminaire :

Une première différence entre les modèles à choix discrets et notre proposition est que, dans la formulation du modèle de choix préliminaire, nous ne faisons pas intervenir dans l'expression du score, à la fois les caractéristiques des individus et les variables liées à l'alternative à étudier. Cela permettra au régulateur de disposer d'un modèle par catégorie sociodémographique et également de réactualiser les catégories dans un contexte socioéconomique évolutif.

Les variables d'entrée ne se résument pas uniquement aux caractéristiques des alternatives (distance, prix,...) mais, pour la modélisation trafic à base d'activités, prennent également en compte les caractéristiques des activités à mener par l'agent (degré d'urgence, site unique ou pas, ...). Les effets des interactions (couplages entre les effets des variables d'entrée) seront quantifiés pour affiner le modèle.

Puisqu'il s'agit d'agents locaux, les valeurs des variables d'entrée liées aux alternatives sont estimées comme connues (même si cela est du genre «plus loin», plus près», « plus cher», « moins cher», etc., manière imprécise). En revanche, les variables liées aux conditions de trafic (degré de congestion, retard, ... résultats des interactions inter agents lors du déplacement) sont ignorées au moment de la prise de décision, ce qui va constituer le modèle de choix préliminaire d'une catégorie sociodémographique.

La part déterministe de la fonction utilité (la fonction score) pour **les choix préliminaires d'une catégorie sociodémographique** est définie comme suit :

Équation 3-3 :

$$S_i^n = \underbrace{a_{i1}x_{i1}^n}_{\text{effets caractéristiques de l'individu}} + \underbrace{a_{i2}x_{i2}^n + \dots + a_{im}x_{im}^n}_{\text{effets variables liées à l'alternative}} + \underbrace{a_{ij}x_{ij}^n + \dots + a_{il}x_{il}^n}_{\text{effets variables liées aux activités}} + \underbrace{a_{ijl}x_{i1}^n x_{j1}^n + \dots}_{\text{effets couplages variables}}$$

Score par catégorie sociale

effets des variables à valeurs connues avant le déplacement

Fonction score intégrant le mécanisme d'apprentissage individuel :

Après le premier déplacement, des effets des variables liées aux conditions de déplacements sont également introduits, assurant ainsi le processus d'apprentissage individuel.

Équation 3-4 :

$$S_i^n = \underbrace{a_{i1}x_{i1}^n + a_{i2}x_{i2}^n + \dots + a_{im}x_{im}^n}_{\text{effets caractéristiques de l'individu}} + \underbrace{a_{ij}x_{ij}^n + \dots + a_{il}x_{il}^n}_{\text{effets variables liées à l'alternative}} + \underbrace{a_{ij_1}x_{i_1}^n x_{j_1}^n + \dots + a'_{i_1}y_{i_1}^n}_{\text{effets variables liées aux activités}} + \underbrace{a_{ij_1}x_{i_1}^n x_{j_1}^n}_{\text{effets couplages variables}} + \dots + \underbrace{a'_{i_1}y_{i_1}^n}_{\text{effets interactions inter agents}}$$

Score par agent de la catégorie i

effets des variables à valeurs connues avant le déplacement

effets des variables à valeurs inconnues = apprentissage individuel

Modèle décisionnel global :

En pratique, un seul modèle sera établi ; il comporte les effets des variables et des interactions de choix préliminaire ainsi que les effets des variables associées aux interactions inter agents lors du trajet. Le choix préliminaire se basera sur la part déterministe liée uniquement aux variables connues avant le déplacement. Les effets des interactions inter agents vont permettre de recalculer le score après chaque trajet.

3.5.2 Démarche de conception de la fonction score

L'approche que nous proposons est hybride dans le sens où elle se situe au croisement des travaux émanant de procédures d'optimisation des procédés industriels et des techniques d'intelligence artificielle. Cette forme hybride de modélisation exploite :

- la possibilité d'élaborer des modèles type "boîte noire" n'intégrant que des variables significatives et prenant en compte les effets des interactions entre variables,
- les performances des systèmes multi agents pour la communication inter agents, les processus d'apprentissage et de négociation.

D'un point de vue conceptuel, elle se distingue par deux aspects :

- afin de prendre en considération les particularités de chaque ville et la perception différente de la qualité d'un service qui en découle, l'idée de base est de construire l'algorithme à l'aide des enquêtes auprès d'échantillons représentatifs ;
- afin de réduire le nombre d'informations nécessaires à un agent pour sa prise de décision, les modèles ne sont pas "universels" mais adaptés à chaque catégorie sociodémographique. Le modèle ne fera pas l'hypothèse que les sujets sont tous identiques, mais seulement que le modèle à établir doit être suffisamment complet pour que les variations de comportements non expliquées par le modèle soient considérées comme l'effet du hasard.

Il faut avoir à l'esprit que, si pour chaque catégorie sociodémographique on souhaite établir un modèle de choix entre plusieurs alternatives, il faudrait :

- mettre en place une procédure de fusion d'informations permettant de prendre en considération le degré de conflit entre les choix des personnes interrogées ;
- exploiter une base de données évolutive dans le temps pour prendre en considération d'éventuelles fluctuations de comportement (affiner le modèle avec les "opinions" d'autres personnes interrogées) ;

- prendre en compte des alternatives qui peuvent disparaître ou apparaître ;
- faciliter l'implémentation d'un modèle évolutif dans le temps sans coût calculatoire exorbitant pour le simulateur.

Afin de ne pas surcharger la mémoire, sont présentés seulement les phases, les principes à l'origine de notre approche et l'interprétation des résultats obtenus. Une application détaillée est présentée dans annexe Anx. F-4 avec justification des choix, mode d'utilisation au niveau du simulateur, tests de sensibilité et de validité.

3.5.3 Démarche logicielle pour l'exploitation de la fonction score

Les interactions « régulateur - agent "pexavvi" - agent "individu" » (présentées dans Figure 2-3) sont basées sur des communications utilisées dans l'élaboration du modèle décisionnel d'un agent "individu" (Figure 3-10).

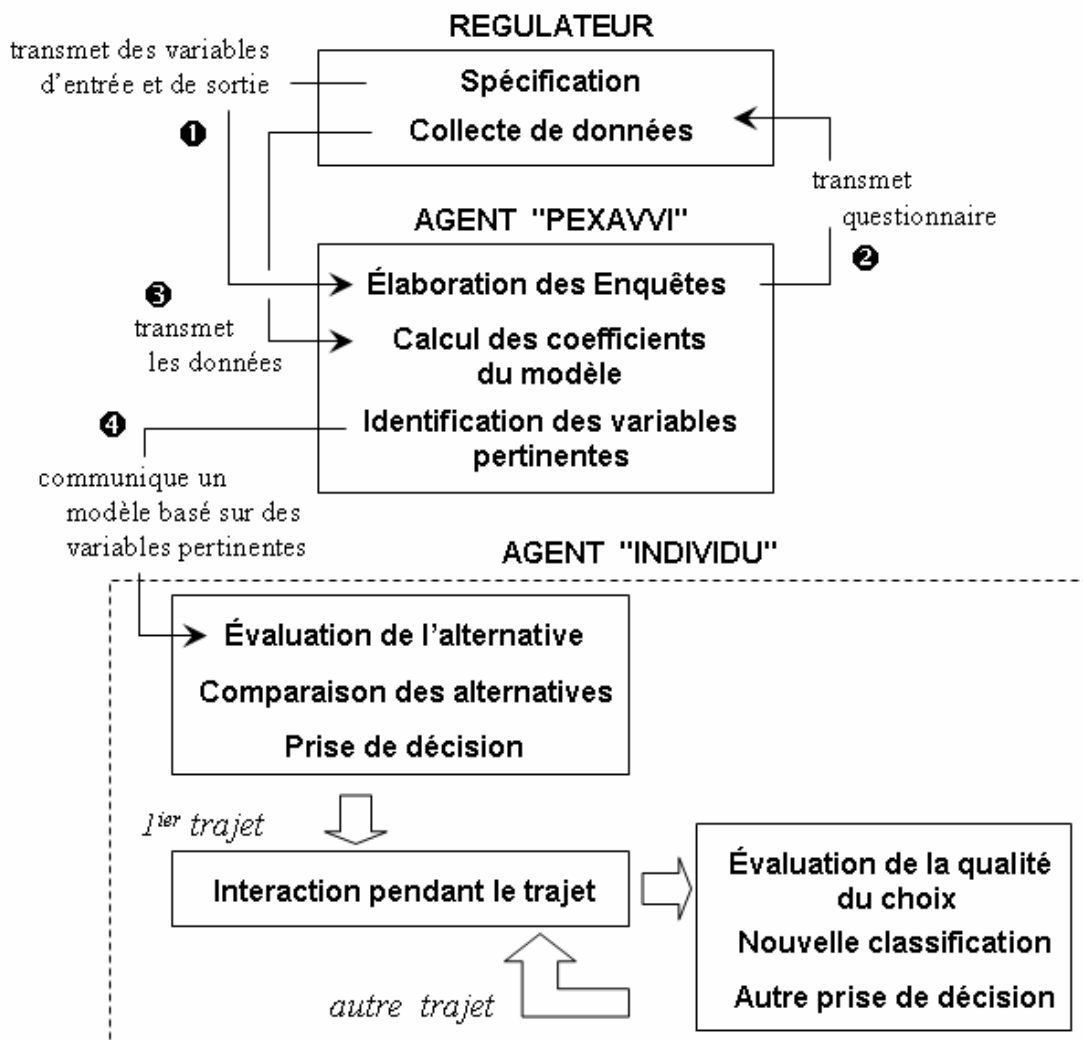


Figure 3-10. Architecture de l'exploitation du modèle décisionnel

Le fil conducteur pour l'élaboration d'un modèle décisionnel est décrit par *Figure 3-10* ; la mise en œuvre de chaque étape est développée dans le paragraphe suivant.

3.6 Etapes d'élaboration d'un modèle décisionnel

3.6.1 Etape 1 : Phase de spécification

L'utilisateur du simulateur (le régulateur) a la liberté de définir des catégories sociodémographiques basées sur, par exemple, l'âge (tranches d'âge), le revenu (tranches de salaires), le sexe etc. Se reporter au diagramme de classes décrivant les agents "individus" (*Figure 2-5* dans chapitre 2) dans lequel on trouve les locaux, étudiants, travailleurs, non-travailleurs, touristes, etc. Ceci confère une grande souplesse, car c'est l'utilisateur qui fixe le degré de discrétisation au niveau des échantillons de la population.

3.6.1.A Choix des variables d'entrée

Nous allons distinguer deux types de variables :

- **exogènes** : variables individuelles comme l'âge, le sexe, etc.
- **endogènes** : variables dites d'entrée qui sont liées à l'alternative analysée, comme la distance origine-destination, la tarification, etc.

Les relations entre variables endogènes sont souvent complexes et non linéaires. Aussi, négliger des variables dites "qualitatives" (perception de la facilité d'accès, conditions météorologique, etc.) ne devrait pas être imposé par des nécessités de simplification analytique, surtout dans un contexte dynamique. Les variables peuvent être quantitatives (par exemple, la distance entre deux parkings), aussi bien que qualitatives (degré de confort, conditions météorologiques, etc.). Le régulateur aura la possibilité de choisir les variables dont il veut tester les effets et qui, pour un même objectif, peuvent être fortement différentes d'une ville à une autre, d'un régulateur à un autre. Par exemple, pour le choix d'un parking, un régulateur peut être intéressé par l'effet de la tarification, alors qu'un autre s'intéresse à la distance d'emplacement par rapport à un site à forte attractivité.

Parmi les variables endogènes, nous distinguons deux types de variables d'entrée :

- les variables dites **internes** : qui correspondent aux variables dont les valeurs sont connues avant le déplacement: distance, tarification, type d'activité,...
- les variables dites **externes** : qui correspondent aux variables dont les valeurs sont inconnues avant le déplacement et qui sont le résultat des interactions entre agents lors du trajet: degré de congestion, information en temps réel, retard,...

3.6.1.B Choix des niveaux des variables

Cette étape est primordiale pour la personnalisation de l'outil à développer. Le régulateur a la possibilité de définir les valeurs à tester, selon les spécificités d'une ville. Il peut ainsi

considérer qu'une distance de 300 mètres de marche à pied entre un parking et une destination est un seuil autour duquel on affine l'analyse, alors que pour une autre ville il pourrait le placer à une valeur bien différente. Il existe également des variables internes pour lesquelles il est difficile de définir les niveaux, du fait d'une perception spécifique, voire floue, de celle-ci (comme par exemple l'attractivité d'un site, l'accessibilité à un site). Dans ce cas, une phase supplémentaire basée sur la logique floue sera intégrée et permettra de départager les niveaux (ces aspects seront détaillés dans le chapitre suivant).

3.6.1.C Choix des variables de sortie

Le succès de la procédure de classement repose sur le choix de variables et celui de niveaux qui, de par leur pouvoir discriminant, conduisent à une bonne différenciation des N alternatives du point de vue de leurs caractéristiques. Or, quel que soit le type de problème traité, les alternatives correspondent à des entités ou des comportements qui se ressemblent plus ou moins au niveau de leurs caractéristiques et qui, par conséquent, sont parfois difficilement différenciables.

Pour les personnes interrogées lors des enquêtes à préférences déclarées, différencier des alternatives ne doit pas être difficile au premier abord. Le concepteur de l'enquête peut proposer initialement une échelle très large de vœux (nous avons rencontré dans des études de marketing la note 8 pour le « presque très cher »). Mais il faut se rendre à l'évidence qu'une échelle trop large est plus un embarras qu'un atout pour la discrétisation des préférences. La solution qui semble convenir est de se limiter à une échelle raisonnable, facilement abordable par les uns (concepteurs) comme par les autres (usagers ou personnes interrogées). Nous avons distingué deux cas :

- Les réponses qui sont censées départager des **alternatives homogènes** (comme la qualité des parkings, la qualité des signalisations, etc.) : dans ce cas il s'agit de fournir une fonction "**score**" capable de quantifier le degré de satisfaction de l'agent. Le régulateur est libre d'établir l'échelle et le nombre de réponses envisageables.
- Les réponses qui vont départager ce que nous appellerons des **alternatives hétérogènes** (comportement devant le manque d'une place disponible pour se garer, modes de transport). Dans ces cas, il nous semble peu adéquat de sanctionner certains scénarios par des "scores" et encore moins de classer les modes de transport les uns par rapport aux autres (par exemple, affirmer que la voiture est "supérieure" à la bicyclette, elle-même "supérieure" au bus, ... comme tente de le faire la théorie microéconomique.). C'est d'ailleurs justement ce que nous essayerons d'éviter, dans la perspective d'ajouter ou d'enlever certains choix potentiels (l'introduction du tramway comme nouvelle offre de transport nous obligerait à reclasser les anciennes alternatives). Dans le cas d'alternatives hétérogènes, la réponse sera sous forme de « **fréquence de choix** » (souvent, parfois, etc.). Le régulateur devra se limiter à quelques réponses potentielles pour la cohérence du questionnaire et pour éviter la complexité algorithmique (ceci sera vu par la suite).

Pour les deux cas, le même score et la même réponse (par exemple "souvent") peuvent être donnés pour une, deux, plus ou aucune alternative. Il ne s'agit donc pas de faire un

classement, ceci permettant et rendant beaucoup de souplesse si des alternatives apparaissent ou disparaissent.

3.6.2 Etape 2 : Phase d'élaboration des enquêtes

3.6.2.A Optimisation industrielle ou modèle décisionnel d'un agent "individu" : problématiques identiques

Notre approche est basée sur une analogie évidente entre le problème de maximisation d'un score géré par des variables internes et sujette aux fluctuations dues aux interactions inter agents et celui d'optimisation d'un procédé industriel pour lequel les effets des variables de contrôle et des bruits de fond affectent la qualité du produit (Figure 3-11).

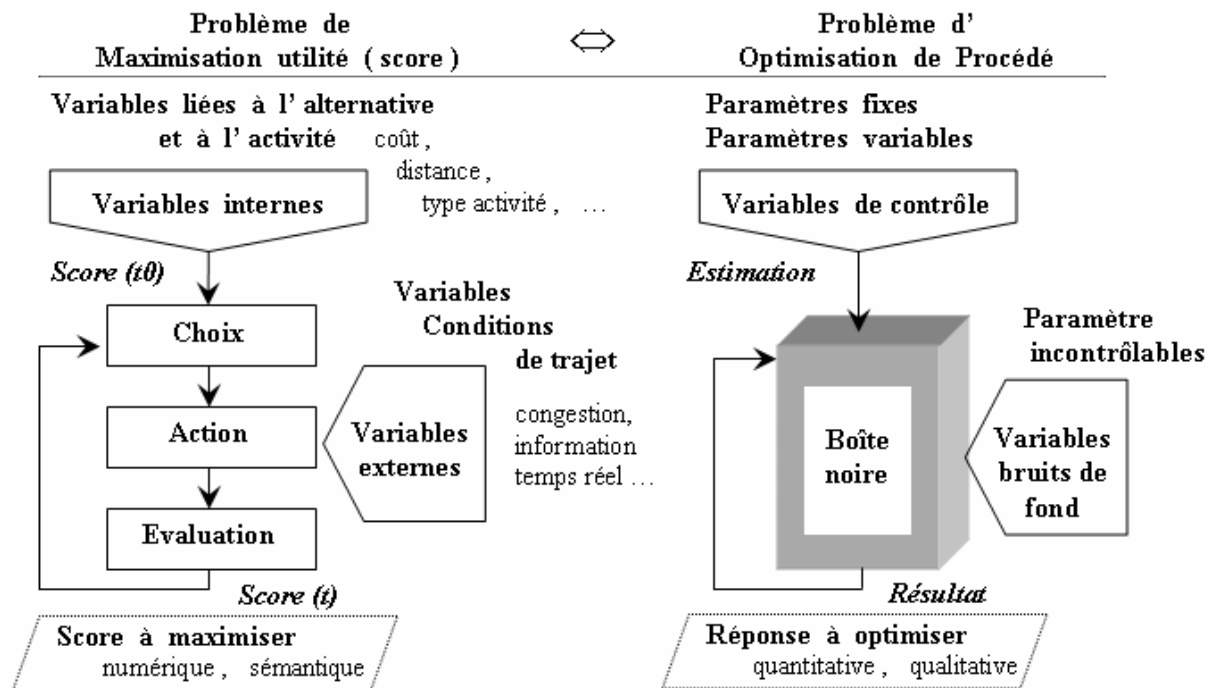


Figure 3-11. Analogie entre maximisation d'un score et optimisation d'un procédé

Très souvent, lors de la mise en place d'un procédé ou de son optimisation, nous sommes confrontés à la difficulté d'une modélisation préalable. Cela s'explique par la complexité des phénomènes mis en jeu (pensons à la modélisation des effets d'un airbag lors d'un choc), mais aussi par l'intervention de variables qualitatives (pensons à la fabrication d'une pièce mécanique dont les caractéristiques dépendront aussi de l'agilité d'un opérateur, de la qualité de la matière).

Seule une démarche expérimentale type "boîte noire" s'y prête pour mettre en évidence les paramètres les plus influents. Pour ce faire, l'approche *COST* (*Changing One Separate Factor at a Time*) où une seule variable est changée à la fois, d'un test à l'autre, reste de loin la méthode la plus employée, sans pour autant se soucier du rôle joué par chaque variable.

L'approche COST peut être très pénalisante, ceci pour deux raisons qui sont la variabilité naturelle de la réponse due à l'ensemble d'incertitudes de la chaîne de mesure (Figure 3-12-a) et l'existence des interactions c'est-à-dire qu'une interaction entre deux paramètres existe si l'effet d'un paramètre est dépendant du niveau auquel se trouve le deuxième paramètre (Figure 3-12-b).

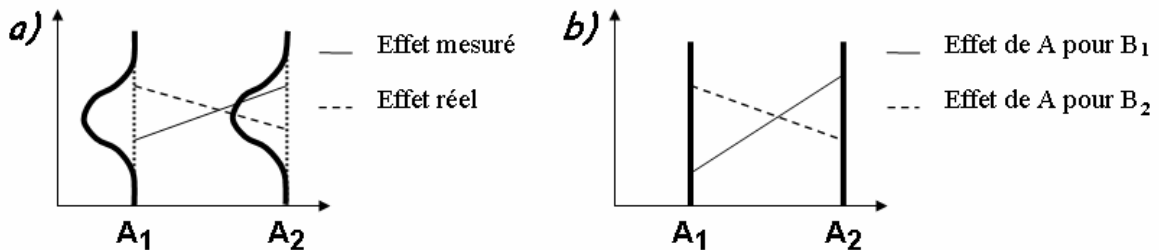


Figure 3-12. a- Variabilité naturelle de la réponse / b- Interaction entre les paramètres A et B

Nous trouvons très souvent ce genre de situations dans l'évaluation d'une alternative ou de la qualité d'un service dans le domaine du trafic urbain. Par exemple, l'évaluation de la qualité d'un mode de transport nécessite de prendre en considération des variables quantitatives (prix, distance, ...) aussi bien que qualitatives (confort, facilité d'accès, ...). Pour répondre à cette problématique, la méthode la plus courante [Gayda1998] est la calibration des modèles à partir 1°) d'enquêtes à préférences observées (ou des surveillances, tout simplement) et 2°) d'enquêtes à préférences déclarées lors desquelles, les gens placés dans des situations hypothétiques, expriment leurs préférences.

A notre connaissance, les modèles de choix ainsi calibrés ne permettent pas la mise en évidence d'interactions qui ne manquent pas lors d'un processus de choix. Par exemple, le couplage entre la facilité d'accès à un site et la sécurité ressentie par un usager peut être non négligeable pour le choix d'un mode de transport. Et ce n'est pas parce que l'accès à un site et/ou la sécurité seront estimés comme non significatifs en terme d'effet, que leur interaction le sera également.

3.6.2.B Table d'essais pour un procédé industriel ou enquête pour analyse de trafic : démarches identiques

Pour étudier l'effet des scénarios hypothétiques, nous avons utilisé le principe des **enquêtes à préférences déclarées**. Les personnes interrogées sont placées dans une situation hypothétique et confrontées à une série de scénarios. Chaque scénario se présente comme une combinaison de plusieurs variables d'entrée à des valeurs données (appelées niveaux). Les personnes interrogées doivent indiquer ce qu'elles feraient (quelle note, fréquence de choix) si elles se trouvaient dans un tel scénario. Lorsque le régulateur décide de tester conjointement les effets de plusieurs variables d'entrée et des interactions, il faut construire des plans (ou tables) contenant plusieurs scénarios (combinaisons) hypothétiques. Ces plans peuvent être complets ou fractionnaires. En fonction du problème à résoudre, un modèle et un plan d'expérience sont choisis. Si le modèle est "complet", il vise à estimer les effets des variables d'entrée et de toutes les interactions ; toutes les combinaisons sont présentes. Un exemple d'un plan d'expériences associé au modèle complet est présenté dans *Tableau 3-1*.

Tableau 3-1. Plan complet pour 2 paramètres à 2 niveaux

Expérience (simulation)	A	B	AB	Y
1	-	-	+	Y ₁
2	-	+	-	Y ₂
3	+	-	-	Y ₃
4	+	+	+	Y ₄

Chaque ligne de ce plan correspond à un scénario hypothétique pour lequel les valeurs (niveaux) des variables d'entrée nous sont imposées. La dernière colonne *Y* est dédiée aux réponses de la personne interrogée (variable de sortie). Une colonne est associée à chaque variable, la troisième colonne correspondant à une interaction est le produit des colonnes A et B. Par exemple, pour l'expérience n°3, la variable *A* est au niveau le plus élevé (illustré par "+") et la variable d'entrée *B* au niveau le plus bas (illustré par "-"). Lorsqu'il s'agit de variables d'entrée qualitatives, la notation des niveaux est arbitraire. Ainsi, si on veut connaître les effets de la distance A et du prix B (et éventuellement de leur interaction AB) sur le degré de satisfaction d'un voyageur, ces quatre scénarios sont soumis à la personne interrogée en exigeant un score pour chacun.

Dans notre cas, l'idée de base est de considérer que chaque personne interrogée est une source d'information indépendante. Pour chaque scénario issu de combinaisons de niveaux des variables d'entrée d'une table orthogonale, l'utilisateur (personne interrogée) affecte un score ou une fréquence de choix (voir exemple *Figure 3-13*).

contrôlées

Variables internes

Q _i	distance	...	prix	activité	Scores	
1	< 300 m	...	< 1 €	urgente		S ₁
...		
3	< 300 m	...	> 1 €	urgente		S ₃
...		

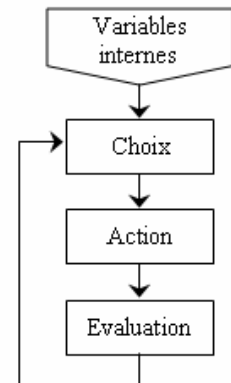


Figure 3-13. Table de préférences déclarées

Nous verrons plus tard comment exploiter l'ensemble de réponses données pour les personnes appartenant à la même catégorie, en vue d'élaborer un modèle de choix préliminaire par catégorie.

Les choix s'effectuant en amont, l'agent sera sujet à avoir, lors de son déplacement, des interactions avec d'autres agents "individus" (conducteurs, piétons, ...) ou des communications avec les agents de type information et/ou signalisation. La perception de la

qualité d'un service peut changer fortement, une forme d'apprentissage par expérience par jugement interne.

Notre méthode d'apprentissage mono agent sera applicable aussi bien aux alternatives homogènes que hétérogènes. Elle est issue de l'analyse de robustesse des procédés industriels. L'idée de base est d'intégrer les variables externes qui, comme dans les processus industriels, sont des facteurs incontrôlables (appelés facteurs de bruit) que le concepteur ou l'utilisateur du simulateur ne veut pas ou ne peut pas directement contrôler.

Dans les procédés industriels, ces facteurs proviennent de trois sources : la variabilité des conditions d'utilisation, la variabilité des conditions normales de fabrication, le vieillissement et autres détériorations. Lors de la simulation des déplacements des agents, les variables externes pourraient être, par exemple :

- le degré de congestion dû aux interactions entre agents "individus" lors des déplacements qui peuvent produire des effets de ralentissement,
- les informations en temps réel (parking occupé, travaux sur le trajet),
- le degré de sécurité ressenti (à travers des zones piétonnes, vélos)
- le retard engendré par les conditions trafic ...

Le régulateur est libre de tester les variables externes pour lesquelles il souhaite connaître les effets. Pour prendre en compte les effets des variables externes (facteurs bruits), nous allons élaborer ce qu'on appelle un plan produit [Taguchi1987] composé d'un plan correspondant aux variables internes et un autre plan croisé qui correspond aux variables externes. Le premier plan de tests construit avec les "facteurs de conception" (variables interne) constitue le plan interne (inner array). On impose les bruits à l'aide d'un deuxième plan appelé plan externe (outer array). Chaque combinaison de variables, définie par le premier "design experimental", est évaluée sous les conditions de bruit du plan externe.

Un exemple est présenté dans Figure 3-14.

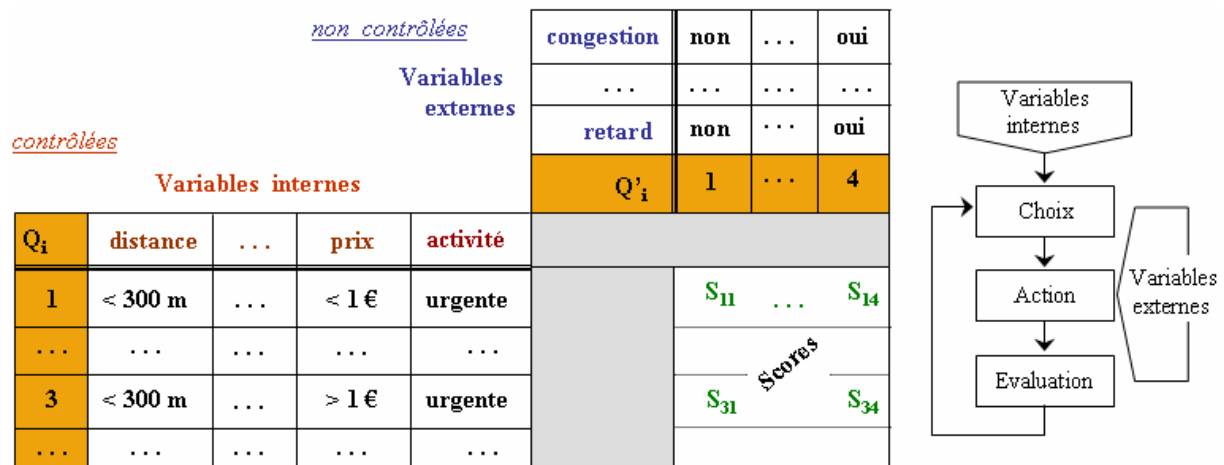


Figure 3-14. Tables de scores attribués par un individu pour divers scénarios décrits par des variables pour des conditions de trafic différentes

Soit un agent "individu" qui doit exécuter une action correspondant au scénario 3 (distance < 300 m , prix stationnement > 1 euro, ...). Selon les conditions trafic (retard ou non, congestion ou non, ...), les scores retenus après chaque déplacement peuvent varier entre S_{31} et S_{34} .

3.6.2.C Elaboration de l'enquête à préférences déclarées par l'agent "pexavvi"

Le problème se complique lorsqu'il faut tester les impacts de plusieurs variables. Comme toute approche mathématique, autant d'équations, donc de scénarios, que d'inconnues. Seulement, un plan avec 15 variables à deux niveaux nécessiterait $32.768 (=2^{15})$ questions, ce qui est prohibitif, voire absurde pour une enquête. Pour cela, on utilise les plans factoriels.

Pour élaborer une enquête à préférences déclarées, nous nous sommes inspirés des principes d'une méthode d'optimisation des procédés industriels (Design Of Experiments - DOE) [Taguchi1987], [Barboux2005] ; à partir d'un nombre réduit de tests, DOE permet de désigner les variables les plus significatives qui affectent la qualité d'un produit ainsi que choisir la solution la plus robuste aux effets des bruits de fond. L'idée de base est d'utiliser les fractions utiles de plans complets (voir un exemple dans Figure 3-15).

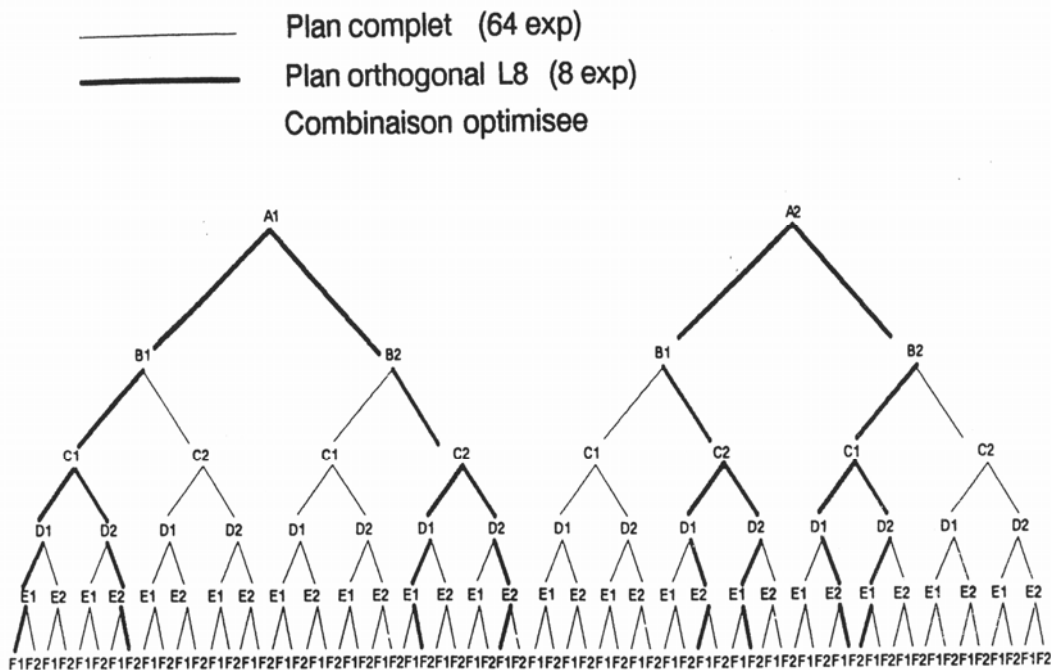


Figure 3-15. Plan factoriel (trait épais) issu d'un plan complet (tous les traits)

Leur construction est possible tant que les interactions du troisième ordre (ABC, BCD, ...) ou plus sont généralement négligeables. De plus, toutes les interactions d'ordre 2 (AB, AD, ...) ne figurent pas forcément dans le modèle que le régulateur proposera.

La propriété la plus remarquable de ces plans fractionnaires est l'orthogonalité. Pour un niveau fixé de toute variable du plan, chaque autre variable apparaît un nombre égal de fois à

chacun de ses niveaux possibles. De plus, pour des plans à interactions, chaque couple $A_i B_j$ apparaît autant de fois (voir un exemple dans Figure 3-16).

$L_{27}(3)^{13}$

Expérience #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Interactions entre deux colonnes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(1)	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11	11
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12	
(2)	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7	5	
	4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10		
(3)	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5			
	2	13	11	12	12	13	11	10	8	9			
(4)	10	8	9	6	7	5	7	5	6				
	12	13	11	13	11	12	9	10	8				
(5)	1	1	2	3	4	2	4	3					
	7	6	11	13	12	8	10	9					
(6)	1	4	2	3	3	2	4						
	5	13	12	11	10	9	8						
(7)	3	4	2	4	3	2							
	12	11	13	9	8	10							
(8)	1	1	2	3	4								
	10	9	5	7	6								
(9)	1	4	2	3									
	8	7	6	5									
(10)	3	4	2										
	6	7	7										
(11)	1	1											
	13	13											
(12)	1												
													11

Graphes linéaires

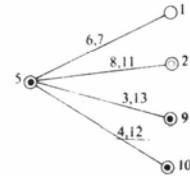
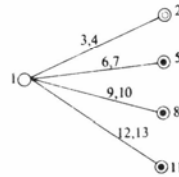
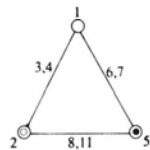


Figure 3-16. Exemple de la table orthogonale $L_{27}(3)^{13}$ avec ses interactions

Les tables les plus utilisées sont celles de Taguchi [Taguchi1987] mais il en existe bien d'autres (voir [Goupy2006]). Ces tables sont notées $L_i(j)^k$ avec i étant le nombre d'expériences à réaliser, j étant le nombre de niveaux de chaque paramètre et k étant le nombre d'actions (paramètres et/ou interactions) pouvant être étudiées. L'intérêt de ces tables standard est leur facilité d'utilisation.

On leur a associé différents outils permettant de choisir rapidement le plan le mieux adapté à un problème donné. Le graphe des effets permet la prise en compte de la difficulté de modifier certains facteurs, le triangle des interactions permet de définir les alias (ambiguïté dans les estimations de certains effets [Vigier1988]). Au moyen du graphe ou du triangle, les interactions sont affectées aux colonnes de la table. Les nœuds du graphe correspondent aux colonnes affectées aux variables, les arcs aux interactions existantes qui pourront donc être évaluées (voir annexe Anx. F-4).

Supposons qu'un régulateur de trafic veuille établir un modèle décisionnel en testant l'effet de plusieurs variables d'entrée. Selon le schéma présenté dans Figure 3-10, il transmet ces variables, ainsi que d'éventuelles interactions pressenties à l'agent "pexavvi" qui, à partir du nombre de variables et d'interactions, calcule le nombre d'inconnues (coefficients du modèle) N comme suit :

Équation 3-5 :

$$N = 1 + \sum_i ddl_i + \sum_{i,j} ddl_{ij}$$

avec : 1 est une inconnue associée à la moyenne ; ddl_i est le degré de liberté associé à la variable i ($ddl_i = n_i - 1$) ; ddl_{ij} est le degré de liberté associé à l'interaction ij : ($ddl_{ij} = (n_i - 1)(n_j - 1)$) ; n_k est le nombre de niveaux de la variable k .

Pour assurer la propriété d'orthogonalité, la taille de la table T (nombre de questions) doit respecter deux conditions :

- $T = m * ppcm$ est un multiple entier du plus petit commun multiple des produits des niveaux des couples des actions (variables ou interactions) disjointes.
- T doit être supérieur ou égal à N .

L'agent "pexavvi" dispose de plusieurs tables fractionnaires en mémoire. Pour chacun des deux plans, il sélectionne celle qui permet d'affecter les variables selon les graphes linéaires en respectant l'éventuelle proposition du régulateur concernant les interactions (si aucune interaction n'a été pressentie par le régulateur, l'agent "pexavvi" détermine celles qui sont permises par les graphes linéaires). Enfin, l'agent "pexavvi" transmet au régulateur une table sous forme de questionnaire qui réunit l'ensemble de scénarios pour lesquels les personnes représentatives d'une catégorie sociodémographique doivent donner une réponse.

A ce stade de développement du simulateur, un programme en Visual Basic permet d'affecter des tables à deux niveaux.

3.6.3 Etape 3 : Calcul des scores moyens pour une catégorie sociodémographique

3.6.3.A Alternatives homogènes : parkings, destinations

Il n'y a aucune difficulté particulière pour établir un score moyen par scénario. Les scores attribués sont des moyennes arithmétiques des scores attribués par chaque personne interrogée. D'un point de vue algorithmique, il est très facile d'intégrer de nouvelles réponses afin d'affiner le modèle dans le temps. C'est aussi la raison pour laquelle, toute démarche de troncature de l'échantillon (pour éliminer une partie de la population dont les réponses divergeaient anormalement) a été abandonnée. Il faut néanmoins étudier la fréquence d'apparition d'une réponse afin de s'assurer que la plupart portent sur le même score (ou proches voisins), c'est-à-dire qu'il y a un comportement similaire des usagers du réseau routier pour la catégorie sociodémographique étudiée.

3.6.3.B Alternatives hétérogènes : modes de transport, comportements autour du parking

Cela devient plus compliqué du fait de la nature de la réponse (fréquence de choix). Les données récoltées sont exploitées selon le formalisme particulier de la théorie des croyances (de l'évidence). La théorie de l'évidence, initialement introduite par Dempster

[Dempster1968] fut reprise sous un formalisme mathématiquement plus abouti par Shafer [Shafer1976]. Cette théorie est souvent décrite comme une généralisation de l'inférence bayésienne au traitement de l'incertain, dans le sens où elle permet de manipuler des événements non nécessairement exclusifs. Elle prend en compte ce qui reste inconnu et représente parfaitement ce qui est déjà connu. A ce titre, Smets [Smets1992] la qualifie de science cognitive par rapport à la théorie de Bayes qu'il qualifie plutôt de science décisionnelle.

Nous rappelons brièvement les concepts de base que nous avons utilisé.

3.6.3.B.1 Choix d'un cadre de discernement

Au départ, la théorie de l'évidence suppose la définition d'un ensemble Θ , appelé **cadre de discernement** pour le problème traité :

Équation 3-6 :

$$\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_N\}$$

Le cadre de discernement est composé de N hypothèses exhaustives et exclusives, dont l'une d'elles est susceptible d'être la solution du problème posé. Prenons dans notre cas l'exemple du choix d'un mode de transport pour effectuer une activité flexible : les hypothèses (ou alternatives) du cadre de discernement pourraient être "bus", "vélo", "à pied" et "voiture". A partir du cadre de discernement Θ , on en déduit l'ensemble noté 2^Θ , comprenant l'ensemble des 2^N sous-ensembles A de Θ .

Équation 3-7 :

$$2^\Theta = \{A / A \subseteq \Theta\} = \{\emptyset, \theta_1, \dots, \theta_N, \theta_1 \cup \theta_2, \dots, \Theta\}$$

Il comprend non seulement les hypothèses singletons de Θ , mais également l'ensemble de toutes les disjonctions possibles de ces hypothèses. Par exemple, un agent "individu" pourrait hésiter entre "bus" et "voiture", en donnant la même réponse (« souvent » par exemple), ce qui est vu mathématiquement comme une disjonction des hypothèses ("bus" ou "voiture"). Tel que défini par Shafer, le cadre de discernement possède les propriétés suivantes :

- Les hypothèses doivent être **exhaustives**, ce qui signifie que la solution au problème est obligatoirement l'une des hypothèses θ_i du cadre de discernement. Dans ce cas, en logique propositionnelle, l'élément Θ désigne la proposition certaine et l'élément $\emptyset = \bar{\Theta}$ la proposition impossible. Il est important de souligner que certains auteurs comme Smets contestent la notion d'exhaustivité du cadre de discernement. En effet, ils considèrent difficile de pouvoir recenser toutes les hypothèses de façon exhaustive pour certains types de problèmes. Ils préconisent ainsi l'hypothèse "open-world" (cadre non exhaustif).
- Les hypothèses doivent être **exclusives** ($\theta_i \cap \theta_j = \emptyset, \forall i \neq j$), ce qui signifie que la solution est unique.

3.6.3.B.2 Méthode d'attribution de masses

La seconde phase va consister à modéliser la connaissance délivrée par une source d'informations (dans notre cas, une personne interrogée). Une première grandeur permettant de caractériser la véracité d'une proposition est la **masse de probabilité élémentaire**. Celle-ci présente une grande analogie avec la notion de distribution de probabilité à la différence qu'une masse unité est répartie parmi les éléments de 2^Θ , c'est-à-dire non seulement parmi l'ensemble des hypothèses singletons, mais aussi parmi les disjonctions de celles-ci. Cette répartition se fera en fonction de la connaissance de la source qu'on cherche à modéliser. La fonction de masse élémentaire $m_\Theta(\cdot)$ associée à la source en question est donc définie par :

Équation 3-8 :

$$m_\Theta : 2^\Theta \rightarrow [0,1]$$

et vérifie les propriétés suivantes :

Équation 3-9 :

$$m_\Theta(\emptyset) = 0 \quad ; \quad \sum_{A \subseteq \Theta} m_\Theta(A) = 1$$

La modélisation issue de cette fonction est appelée **jeu de masses**. Les **éléments focaux** sont les éléments A de 2^Θ dont la masse $m_\Theta(A)$ est non nulle. L'ensemble de ces éléments constitue le **noyau** N_Θ :

Équation 3-10 :

$$N_\Theta = \{A \in 2^\Theta / m_\Theta(A) > 0\}$$

Lorsque les éléments focaux se réduisent aux seuls singletons, la notion de masse élémentaire est assimilable à celle de probabilité.

La masse $m_\Theta(A)$ représente la partie du degré de croyance placée **exactement** sur la proposition A . Si cette dernière est différente d'une hypothèse singleton alors cette masse représente la partie du degré de croyance placée exactement sur elle et qui n'a pas pu, compte tenu de l'état actuel de la connaissance, être affectée à un sous-ensemble plus spécifique à A [Shafer1976].

On peut aisément comprendre l'apport du modèle de la théorie de l'évidence par rapport à l'approche probabiliste. Le fait de ne pas être obligé de répartir la masse totale de probabilité sur des singletons permet d'avoir une attitude moins arbitraire. Cette souplesse de la méthode permet de représenter facilement **l'ignorance totale** par le jeu de masses suivant :

Équation 3-11 :

$$m_\Theta(\Theta) = 1 \quad \text{et} \quad m_\Theta(A) = 0 \quad \forall A \neq \Theta$$

Pour le mode de transport, il s'agit d'un cas pour lequel une personne donnerait la même réponse (par exemple, "souvent") pour les quatre alternatives.

On comprend bien que l'affectation des masses est primordiale. Si pour deux hypothèses singletons A et B on peut associer facilement des masses (probabilités au sens bayésien), par exemple, $m(\text{bus}) = 0,3$ et $m(\text{à pied}) = 0,7$, il est beaucoup plus difficile d'envisager de répartir sur la disjonction $A \cup B$. Il n'existe pas une méthode "recette" pour faire cette affectation de masses. Elle est propre au problème étudié et est laissée à l'expérience de l'utilisateur. Nous présenterons plus tard, dans un exemple concret, la manière dont nous avons effectué l'affectation des masses.

3.6.3.B.3 Méthode d'affaiblissement de masses

En vue d'une fusion d'informations issues de plusieurs sources, il est important de pouvoir prendre en compte la fiabilité relative des informations délivrées par les sources. Soit $\alpha \in [0, 1]$ l'indice de fiabilité associé à la source d'information S_j en fonction de la confiance qu'on est amené à lui accorder.

Dans le formalisme de la théorie de l'évidence, la fiabilité d'une source S_j est prise en compte au niveau du jeu de masses $m_\emptyset(S_j)$ qui lui est associé. Pour cela, un affaiblissement (opération de "discounting" [Smets1994]) est effectué sur celui-ci pour conduire au nouveau jeu de masses.

Équation 3-12 :

$$\forall A \neq \emptyset, m'(A) = \alpha \cdot m(A) ;$$

$$m'(\emptyset) = (1 - \alpha) + \alpha \cdot m(\emptyset)$$

Cette opération a pour effet d'affaiblir le jeu de masses considéré et de pondérer l'importance de la source au sein de la fusion avec d'autres sources, sans pour autant l'éliminer complètement. Ce coefficient d'affaiblissement est unitaire si la source est totalement fiable et nul si la source ne l'est pas du tout. Entre les deux extrêmes, il est possible d'envisager plusieurs formes analytiques (décroissance exponentielle, polynomiale, etc.). Dans la pratique, il est souvent pris arbitrairement. Nous considérons qu'une personne qui donne la même réponse pour plusieurs alternatives n'est pas "fiable" ou autrement dit est "indécise". Son avis doit être affaibli si la fusion des informations est envisagée. Pour nos études, nous proposons la forme analytique suivante :

Équation 3-13 :

$$\alpha = \left(1 - \frac{n-1}{N} \right)$$

avec n étant le nombre d'alternatives ayant la même réponse (ou notées d'une façon identique) et N étant le nombre total d'alternatives.

3.6.3.B.4 Fusion d'informations

Supposons que le régulateur collecte des réponses en provenance de M personnes (sources). Chaque source S_j ($j=1, \dots, M$) émet, compte tenu de l'état actuel de sa connaissance, son propre jugement sur le problème donné. Chaque source possède alors son propre jeu de masses $m_{\Theta}^{S_j}(\cdot)$ défini sur le même cadre de discernement Θ . La loi de combinaison de Dempster consiste alors à déduire le jeu de masses unique $m_{\Theta}(\cdot)$ résultant de l'agrégation de ces M jeux de masses élémentaires.

La loi de combinaison de Dempster possède un certain nombre de propriétés primordiales en fusion de données, notamment celles de commutativité et d'associativité. On peut donc combiner un ensemble de M sources "en cascade" (Figure 3-17), dans n'importe quel ordre et de façon récursive. En effet, par application successive de la somme orthogonale, on va combiner d'abord deux sources, puis combiner la source résultante avec une troisième et ainsi de suite.

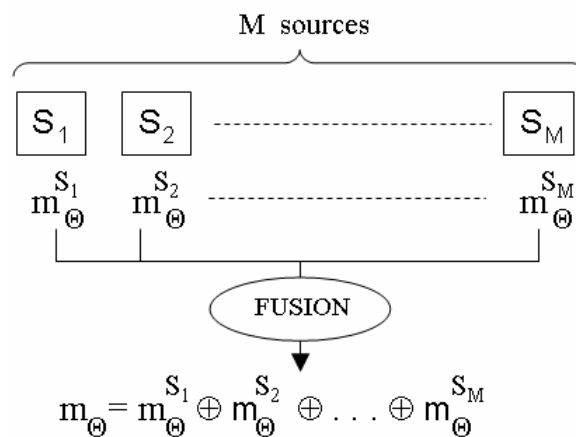


Figure 3-17. Combinaison de M sources d'information selon la loi de Dempster

C'est l'intérêt pour lequel nous avons retenu la théorie de Dempster-Schafer dans un premier temps, comme méthode de fusion d'informations. En effet, le simulateur est renseigné avec des données issues des questionnaires et donne, par fusion, un jeu de masses nous permettant de quantifier les préférences des utilisateurs à un instant donné. Mais en supposant que des conditions de trafic changent et qu'à l'instant $t+1$ les réelles préférences des utilisateurs ne soient plus les mêmes, alors nos modèles comportementaux doivent être remis à jour systématiquement avec l'avis de nouvelles personnes. La combinaison en cascade se prête très bien donnant ainsi un caractère évolutif au modèle sans engendrer des coûts de calcul prohibitif.

Soient deux sources d'information distinctes S_1 et S_2 , $m_{\Theta}^{S_1}(\cdot)$ et $m_{\Theta}^{S_2}(\cdot)$ leurs jeux de masses respectifs. Soient A_1, A_2, \dots, A_k les éléments focaux de la première source et B_1, B_2, \dots, B_v ceux de la seconde. Le jeu de masses final est obtenu selon l'opération dite somme orthogonale :

Équation 3-14 :

$$m_{\Theta}(\cdot) = m_{\Theta}^{S_1}(\cdot) \oplus m_{\Theta}^{S_2}(\cdot)$$

Équation 3-15 :

$$m_{\theta}(A) = \sum_{B \cap C = A} m_{\theta}^{S_1}(B) \cdot m_{\theta}^{S_2}(C)$$

La combinaison a pour effet de renforcer la croyance sur les propositions pour lesquelles les personnes sont concordantes, et au contraire de l'atténuer en cas de conflit. Par exemple, pour deux sources S_1 et S_2 , le conflit K peut être quantifié comme suit:

Équation 3-16 :

$$K = m(\phi) = \sum_{B \cap C = \phi} m_{\theta}^{S_1}(B) \cdot m_{\theta}^{S_2}(C)$$

Les causes du conflit peuvent être multiples (mauvaises réponses de personnes, mauvaise définition du cadre de discernement, mauvaise définition des fonctions de croyance). Dempster préconise de "re-normaliser" la distribution de masse obtenue après combinaison :

Équation 3-17 :

$$m_{\theta}(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{B \cap C = A} m_{\theta}^{S_1}(B) \cdot m_{\theta}^{S_2}(C)$$

Cette solution n'est en général pas satisfaisante car elle consiste à ignorer le conflit, et lorsque celui-ci est important, la décision n'est prise que sur la faible partie d'information correspondant à la concordance des sources. Un certain nombre d'auteurs ont proposé des techniques pour traiter de façon adaptée la masse correspondant au conflit. En effet, telle que la règle de combinaison de Dempster est définie, et quelles que soient les versions qui en sont issues (Yager, Dubois, ... voir [Lefevre2001], pour une analyse comparative), la fusion des informations issues de sources en forte contradiction est représentée d'une façon irréaliste.

Dans notre cas, étant donné que les modèles comportementaux sont établis par catégorie sociodémographique, il n'y a pas, à première vue, de raisons à avoir des sources d'information en fort conflit. On peut éventuellement affecter le conflit à des comportements différents au sein d'une même catégorie et envisager de revoir la discrétisation. Mais c'est une conclusion un peu réductrice, dans la mesure où on peut avoir des personnes avec des comportements très similaires, mais des jeux de masses différents, ce qui, en termes de fusion de données, se traduit par un fort conflit.

Si tel était le cas, les réponses aberrantes peuvent être éliminées par ACP (Analyse en Composantes Principales). Sauf qu'ici, il ne faut pas le faire puisque le souhait est d'intégrer l'avis des personnes qui risque d'évoluer dans le temps (voir ANNEXE G -). Une deuxième limite de cette approche est le fait que, si le cadre de discernement contient au moment t un nombre de N alternatives, il n'est pas envisageable à $t+1$ d'ajouter des alternatives. Des tentatives "open world" ont été proposées, mais le reproche est un formalisme au cas par cas.

Nous proposons, après échanges avec M. Smarandache, d'utiliser une approche portant son

nom (Dezert-Smarandache - DSmT) [Dezert-Smarandache2004]. Certains la présentent, dans un certain sens, comme le prolongement de la théorie de Dempster-Schafer et de la théorie Bayésienne, d'autres considèrent que ce n'est qu'une extension de la théorie de Dubois-Prade qui opère également avec les conjonctions. Les applications sont pour l'instant peu nombreuses mais la technique est puissante [Dezert-Smarandache2006]. Pour mieux illustrer cet aspect, prenons un cas simple, le plus simple cadre de discernement envisageable comprenant deux éléments θ_1 et θ_2 . La relation entre les masses selon les trois théories est présentée dans *Tableau 3-2*.

Tableau 3-2. Relation entre les masses selon les 3 principales théories de l'évidence

pour Bayes	$m(\theta_1) + m(\theta_2) = 1$
pour Dempster-Shafer	$m(\theta_1) + m(\theta_2) + m(\theta_1 \cup \theta_2) = 1$
pour Dezert-Smarandache	$m(\theta_1) + m(\theta_2) + m(\theta_1 \cup \theta_2) + m(\theta_1 \cap \theta_2) = 1$

La dernière théorie s'attaque à certaines limitations de la théorie Dempster-Schafer (DST theory) comme :

- la définition d'un cadre de discernement pour lequel les hypothèses sont exhaustives et exclusives,
- le caractère statique de la fusion,
- la prise en compte du conflit entre les sources d'information,
- le fait que le complément de la réunion (l'intersection) est exclu comme sous-ensemble, ce qui est réducteur si on travaille avec des variables floues.

Les deux auteurs partent de ces quatre aspects limitatifs pour aboutir à une nouvelle approche mathématique concernant la fusion d'information. Cette approche commence par un modèle appelé modèle libre (libre parce qu'il opère avec un cadre de discernement dans lequel les éléments peuvent avoir des caractéristiques en commun et aucune contrainte n'est placée sur les hypothèses). Elle peut être complétée par un modèle hybride qui intègre le fait que certains jeux d'hypothèses peuvent être réellement exclusifs ou ne pas exister du tout, à un moment donné. (voir annexe Anx. E-2 pour des compléments théoriques).

Il est certain que le problème devient plus complexe car, le nombre de sous éléments est beaucoup plus important que celui dans le cas de Dempster-Schafer. Par exemple, pour un cadre de discernement formé de trois hypothèses :

Équation 3-18 :

$$\Theta = \{ \theta_1, \theta_2, \theta_3 \}$$

Pour la théorie de Dempster-Schafer, il y a 7 éléments non nuls pour le référentiel 2^{θ} , alors que pour la DSmT, il y a 18 éléments dans l'hyperensemble D^{θ} (au-delà de 6 hypothèses, il faut opérer avec 59 Méga-octets [Dezert-Smarandache2004]). Mais en pratique, pour la plupart des opérations de fusion, seulement un faible nombre de sous-ensembles possèdent une masse non nulle. Il n'est donc pas nécessaire de générer et de garder en mémoire tous les éléments de D^{θ} , mais seulement ceux dont la masse est strictement positive. Les auteurs ont développé et mis en libre service un algorithme très performant sous MATLAB qui permet la génération facile de l'hyperensemble D^{θ} [Dezert-Smarandache2004] et un algorithme pour la fusion des données venant d'être développé sous MATLAB par une équipe canadienne (juillet 2006, [Dezert-Smarandache2006]).

Maintenant supposons qu'il faille prendre une décision pour choisir un mode de transport. Il existe plusieurs manières de classifier les alternatives (maximum de crédibilité, plausibilité, etc. (voir [Ha Duong2006]). Certains auteurs préfèrent utiliser une fonction de probabilité pour ensuite appliquer les méthodes classiques de décision dans le cadre probabiliste. Issue du "Transferable Belief Model" (TBM), la méthode de classement repose sur le maximum de probabilité pignistique [Smets1994] dite aussi décision "prudente". Il s'agit en fait de distribuer de manière uniforme la masse placée sur chaque proposition, différente d'une hypothèse singleton, sur les hypothèses qui la composent. Cette approximation est similaire à celle faite en inférence bayésienne lorsqu'en l'absence d'information, une distribution uniforme est utilisée sur les différentes hypothèses.

Adaptée au modèle hybride DSmT, elle devient :

Équation 3-19 :

$$\forall A \in D^{\theta}, \quad p(A) = \sum_{X \in D^{\theta}} \frac{C_M(X \cap A)}{C_M(X)} m(X)$$

avec $C_M(X)$ représentant le cardinal DSmT de la proposition X .

Les démarches d'évaluation des alternatives pour une catégorie sociodémographique peuvent être présentées schématiquement selon *Figure 3-18*.

Nous avons dans le tableau : R_i – réponses , $m_i(j)$ - jeu de masse d'une personne interrogée pour l'alternative j à la question i , $M_i(j)$ - masse issue de la fusion correspondante de toutes les réponses , $p_i(j)$ - probabilité pignistique pour l'alternative j à la question i .

Les probabilités pignistiques deviennent, à une constante près (arbitraire), les scores associés à chaque scénario et à chaque alternative. Si les plans sont complets, tous les scénarios peuvent être évalués à l'aide des réponses fournies, autrement un modèle doit être développé afin d'en déduire les scores des scénarios non évalués.

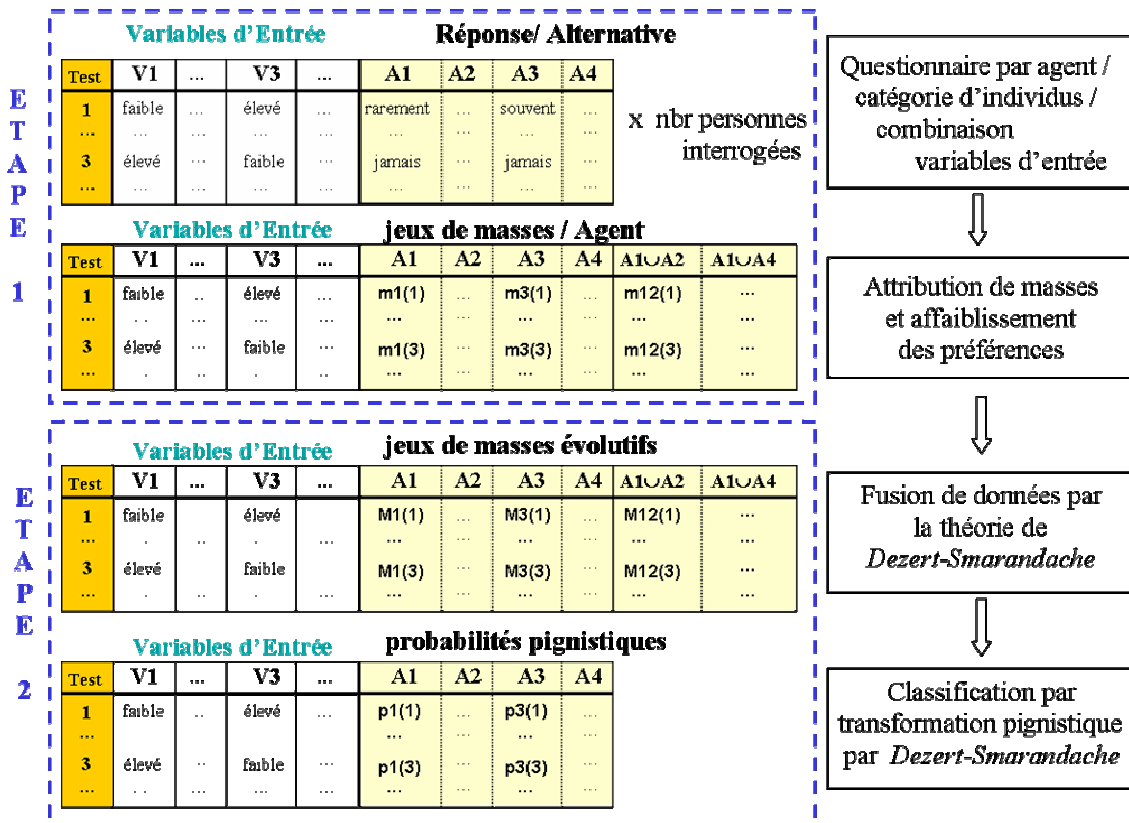


Figure 3-18. Démarche d'évaluation des alternatives hétérogènes

3.6.4 Etape 4 : Phase d'élaboration du modèle

Des techniques du type préférences déclarées (connues sous le nom de "méthode de Louvière" [Louvière1987]) ont été déjà utilisées par le passé dans le domaine de la consommation et du marketing, aux États-Unis. Aujourd'hui, en Grande-Bretagne, aux États-Unis, aux Pays-Bas elle est devenue un outil courant dans l'étude de fiabilité de nouveaux projets. Dans le domaine des transports, l'équipe de Timmermans (concepteur d'ALBATROSS) s'en est récemment servi [Bos2005] pour étudier les paramètres significatifs qui affectent le choix d'un parking relais ("park&ride"). Dans ces travaux, le but est de mesurer le poids de chaque variable étudiée, sachant qu'il y a un seul plan (pas de variables externes). Bien qu'il y ait un potentiel évident dans l'aspect prévisionnel de cette démarche, celui-ci n'est pas exploité. Autrement formulé, les résultats sont très souvent exploités afin de retenir seulement les variables significatives sans se soucier de la construction d'un modèle prévisionnel. Nous avons souhaité aller au-delà afin de pouvoir simuler le comportement d'un agent pour toutes les combinaisons de niveaux. L'idée est l'élaboration d'une table de tests pour construire un polynôme qui modélise les préférences des agents devant plusieurs scénarios hypothétiques.

Il existe plusieurs modèles du type additif pouvant y être associés (voir annexe Anx. E-1 et [Goupy2006] pour une présentation succincte des modèles couramment employés). Nous avons utilisé un modèle de type matriciel, beaucoup moins connu mais très convivial (modèle Vigier [Vigier1988]) dont le principe est d'opérer avec des moyennes de résultats pour

contourner les problèmes dus à la variabilité naturelle de la réponse. L'effet moyen d'une action (variable d'entrée ou interaction) est un élément de matrice défini comme suit :

- pour une variable d'entrée (interne ou externe) A ,

Équation 3-20 :

$$a_i = Y_{moy}(A_i) - M$$

- pour une interaction AB entre les deux variables d'entrée,

Équation 3-21 :

$$a_i b_j = Y_{moy}(A_i B_j) - M - a_i - b_j \quad \text{avec :}$$

- a_i - effet moyen de la variable A lorsqu'elle est au niveau i
- $a_i b_j$ - effet moyen de l'interaction AB lorsque A est au niveau i et B au niveau j
- M - moyenne de tous les résultats du plan
- $Y_{moy}(A_i)$ - moyenne de tous les résultats lorsque A est au niveau i
- $Y_{moy}(A_i B_j)$ - moyenne de tous les résultats lorsque A est au niveau i et B au niveau j

Par exemple, pour un questionnaire à deux variables, le modèle peut être présenté sous forme matricielle, incluant une part aléatoire ε , comme suit :

Équation 3-22 :

$$Y = M + (a_1 \quad a_2)A + (b_1 \quad b_2)B + \begin{pmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 \end{pmatrix} AB + \varepsilon$$

Le modèle étant additif, la réponse correspondant à un scénario pour A au niveau 2 et B au niveau 1 se calcule de la manière suivante :

Équation 3-23 :

$$Y(A_2 B_1) = M + a_2 + b_1 + a_2 b_1$$

La réponse ne concerne bien sûr que la part déterministe du modèle car le bruit de fond est de nature aléatoire. L'intérêt de manipuler des effets moyens réside dans le fait que, du fait de leur définition, la somme des effets moyens d'une variable est nulle (voir *Figure 3-19* pour illustrer cette propriété dans le cas d'une seule variable).

Ceci explique la possibilité de réduire le nombre d'inconnues et donc le nombre de simulations (ou questions) nécessaires pour déterminer les coefficients du modèle (effets moyens des paramètres et des interactions).

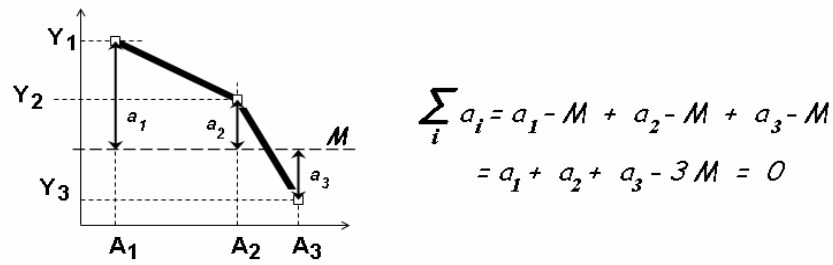


Figure 3-19. Effets moyens du paramètre A rapportés à la moyenne des résultats

Le modèle obtenu permet d'estimer la réponse pour n'importe quelle combinaison dans l'intervalle de validité des niveaux sans avoir soumis, pour cela, le scénario à l'évaluation. Le gain peut être impressionnant car, pour 27 questions posées (correspondantes à la table $L_{27}(3)^{13}$), nous pouvons prévoir la réponse pour les 216 autres combinaisons ($3^5 - 27 = 216$).

Bien sûr, et c'est l'intérêt des plans orthogonaux, si le scénario étudié n'est pas dans les plans, on peut déduire le score correspondant à l'alternative i grâce au modèle de Vigier pour les plans croisés [Vigier1988]. Le modèle de Vigier pour un plan croisé est représenté par :

Équation 3-24 :

$$S_i = M + \underbrace{A + B + C + \dots + AB \dots}_{\text{plan interne}} + \underbrace{H + I + J}_{\text{plan externe}}$$

Nous rappelons que cette écriture est symbolique. M représente la moyenne de tous les résultats (plan externe et interne) et les termes A, AB, \dots, J sont des représentations matricielles des effets moyens des actions (variables et interactions).

Pour une variable externe, par exemple H , les effets moyens s'évaluent comme suit :

Équation 3-25 :

$$h_i = Y_{\text{moy}}(H_i) - M$$

avec $Y_{\text{moy}}(H_i)$ - moyenne des moyennes de tous les résultats lorsque H est au niveau i (sur la colonne) et h_i - effet moyen de la variable H lorsqu'elle est au niveau i

Équation 3-26 :

$$S_i = M + (a_1 \ a_2)A + (b_1 \ b_2)B + \dots \begin{pmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 \end{pmatrix} AB + \dots (h_1 \ h_2)H + (i_1 \ i_2)I + (j_1 \ j_2)J$$

Si pour les alternatives homogènes on dispose d'un modèle décisionnel unique, pour celles hétérogènes on a autant de modèles que d'alternatives. Dans les deux cas, des ajustements sont pratiqués par un mécanisme d'apprentissage par expérience par jugement interne pour lequel les "récompenses" ou "pénalités" sont attribuées par l'agent lui-même,

selon à ce que les effets des conditions trafic ont été favorables ou défavorables à la qualité de l'action menée (choix mode, destination, parking, ...).

Pour valider les modèles obtenus (alternatives homogènes ou hétérogènes), le questionnaire soumis contient une ou deux questions supplémentaires qui sont en dehors du plan d'expérience. Les scores moyens obtenus à ces deux questions sont comparés avec ceux obtenus par le modèle (voir ANNEXE G - pour la validation du modèle).

- L'enquête à préférences déclarées à mener est celle du plan produit.
- Chaque agent "individu" dispose initialement d'un modèle "moyen" selon sa catégorie sociodémographique lui permettant d'attribuer des scores pour un scénario donné et, éventuellement, de classer plusieurs alternatives correspondant à ce même scénario.
- Le score $S(t_0)$ attribué pour la première simulation avant le départ ne prend pas en compte les effets des variables externes.
- Le score $S(t)$ en fin de déplacement sera celui correspondant au scénario bruit de fond et prend en compte les effets des variables externes.
- Ce score est celui qu'utilisera l'agent "individu" pour le prochain trajet de ce scénario.

3.6.5 Etape 5 : Phase d'identification des variables pertinentes

Vu que le modèle est additif, il suffirait de regarder les valeurs des effets moyens. La difficulté d'interprétation se pose quand les valeurs sont "mitigées", à savoir des actions (variables ou interactions) qui sont difficiles à classer "d'un coup d'œil" selon l'aspect non significatif ou significatif. Dans ce cas, on fait appel à un outil statistique comme l'Analyse de la Variance (ANOVAR ou ANOVA pour Analysis Of Variance présenté dans *Tableau 3-3*) qui permet de comparer la variance (notée V_A ou V_{AB}) due à chaque paramètre ou interaction avec celle due au résidu V_r (où le résidu est calculé à l'aide des écarts entre les valeurs calculées et celles données par le modèle).

L'analyse de la variance évalue la probabilité que les variances des termes à évaluer soient significativement différentes de la variance résiduelle. Ces résultats permettent donc de déterminer les variables et les interactions dont les probabilités sont inférieures à un niveau fixé arbitrairement. Selon ce niveau de signification, ces termes peuvent être rejetés, c'est-à-dire supprimés de l'étude. Le modèle final s'appelle un modèle "réduit". Le test de confiance de Fisher-Snedecor (à 95% et 99% de confiance) permet de classer les actions (*Tableau 3-4*).

Du point de vue informatique, l'intérêt d'opérer une ANOVA est majeur. Selon la catégorie sociodémographique, certaines variables vont être classées comme non significatives, ce qui permet de réduire le nombre d'informations à transmettre par agent "individu". L'agent "pexavvi" envoie les coefficients du modèle réduit à l'agent "individu" qui calcule, classe et choisit une alternative selon ses besoins (choix d'une destination, d'un parking, ...) et ses propres contraintes.

Tableau 3-3. Tableau de l'analyse de la variance (ANOVA)

Action	Variance	Ratio
Paramètre A	$V_A = \frac{N}{n_A (n_A - 1)} \sum_i a_i^2$	$\frac{V_A}{V_r}$
Interaction AB	$V_{AB} = \frac{N}{n_A n_B (n_A - 1)(n_B - 1)} \sum_i \sum_j a_i b_j^2$	$\frac{V_{AB}}{V_r}$
Résidu	$V_r = \frac{1}{\gamma_r} \sum_i \sum_j (Y_{ij}^{exp} - Y_{ij}^{th})^2$	

(N- nombre de tests ; n_A , n_B - nombre de niveaux des paramètres ; a_i , $a_i b_j$ - effets moyens des paramètres et des interactions ; γ_r - degré de liberté du résidu ; Y_{ij}^{exp} , Y_{ij}^{th} - valeurs calculées et issues du modèle)

Tableau 3-4. Classement des actions selon le test de Fisher-Snedecor

$\frac{V_A(ouV_{AB})}{V_r} > F_{0,99}$	action Très Significative - TS
$F_{0,95} < \frac{V_A(ouV_{AB})}{V_r} < F_{0,99}$	action Significative - S
$\frac{V_A(ouV_{AB})}{V_r} < F_{0,95}$	action Non Significative - NS

Une question pouvant se poser est la lourdeur, non pas d'un point de vue calculatoire, mais celle due au nombre de questions auxquelles les personnes interrogées vont être soumises. Par exemple, s'il y a 7 variables de bruit à faire varier à deux valeurs extrêmes, un plan de 8 combinaisons (ou essais) peut être retenu. Si le plan principal contient également 8 combinaisons pour 7 variables, on peut dire qu'il y aura (8 x 8 =) 64 questions au total. Ceci est considérable et va être rédhibitoire même si c'est beaucoup moins que (2⁷x2⁷ =) 16.384 questions. Dans ce cas, il est tout à fait envisageable de réaliser un premier questionnaire avec un plan principal associé au plan secondaire "idéal" (tous les bruits de fond sont bénéfiques). L'analyse de la variance permet ainsi de réduire le nombre de variables d'entrée et le plan produit (avec une deuxième enquête) peut devenir très facilement réduit et donc exploitable.

3.6.6 Etape 6 : Prise de décision

3.6.6.A . . . pour les alternatives homogènes

Supposons qu'il faille choisir parmi deux alternatives, par exemple, deux sites (ou lieux). Nous adoptons une démarche comparative. Par exemple, pour tous niveaux égaux par ailleurs, si la distance est différente, l'agent "individu" placera au niveau 1 le site situé à la distance la plus "courte" et au niveau 2 celui à distance "élevée".

Il s'agira donc de comparer deux scénarios différents à l'aide du modèle réduit fourni par l'agent "pexxavi" selon sa catégorie sociodémographique. Le score le plus élevé correspond au choix de l'agent. Si plusieurs alternatives existent, et afin d'éviter d'utiliser des tables à plusieurs niveaux (laborieux pour les enquêtes), le choix se fera par exclusion après comparaison deux à deux.

3.6.6.B . . . pour les alternatives hétérogènes

Cette fois-ci, il ne s'agit pas d'une démarche comparative. Les probabilités pignistiques étant, à une constante près, les scores associés à chaque scénario et à chaque alternative, l'agent appartenant à une certaine catégorie sociodémographique va évaluer la qualité d'une alternative pour un scénario donnée à l'aide des modèles réduits fournis par l'agent "pexavvi". Pour un scénario donné, le choix correspond à l'alternative dont le score est le plus élevé.

3.6.6.C Cas particulier : choix d'une alternative dite robuste

Nous allons exploiter, pour notre simulateur, une autre application des plans croisés. Ceux-ci vont être intéressants pour le choix d'une alternative "robuste" quand les scores de deux ou plusieurs alternatives sont très proches (reste au régulateur de définir le "très proche").

Le but est de sélectionner la combinaison qui est la moins affectée par les fluctuations dues au bruit de fond (voir [Al-Aomar2002] pour une présentation détaillée de ce concept). Pour chaque scénario j du plan principal, on calcule, pour chaque alternative k , la valeur moyenne du score S_j^k et l'écart type correspondant.

Équation 3-27 :

$$\sigma_j^k = \sqrt{\frac{\sum_j (S_j^k - S_{jm}^k)^2}{m-1}}$$

Taguchi [Taguchi1987] propose trois formes du rapport s/n , selon le type de réponse souhaitée : la plus faible, la plus élevée ou une valeur nominale (voir *Tableau 3-5*).

Tableau 3-5. Les 3 formes standards du rapport s/n [traduit de Al-Aomar2002]

Caractéristiques de performance	Formule du rapport S/N (db)
Smaller-the-Better (SB)	$s/n = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$
Nominal-is-Best (NB)	Moyenne et Variance $s/n = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{\sigma} \right)^2$
	seulement Variance $s/n = -10 \log (\sigma^2)$
Larger-the-Better (LB)	$s/n = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$

Dans notre cas, l'intérêt porte sur une valeur nominale (voir annexe Anx. E-3 pour des compléments théoriques), ainsi il s'agit du rapport :

Équation 3-28 :

$$\left(\frac{s}{n} \right)_j^k = 20 \log \left(\frac{S_j^k}{\sigma_j^k} \right)$$

avec (s/n) le rapport signal/bruit pour la question j et l'alternative k , S_j^k la moyenne des scores pour le scénario j et l'alternative k ; σ_j^k : écart-type des scores attribués au scénario j et l'alternative k .

Un exemple de plans croisés est présenté dans *Figure 3-20*.

Dans le cas où un scénario serait évalué avec des scores proches, le choix de l'agent "individu" portera sur l'alternative pour laquelle le rapport " s/n " est maximal ; cela signifie qu'à score égal (ou presque) la perception des effets des variables "bruits" est moindre. Il s'agit donc d'une alternative pour laquelle les effets de congestion, de la sécurité ou de l'information en temps réel restent négligeables, c'est-à-dire une alternative "robuste" acquérant la confiance et la fidélité de l'utilisateur de la route. Bien sûr, si le rapport " s/n " ne peut pas être évalué (scénario inexistant dans le plan principal), il est toujours possible de le déterminer par le modèle de Vigier, en utilisant les valeurs " s/n " à la place des scores (voir annexe Anx. E-3 et Anx. F-4).

					<i>non contrôlées</i>						
					Variables externes						
<i>contrôlées</i>					Variables internes						
					Q'_i						
Q_i	distance	...	prix	activité					S_{moy}	σ	S_{moy}/n
1	< 300 m	...	< 1 €	urgente	Scores						Signal / bruit
...							
3	< 300 m	...	> 1 €	urgente							
...							

Figure 3-20. Plans croisés pour l'étude de l'indicateur de robustesse

3.7 Processus d'apprentissage collectif

3.7.1 Changement de choix dans un contexte environnemental statique

3.7.1.A Négociation et apprentissage par partage d'expérience

La grande majorité de travaux rencontrés dans la littérature se basent sur la constitution d'un agenda personnel sans l'identification des interactions entre individus à ce moment-là. Cependant il y a plusieurs sortes d'interrelations. Celles au sein du ménage et celles entre ménages c'est à dire, à travers des individus de différents ménages, tels que des arrangements de type covoiturage et des participations communes aux activités. Nous envisagerons pourtant la possibilité de partage d'expérience dans des cas bien particuliers (au sein d'un même groupe sociodémographique ou d'un ménage). Nous allons nous intéresser au covoiturage, aspect essentiel pour l'étude de l'activité de stationnement. Le principe de cette négociation, le partage d'expérience et la modélisation informatique seront détaillés dans le chapitre 4.

3.7.1.B Réactualisation des préférences

Il s'agit de changements qui ne sont pas dus à des modifications au niveau de l'infrastructure routière (modification des voies, changements des offres de transport, ...) ou des caractéristiques urbaines (nouveau quartier, points d'attraction). Le régulateur n'en a pas la maîtrise. Selon les causes qui les induisent, nous distinguons deux cas bien distincts, la réactualisation des préférences et le changement des préférences par expérience.

La perception de la qualité du service peut évoluer dans le temps suite à des contextes exogènes. Comme précisé dans le chapitre 1, le changement du niveau de vie des usagers, du prix de l'essence, ... sont des variables qui ne font pas partie d'interactions urbanisme/transport prises en compte. Dans ce cas, nous envisageons une simple réactualisation de la base de données transmise par le régulateur à l'agent "pexavvi" pour le calcul des modèles réduits que ce dernier transmettra à l'agent "individu".

La démarche de modélisation proposée dans les paragraphes précédents se prête très facilement à la réactualisation des modèles obtenus par catégorie sociodémographique.

Dans le cas d'alternatives homogènes, l'introduction de nouvelles données modifiera les modèles par catégorie sociodémographique par un simple ajustement des éléments des matrices qui se déterminent à l'aide des valeurs moyennes des réponses (voir Équation 3-20, Équation 3-21 et Équation 3-22 paragraphe §3.6.4). Sauf scénario particulier, nous n'envisageons pas le remplacement total de la base de données initiale, afin d'assurer, d'une façon simpliste, nous le reconnaissons, l'effet de l'inertie dans les processus de prise de décision.

Quant aux alternatives hétérogènes (comme le mode de transport), l'introduction de nouvelles données est fortement facilitée par le mécanisme de fusion en cascade qui est un avantage offert par l'algorithme de Dezert-Smarandache.

Quel que soit le type d'alternative, le résultat de cette réactualisation peut être insignifiant ou drastique (ce qui peut se traduire par la modification de classement des alternatives). Dans ce dernier cas, le régulateur peut aussi se demander si l'échantillonnage en catégories sociodémographique a été suffisamment fin et, à long terme, s'il ne faut pas envisager de le réactualiser lui aussi (suite, par exemple, à l'apparition d'une nouvelle communauté ethnique).

3.7.2 Changements de choix dans un contexte environnemental dynamique

Un mécanisme d'apprentissage ne peut être jugé comme tel, s'il ne permet pas de prendre en considération des modifications possibles du nombre d'alternatives à évaluer préalablement (ajout ou disparition de certains choix potentiels, comme par exemple, l'introduction d'un nouveau parking ou l'indisponibilité d'un bus à partir de certaines heures). L'identification doit être suivie par une phase d'évaluation qui détermine les changements internes que l'agent doit appliquer de façon à être en phase avec la nouvelle situation. Dès lors, pour des conditions difficilement maîtrisables, réaliser un apprentissage uniquement sur les nouvelles hypothèses peut ne pas correspondre aux conditions présentes lors de l'apprentissage réalisé sur les hypothèses existantes. Refaire un apprentissage peut représenter pourtant une opération très et trop coûteuse.

Selon notre approche de modélisation du processus décisionnel, il n'y a aucun problème particulier pour les alternatives homogènes (choix des destinations, des parkings, etc.). Les alternatives sont évaluées séparément et comparées deux-à-deux, donc l'ajout ou la suppression d'une alternative n'induit aucun coût calculatoire supplémentaire (à part les spécifications au niveau des modules trafic ou occupation du sol qui sont à la charge du régulateur).

Pour les alternatives hétérogènes (choix d'un mode de transport, par exemple), c'est le cadre de discernement qui change, ce qui nécessite une démarche plus approfondie. Pour résoudre ce problème, l'approche de Dezert-Smarandache (DSmT) a encore retenu notre attention par son habileté dans la manipulation du caractère dynamique de la fusion. En effet, au moyen des théories précédentes, si on sait redistribuer des préférences après

qu'une alternative soit éliminée, il est beaucoup plus difficile d'envisager la même opération si des alternatives s'ajoutent. Or c'est précisément ce qui nous intéresse pour un modèle comportemental évolutif dans le temps et pour lequel on ne veut pas être obligé de recommencer l'initialisation du modèle.

3.7.2.A Disparition d'une alternative

Plaçons-nous dans le cas où une alternative n'est plus valable. Par exemple, l'activité doit se dérouler dans une période où les bus ne sont pas en service (l'agent "individu" a accès aux horaires de bus suite aux communications avec l'agent "information"). Selon l'algorithme de conditionnement [Smets1992], les masses sont redistribuées d'une façon additive sur les hypothèses qui peuvent devenir vraies.

3.7.2.B Apparition d'une alternative

Maintenant, supposons qu'une nouvelle alternative apparaisse (un nouveau mode de transport, par exemple). Ceci entraîne un nouveau cadre de discernement. Pour simplifier la présentation, plaçons-nous dans un contexte facile. Soit, à l'instant t , le cadre de discernement suivant :

Équation 3-29 :

$$\Theta(t_i) = \{\Theta_1 ; \Theta_2\}$$

Deux sources d'informations indépendantes proposent des jeux de masses $m_1(.)$ et $m_2(.)$ dans $D^{\Theta(t_i)}$. Soit à t_{i+1} une nouvelle alternative (car-sharing) devenant possible et une troisième source d'informations (personne interrogée) proposant un jeu de masse $m_3(.)$ dans $D^{\Theta(t_{i+1})}$ avec le nouveau cadre de discernement ci-après :

Équation 3-30 :

$$\Theta(t_i + 1) = \{\Theta(t_i) ; \Theta_3\}$$

La fusion se fait selon les étapes suivantes :

- fusion des deux masses selon le modèle libre de DSMT sur $D^{\Theta(t_i)}$

$$m_{12}(.) = [m_1 \oplus m_2](.)$$

- puis la même règle de fusion permettant d'obtenir :

$$m_{t_{i+1}}(.) = m_{123}(.) = [(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3](.) = (m_{12} \oplus m_3)(.)$$

Si une contrainte apparaît sous forme d'information certaine, le modèle hybride permet toujours d'affiner les résultats du modèle libre.

3.8 Vue globale de notre approche de modélisation des comportements des agents "individus"

En synthèse, nous présenterons dans *Figure 3-21* les étapes du processus décisionnel d'un agent en incluant les phases d'apprentissage collectif qui permettent de réactualiser le modèle de choix préliminaire (actualisation des préférences, changements d'offres, négociation).

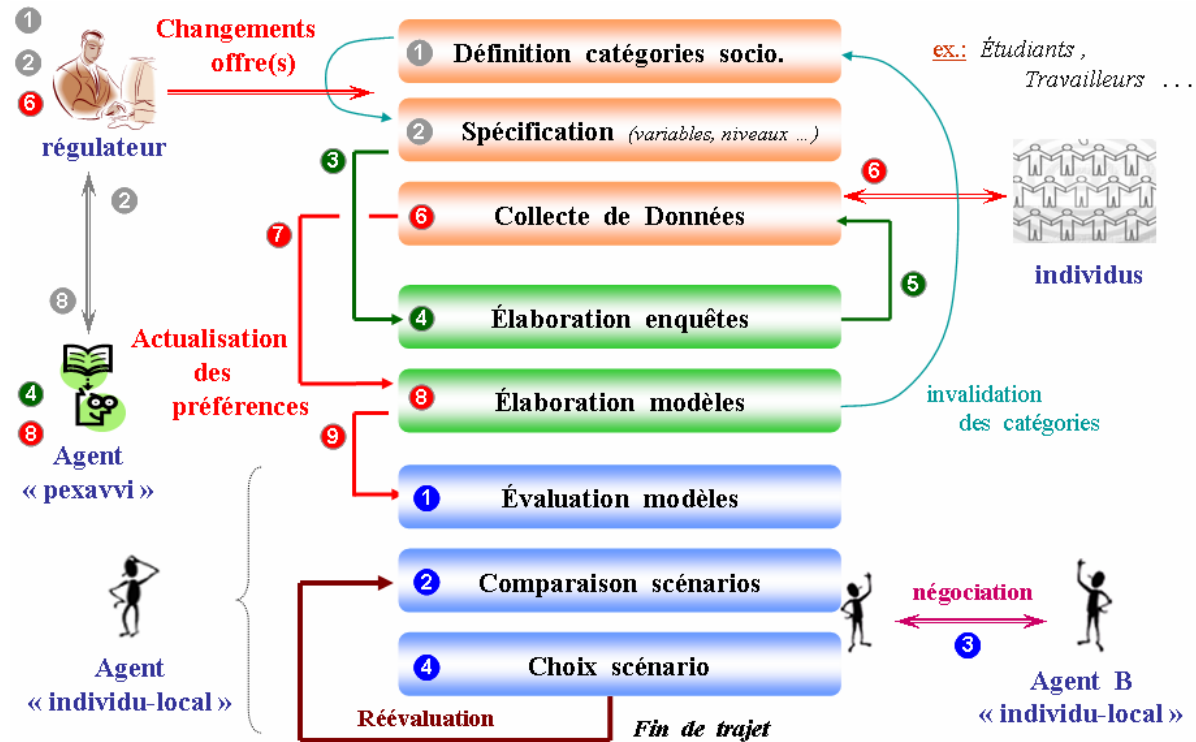


Figure 3-21. Architecture logicielle pour le processus décisionnel évolutif

3.8.1 Ses intérêts

- Le modèle a un côté "individualisation" : un régulateur peut choisir les variables d'entrée, les niveaux et les interactions dont il souhaite étudier les impacts dans la ville étudiée. Ils peuvent être différents d'une catégorie sociodémographique à une autre.
- Le régulateur peut étudier le comportement des usagers face à des scénarios existants ou hypothétiques, ce qui rend cette démarche intéressante lors d'une étude préliminaire concernant des projets de transport (changements à moyen ou long terme).
- Il est possible d'élaborer un modèle avec un nombre restreint de questions portant sur les préférences des individus.
- Un avantage est de ne pas intégrer les caractéristiques sociodémographiques des agents dans le modèle, ce qui, à long terme, évitera de biaiser leurs effets (évolution des caractéristiques de la population, nouveaux groupes ethniques).

- Grâce à l'analyse de la variance, le nombre de données à renseigner pour chaque agent est considérablement réduit, ceci pour chaque catégorie définie par le régulateur.
- Il est possible d'envisager des modèles de comportement avec des variables à niveaux flous (voir chapitre suivant).
- Il est possible d'employer cette approche dans plusieurs contextes :
 - pour évaluer les alternatives à l'aide d'une fonction "score" et choisir celle qui maximise le score ;
 - pour établir des formes analytiques de certaines variables non mesurables (attractivité, accessibilité, ...).
- Il est possible de réactualiser ou d'enrichir facilement la base de données car il faut juste une mise à jour de chaque moyenne "score" ou de fusion de données par scénario. Cela permet de prendre en compte les fluctuations de comportement dans le temps suite à des contextes exogènes qui ne font pas partie d'interactions urbanisme-transport que le régulateur désire tester (prix de l'essence, par exemple).
- Le régulateur peut étudier le comportement des usagers face à des changements de l'offre de transport par l'introduction ou la disparition des alternatives soumises au choix de l'agent.
- Un modèle en rapport signal/bruit permet à l'agent "individu" de faire le choix entre plusieurs alternatives qui sont susceptibles de le satisfaire (scores proches). Il est également possible, pour le régulateur, de détecter les scénarios pour lesquels les agents sont les plus sensibles aux conditions trafic.
- Le processus décisionnel prend en compte les interrelations entre individus via un processus de négociation suivi par une phase de partage d'expérience (détails dans le chapitre suivant).

3.8.2 Ses contraintes

Il existe des contraintes dans l'application des plans orthogonaux dont le non respect, mis à part la méconnaissance de l'utilisation d'un modèle et la constitution d'une table orthogonale, peuvent induire des échecs dans l'application de cette approche :

- La distribution des réponses est du type aléatoire. Les réponses (provenant de plusieurs personnes appartenant à la dite même catégorie) pour chaque question se répartissent selon une distribution de Gauss, sinon les résultats du modèle seront biaisés. Il existe plusieurs explications au non respect de cette contrainte. Le questionnaire est mal compris (par les usagers), ou les niveaux des variables sont mal définis (prix "faible" et "élevé" par exemple), ou les variables qui affectent réellement le choix de l'individu n'ont pas été incluses dans le modèle, etc.
- Le choix des interactions à mettre dans le modèle est délicat car la notion d'interaction est généralement mal perçue.

- Pour que le calcul des effets moyens ne soit pas biaisé, il faut que les variables d'entrée soient indépendantes. Le changement de niveau d'une variable n'affecte pas la valeur du niveau d'une autre variable. Cette contrainte est la plus contraignante. Par exemple, lorsqu'on s'intéresse à la qualité de déplacement en bus, la distance entre deux points et le prix du trajet peuvent être corrélés pour certaines villes mais pas pour d'autres.
- La condition nécessaire pour pouvoir utiliser la loi de combinaison de Dezert-Smarandache pour l'évaluation des alternatives hétérogènes est que les sources d'information soient indépendantes. Cette notion d'indépendance, différente de celle rencontrée dans le cadre probabiliste, reste une notion ambiguë dans la pratique. Par exemple, il ne sera pas envisageable de prendre en compte des avis "individuels" au sein d'un ménage et d'ajouter un avis "partagé". Chaque agent disposera de son propre modèle ; le choix d'un ménage pour un mode de transport, par exemple, se fera par négociation.
- Il est évident que la théorie de l'évidence a comme désavantage sa complexité algorithmique qui est directement liée à la taille du cadre de discernement. Elle est amenée à manipuler un grand nombre d'éléments. Pour cette raison, dans le cas du choix d'un itinéraire lors de la recherche d'une place de parking (par l'agent "individu"), nous allons nous abstenir de proposer comme hypothèses toutes les alternatives possibles.

3.8.3 Ses limites

L'erreur globale au niveau du modèle peut être vue comme étant due aux faits suivants.

- Des erreurs d'évaluation des comportements sont faites lors des enquêtes. Il s'agit des erreurs d'échantillonnage (base de sondage, sélection des répondants, non réponses totales) et des erreurs de mesure découlant de questionnaires incomplets, mal compris ou incorrectement expliqués.
- Le modèle choisi n'est valable que dans l'intervalle fixé par les niveaux haut et bas pour chaque variable. L'écart entre les 2 niveaux est donc primordial. Trop faible, l'effet attribué à cette variable ne sera pas significatif. Trop important, il risque de ne pas être fiable pour toute tentative d'interprétation par interpolation.
- Même si les plans proposent des solutions très intéressantes (tester les impacts de 15 variables avec seulement 16 questions ; si, si, c'est possible), il sera souhaitable que le nombre de variables soit inférieur à 7 pour faciliter la compréhension du questionnaire.
- Pour la fusion avec Dezert-Smarandache, il faut éviter de tester plus de 6 alternatives à la fois pour des raisons calculatoires.
- Si le régulateur décide de tester les effets d'une nouvelle variable d'entrée, il est obligé de relancer toute la procédure.
- L'utilisation d'un plan produit peut devenir lourde (en termes de questionnaire), dès lors qu'il s'agit de tester les impacts de plus de 7 variables dans le plan principal. Dans ce cas,

cette étape doit se dérouler après l'analyse de la variance, ce qui se traduit par le besoin de refaire une enquête uniquement avec des variables significatives.

- Pour ces mêmes raisons, il est déconseillé de vouloir tester plus de trois variables de bruits de fond, et encore moins des interactions envisageables.

3.9 Conclusion

Les travaux réunis dans ce chapitre concernent le développement et l'application d'une approche originale que nous avons développée pour simuler le processus décisionnel d'un agent "individu". Placé dans un contexte urbanisme-transport évolutif, cela nécessite la prise en compte de changements potentiels de comportement, ce qui dans notre contexte multi agents, passe par le développement de mécanismes d'apprentissage. L'évolution des préférences des usagers d'un réseau routier peut se traduire par l'apparition des fluctuations dans le temps, de conditions particulières de déplacement aussi bien que, bien plus drastique, par le changement du nombre d'alternatives proposées.

Ce chapitre nous a permis de voir les approches existantes pour des modèles décisionnels, quelles formes peut prendre le problème de l'apprentissage, quelles en sont les difficultés, et quels outils nous permettent de travailler dans le cadre que nous nous sommes fixés. Nous avons proposé une forme hybride de modélisation qui exploite, d'une part, la communication au sein d'un système multi agents et d'autre part, le calibrage algorithmique des modèles comportementaux à l'aide d'enquêtes à préférences déclarées. Notre approche intègre un mécanisme d'apprentissage mono agent par expérience par jugement interne, puisqu'il s'agit d'adapter un comportement de manière à maximiser un score, lequel peut représenter une grande variété d'objectifs, choix d'un mode de transport, d'une heure de départ, etc. Des mécanismes d'apprentissage collectif permettent de réactualiser les préférences (fluctuations des préférences dans le temps, changement de l'offre, etc.) et de partager l'expérience après une phase de négociation.

Il s'agit d'une technique d'enquête et de modélisation adaptée de l'optimisation des procédés industriels (plans orthogonaux couplés avec le modèle matriciel de Vigier) qui présentent pour notre simulateur les avantages suivants.

Le régulateur possède la maîtrise des variables à tester (quantitatives ou qualitatives) et des niveaux, selon des catégories sociodémographiques qu'il établit au préalable ; il peut les faire varier indépendamment les uns des autres de manière à isoler leurs effets respectifs. Il est également envisageable de faire ressortir les effets des interactions entre les variables d'entrée, un manque évident de la plupart de modèles classiques.

Le nombre de données à renseigner pour chaque agent est considérablement réduit ce qui se traduit au niveau du simulateur par des coûts calculatoires réduits.

Les modèles comportementaux obtenus sont évolutifs dans le temps.

Nous verrons dans la partie suivante comment ces modèles sont exploités et implémentés dans un contexte concret (ville spécifique, catégories sociodémographiques particulières) en plaçant l'activité de stationnement au début et à la fin d'une chaîne de déplacements urbains.

Partie 3 : Offre et demande de stationnement

Chapitre 4 - Le parking, début et fin d'une chaîne de déplacements d'un "individu"

Chapitre 4 - Le parking, début et fin d'une chaîne de déplacements d'un "individu"	144
4.1 Introduction	146
4.2 Les parkings dans la chaîne de déplacements	147
4.3 Choix de la destination pour une activité "multi sites"	150
4.3.1 Perception de l'attractivité et de l'accessibilité : critères fondamentaux dans le choix d'une destination à activités "multi sites"	150
4.3.2 Les niveaux flous pour définir l'Affinité d'un site	152
4.3.3 Choix d'une destination pour une activité multi sites à La Rochelle.....	156
4.3.3.A Modèle de choix préliminaire d'une destination.....	156
4.3.3.A.1 Accessibilité à un site	156
4.3.3.A.2 Attractivité d'un site.....	156
4.3.3.A.3 "Affinité pour un site"	157
4.3.3.B Modèle évolutif concernant le choix d'une destination	158
4.3.3.B.1 Apprentissage individuel	158
4.3.3.B.2 Apprentissage collectif	158
4.3.3.C Validation (partielle) du modèle : comparaison avec un système réel.....	159
4.4 Choix d'un mode de transport pour une certaine catégorie sociodémographique et pour une certaine ville	160
4.4.1 La perception de la qualité d'un mode de transport.....	160
4.4.1.A Les modèles agrégés.....	161
4.4.1.B Les modèles désagrégés	161
4.4.2 Négociation pour partage d'un mode de transport.....	163
4.4.2.A Processus d'élaboration de l'agenda	163
4.4.2.B Processus de négociation pour le covoiturage.....	165

Chapitre 4 : Le parking, début et fin d'une chaîne de déplacements d'un "individu"

4.4.2.B.1	Réseaux de Petri modélisant le processus de négociation.....	165
4.4.2.B.2	RdP colorés du processus de négociation de covoiturage.....	167
4.4.2.B.3	Etablissement des propriétés.....	167
4.4.2.B.4	Propriétés des réseaux de Petri colorés à vérifier.....	168
4.4.3	Apprentissage par partage d'expérience dans un choix modal.....	169
4.4.4	Choix modal à La Rochelle.....	172
4.4.4.A	Modèle de choix préliminaire pour le mode de transport.....	172
4.4.4.B	Modèle évolutif de choix d'un mode de transport.....	174
4.4.4.B.1	Apprentissage individuel dans un contexte statique.....	174
4.4.4.B.2	Apprentissage collectif dans un contexte dynamique.....	175
4.4.4.C	Interprétation des résultats du modèle.....	176
4.5	Choix d'un parking pour une certaine catégorie sociodémographique et pour une certaine ville.....	177
4.5.1	Le parking en début du déplacement.....	177
4.5.1.A	Modèles de choix de parking dans la littérature.....	177
4.5.1.B	Variables testées pour le choix du stationnement.....	178
4.5.1.C	Remarques sur les modèles et variables de choix d'un parking.....	178
4.5.2	Scénarios pour le choix d'un parking.....	179
4.5.3	Choix d'un parking à La Rochelle.....	180
4.5.3.A	Modèle décisionnel pour le choix d'un parking.....	180
4.5.3.B	Exploitation des modèles.....	181
4.5.3.B.1	Les variables et interactions significatives.....	181
4.5.3.B.2	Modélisation des préférences pour des scénarios hypothétiques.....	181
4.5.3.B.3	Différenciation des niveaux de préférences selon la catégorie d'individus	181
4.5.3.B.4	Classement des parkings selon le type d'agents "individu".....	182
4.5.3.C	Réalisme de la représentation de la dispersion des préférences.....	182
4.6	Comportements des agents "individus" lors de l'absence d'une place de parking	183
4.6.1	Le parking en fin de déplacement.....	183
4.6.2	Scénarios pour le choix d'un comportement lors de l'absence d'une place de stationnement.....	184

4.6.3	Choix d'un comportement à La Rochelle en l'absence de place	185
4.7	A la recherche d'une place de stationnement.....	186
4.7.1	Quelles hypothèses prendre.....	186
4.7.2	Quel itinéraire "pressenti" lors de la recherche d'une place de stationnement 189	
4.8	Conclusion.....	191

4.1 Introduction

Vu par certains chercheurs comme un élément annexe, voire négligé, d'un modèle trafic, traité comme une "boîte noire" permettant de calibrer les modèles trafic entre les zones d'émission et d'attraction, le parking est pour nous un élément principal de la simulation du trafic urbain.

A partir de la chaîne de déplacements définie dans *Figure 1-17*, nous aborderons d'abord le choix des destinations multi sites, aspect peu traité dans les modèles trafic, et qui reste pourtant une des causes principales des fluctuations de l'équilibre offre – demande de stationnement, à une époque où le panel des activités se diversifie et se complexifie. Pour ce faire, des concepts comme l'attractivité et l'accessibilité seront modélisés pour établir un classement par sites. Nous nous intéresserons également au choix du mode de transport, dans un contexte statique et dynamique urbanisme-transport, dans la mesure où il conditionne la demande de stationnement. A une époque où le covoiturage devient une formule intéressante, à la fois pour les usagers du réseau routier ainsi que pour les régulateurs trafic, nous introduirons la possibilité de négociation entre partenaires d'un même groupe. Pour pallier la manière séquentielle de traiter l'activité de stationnement, une attention particulière est accordée aux variables conditionnant le choix du parking afin d'intégrer à la fois les particularités des parkings et celles des activités à mener par les agents "conducteurs".

En fin de déplacement, l'agent "conducteur" gare son véhicule ; mais en l'absence d'une place de stationnement, il va chercher un autre parking, ou une place illicite, ou faire des tours autour du parking, ou différer son activité, ce qui n'est pas sans effet sur l'état de congestion des routes. Ce sont ces aspects, quasi-inexistants dans la littérature de spécialité, que nous allons aborder afin d'intégrer l'activité de stationnement comme un maillon de la chaîne de déplacements urbains.

Pour ce faire, nous mettrons en œuvre la chaîne décision – apprentissage des agents "individus" développée dans le chapitre précédent pour plusieurs catégories sociodémographiques d'une ville (La Rochelle, ~76.000 habitants). Le but principal n'est pas l'élaboration de modèles « universels », mais de rechercher et donc montrer que toutes les phases de la chaîne de déplacements peuvent être traitées avec la même démarche de modélisation, souple d'utilisation pour le régulateur souhaitant tester les variables et niveaux de son choix en fonction des catégories sociodémographiques qu'il définira.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de trois publications dans les domaines informatique, planification des transports et management [Boussier2004], [Boussier2006b], [Boussier2006c].

4.2 Les parkings dans la chaîne de déplacements

Nous sommes partis de l'hypothèse qu'un agent local dispose d'une base de connaissances sur les caractéristiques des alternatives. Cela veut dire qu'après le choix d'une destination, un usager négocie ou pas avec un ou des partenaires concernant le mode de transport. Dans le cas d'un déplacement en voiture, il fait le choix du parking au voisinage de la destination. Ceci signifie que le choix du parking devance le choix d'itinéraire (Figure 4-1).

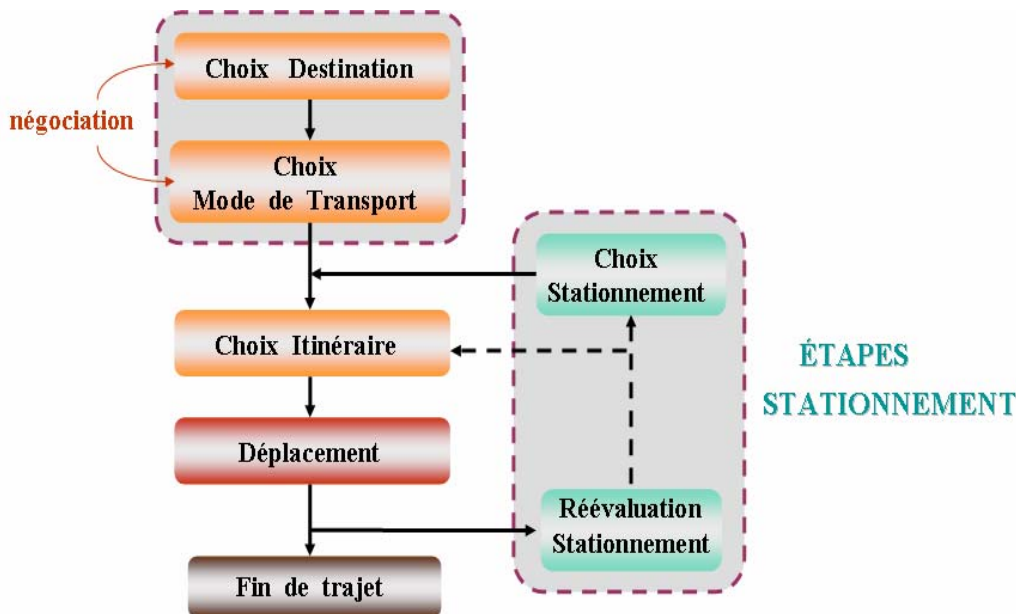


Figure 4-1. Chaîne de déplacements incluant le stationnement

En fin de déplacement, deux alternatives sont possibles : soit l'agent gare son véhicule sur une place de stationnement, soit il doit adopter un comportement autre (stationner illicitement, faire un tour autour du parking, choisir un autre parking ou reporter son activité). Si le choix porte sur « faire des tours autour du parking » en attendant qu'une place se libère, l'usager doit choisir un itinéraire autour du parking ce qui peut induire des effets de congestion autour du parking.

Dans la littérature de spécialité, on peut remarquer que la façon d'aborder les parkings reste un processus plutôt séquentiel, le parking étant vu comme une entité à part, sans lien avec la chaîne de déplacements en amont (choix modal, de destination...) ou en aval (comportement des conducteurs en l'absence d'une place disponible et effets sur l'état de congestion des routes).

Dans des travaux récents [Sattayhatewa2003], le modèle de choix utilise des mesures sur *l'attractivité des destinations* et peut décrire l'utilisation courante d'un parking mais aussi être employé à caractère prévisionnel. D'autres travaux de références font apparaître depuis longtemps le besoin d'intégrer le choix des parkings comme une étape fondamentale de la

modélisation de la demande de déplacement (par exemple, Eldin ([Nour Eldin1981] qui a introduit la *perception du plus court chemin*, ou Gur [Gur1984] qui s'intéresse au *temps d'accès au parking*). Ainsi les conducteurs sont associés à des parkings selon leur *perception du plus court chemin et de la plus courte durée (incluant le temps de marche à pied)*.

Florian [Florian1980] considère la corrélation dans l'autre sens ; il a inclus le concept d'entropie dans la distribution des trajets afin de prendre en compte la dispersion des choix de destinations due à des aspects comportementaux. Une partie intéressante de son travail a été de prendre en compte les capacités d'un parking, cependant l'impact des congestions possibles n'apparaît pas dans le modèle.

Un récent exemple est présenté dans les travaux de Zhang [Zhang2005], où un modèle probabiliste basé sur des enquêtes de préférences observées a été calibré pour la ville de Hiroshima. A notre connaissance, c'est le seul qui traite, à la fois, le choix des destinations et des parkings. Le nombre élevé d'alternatives (*Figure 4-2 et Figure 4-3*) rend cette approche laborieuse. Ajoutons à cela le caractère peu comportemental de l'approche, en inadéquation avec les objectifs de notre simulateur.



Figure 4-2. Modèles de choix de destinations et de parkings [Zhang2005]

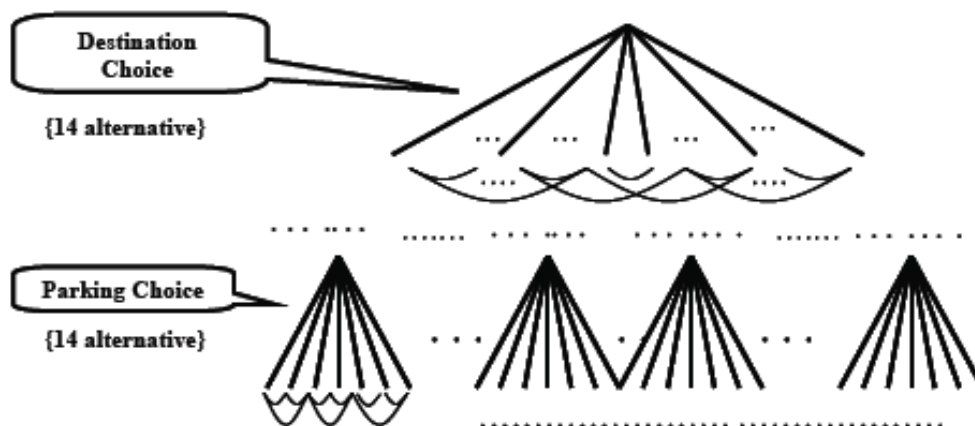


Figure 4-3. . . . suite de [Zhang2005]

Dans la mesure où nous souhaitons intégrer l'activité de stationnement comme un maillon de la chaîne de déplacements, mis à part le choix de transport, les destinations et le covoiturage, deux phases sont importantes pour un régulateur trafic, que ce soit pour la simulation d'un état du système ou que ce soit pour l'établissement des impacts de nouvelles stratégies (urbanistes ou transport) :

- la phase en amont au déplacement, qui consiste à modéliser les préférences des conducteurs locaux pour un parking selon la destination choisie ;
- la phase en fin du déplacement, qui consiste à modéliser les intentions des conducteurs locaux lors de l'absence d'une place de stationnement.

Pour ce faire, plusieurs études de cas ont été menées à La Rochelle avec plusieurs objectifs distincts :

- tester la validité du cadre méthodique proposé dans le chapitre précédent pour les modèles décisionnels associés aux phases de déplacement ;
- tester une démarche de modélisation des choix des parkings avec des variables qui intègrent à la fois les effets des caractéristiques des parkings, de l'activité à mener par l'agent et des interactions inter agents ;
- fournir des modèles décisionnels pour tester le démonstrateur développé (voir chapitre 5).

Les étapes de l'organisation des déplacements pour lesquelles ce type d'étude a été mené sont :

- le choix d'une destination d'une activité pouvant se dérouler sur plusieurs sites,
- le choix d'un mode de transport,
- le choix d'un parking,
- le comportement des agents en l'absence d'une place de stationnement.

La procédure d'élaboration des modèles est toujours la même :

- En fonction d'un groupe représentatif d'une certaine catégorie sociodémographique sont choisis les variables internes et externes à tester, leurs niveaux et le panier de réponses potentielles (**rôle du régulateur**).
- Une enquête est élaborée par la méthode présentée dans le paragraphe §3.6.2.C (**rôle de l'agent "pexavvi"**) ; une collecte de données est effectuée auprès d'un échantillon représentatif (**rôle du régulateur**).
- Les résultats sont exploités pour l'élaboration des modèles décisionnels qui seront fournis à chaque agent "individu" de la catégorie (**rôle de l'agent "pexavvi"**).

Nous présenterons uniquement le principe et discuterons les résultats de ces modèles, le détail des calculs étant présenté en annexe FFF. Mise à part leur validation par comparaison avec des données du terrain (quand elles ont pu être récupérées), nous nous attarderons dans l'annexe G sur les tests statistiques de validité et de sensibilité.

4.3 Choix de la destination pour une activité "multi sites"

4.3.1 Perception de l'attractivité et de l'accessibilité : critères fondamentaux dans le choix d'une destination à activités "multi sites"

Lorsque nous nous sommes penchés sur l'étape du choix d'une destination pour un agent "conducteur d'une voiture" local, nous avons considéré que le panier d'activités fixes était établi pour chaque agent aussi bien que les sites des activités fixes. Lorsque nous avons voulu intégrer les activités flexibles à sites multiples ("shopping", activités récréatives, ...), cause principale des fluctuations offre-demande de stationnement, nous avons constaté que la littérature de spécialité, et en particulier celle portant sur les simulateurs à base d'activités, a très peu développé ces aspects.

Pourtant, au moment où la chaîne d'activités devient de plus en plus complexe et les usagers se déplacent de plus en plus pour des activités récréatives, une simulation réaliste de la distribution des flux ne pourrait les négliger. Des travaux se sont attaqués à la complexité de ces problèmes [Schönfelder2002], [Bhat2004], [Newmark2005] mais il n'y a à notre connaissance aucun modèle permettant d'illustrer d'une façon réaliste le comportement d'une personne devant le choix de plusieurs destinations. Dans *Figure 4-4*, nous rappelons les principaux modèles rencontrés dans la littérature.

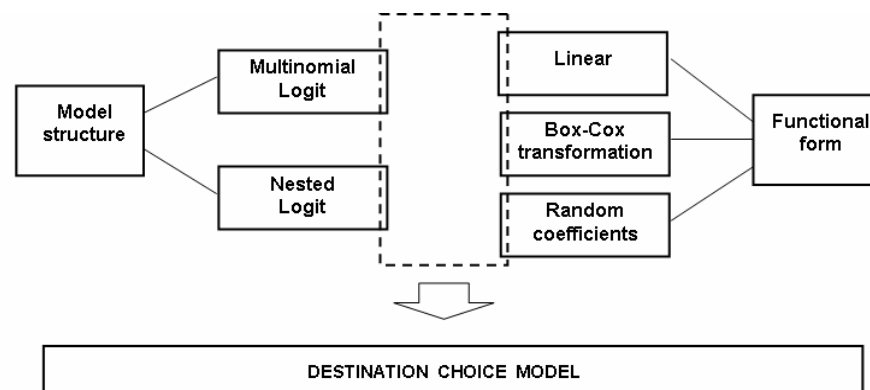


Figure 4-4. Modèles de choix de destinations [Hammadou2004]

Essayer d'envisager des modélisations type gravitaire, c'est-à-dire une probabilité importante d'autant plus que l'agent "individu" habite près de la destination, n'est plus vraiment justifiée. Ces dernières années ont vu naître de nombreux modèles basés sur l'utilité [Cirillo2003], [Marchal2003], [Simma2003] dans lesquels on a admis que le coût (distance) ne peut pas être le seul facteur à prendre en compte. Une autre façon de voir est de supposer, raisonnablement, que l'utilisateur cherche à concentrer spatialement le calendrier de ses activités afin de profiter au mieux des frais de déplacement. Dans ce schéma de raisonnement, la localisation d'une destination dépend de la localisation résidentielle et de celles de toutes les autres destinations à envisager. Cette circonscription spatiale caractérise le prisme espace-temps de l'individu qui est à l'origine des simulateurs trafic basés sur le principe de la "Time-Geography" [Yamamoto2004]. On peut également évoquer la concentration d'activités de

différents types complémentaires dans une même zone géographique. Cela favorise son attractivité, les consommateurs pouvant alors les associer entre elles sans avoir à subir de contraintes spatio-temporelles supplémentaires significatives. A cet égard, la zone peut être jugée comme attractive. Dans ses travaux, Dijst [Dijst1997] considère que l'espace dans lequel se déroulent les activités est une ellipse définie par le temps équivalent argent (appelée souvent VOT – value of time), la vitesse de déplacement et la distance entre deux arrêts.

Mais Pozsgay [Pozsgay2001] n'approuve pas ce raisonnement. Voyons l'exemple des deux cas présentés dans *Figure 4-5*,

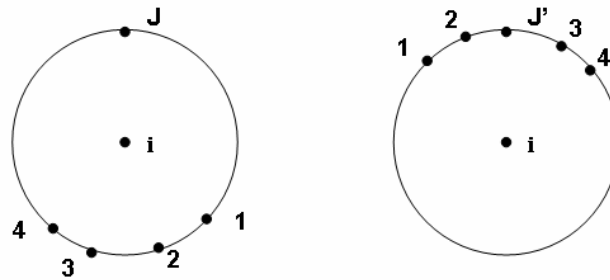


Figure 4-5. Importance des destinations les unes par rapport aux autres [Pozsgay2001]

Même si les zones j et j' ont des caractéristiques identiques et les déplacements ij ou ij' semblent équiprobables, le fait que j est à l'écart des autres zones peut avoir des effets considérables. La zone j peut bénéficier d'une probabilité de choix supérieure parce que le taux de congestion risque d'être moindre. Par ailleurs, la zone j' peut attirer plus de trajets du fait de l'agglomération de points d'attraction due aux zones l'entourant. On en conclut donc que plus ou moins d'opportunités (points d'attraction) n'est pas non plus un argument unique à prendre en considération.

L'attractivité d'une zone est fortement dépendante de l'accessibilité de la zone, mais c'est l'accessibilité qui est à la base de l'organisation interne de l'espace urbain, et gère la compétition des différentes activités économiques pour s'assurer les localisations les plus avantageuses.

La notion d'accessibilité est un concept relativement ancien, développé en géographie, en économie urbaine et régionale et en économie des transports. C'est en 1959 que Hansen [Hansen1959] proposait les premières définitions et utilisations du concept d'accessibilité, notion plus riche que celle de proximité. Initialement, le terme de proximité exprimait deux notions différentes : une distance faible et un accès à une autre unité ou fonction économique. Si les deux notions étaient fusionnées dans le même mot, c'est parce qu'une distance kilométrique importante était perçue comme ce qui empêche "l'accès à" et inversement une distance réduite comme ce qui donne "l'accès à". Avec l'évolution technologique des transports et des infrastructures, la perception de la proximité est devenue ambiguë. Une forte variation de vitesses associées aux moyens de transport se traduit par le fait que "l'accès à" peut être identique en se situant à deux distances différentes. Inversement, dans la mesure où

les différents réseaux de transport sont sujets à des perturbations, à distances égales "l'accès à" peut être très différent.

Au-delà de ces points de vue généraux, les définitions et surtout les mesures qui en découlent diffèrent largement. On trouve des modèles entropiques d'interactions spatiales, des modèles issus de la théorie économique ou l'utilité aléatoire. Pour une synthèse sur les modèles les plus employés, se reporter à Gould [Gould2002] qui met en garde sur le caractère "glissant" de l'accessibilité et de l'attractivité, en rappelant qu'il s'agit d'un terme que chacun utilise à tort et à travers jusqu'à ce qu'il soit confronté au problème de définition et de mesure. On saisit bien intuitivement les sens de l'accessibilité et de l'attractivité, mais le problème capital est de passer de cette notion intuitive, de cette "facilité et qualité ressenties" évidemment dépendante de l'individu et de sa perception, à une formulation pratique et opérationnelle.

De Palma [DePalma1998] associe automatiquement les concepts accessibilité, attractivité et prix dans un modèle visant la maximisation de l'utilité ressentie par l'utilisateur. Nous ne partageons pas entièrement ce point de vue dans la mesure où l'accessibilité est une variable qui peut varier à court terme ou à moyen terme, tandis que l'attractivité s'ajuste par ces points d'attraction à long terme.

Enfin, et c'est notre point de départ, certains auteurs ont souligné l'importance de fonder les mesures d'accessibilité au niveau de l'individu et sur une théorie comportementale. Dans ce cadre, les mesures d'accessibilité ne sont plus seulement une mesure agrégée du niveau de service en fonction de destinations potentielles, mais une mesure désagrégée en fonction du type d'individu qui se déplace, du motif.

4.3.2 Les niveaux flous pour définir l'Affinité d'un site

Lorsque nous avons souhaité démarrer l'approche de modélisation présentée dans le chapitre précédent concernant les alternatives dites homogènes (classement des sites selon le score), beaucoup trop de variables d'entrée ont dû être listées : nombre de points d'attraction, facilité d'accès, coût, distance, possibilité de stationnement, etc. Même une table orthogonale qui amène à réduire considérablement le nombre de scénarios hypothétiques devient inadéquate lorsqu'il s'agit de formuler des questions contenant plus de dix variables.

Une autre possibilité était d'utiliser, comme variables d'entrée, des concepts comme l'accessibilité et l'attractivité qui étaient censées réunir les effets de plusieurs variables. Mais lorsque nous avons formulé un questionnaire incluant ces variables, nous nous sommes trouvés, face aux personnes interrogées, en difficulté pour l'explication et la compréhension du "véritable" sens de ces notions. Dans la mesure où nous ne sommes pas en mesure de définir avec exactitude les niveaux "bas" et "haut" de ces deux grandeurs, l'emploi de la méthode présentée précédemment devient peu rigoureux, à moins qu'on intègre dans le modèle la notion de perception "floue".

Ce sont les raisons qui nous ont conduit à utiliser la logique floue [Zadeh1965] ayant pour objectif la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. C'est une technique qui est de plus en plus employée ces dernières années afin de décrire le comportement des utilisateurs du réseau routier, en particulier dans la phase du choix d'un

itinéraire, de choix modal, de perception des coûts d'un trajet, de l'élaboration d'un programme d'activités [Hoogendoorn2000], [Henn2001], [Pezzoli2001], [Postorino2002], [Dell'Orco2003], [Olaru2003], [Thériault2005].

Afin de permettre à un agent de faire son choix parmi plusieurs destinations, l'idée de base [Boussier2005] est d'utiliser une grandeur que nous appellerons "l'affinité pour un site" et de choisir celle à plus grand score.

Les étapes pour l'obtention de celle-ci sont présentées dans Figure 4-6 ; les variables d'entrée que nous proposons sont également listées ci-après :

- l'attractivité du site ,
- l'accessibilité le long du trajet ,
- la distance entre l'origine et la destination par le chemin le plus court (qui peut être convertie en coût).

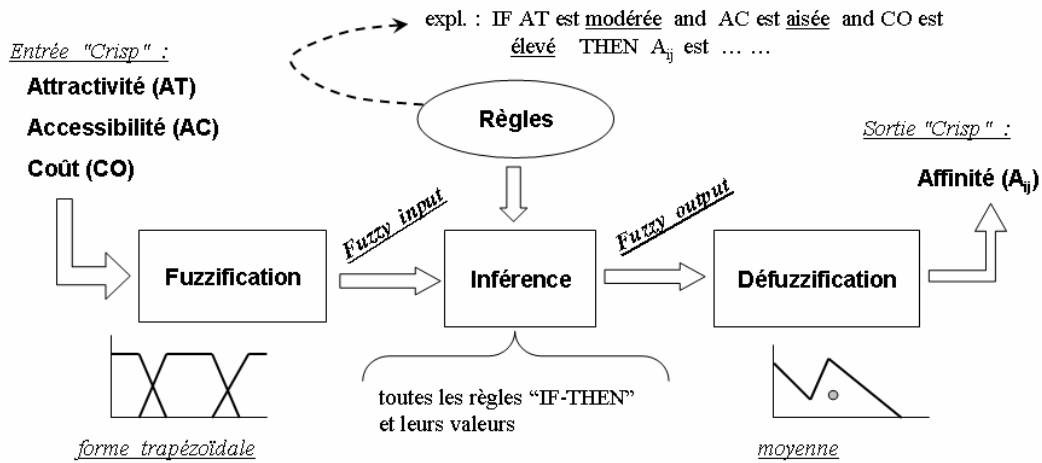


Figure 4-6. Description des étapes pour l'obtention de l'"affinité d'un site"

Un exemple de représentation floue de l'attractivité d'un site est présenté dans Figure 4-7.

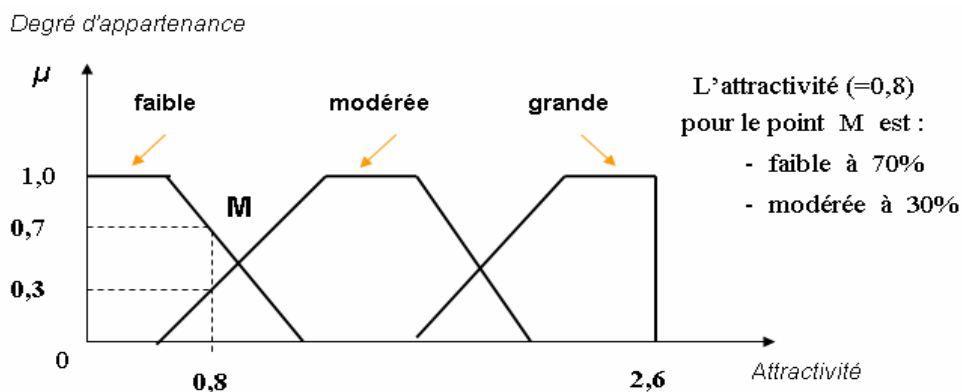


Figure 4-7. Représentation de l'attractivité

Les niveaux affectés aux variables floues sont présentés ci-après dans Tableau 4-1.

Tableau 4-1. Variables et valeurs floues pour l'"Affinité d'un site"

Variables d'entrée			Variable de sortie
Attractivité	Accessibilité	Coût	"Affinité"
grande	aisée	élevé	importante
modérée	moyenne	raisonnable	moyenne
faible	difficile	faible	faible

Afin de prendre en compte la perception des usagers par catégorie sociodémographique, les règles de décision sont définies en utilisant le principe de "l'expérience des experts". Une table de vérité a été établie par notre groupe de travail pour la catégorie "étudiants" (Figure 4-8).

ACCESSIBILITE		facile			moyenne			difficile		
DISTANCE		près	milieu	loin	près	milieu	loin	près	milieu	loin
ATTRACTIVITE	faible									
	moyenne									
	forte									

AFFINITE : très forte moyenne faible

Figure 4-8. Table de vérité des règles pour déterminer le niveau d'affinité d'un site

Dans notre cas, une des règles "IF – THEN" est : si l'accessibilité est facile, et si le coût lié à l'éloignement du site est élevé (la distance origine-destination est importante) et si l'attractivité est moyenne, alors l'affinité est "**moyenne**". L'étape d'inférence permet de prendre en considération toutes les règles "IF - THEN" qui amènent au même niveau de l'affinité et la défuzzification se fait selon la méthode des moyennes (voir annexe Anx. F-3).

Avant tout emploi de cette approche, se pose bien sûr le problème de la quantification des variables d'entrée sous forme crisp : le coût, l'accessibilité, l'attractivité. La variable floue "coût" est associée à la distance entre l'origine et la destination. Elle est renseignée à l'aide des coordonnées des points d'origine et destination (chemin le plus court, pour l'instant). La plage choisie pour la fuzzification va de 0 à 16 km (choix arbitraire lié à l'étendue de la ville de La Rochelle).

Quant à l'attractivité et à l'accessibilité, elles seront modélisées pour chaque catégorie sociale d'individus par l'approche basée sur les plans orthogonaux et le modèle de Vigier. Au

lieu de développer diverses fonctions empiriques ou de chercher un modèle "universel", nous proposons de prendre en considération la perception des personnes intéressées par l'accessibilité et l'attractivité, c'est-à-dire les "bénéficiaires". Ainsi, plusieurs modèles d'accessibilité et d'attractivité peuvent être développés, selon les catégories sociodémographiques aussi bien que selon les variables dont le régulateur souhaite tester les effets dans une ville donnée.

Lors de nos études, ces modèles ont été élaborés pour la catégorie "étudiants" et les sous catégories "hommes" et "femmes".

Par rapport aux étapes de mise en œuvre d'un modèle décisionnel, présentées dans *Figure 3-10*, la procédure informatique s'est enrichie avec des phases associées à la définition de la réponse « affinité ». Les communications sont schématiquement présentées dans *Figure 4-9* (uniquement pour l'étape de choix préliminaire, pour le premier déplacement). La procédure informatique pour le choix de la table orthogonale fractionnaire est assurée par l'agent "pexavvi".

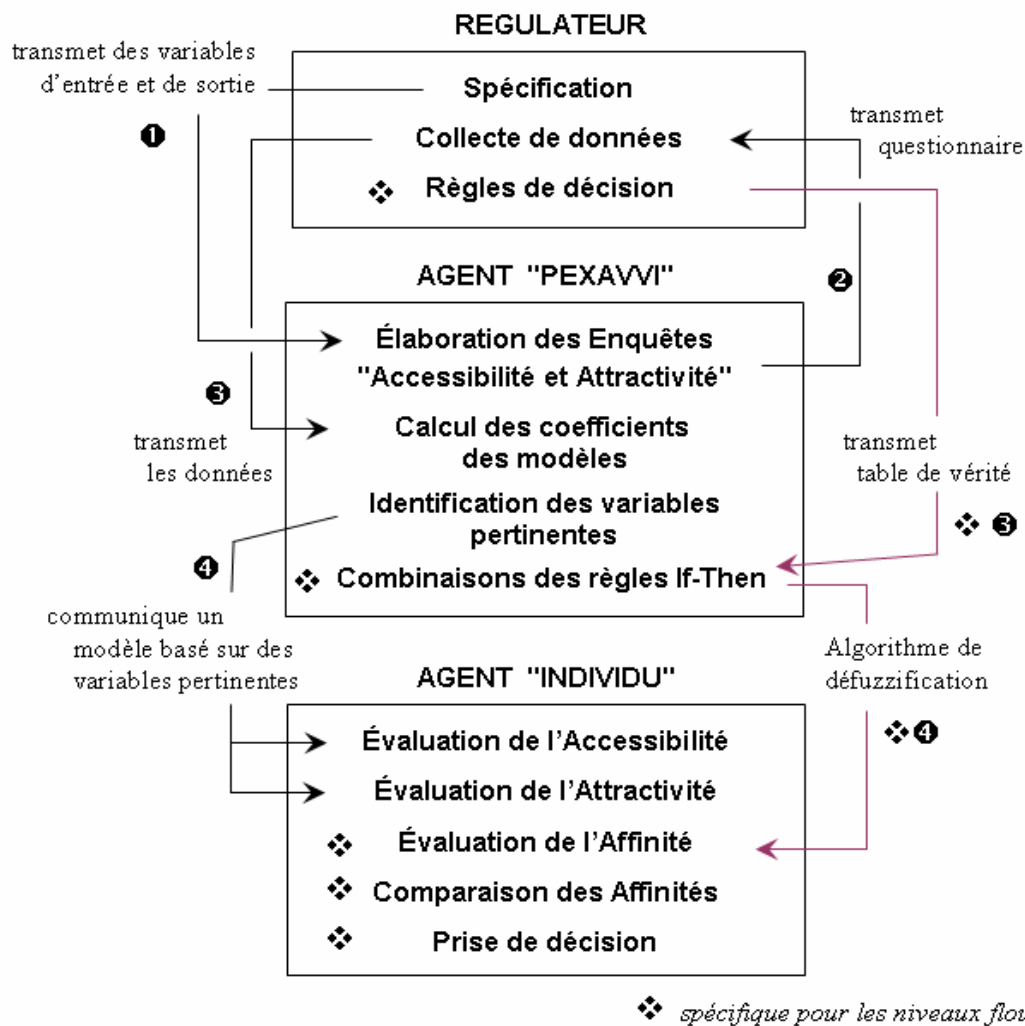


Figure 4-9. Architecture d'une démarche décisionnelle avec des niveaux flous

4.3.3 Choix d'une destination pour une activité multi sites à La Rochelle

4.3.3.A Modèle de choix préliminaire d'une destination

4.3.3.A.1 Accessibilité à un site

Les variables testées sont : le nombre de routes (**N**), l'écoulement du trafic (**E**), la dimension de la route (**D**), la possibilité de stationnement (**P**), la signalisation (**S**). Les interactions pressenties sont **ED** (écoulement - dimension de la route) et **ES** (écoulement - signalisation). Etant donné qu'il s'agit de comparer des **alternatives homogènes**, la réponse est donc sous forme de scores (plage 0-3).

Les détails sont fournis en **annexe Anx. F-1**.

Suite à l'analyse de la variance, la part déterministe du modèle réduit illustrant la perception de l'accessibilité pour les agents "étudiants" s'écrit comme suit :

- pour les hommes ayant en moyenne 23 ans :

$$Y = 1,244 + (0,544 \quad -0,544)E + (0,406 \quad -0,406)P + (0,281 \quad -0,281)S$$

- pour les femmes ayant un âge proche :

$$Y = 1,175 + (0,275 \quad -0,275)E + (0,350 \quad -0,350)D + (0,525 \quad -0,525)P + \begin{pmatrix} 0,125 & 0,125 \\ -0,125 & 0,125 \end{pmatrix} ED$$

On peut constater qu'il s'agit de deux modèles différents, à la fois par les valeurs des coefficients de variables significatives communes, et par les variables proprement-dites qui affectent la perception de l'accessibilité en fonction du sexe des personnes.

Il en résulte une perception différente des agents "individus" à travers :

- la différence entre les variables les plus significatives : L'agent du sexe masculin au volant d'un véhicule aura besoin de connaître des informations sur l'écoulement du trafic, les disponibilités des parkings et la qualité de la signalisation. L'agent du sexe féminin au volant s'intéressera plutôt à la largeur de la route qu'à la signalisation, ce qui peut trouver son explication dans le sentiment de sécurité lors du déplacement. Le modèle contient également l'effet de l'interaction entre l'écoulement du trafic et la largeur de la route.
- L'importance relative différente des variables : Pour l'agent du sexe masculin, la variable la plus significative est l'écoulement, alors que pour la femme c'est la possibilité de stationner facilement.

4.3.3.A.2 Attractivité d'un site

Un modèle similaire a été élaboré pour modéliser la perception de l'attractivité d'un site (**annexe Anx. F-2**) et ceci, pour trois modes de transport (bus, voiture, vélo).

Les variables testées sont : la possibilité de stationnement par rapport à la destination (**S**), le

prix des produits ou service (**P**), la variété des services (**V**), l'accès au site (**A**) et la mobilité dans le site (**M**).

Les modèles réduits présentés ci-dessous (pour la sous-catégorie « hommes ») montrent une forte hétérogénéité de préférences :

- **Pour le bus :** $Y_{bus} = 1.27 + (0.18 \quad -0.18)S + (0.31 \quad -0.31)P + (-0.24 \quad 0.24)V$
- **Pour le vélo :** $Y_{vélo} = 0.95 + (0.36 \quad -0.36)S + (0.26 \quad -0.26)P + (-0.23 \quad 0.23)V$
- **Pour la voiture :** $Y_{voiture} = 1.18 + (0.46 \quad -0.46)P + (0.29 \quad -0.29)A$

Il en résulte un comportement différent des agents "individus" à travers :

- la différence entre les variables les plus significatives : pour le bus et le vélo, les seules variables significatives sont la possibilité de stationnement, les prix des produits ou des services et la variété des services. Pour la voiture, seules les prix des produits ou services et la facilité d'accès au site affectent leur choix
- L'importance relative différente des variables : même dans le cas d'alternatives dont le choix est géré par les mêmes variables (bus et vélo), leur importance est différente ; le stationnement est la variable la plus importante en vélo, alors que les prix sont primordiaux pour le déplacement en bus.

Les niveaux des variables significatives dont a besoin chaque agent pour prendre sa décision se trouvent respectivement dans les modules infrastructure et aménagement du territoire. Nous avons utilisé lors de nos travaux uniquement le modèle réduit qui correspond à l'attractivité en voiture (pour nos travaux sur le stationnement), afin de déterminer les variables à renseigner auprès de l'agent "étudiant" et les valeurs minimales et maximales de l'attractivité nécessaires à la fuzzification de l'attractivité qui, tout comme l'accessibilité, contribue au calcul de l'affinité pour un site.

4.3.3.A.3 "Affinité pour un site"

Les plages des variables à fuzzifier s'étalent dans ce cas entre les valeurs minimales et maximales obtenues à l'aide des modèles réduits (par exemple mini.= 0,013 et maxi.= 2,475 pour l'accessibilité perçue par les hommes). Cela permet d'attribuer des représentations trapézoïdales et de trouver les degrés d'appartenance des deux variables (accessibilité et attractivité). Le résultat obtenu après inférence est converti en une variable numérique (selon **annexe Anx. F-3**).

Le résultat obtenu après défuzzification est une valeur relative qui a valeur de score. L'agent "étudiant-conducteur" va comparer les affinités correspondantes à tous les sites où l'activité flexible prévue peut être effectuée et se rendra au site ayant la plus forte affinité.

4.3.3.B Modèle évolutif concernant le choix d'une destination

4.3.3.B.1 Apprentissage individuel

Lors de son premier trajet, chaque agent "étudiant" (selon son genre) dispose d'un modèle réduit transmis par l'agent "pexavvi"; le modèle contient uniquement les variables significatives associées à la catégorie sociodémographique à laquelle appartient l'agent. Cela ne veut pas dire que tous les étudiants vont choisir la même destination, compte tenu du fait que leur domicile est différent (donc le nombre de routes, la dimension de la route, ...). Ce ne sont que leurs préférences qui sont similaires.

Avec l'introduction des variables externes (plans croisés contenant, par exemple, le degré de congestion lors du trajet, information en temps réel ...), il est envisageable de suivre les effets des interactions inter agents sur la perception de l'attractivité, de l'accessibilité et donc de l'affinité d'un site. Cela peut se traduire par un changement de classements des sites pour le prochain trajet.

Lorsque le modèle de perception sera intégré au niveau de notre simulateur, à l'aide de ses senseurs (capteurs de perception), l'agent "individu" pourra estimer les conditions pour le trajet : avec ou sans informations en temps réel, avec ou pas d'incident de trafic, dans de bonnes ou mauvaises conditions d'accessibilité. Dans cette application, les niveaux des variables du plan secondaire peuvent être renseignés à l'agent "individu" comme suit :

- **information** : concerne le nombre de panneaux d'indications prévus et aperçus ou des informations en temps réel (SIG, téléphone, ...) ; suite au déplacement, si le nombre est inférieur, alors le niveau est "non".
- **sécurité** : concerne le nombre d'incidents sur le trajet (les collisions par exemple).
- **congestion** : si la vitesse moyenne du trajet est inférieure à une certaine vitesse (fonction de la distance et du temps prévu fonction des limitations), alors le niveau est "oui".

4.3.3.B.2 Apprentissage collectif

- dans un contexte statique transport-urbanisme, la réactualisation des préférences passe par le renouvellement de la base de données (réponses collectées), ce qui ne suppose pas forcément le remplacement des réponses anciennes. Le modèle décisionnel peut changer fortement en termes de variables significatives et/ou de poids des variables. Ce type d'apprentissage se prête si le régulateur considère que des changements exogènes ont pu changer la perception de l'attractivité et/ou de l'accessibilité d'un site (niveau de vie, type de stationnement, ...).
- dans un contexte dynamique transport-urbanisme, dans la mesure où les sites sont comparés deux à deux, l'ajout ou la suppression d'une alternative (site) n'induit aucun coût calculatoire supplémentaire (à part les spécifications au niveau des modules trafic ou occupation du sol qui sont à la charge du régulateur). Pour rappel, voir le paragraphe §3.6.6 pour la comparaison des alternatives homogènes.

Dans cet exemple, le régulateur s'est intéressé à la catégorie "étudiants" à La Rochelle ; il n'est pas exclu que pour la catégorie "travailleurs", par exemple, le modèle soit complètement différent (en termes de poids de variables, voire les variables significatives elles-mêmes). Il n'est pas exclu non plus que le régulateur souhaite tester des effets de variables différentes selon la catégorie sociodémographique.

On comprend bien que dans une autre ville, pour les mêmes catégories et les mêmes variables et interactions testées, les valeurs "seuil" peuvent être fortement différentes (le nombre de voies, le nombre de routes, etc.). De même, une discrétisation différente par catégories peut être envisagée.

4.3.3.C Validation (partielle) du modèle : comparaison avec un système réel

Pour valider le modèle, nous avons utilisé la base de données de LISELEC à La Rochelle. Le système LISELEC propose, après avoir contracté un abonnement, le libre service, 24h/24, 7j/7, d'une flotte de 50 voitures électriques. Les abonnés peuvent emprunter et restituer les voitures sur 7 stations (ou parkings réservés) réparties sur la commune. Pour la facturation et la gestion du système, le dispositif électronique et informatique permet de connaître en détail tous les mouvements de chacun des véhicules, des abonnés avec les caractéristiques détaillées de chacun d'entre eux (identité, adresse, sexe, âge, ...) (voir [Boussier2003] pour une description détaillée de LISELEC.).

Nous partons de l'hypothèse que le nombre de trajets, effectués par des individus de la catégorie étudiant au départ d'un parking "car-sharing" dans les créneaux horaires 7h-10h, est proportionnel au nombre d'abonnés habitant au voisinage d'un parking "car-sharing" (distance < 300 m). Cette corrélation a été mise en évidence par l'Analyse en Composantes Principales (utilisation du logiciel S-Plus). Selon la zone d'origine de chaque agent, ce dernier choisit une destination pour mener des activités flexibles en fonction du classement des affinités. Nous proposons de relier le nombre de trajets entre les zones i et j à l'affinité ressentie pour un site d'une façon simple.

Équation 4-1 :

$$\theta'_{ij} = k_j A_{ij} n_i$$

avec n_i étant le nombre d'agents "individu-conducteur" qui habitent au voisinage du parking i et effectuent le trajet $i-j$; A_{ij} étant l'affinité pour la zone j et k qui est une constante à calibrer.

Dans *Figure 4-10*, nous avons montré un exemple de distribution des flux entre le parking S_7 et les six autres (données stockées tous les jours pendant un an entre 7 h et 10 h). A nombre égal d'abonnés, on peut remarquer, à une constante près, qu'il y a une bonne concordance entre les flux mesurés au départ du parking S_7 et l'affinité "calculée" pour les zones des autres parkings.

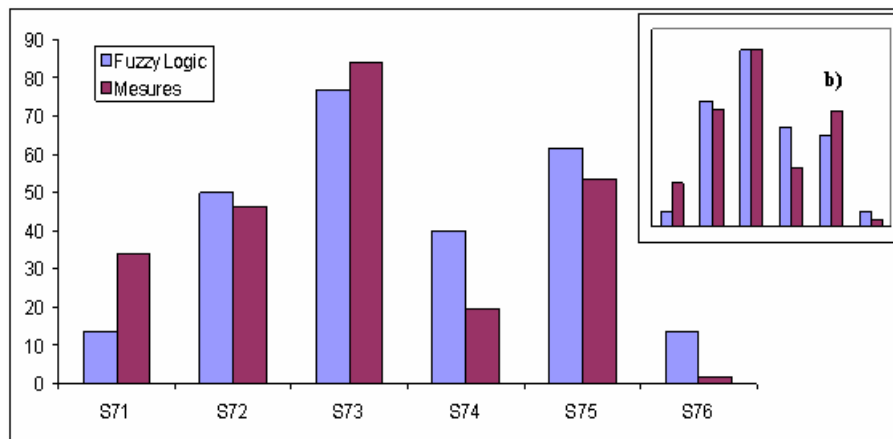


Figure 4-10. Comparatif des résultats "calculés" et les données mesurées pour le nombre de trajets entre parkings (figure b : jours du week-end)

4.4 Choix d'un mode de transport pour une certaine catégorie sociodémographique et pour une certaine ville

4.4.1 La perception de la qualité d'un mode de transport

Le choix primordial dans tout modèle de déplacement est lié au mode de transport, permettant aux agents "individus" de transiter entre les différentes zones au cours des différentes tournées, et d'effectuer leurs activités. Dans le cas où l'agent décide d'emprunter la voiture, se posera le problème de stationnement.

Le choix modal d'un usager de la route a suscité une littérature très abondante (voir [DePalma2001], [Hess2005] pour une analyse de synthèse) et, généralement, les variables expliquant le choix modal d'un usager sont regroupées selon les trois catégories ci-après :

- caractéristiques de l'usager (revenu d'un ménage, nombre de personnes d'un ménage, nombre de voitures disponibles, ...),
- caractéristiques du déplacement (distance du trajet, heure de départ, ...),
- caractéristiques du mode de transport (coûts, liaisons avec un autre mode, vitesse de déplacement, ...).

Les modèles existants peuvent être classés selon Figure 4-11 [Szeto2005].

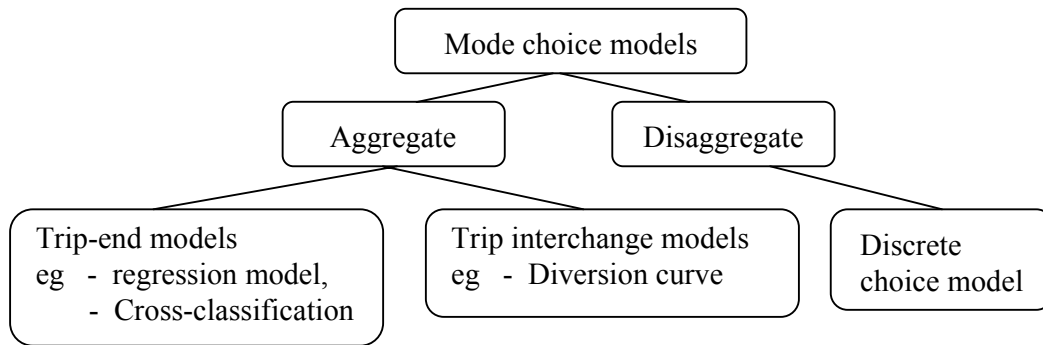


Figure 4-11. Panorama des modèles existants de choix modal [Szeto2005]

4.4.1.A Les modèles agrégés

Ils sont basés sur les informations inter zonales. Dans la plupart des modèles, les déplacements sont distribués d'une façon probabiliste par mode, à leur tour distribués par destination, et sont ensuite répartis entre les voies rapides et le réseau interne d'une ville. Ce type de modèles est tout d'abord applicable pour des villes de petite taille où le trafic de transit est négligeable. Ils n'ont pas la prétention de donner une vue réaliste pour une ville autre que celle pour laquelle ils ont été calibrés. Souvent dans certains travaux [Shifan2003], la répartition modale est décomposée en deux sous-étapes hiérarchiques. La première étape consiste à déterminer la part des modes légers (marche à pied essentiellement et vélo), avant de procéder au partage entre voiture et transports collectifs. Une fois les déplacements en mode de transports légers déduits du total des déplacements internes à chacune des zones, un partage est opéré entre les modes motorisés (voiture et transports collectifs).

La procédure de calibrage du modèle aboutit alors à une estimation des différents paramètres constitutifs de l'utilité respective de chaque mode de transport. Le calibrage du modèle donne les valeurs moyennes du temps sur l'échantillon pour chaque mode de transport en situation actuelle.

4.4.1.B Les modèles désagrégés

Ils sont beaucoup plus appropriés à une approche multi agents car ils utilisent les spécificités d'un individu ou d'un ménage. Ce sont souvent des modèles de type Logit désagrégés pour lesquels les entités cherchent à maximiser une fonction utilité [Kim2004], [Koppelman2005]. Au mieux, les modèles de choix modal sont calibrés à partir d'observations individuelles issues de l'enquête. Les modèles dits désagrégés comprennent les caractéristiques individuelles de la personne et les différentes variables de l'offre de transport. Les modèles Logit utilisés précédemment sont très fréquents dans la littérature, cependant il existe deux problèmes qui les rendent peu intéressants pour notre application.

- ***Hypothèse restrictive associée à la difficulté d'intégrer une nouvelle offre de transport***

C'est l'hypothèse bien connue du modèle Logit - l'IIA (Independence of Irrelevant Alternatives, qu'on peut traduire approximativement par « indépendance par rapport aux choix non retenus ») [Ben-Akiva1998]. Cette hypothèse entraîne que la prise en compte d'une

nouvelle option de choix (ou l'élimination d'une option) change la probabilité des autres options de choix de telle sorte que le rapport des probabilités reste inchangé. Dans certaines situations, elle est trop restrictive pour modéliser correctement un comportement, comme le montre l'exemple suivant, connu sous l'appellation « bus bleu / bus rouge », développé par Debreu [Smale1974].

Considérons que, pour aller d'un endroit à un autre, les individus aient le choix entre la voiture et un bus bleu, et supposons que ce choix leur soit indifférent. On a donc une même probabilité pour les deux. Considérons maintenant que la compagnie de bus introduit des bus rouges, et supposons que les individus ne soient pas sensibles à la couleur. Le ratio des probabilités, qui ne dépend pas des autres choix possibles, reste égal à 1 et les probabilités se redistribuent sur les trois modes. Or, puisque les individus ne préfèrent pas la voiture au bus et qu'ils sont indifférents à la couleur du bus, on a un jeu de probabilités qui surestime la probabilité de prendre le bus et sous-estime la probabilité de prendre la voiture.

Dans cet exemple, la propriété IIA n'est pas valide parce qu'en réalité deux des choix proposés sont très proches l'un de l'autre. Ainsi, il préfère d'une manière générale voyager en bus (car il se fatigue moins, peut utiliser son temps de transport pour lire, ...) et arbitre entre le bleu et le rouge selon ses goûts de couleur.

Les modèles logit dits emboîtés résolvent en partie ce problème [Ben-Akiva1998] mais cela reste insuffisant pour une redistribution réaliste des déplacements par mode de transport surtout pour l'introduction de nouveaux modes.

- ***Hypothèse restrictive d'unicité des paramètres sur l'ensemble des usagers***

Deux usagers identiques (par rapport aux variables observées) doivent avoir le même vecteur de paramètres. On conçoit parfaitement que cette hypothèse soit restrictive. En effet, les usagers ne présentent pas les mêmes paramètres comportementaux, ces derniers étant naturellement distribués dans la population. Ces variables ne font pas intervenir la qualité d'un trajet comme par exemple le bien-être des voyageurs à travers les concepts de confort, sécurité ou encore le degré d'importance d'une activité à mener. Des travaux récents font intervenir les revenus. Lorsque le revenu de l'individu devient suffisamment élevé, toutes les probabilités de choix deviennent indépendantes du coût des modes de transport. En effet, plus l'utilisateur est riche, moins il est exigeant sur le coût (monétaire) du mode et plus il s'avère préoccupé par les caractéristiques relatives à la qualité (en particulier le temps de trajet). Ceci est une façon de départager les usagers par des variables pertinentes. C'est exactement le point de vue que nous avons adopté jusqu'à présent, mais avec d'autres bases algorithmiques.

- ***Hypothèse restrictive associée au caractère non partagé des choix modaux***

Devant la difficulté de réaliser un calibrage désagrégé, il est souvent procédé à une segmentation de la population qui voyage en fonction de ses caractéristiques. La segmentation triviale est relative au motif du déplacement mais d'autres dimensions peuvent être introduites comme la taille du groupe, la durée du voyage, etc. Ce qui est couramment négligé est le partage d'un mode de transport (par exemple la voiture privée) par les membres d'un groupe, aspect très handicapant pour la représentation d'une distribution réaliste par modes. Le paradigme multi agents s'y prête bien avec la procédure de négociation au sein d'un groupe.

4.4.2 Négociation pour partage d'un mode de transport

4.4.2.A Processus d'élaboration de l'agenda

Dans l'élaboration de modèles à base d'activités, l'élaboration d'un agenda d'un agent "individu" est un sujet à part entière. Les contraintes peuvent inclure des contraintes modales (liées à la disponibilité et à l'accessibilité modales), des programmes obligatoires (travail, école), le ménage et les contraintes personnelles (engagements du ménage, par exemple déposer et "ramasser" les enfants à l'école) et contraintes institutionnelles (heures d'ouverture des établissements). Comme précisé dans le chapitre 1, il existe des outils de planification (par exemple, STARCHILD) qui sont opérationnels et faciles à intégrer au niveau de notre simulateur.

Nous nous intéressons à l'élaboration d'un agenda uniquement dans la mesure où cela peut concerner le choix d'un mode de transport et afin d'intégrer une option de covoiturage. Pour la plupart des modèles que nous avons rencontrés dans la littérature, l'unité de l'analyse typiquement utilisée dans les modèles basés sur les activités est le jour de la semaine. La raison est qu'il y a peu de variations selon les jours de la semaine. Mais des travaux [Axhausen2002] se concentrant sur des aspects simples (tels que la fréquence de déplacement, le nombre et le type d'arrêts effectués le soir/matin et leurs permutations) ont montré la variabilité tout à fait substantielle selon les jours de la semaine (voir [Pas1987], [Jou1997], [Srinivasan2002]).

Le diagramme d'activités (Figure 4-12) décrit notre point de vue pour le processus d'exécution de l'agenda d'un agent "individu".

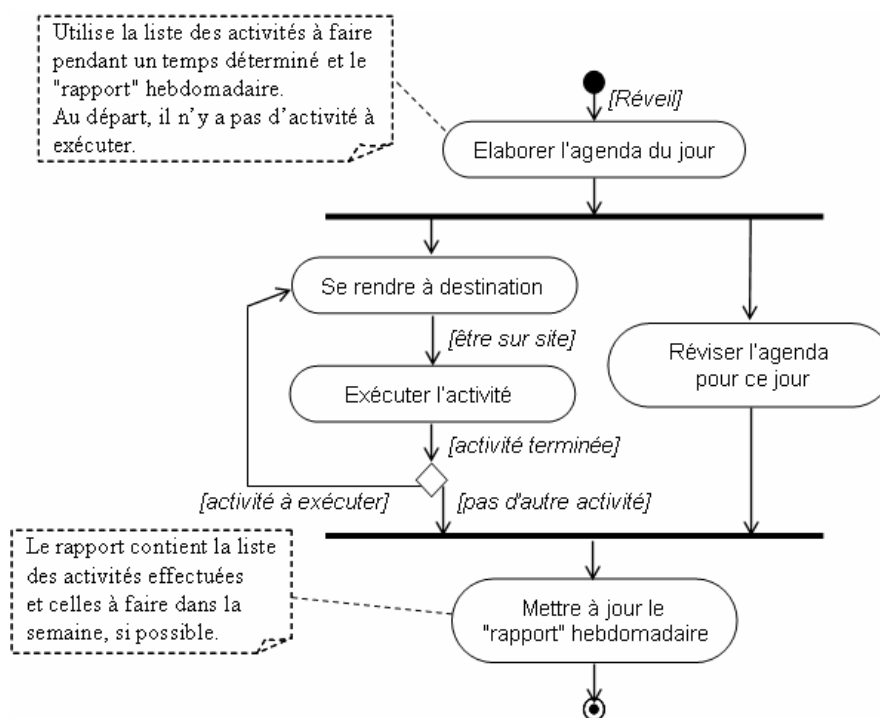


Figure 4-12. Diagramme d'activités du processus d'exécution de l'agenda

Nous proposons un agenda hebdomadaire sous la forme de 5 jours ouvrés et 2 jours pour le week-end. L'intérêt d'établir un agenda pour une semaine n'est pas seulement de tenir compte de l'hétérogénéité des activités d'un jour à l'autre mais surtout de pouvoir reporter à un autre jour certaines activités flexibles :

- en cas de manque de temps pour effectuer l'activité.
- l'impossibilité de trouver une place de stationnement dans un espace et un intervalle de temps jugés raisonnables.

Les individus dans des ménages agissent les uns sur les autres pour satisfaire les objectifs personnels et les nécessités du ménage [De Lapparent2004], [Pribyl2005]. Cet aspect est très important quand on sait que, par exemple en Ile De France, 30% des familles n'ont qu'une seule voiture. Ne pas les prendre en compte peut avoir comme conséquence des prévisions incorrectes pour des changements dus à l'urbanisme, aux systèmes de transport, et aux caractéristiques démographiques. Cependant, il y a eu récemment quelques efforts pour modéliser des interactions interpersonnelles de manière plus explicite, pour la plupart, à base des équations structurales. Dans un autre registre, Rindt [Rindt2003] développe un modèle multi agents de négociation, mais il concerne uniquement le partage des activités et non pas l'aspect partage du mode de transport.

Ci-après *Figure 4-13* présente notre vue concernant le processus général d'élaboration de l'agenda, chaque agent "individu" ayant un agenda.

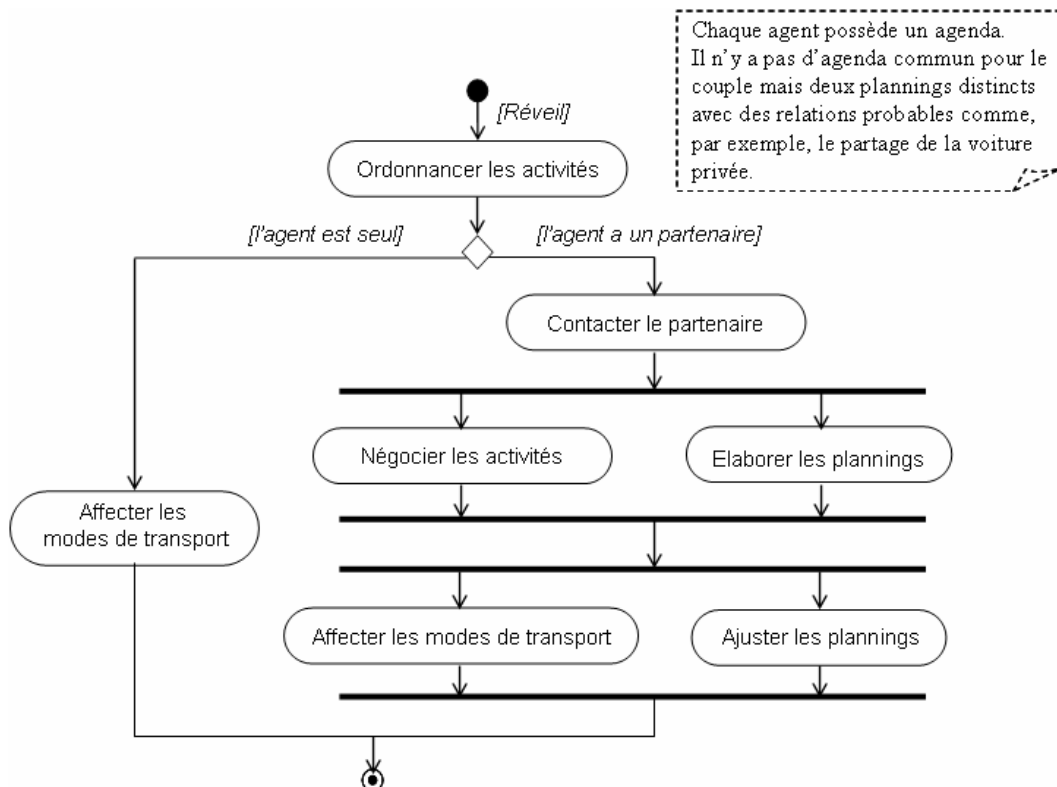


Figure 4-13. Diagramme du processus d'élaboration de l'agenda final avec ou sans négociation

Nous proposons de nous placer dans le contexte d'un ménage ayant des activités flexibles (magasins, cinéma, etc.) pouvant s'effectuer ensemble, en négociant le partage d'un véhicule. Chaque agent élabore son propre agenda et ensuite négocie avec son potentiel partenaire (Figure 4-14).

Le partenaire fait partie du ménage (nom et adresse identiques), ou bien est un voisin (adresse proche du domicile) ou bien est un collègue de travail (adresse employeur identique). Tous ces agents "individus" forment des groupes au sein desquels des négociations sont possibles. Un agent "individu" peut faire partie de plusieurs groupes ou aucun. Ceci signifie que les agents d'un groupe ne sont pas forcément issus de la même catégorie sociodémographique. Aussi, les modèles décisionnel et d'apprentissage peuvent ne pas être les mêmes.

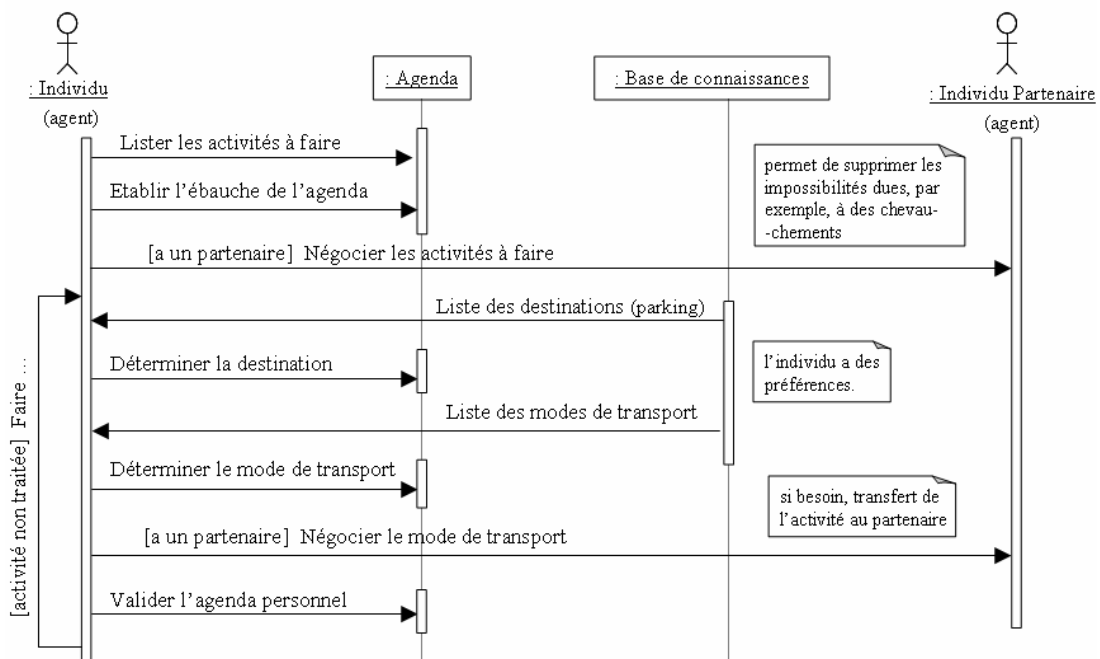


Diagramme de séquence du cas d'utilisation « Agenda individuel hebdomadaire »

Figure 4-14. Interactions entre partenaires concernant l'élaboration de l'agenda individuel hebdomadaire

4.4.2.B Processus de négociation pour le covoiturage

4.4.2.B.1 Réseaux de Petri modélisant le processus de négociation

L'interaction entre deux partenaires est modélisée à l'aide des deux réseaux de Petri (RdP) [Etraillier2002], [Bourdon2002] et présentée dans Figure 4-15. Ces deux RdPs sont destinés à chaque agent "individu". L'agent A est initiateur de la demande et B est le correspondant.

Cette représentation nous permet de vérifier qu'un agent qui veut effectuer du partage de voiture doit faire une proposition à un autre qui, à son tour, peut accepter, refuser ou proposer

un arrangement. Cette négociation peut se faire au sein d'un ménage ou par e-mail (ou autres systèmes de communication) envoyé à quelqu'un de son groupe. Un agent peut être simultanément en interaction avec plusieurs agents (par exemple, être en train de converser par téléphone et conduire un véhicule). Ceci concerne le problème de la définition des espaces d'interaction, sujet n'étant pas traité dans le cadre de nos travaux de thèse.

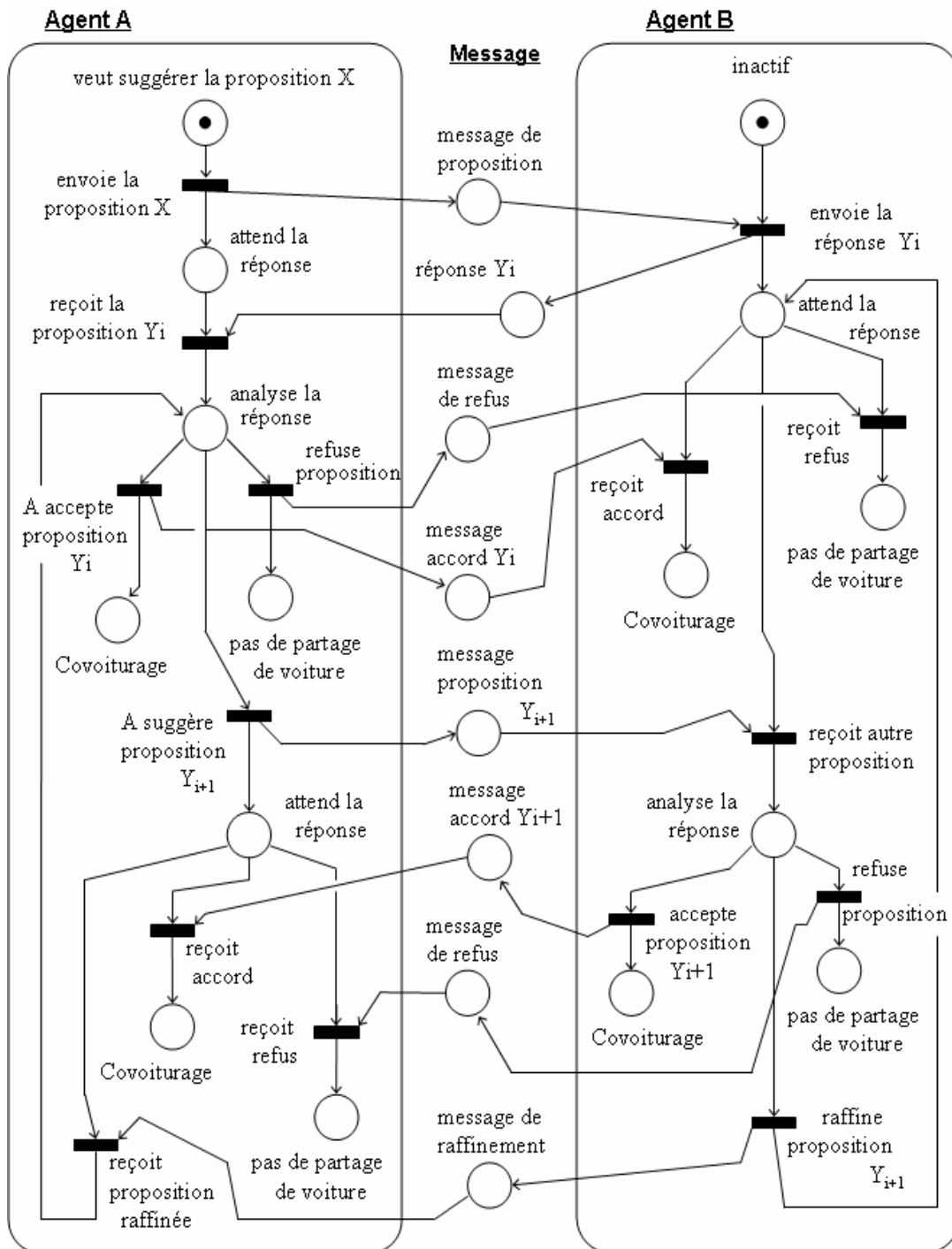


Figure 4-15. Interactions entre deux agents pour la décision de covoiturage

4.4.2.B.2 RdP colorés du processus de négociation de covoiturage

Ayant à faire à plusieurs agents, nous allons nommer chaque place et transition afin de pouvoir construire plus facilement un modèle de réseaux de Petri colorés ([Etraillier2002], voir annexe Anx. B-4) pour satisfaire le fonctionnement souhaité.

4.4.2.B.3 Etablissement des propriétés

Des interactions ne pouvant jamais avoir lieu entre certains agents "individu" (deux personnes totalement étrangères), la modélisation va être améliorée en considérant les agents "individus" par groupe. Tout d'abord, un agent A_i va initier une négociation avec un agent A_j (qui est considéré comme le correspondant) appartenant à son groupe du premier rang.

Un agent "individu" faisant partie d'un groupe, *a fortiori* de plusieurs, les groupes sont composés de ceux du domicile (nom et adresse), du voisinage (adresses proches) et des collègues (adresse employeur identique). Voyons donc dans *Figure 4-16* ce que cela implique lorsqu'un agent "individu" appartient, par exemple, à trois groupes.

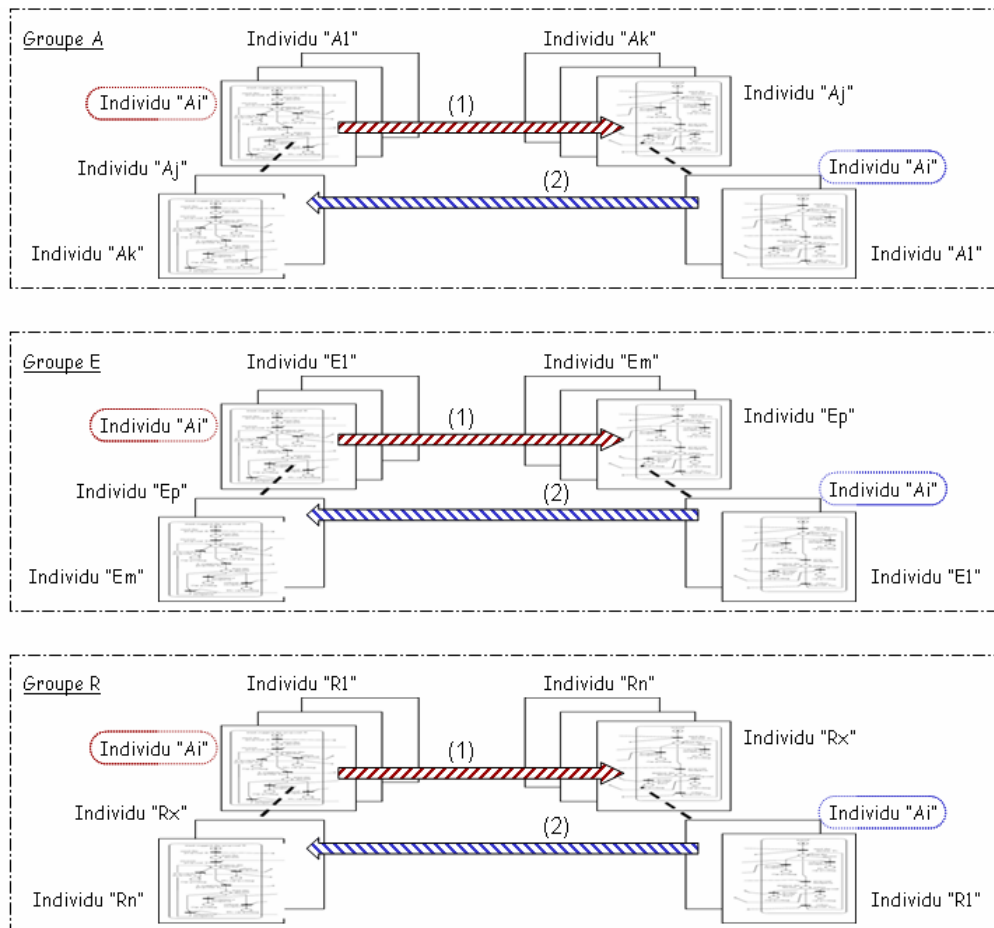


Figure 4-16. RdP : Interactions entre agents "individus" de différents groupes

Cette représentation nous montre clairement, que l'agent A_i pourrait être initiateur de plusieurs négociations en simultanée à condition que cela ne soit pas avec un autre agent au sein d'un seul groupe. La même remarque peut être formulée pour le côté "correspondant". Puisque nous considérons que la page "initiateur" et celle de "correspondant" sont les mêmes quel que soit le groupe (autrement formulé, un agent "individu" a une page "initiateur" et une page "correspondant"), alors un agent ne peut pas être initiateur de négociations avec plusieurs agents en même temps, quel que soit le groupe ; idem pour le correspondant. Nous déclarons qu'il est inutile qu'un agent soit initiateur d'une négociation avec lui-même, et donc correspondant de lui-même. Cet agent n'a pas besoin d'utiliser un processus d'échange de messages pour connaître ses informations. Un agent "correspondant" d'un autre ne doit pas pouvoir devenir "initiateur" avec l'agent ayant ouvert cette négociation. Un seul canal d'échange de messages suffit.

Pour simplifier et diminuer le temps (cela ne peut aller que dans le bon sens) pour l'élaboration des agendas personnels suite à des négociations entre partenaires, nous limitons volontairement le nombre de processus d'échange. Un agent initiant une négociation ne pourra pas être correspondant d'une autre négociation et vice-versa, un agent "correspondant" ne pourra pas initier une autre négociation. Chacun devra attendre la fin d'un processus de négociations pour pouvoir en démarrer un autre. Cette hypothèse n'est pas très éloignée de la réalité. Des engagements sont pris, l'agent contacté ou souhaitant négocier avec un autre sera contraint par des engagements précédents qui ne seront peut-être pas les plus favorables. Nous ne sommes pas en train de rechercher un optimum mais avoir des agents "individus" qui négocient pour faire ou pas du covoiturage à un instant donné et fonction de leurs informations. Le diagramme d'états montre les deux états principaux permettant cette exclusion (Figure 4-17).

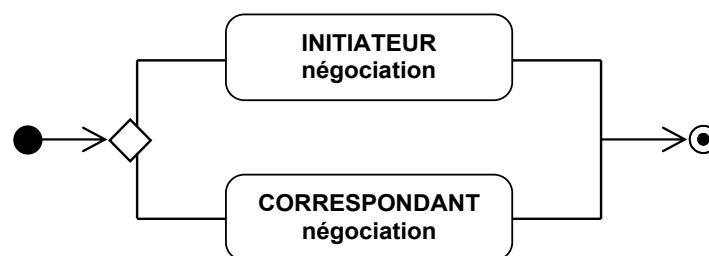


Figure 4-17. Etats possibles d'un agent "individu" en phase de négociation

4.4.2.B.4 Propriétés des réseaux de Petri colorés à vérifier

N'ayant pas représenté certaines transitions (voir annexe Anx. B-4) et notre volonté n'étant pas de limiter à 1 le nombre de négociations durant les phases de simulation ou l'usage du simulateur, on veut une séquence infinie de franchissement ; ces réseaux de Petri seront donc **répétitifs**.

Il n'y a pas création de jetons donc pas de dépassement d'un nombre entier (borne), ces réseaux sont donc **bornés**. De plus ils sont **sains** car 1-bornés.

$$M(\text{II-DEB}) + M(\text{II-ATT}) + M(\text{II-ANA}) + M(\text{II-OK1}) + M(\text{II-NO1}) + M(\text{II-REV}) \\ + M(\text{II-OK2}) + M(\text{II-NO2}) = 1$$

$$M(\text{IC-REP}) + M(\text{IC-ATT}) + M(\text{IC-ANA}) + M(\text{IC-OK1}) + M(\text{IC-NO1}) + M(\text{IC-OK2}) + M(\text{IC-NO2}) = 1$$

Nos réseaux sont **vivants**, donc sans blocage, puisque toutes les transitions sont vivantes. Ils sont **non persistants** car le franchissement d'une transition empêche ceux des autres. Nos réseaux possèdent des **états d'accueil**, ils sont **réversibles** car il est toujours possible de revenir au marquage initial M_0 à partir de tout marquage M accessible à partir de M_0 .

$$M(\text{II-DEB})_k + M(\text{II-ATT})_k + M(\text{II-ANA})_k + M(\text{II-OK1})_k + M(\text{II-NO1})_k + M(\text{II-REV})_k + M(\text{II-OK2})_k + M(\text{II-NO2})_k + M(\text{IC-ATT})_k + M(\text{IC-ANA})_k + M(\text{IC-OK1})_k + M(\text{IC-NO1})_k + M(\text{IC-OK2})_k + M(\text{IC-NO2})_k = 1$$

$$M(\text{IC-REP})_k + M(\text{IC-ATT})_k + M(\text{IC-ANA})_k + M(\text{IC-OK1})_k + M(\text{IC-NO1})_k + M(\text{IC-OK2})_k + M(\text{IC-NO2})_k + M(\text{II-ATT})_k + M(\text{II-ANA})_k + M(\text{II-OK1})_k + M(\text{II-NO1})_k + M(\text{II-REV})_k + M(\text{II-OK2})_k + M(\text{II-NO2})_k = 1$$

Nous interdisons à un agent "individu", pouvant être initiateur ou correspondant d'une négociation, de pouvoir communiquer avec lui-même. Nous interdisons qu'un agent "individu" déjà en cours de négociation en tant que correspondant devienne initiateur de négociation avec l'agent étant en cours de négociation avec lui-même. Nous interdisons qu'un agent "individu" k déjà en cours de négociation puisse participer à une autre négociation. Cette dernière englobe les deux précédentes interdictions.

Comme propriétés fonctionnelles, nous pourrions vérifier que, lorsqu'un agent i est initiateur de négociation, l'agent j correspondant doit se trouver dans certains états pour le bon déroulement de la négociation :

- si $M(\text{II-ATT})_i = 1$ alors $M(\text{IC-REP})_j + M(\text{IC-ATT})_j = 1$
- si $M(\text{IC-ATT})_j = 1$ alors $M(\text{II-ATT})_i + M(\text{II-ANA})_i + M(\text{II-OK1})_i + M(\text{II-ON1})_i + M(\text{II-REV})_i = 1$
- si $M(\text{II-ANA})_i = 1$ alors $M(\text{IC-ATT})_j = 1$
- si $M(\text{II-OK1})_i = 1$ alors $M(\text{IC-ATT})_j + M(\text{IC-OK1})_j = 1$
- si $M(\text{II-NO1})_i = 1$ alors $M(\text{IC-ATT})_j + M(\text{IC-NO1})_j = 1$
- si $M(\text{II-REV})_i = 1$ alors $M(\text{IC-ATT})_j + M(\text{IC-ANA})_j + M(\text{IC-OK2})_j + M(\text{IC-NO2})_j = 1$
- si $M(\text{IC-ANA})_j = 1$ alors $M(\text{II-REV})_i = 1$
- si $M(\text{IC-OK2})_j = 1$ alors $M(\text{II-REV})_i + M(\text{II-OK2})_i = 1$
- si $M(\text{IC-NO2})_j = 1$ alors $M(\text{II-REV})_i + M(\text{II-NO2})_i = 1$

4.4.3 Apprentissage par partage d'expérience dans un choix modal

Le diagramme états-transitions (*Figure 4-18*) montre plusieurs scénarios amenant à un partage de voiture.

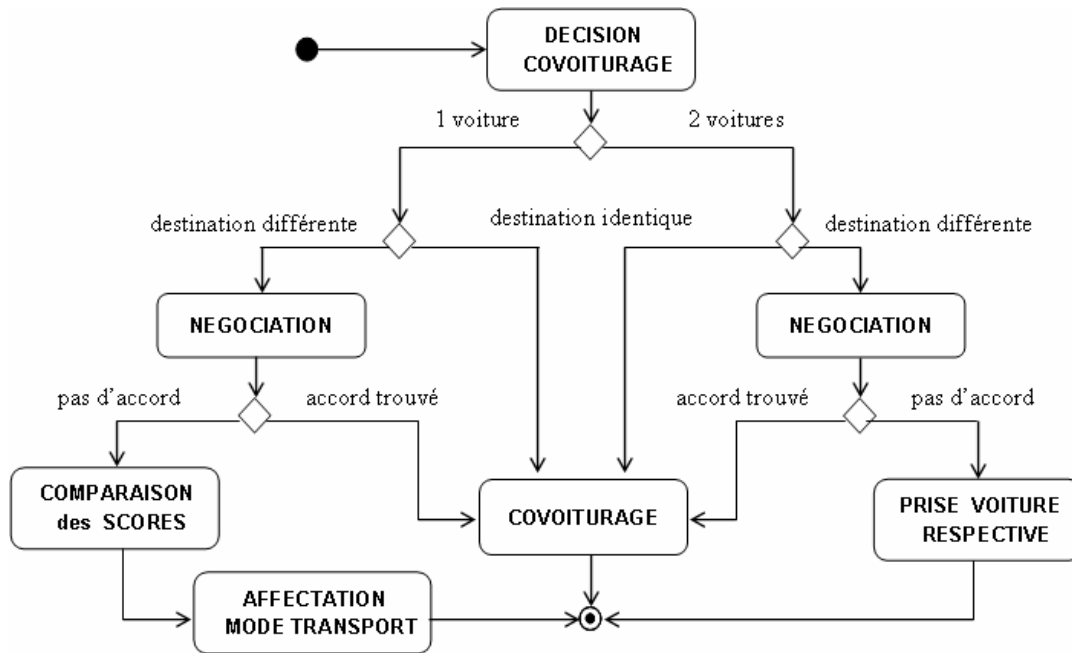


Figure 4-18. Scénarios amenant au covoiturage ou à un choix de déplacement individuel

Nous nous plaçons dans le cas où aucune contrainte horaire (départ ou retour) n'affecte la négociation de covoiturage. Ici, nous avons les cas de possession ou non d'un véhicule pour chacun des membres du ménage. Dans certaines situations (par exemple, les revenus), selon le résultat de la négociation, ils pourront faire du covoiturage alors qu'ils possèdent deux véhicules.

Discutons les cas où la proposition de faire du covoiturage est rejetée.

- **Il n'y a pas de destinations communes dans la journée et il n'y a qu'une voiture.**

Chaque agent doit se déplacer selon son agenda et pour une destination donnée. Les agents peuvent appartenir ou pas à la même catégorie sociodémographique ; les scénarios peuvent être ou pas identiques. Chaque agent calcule son score et classe les modes de transport. La voiture est "attribuée" selon une fonction (par exemple, le score le plus élevé désigne celui qui prend la voiture) à un des agents tandis que l'autre agent prend le mode de transport qu'il a placé en deuxième position, après redistribution des préférences (disparition d'une alternative, paragraphe §3.7.2.A). Pour une prochaine négociation correspondant aux mêmes scénarios, chaque agent aura exploité son mécanisme d'apprentissage individuel et ce sont les derniers scores qui sont employés en cas de conflit. Au stade actuel, la fonction pour l'attribution du véhicule est décrite par l'algorithme dans Figure 4-19 :

```
if score_voiture_agentA > score_voiture_agentB
then
  if score_mode2_agentA > score_mode2_agentB
  then
    AgentB = Affect_voiture()
  else
    AgentA = Affect_voiture()
  endif
else
  if score_voiture_agentA < score_voiture_agentB
  if score_mode2_agentA < score_mode2_agentB
  then
    AgentA = Affect_voiture()
  else
    AgentB = Affect_voiture()
  endif
  else
    Tirage_aléatoire_Affect_voiture( AgentA , AgentB )
  endif
endif
```

Figure 4-19. Algorithme de la fonction "Attribution de la voiture"

- **Les individus disposant de deux voitures ont des destinations communes.**

La négociation de partage de véhicule peut aboutir si les activités de la journée démarrent dans le même créneau horaire et qu'elles sont spatialement proches (valeurs à fixer). Sinon, dans le cas où les destinations sont différentes et à sites uniques, chaque agent prend sa voiture. Si les activités sont multisites et de même type (shopping, promenades, etc.), on peut envisager, pour un trajet dans le futur, un changement de décisions suite au partage d'expérience pouvant aboutir à un partage de voiture comme suit :

- En fin de trajet chaque agent recalcule son score selon la procédure d'apprentissage individuel. Il s'agit de réévaluer l'affinité pour le site qui sera dépendante de la nouvelle valeur de l'accessibilité calculée par apprentissage.
- Il n'existe que deux possibilités. Soient les conditions de trafic (les niveaux des bruits de fond placés dans le plan secondaire) ont été telles que l'agent est satisfait de son choix et retient le nouveau score pouvant être supérieur ou égal à celui calculé avant le trajet. Soit le score est diminué à cause d'un contexte défavorable lors du déplacement et c'est le score retenu pour un trajet similaire (obtenu par le modèle de Vigier).
- Lors de la prochaine procédure de négociation pour le covoiturage, une étape supplémentaire est introduite : comparaison des "degré d'insatisfaction" pour le trajet précédent.

Définissons comme degré d'insatisfaction le rapport suivant :

Équation 4-2 :

$$\gamma = \frac{S_{avant} - S_{après}}{S_{avant}} (\%)$$

avec respectivement S_{avant} et $S_{après}$ étant les scores associés à l'affinité pour un site avant et après déplacement.

Si $\gamma_A > \gamma_B$, la fois suivante (pour un niveau à fixer arbitrairement), les deux agents A et B pourraient envisager le covoiturage pour le prochain déplacement (au sein d'un même groupe mais quelle que soit la catégorie sociodémographique à laquelle ils appartiennent).

Nous allons voir dans un paragraphe suivant que, dans le cas d'un ménage, si le chauffeur est un homme ou une femme, le choix du parking de la destination commune peut ne pas être le même.

Le régulateur est informé, via l'agent "pexavvi" du nombre de covoiturages effectués, ce qui permet de suivre, dans le temps, les effets des changements urbanisme-transport sur ce mode fortement encouragé ces dernières années par les autorités locales.

4.4.4 Choix modal à La Rochelle

4.4.4.A Modèle de choix préliminaire pour le mode de transport

Nous rappelons que l'idée de base est que les modèles comportementaux obtenus n'ont pas la prétention d'être des modèles "universels" mais propres à une certaine catégorie d'agents "individus" et à l'image de la perception des conditions trafic d'une certaine ville. Les modes de transport choisis comme alternatives potentielles sont : **le déplacement à pied, le vélo, la voiture (ou automobile), le transport public (bus de ville)**.

Les variables testées pour la catégorie étudiants de La Rochelle ont été respectivement : la météo, le risque des incidents, la distance entre origine et destination, les conditions de trajet (avec ou sans bagages) et le temps disponible (avec l'introduction par défaut des 2 interactions : météo/conditions de trajet) (voir **annexe Anx. F-4**).

On peut se demander pourquoi la facilité de stationnement n'est pas testée comme variable interne. En fait, il s'agit d'**alternatives hétérogènes** ; aussi la variable doit être commune aux quatre alternatives. Par exemple, pour le bus de ville, cette variable n'a aucun sens. Egalement, c'est un choix fait selon les spécificités de la ville et de la perception de la catégorie sociale "étudiant". Un autre utilisateur du simulateur est libre de choisir les variables dont il veut tester l'effet. A la place des conditions météorologiques (météo), pourquoi ne pas mettre l'heure de départ, etc.

Les enquêtes soumises contiennent une explication détaillée de la signification des variables et des niveaux afin d'éviter au maximum une interprétation subjective. Voici des explications sommaires sur la signification possible des niveaux des variables : *météo* = mauvaise \Rightarrow pluie / *risques d'incidents* = élevé \Rightarrow pour voie non-aménagée pour vélo et piétons, passages piétons pour voiture, incivilité pour bus / *distance* = élevée \Rightarrow > 5 km / *temps disponible* = pressé \Rightarrow activité fixe

Dans la définition des niveaux pour les variables quantitatives, le régulateur garde la maîtrise. Par exemple, dans le cas de la distance, la valeur limite (5 km) entre les niveaux élevé et faible est choisie en fonction du rayon moyen de la ville (ici, La Rochelle). Bien sûr, pour une autre ville, le seuil testé par le régulateur pourra être différent, ce qui peut se traduire par des répercussions drastiques sur les préférences des usagers et donc des effets moyens des variables (15 km, seraient-ils considérés par un usager comme accessibles en vélo ?). C'est un des avantages de cette approche, à savoir la possibilité qu'a le régulateur de définir librement les niveaux et leurs seuils (pour les variables quantitatives).

S'agissant d'alternatives hétérogènes, la réponse est sous forme de fréquence de choix (allant de très rarement jusqu'à très souvent) et la fusion d'informations repose sur l'algorithme de Dezert-Smarandache avec un cadre de discernement défini par le régulateur (voir annexe Anx. F-4).

$$\Theta = \{ \text{à Pied, Vélo, Bus, Automobile} \} = \{ P_i, V_e, B_u, A_u \}$$

Après l'analyse de la variance, pour chaque alternative (mode de transport) un modèle réduit correspond au score affecté à la qualité du service. A titre d'exemple, pour le bus, le modèle que l'agent "pexavvi" transmet à un agent "étudiant" est :

Équation 4-3 :

$$S_{B_u} = 2,75 + (0,345 - 0,345) \text{ distance} + (-0,84 \quad 0,84) \text{ conditions} + (0,6 - 0,6) \text{ temps disponible}$$

En fait, les seules variables significatives dans le choix du bus sont, par ordre d'importance, la distance, les conditions de trajet (bagages) et le temps disponible (degré d'urgence de l'activité).

Les modèles de scores sont différents pour les autres modes de transport, par conséquent les variables significatives peuvent être différentes. Par exemple pour le vélo, les variables significatives sont : la météo, le risque d'incidents, la distance et les conditions de trajet. L'interaction "conditions de trajet - risque d'incidents" est également importante. Le modèle réduit dont se servira l'agent "étudiant" pour prendre sa décision (mode vélo) est :

Équation 4-4 :

$$S_{V_e} = 2,8 + (1,52 - 1,52) \text{ météo} + (0,71 - 0,71) \text{ risque} + (-0,55 \quad 0,55) \text{ distance} \\ + (-0,5 \quad 0,5) \text{ conditions trajet} + \begin{pmatrix} -0,61 & 0,61 \\ 0,61 & -0,61 \end{pmatrix} \text{ risque/conditions}$$

Les scores des scénarios qui ne se trouvent pas dans le questionnaire (ici, 24 combinaisons des niveaux dont les effets n'ont pas été évalués) sont déterminés par l'agent "individu" à l'aide des modèles matriciels réduits correspondant à chaque alternative.

Pour un scénario donné, l'agent "étudiant" choisira le mode de transport (l'alternative) pour lequel le score est le plus élevé. Pour le premier déplacement, il utilise les modèles sans les variables externes. Pour les autres déplacements, les termes correspondants à la phase d'apprentissage individuel affineront le modèle de choix préliminaire pour chaque alternative.

Le classement des modes de transport pouvant changer, ceci peut entraîner des conséquences sur les résultats de négociation pour le covoiturage par exemple.

4.4.4.B Modèle évolutif de choix d'un mode de transport

4.4.4.B.1 Apprentissage individuel dans un contexte statique

Les communications pour la prise de décision sont schématiquement présentées dans Figure 4-20.

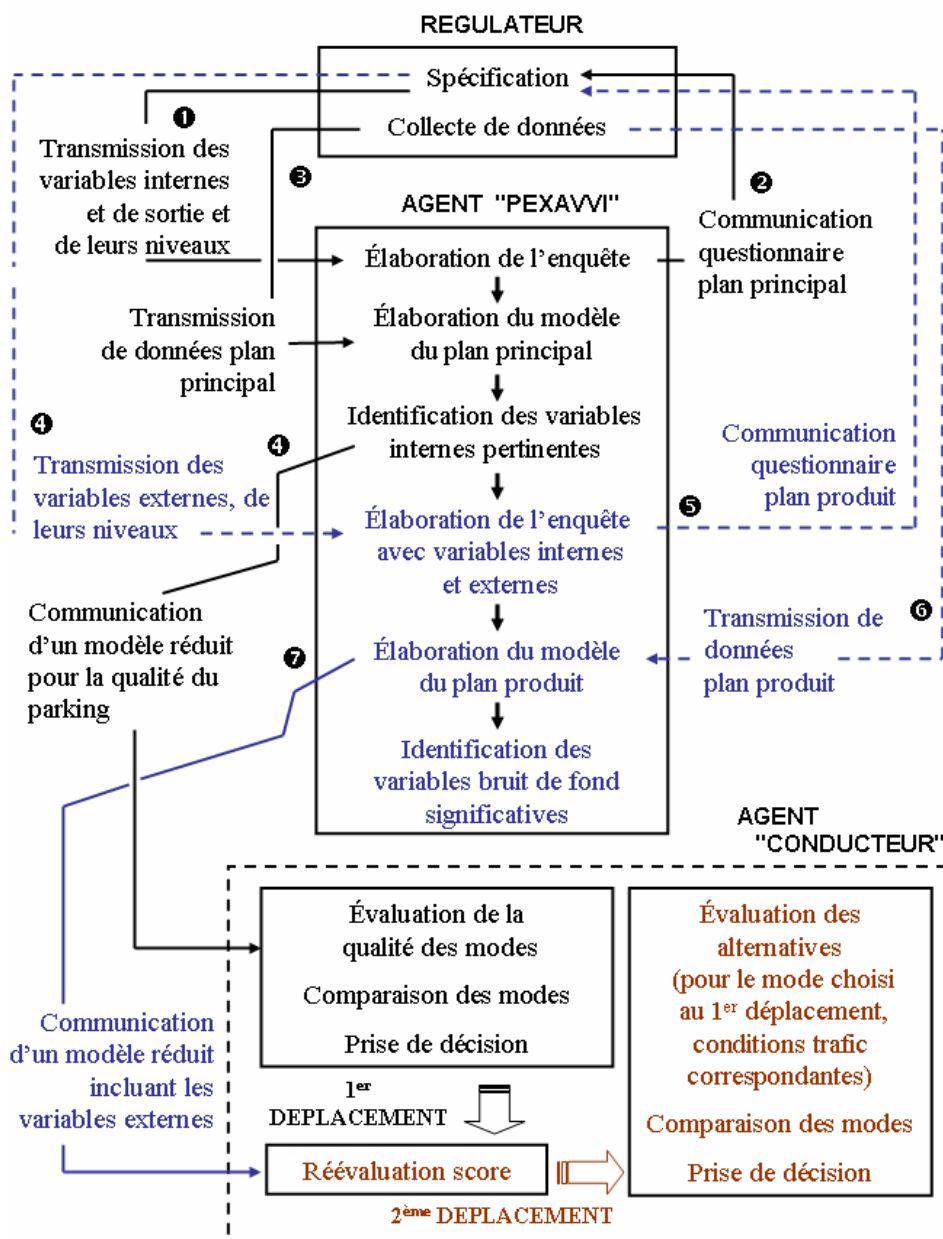


Figure 4-20. Architecture décisionnelle pour le choix du mode de transport

Compte tenu du nombre important de questions à poser dans l'évaluation des quatre alternatives, une deuxième série d'enquêtes a été lancée pour les plans croisés incluant uniquement les variables du plan principal jugées significatives pour chaque mode avec les variables externes (par défaut, les mêmes que pour le choix de destination : degré de congestion, information en temps réel, sécurité).

Vu le nombre d'agents "individus" devant réaliser les agendas, il est prévu qu'il y ait plusieurs agents "pexavvi", ceci communiquant avec le régulateur et les agents "individus" à travers des agents "interface" ; ils peuvent s'informer auprès des modules du simulateur "blocs trafic", "information", "points d'attraction", ... (se reporter à *Figure 2-3*. Les principaux paquetages d'agents, interactions et modules de notre simulateur). Les niveaux des variables d'entrée propres à l'agent "individu" se trouvent dans son agenda (type d'activité, avec ou sans bagages), la distance est estimée à partir du module "organisation du sol" en fonction du chemin le plus court (pour le bus, elle est imposée par le trajet de celui-ci). Les autres niveaux sont renseignés par le régulateur (le "mauvais temps" peut être un temps pluvieux ou une canicule.). Les informations météorologiques sont fournies par un agent de type information.

Le modèle décisionnel incluant la phase d'apprentissage individuel est :

Équation 4-5 :

$$S_{Bu} = 2,6 + (0,35 - 0,35)dis\ tan\ ce + (-0,8 \quad 0,8)conditions + (0,5 - 0,5)temps\ disponible + (0,05 \quad -0,05)congestion + (0,1 \quad -0,1)sécurité + (0,03 \quad -0,03)inf\ or\ mation$$

On peut remarquer, logiquement, une légère différence entre les coefficients du modèle de choix préliminaire et celui incluant les effets des variables externes, mais les effets des variables internes sont quasi identiques (normal, car les variables externes font office de bruits de fond). L'application de l'analyse de la variance permettra de dégager les variables externes significatives qui seraient responsables du changement de choix. Dans ce cas, l'information en temps réel n'affecte pas la perception de la qualité du déplacement des étudiants, mais cela pourrait être différent pour des touristes en visite à La Rochelle.

4.4.4.B.2 Apprentissage collectif dans un contexte dynamique

- **Disparition d'une alternative**

Concernant le mode de transport, ce cas est courant. C'est par exemple, une activité devant se dérouler dans une période où les bus ne sont pas en service. Dans ce cas, les masses sont redistribuées comme indiqué dans le paragraphe §3.7.2.A.

Les modèles changent de coefficients, mais illustrent les mêmes préférences d'alternative à choisir pour le scénario donné. Voir l'exemple en annexe.

- **Ajout d'une alternative**

Supposons maintenant qu'un service de partage de voitures (car-sharing) soit proposé aux usagers. Le cadre de discernement est :

Équation 4-6 :

$$\Theta(t+1) = \{ \text{à Pied, Vélo, Bus, Auto, Car-sharing} \} = \{ P_i, V_e, B_u, A_u, C_a \},$$

Pour éviter le paradoxe « bus bleu / bus rouge » (paragraphe §4.4.1.B), une nouvelle collecte de données doit s'effectuer auprès des étudiants (pas obligatoirement auprès des mêmes). Les personnes interrogées doivent s'exprimer cette fois-ci sur les cinq alternatives pour donner la fréquence de choix de chaque alternative.

Le paragraphe §3.7.2.B décrit les incidences sur la fusion d'information. Pour illustrer cette démarche, supposons que pour le choix du mode de transport, nous ayons la voiture et le bus comme alternatives initiales et que le jeu de masses suivant obtenu après fusion des préférences de deux personnes interrogées soit :

$$m_t(\text{Automobile}) = 0,21 ; \quad m_t(\text{Bus}) = 0,17 ; \quad m_t(\text{Auto} \cup \text{Bus}) = 0,62$$

Maintenant nous avons à l'instant t+1 une troisième personne proposant un troisième jeu de masses prenant en compte une autre alternative qui devient envisageable (possibilité de pratiquer du car-sharing).

$$\Theta(t+1) = \{ \text{Automobile ; Bus ; Car - sharing} \}$$

$$\text{et } m_{t+1}(\text{Auto}) = 0,1 ; \quad m_{t+1}(\text{Bus}) = 0,3 ; \quad m_{t+1}(\text{Car_sharing}) = 0,2 ; \\ m_{t+1}(\text{Auto} \cup \text{Car_sharing}) = 0,4$$

Dans ce cas, selon la DSmT classique (libre), le nouveau jeu de masses est :

$$m(\text{Auto}) = 0,3 ; \quad m(\text{Bus}) = 0,23 ; \quad m(\text{Car_sharing}) = 0,17 \\ m(\text{Auto} \cup \text{Car_sharing}) = 0,14 ; \quad m(\text{Bus} \cup \text{Car_sharing}) = 0,16$$

En appliquant la transformation pignistique, le choix d'un agent appartenant à cette catégorie sociodémographique porte sur "la voiture".

Remarque : Rappelons que, pour des raisons calculatoires, le cadre de discernement ne devrait pas dépasser sept hypothèses ce qui est bien raisonnable pour le choix d'un mode de transport, d'une heure de départ, etc. mais par contre, pas pour un itinéraire. Nous verrons dans le chapitre suivant comment ce genre de problème peut être contourné.

4.4.4.C Interprétation des résultats du modèle

Une validation complète aurait nécessité de faire des observations ou des enquêtes à préférences "observées" sur le terrain, ce qui n'a pas pu être envisagé avec une rigueur statistique convenable (voir en annexe pour l'analyse statistique des données).

A partir des coefficients des modèles, on peut néanmoins comparer des scénarios correspondant à une alternative donnée pour juger du réalisme des modèles. Par exemple, pour le vélo :

- Scénario { météo = favorable , risque d'incidents = faible , conditions de trajet = avec bagages , activité (temps disponible) = urgente } → $S_{Ve} = 3,43$
- Scénario { météo = défavorable , risque d'incidents = élevé , distance = élevée , conditions de trajet = sans bagages } → $S_{Ve}' = 0,01$

L'écart entre les scores met en évidence une forte préférence pour le premier scénario, ce qui est en accord avec l'importance des variables comme la météo ou les conditions de trajet pour le choix du vélo en tant que moyen de transport.

4.5 Choix d'un parking pour une certaine catégorie sociodémographique et pour une certaine ville

4.5.1 Le parking en début du déplacement

4.5.1.A Modèles de choix de parking dans la littérature

Selon [Dell'Orco2003], les différents modèles de choix du parking peuvent être classés en deux grands groupes selon l'approche de modélisation :

- **les modèles basés sur les réseaux** : qui essaient de simuler implicitement le choix du parking puisqu'il est modélisé en complétant le module de l'attribution des déplacements (à savoir le modèle du choix de la route). La représentation graphique usuelle du réseau de routes est temporairement modifiée en modélisant les parkings par un ensemble de liaisons (à savoir des arcs qui connectent les liaisons de route aux centroïdes). Par exemple, on peut trouver, pour des facilités de stationnement, des liaisons d'accès vers les parkings, entre parkings, et des liaisons piétonnes [Bifulco1993], [Cascetta2001].
- **les modèles de choix discrets** : qui sont essentiellement basés sur la théorie de l'utilité. L'ensemble de variables de choix est défini comme une fonction de besoins pratiques et d'analyse des buts. Leur principal but est de simuler les effets de différentes stratégies de stationnement sur le choix modal. Certains travaux ont abouti à des modèles élaborés car, en suivant les concepts de la théorie de l'utilité, un caractère aléatoire est associé à chaque alternative.

Le plus utilisé des modèles de type discret est celui du type Logit comme celui du modèle CLAMP [Polak1990] ou celui développé par Hess [Hess2006]. Des travaux de MNL (multinomial logit) sont utilisés pour choisir le type de réservation [Teknomo1997], [Van Waerden2003] ou encore pour décrire l'activité d'un système "Park and Ride" [DePalma2001b], [Bos2003] (pour un aperçu détaillé des approches à choix discret, voir aussi les travaux décrits dans [Still2000]).

Certains travaux [Sattayhatewa2003] ont été consacrés à l'évaluation du choix d'un parking pour des événements particuliers (spectacles, manifestations, etc.) générateurs du trafic et de surcharge de parkings. Un modèle analytique probabiliste est proposé pour aider à la gestion des parkings dans ces situations particulières et pour estimer les potentiels impacts liés à l'apparition ou à la fermeture de parkings dans son voisinage. Dans les travaux de Tong

[Tong2004], le modèle adopte une approche d'équilibre dans laquelle sont pris en compte différents types de véhicules et multiples types de stationnement. Un groupe de plusieurs liens est établi afin de connecter la demande de localisations aux facilités de localisation en accord avec l'admissibilité de chaque type de véhicule à un type particulier de facilité. Le pic de charge d'un parking selon le moment de la journée peut être déduit à partir de ce modèle. Ce modèle a été validé et a fourni des résultats significatifs à Hong Kong.

Les systèmes "Advanced Traveller Information System" (ATIS) [Maccubbin2000], [Zargayouna2003] ou « Parking Guidance Information » (PGI) [Tsopelas2001] informent les conducteurs sur l'état du réseau routier (par exemple l'état de congestion, les accidents en cours, les zones en travaux, le prix, etc.) afin de réduire les effets négatifs du trafic, par exemple la congestion et/ou la pollution. Les modèles mathématiques sont nécessaires pour simuler les effets de l'information sur le comportement des automobilistes, comme par exemple, les systèmes de guidage vers un parking en prenant en compte explicitement le degré d'incertitude de perception des conducteurs [Dell'Orco2003].

4.5.1.B Variables testées pour le choix du stationnement

Les modèles essaient de réunir des facteurs qu'un automobiliste prend en compte pour le choix d'un parking. Pour remédier au manque de réalisme de certains modèles, il existe de nombreux travaux faisant intervenir une analyse plus raffinée de l'impact du coût dans le choix d'un parking (voir [Kurri2004], [Erhardt2005]). Par exemple, Shoup suppose que le prix du parking est plus élevé dans le cas des destinations pour lesquelles la demande est plus grande et que le prix décroît avec la distance pour ces destinations [Shoup1999]. Les travaux de Hess [Hess2006] montrent l'effet des parkings non payants sur le choix et la demande de stationnement. Un modèle logit multinomial est développé afin d'évaluer la probabilité que les usagers quotidiens qui bénéficient ou non d'un parking gratuit au travail vont choisir de rouler seul, ou en covoiturage ou par un système relais du type "Park and Ride". Il en ressort l'influence du coût du parking et du temps de trajet dans le choix du mode de déplacement.

Pour trouver la place optimale de parking, généralement, la plupart des modèles utilisent des combinaisons des variables suivantes : *distance entre le parking et la destination, le prix du parking, la distance parking-destination, le temps de stationnement, la vitesse de marche à pied entre parking et destination, le nombre de personnes, la durée moyenne du temps de marche à pied* ([Sattayhatewa2003], [Tong2004]).

Les travaux s'appuient souvent sur des bases de données issues d'enquête [Gayda1994], [Bos2003], [Crowder2003] ; certaines de ces variables sont souvent estimées par l'enquête ménage (*temps d'accès au parking, de recherche d'une place ou de marche à pied*) alors que *le coût* de stationnement peut être renseigné par des organismes locaux. Ces variables sont généralement introduites dans une fonction "prix" (coût assumé par l'utilisateur) qu'on tente de minimiser.

4.5.1.C Remarques sur les modèles et variables de choix d'un parking

Malgré l'hétérogénéité des approches et de variables prises en considération pour la modélisation des choix des parkings, la façon séquentielle dont le stationnement est abordé et

l'aspect peu comportemental rendent la représentation peu réaliste.

Pour ce dernier aspect, le plus souvent, le parking est un simple "objet" payant et c'est souvent le critère qui justifie les préférences différentes des usagers. De récents travaux tendent de gommer ces insuffisances ([Hess2004]) en présentant les résultats de l'analyse comportementale pour le choix d'un parking à partir d'une enquête de préférences (SP-stated preferences) collectées auprès de plusieurs villes d'Angleterre. Ils emploient un modèle mixte multinomial logit (MMNL) capable de prendre en compte les préférences et les jugements hétérogènes des conducteurs.

Les résultats montrent que c'est l'hétérogénéité des jugements qui est le facteur principal dans le choix du parking. Cela permet de remonter à des conclusions intéressantes concernant l'influence des facteurs comme l'accès, la recherche de place de stationnement et les stratégies mises en place pour persuader de ne pas faire du stationnement illégal.

4.5.2 Scénarios pour le choix d'un parking

Prenons le cas d'un agent "individu-local" ayant choisi de faire son déplacement en voiture (avec ou sans négociation avec un partenaire de son groupe – voir paragraphe §4.4.2). Donnons-nous pour point d'origine initial le domicile de l'agent "conducteur" ou, pour être plus précis, le "parking au voisinage de son domicile" où il peut emprunter la voiture (parking personnel, résidentiel, etc.). Un agent "conducteur-local" effectuant un trajet en voiture se trouve confronté à plusieurs cas de figure (Figure 4-21).

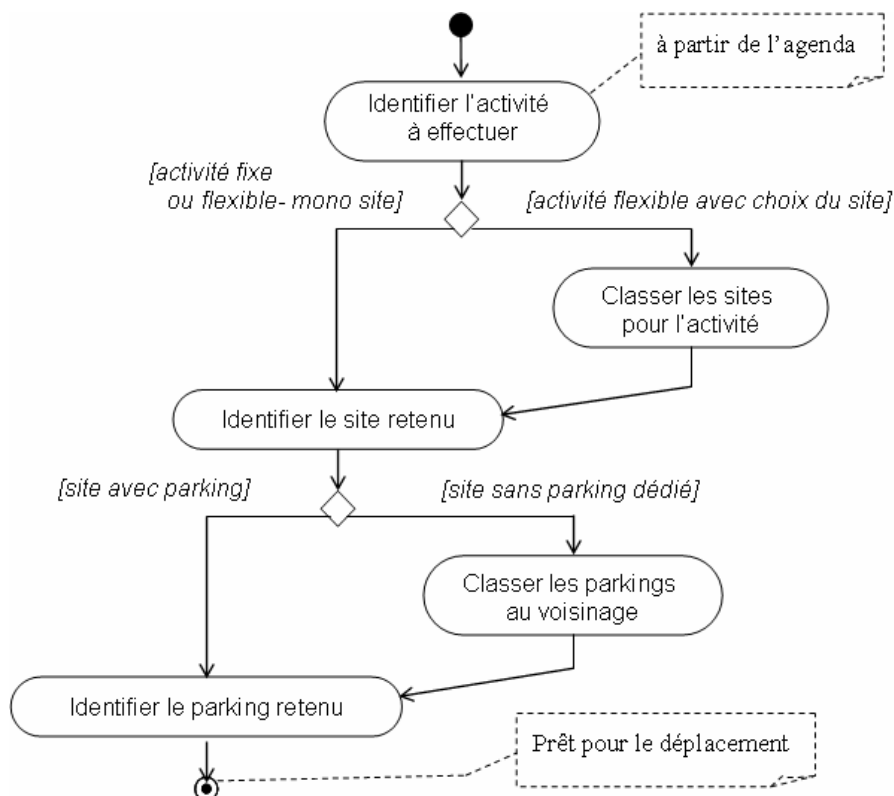


Figure 4-21. Scénarios pour le choix du parking de destination [Boussier2005b]

Nous avons distingué trois cas :

- **Il s'agit d'une activité à site unique possédant son parking réservé** : c'est le cas le plus simple et donc, ne nécessite pas une approche particulière. A ce stade de développement des modules du simulateur, nous avons considéré que l'agent disposait d'un agenda type et que les destinations à site unique étaient renseignées. Les points d'attraction contiennent des informations sur la nature des places de stationnement. Nous nous y intéresserons lorsqu'il faudra prendre en compte le scénario particulier qui est l'impossibilité de garer son véhicule personnel.
- **Il s'agit d'une activité à site unique sans parking réservé** : dans ce cas, il faut avoir une procédure de classement des parkings autour du point d'attraction.
- **Il s'agit d'une activité multi sites sans parking réservé** : dans ce cas, il faut d'abord faire le choix d'une destination (selon paragraphe §4.3) et ensuite le choix des parkings autour du lieu retenu.

4.5.3 Choix d'un parking à La Rochelle

4.5.3.A Modèle décisionnel pour le choix d'un parking

Nous nous sommes adressés à deux types de conducteurs (deux groupes sociodémographiques) : **étudiants** de l'Université de La Rochelle et **travailleurs** (personnel employé). Nous avons mené cette étude en voulant tester un nombre important de variables d'entrée (voir **annexe Anx. F-5** pour les détails de calcul). Pour pallier la séquentialité de l'analyse de l'offre de stationnement, nous avons fait intervenir non seulement des variables liées strictement au parking, mais aussi les priorités de l'utilisateur selon le type d'activité, le scénario de covoiturage et les conditions trafic.

Le même panier de variables internes a été testé pour les deux catégories : le prix du parking (A), la distance jusqu'à la destination (B), la vitesse de marche à pied (C), la durée de stationnement (D), le nombre de personnes (E), le type d'activité (F), la qualité de l'infrastructure (G).

Pour disposer de modèles affinés, nous avons volontairement imposé l'étude de quelques interactions entre les effets des variables : prix – distance (AB), prix – vitesse de marche à pied (AC), prix - durée du stationnement (AD), prix - nombre de personnes (AE), prix – activité (AF), prix – accessibilité (AG), distance - vitesse de marche à pied (BC), durée du stationnement – accessibilité (DG).

Contrairement au choix modal, il s'agit de classer des **alternatives homogènes** ; des évaluations par valeurs numériques (notes) sont suffisantes pour faire un classement à partir d'un score maximal.

Du fait du nombre important de variables et des interactions à tester, nous nous trouvons dans la situation de lancer, tout comme pour les modes de transport, deux enquêtes : une pour faire un premier tri parmi les variables d'entrée (internes) qui sont à l'origine d'un premier modèle réduit (avant déplacement) ; la deuxième enquête, incluant uniquement les variables internes significatives et celles externes pour lancer le mécanisme d'apprentissage.

Les modèles réduits obtenus après analyse de la variance sont les suivants :

- Pour les étudiants : L'analyse de la variance désigne comme actions significatives, le prix (A), la distance entre le parking et le point d'attraction (B), l'accessibilité (G), la vitesse de marche à pied (C) et l'interaction AG (prix - accessibilité) :

Équation 4-7 :

$$S = 39,98 + (12,7 - 12,7)A + (7,64 - 7,64)B + (4,5 - 4,5)C + (6,77 - 6,77)G + \begin{pmatrix} 4,36 & -4,36 \\ -4,36 & 4,36 \end{pmatrix} AG$$

- Pour les travailleurs : Le modèle réduit fait apparaître le type d'activité (F) à la place de la vitesse de marche à pied (C) :

Équation 4-8 :

$$S = 39,85 + (12,6 - 12,6)A + (11,75 - 11,75)B + (3,47 - 3,47)F + (6,5 - 6,5)G + \begin{pmatrix} 4,04 & -4,04 \\ -4,04 & 4,04 \end{pmatrix} AG$$

4.5.3.B Exploitation des modèles

4.5.3.B.1 Les variables et interactions significatives

La durée du stationnement et le nombre de personnes n'affectent pas les préférences des agents "individus-conducteurs", quelle que soit la catégorie sociale. Ceci signifie que le covoiturage peut être pratiqué sans contrainte pour les agents ayant une destination commune. Le type d'activité est jugé non-significatif pour les étudiants, alors que pour les travailleurs c'est la vitesse de marche à pied.

4.5.3.B.2 Modélisation des préférences pour des scénarios hypothétiques

Pour un scénario non évalué par enquête (hypothétique), il est possible d'estimer la préférence de l'agent "individu" avant le début du voyage selon sa catégorie. Par exemple, pour le scénario « A1 B1 C2 D1 E1 F1 G1 » (prix = bas, distance = proche, vitesse de marche à pied = faible, durée de stationnement = courte, nombre de personnes = 1, type d'activité = urgent, accessibilité = facile), la réponse est :

- Pour les étudiants : $S = 39,98 + 12,7 + 7,64 - 4,5 + 6,77 + 4,36 \cong 67,4$
- Pour les travailleurs : $S = 39,85 + 12,6 + 11,75 + 3,47 + 6,5 + 4,04 \cong 78,2$

4.5.3.B.3 Différenciation des niveaux de préférences selon la catégorie d'individus

Prenons deux situations distinctes :

- Pour le scénario « A1 B2 C1 D1 E2 F1 G2 » (prix = bas, distance = importante, vitesse de marche à pied = grande, durée de stationnement = courte, nombre de personnes > à 1, type d'activité = urgent, accessibilité = difficile), les niveaux des variables D, E, F n'étant pas renseignés car ces variables étant non-significatives, les réponses sont respectivement 38,0 pour les agents étudiants et 33,6 pour les agents travailleurs.
- Pour le scénario « A2 B1 C2 D2 E1 F1 G2 » (prix = élevé, distance = proche, vitesse de marche à pied = faible, durée de stationnement = longue, nombre de personnes > à 1, type d'activité = urgent, accessibilité = facile), les niveaux des variables C, D, E n'étant pas renseignés car ces variables étant non-significatives, les réponses sont respectivement 28,5 pour les agents étudiants et 40,0 pour les agents travailleurs.

4.5.3.B.4 Classement des parkings selon le type d'agents "individu"

Supposons maintenant que l'agent "individu" doive choisir entre deux parkings qui se trouvent à moins de 500 mètres du point d'attraction. Pour un scénario donné, il suffit de différencier les parkings par comparaison des niveaux des variables. Soit un agent "individu-travailleur" ayant une faible vitesse de marche à pied (=C1), seul (=E1), ayant à mener une activité urgente (=F1), de courte durée (=D1). Prenons deux parkings au voisinage d'un point d'attraction avec les caractéristiques suivantes :

- parking 1 : prix = 0,3 Euro/heure (=A1) , distance = 300 m (=B2),
 deux routes "distribuant" le parking (=G2)
- parking 2 : prix = 1 Euro/heure (=A2) , distance = 100 m (=B1),
 quatre routes "distribuant" le parking (=G1)

Les scores des scénarios correspondant respectivement aux combinaisons « A1B2C2D1E1F1G2 » et « A2B1C2D1E1F1G1 » sont déterminés à l'aide du modèle réduit. Le parking ayant le score le plus élevé est retenu comme choix de l'agent. Dans le cas où les scores sont proches lors du premier déplacement (limite à définir par l'utilisateur du simulateur), le choix porte sur le parking ayant le prix le plus faible car c'est la variable la plus significative.

4.5.3.C Réalisme de la représentation de la dispersion des préférences

Cette conclusion est confortée par une étude que nous avons menée en utilisant la base de données de LISELEC (système de libre-service de véhicules électriques à La Rochelle). Pour la facturation et la gestion du système, le dispositif électronique et informatique permet de connaître en détail tous les mouvements de chacun des véhicules, des abonnés avec les caractéristiques détaillées de chacun d'entre eux (identité, adresse, sexe, âge, ...).

Parmi les sept parkings-stations, deux d'entre eux (situés à Verdun et à Arsenal) proches géographiquement (car à moins de 300 m) desservent pratiquement les mêmes points d'attraction. Les choix des conducteurs (analyse pour les jours ouvrés sur une période d'un an

avec plus de 35.000 acquisitions) sont différents selon le statut de l'utilisateur (travailleur ou étudiant) et le créneau horaire (Figure 4-22).

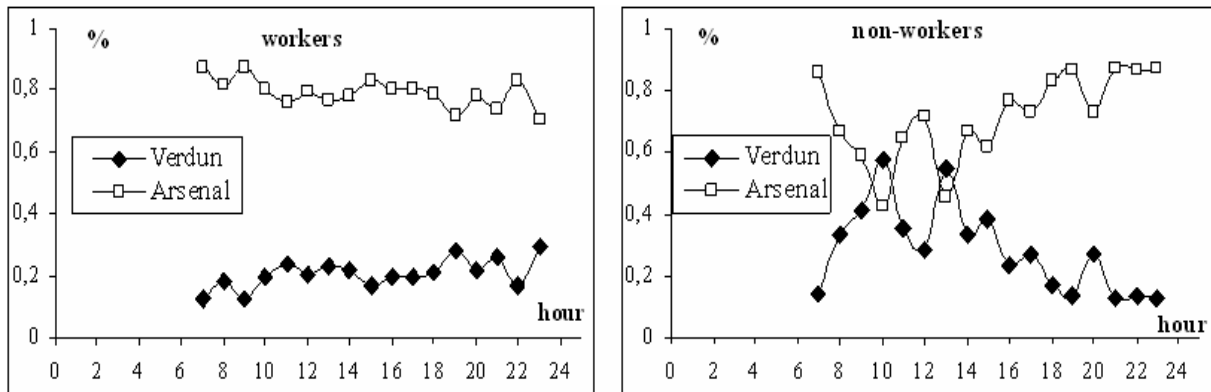


Figure 4-22. Comportements de 2 catégories de conducteurs pour le choix des parkings (pourcentage de restitution de voitures pour les 2 stations-parkings)

Sur le terrain, un régulateur ne devrait pas tirer de conclusions hâtives et imputer ces écarts à une telle ou telle autre variable. L'hétérogénéité des comportements est, comme nous l'avons vu, le résultat d'un couplage prix - type d'activité - accessibilité avec leurs interactions que nul ne pourrait saisir à partir d'un simple semis de points.

4.6 Comportements des agents "individus" lors de l'absence d'une place de parking

4.6.1 Le parking en fin de déplacement

Lors de la modélisation de la demande de déplacement, les aspects liés aux parkings et aux conséquences du déséquilibre offre-demande de stationnement sont traités d'une façon superficielle, voire inexistante. Typiquement, cela consiste au mieux à représenter le parking en terme de temps de recherche d'une place, couplé avec une charge du parking [Coombe1997]. Dans certains modèles plus élaborés, on peut envisager que cette charge du parking dépende de la journée, le temps de recherche d'une place augmentant si peu de places sont disponibles. Afin de mettre en évidence les interrelations entre la structure urbaine, le trafic et le stationnement, il y a deux méthodes pour intégrer le stationnement : les modèles statiques et ceux dynamiques.

Parmi les **modèles statiques**, le seul abordant en détail les parkings est START/DSCMOD [Roberts1997], pour lequel TRAM est une partie du projet. Les types de parkings sont les parkings courte et longue durée. Les aspects temporels ne sont pas représentés et la demande est illustrée par le nombre de trajets.

Parmi les **modèles dynamiques**, on peut rappeler ceux de Wegener ([Wegener1994]). Concernant les parkings, leur choix apparaît dans un sous-modèle en lien avec le trafic et la structure urbaine en tant qu'élément du choix d'installation des commerces et du marché du logement.

Trends Integration Procedure (TIP) développé en 1991 (voir [Young2000]) et son successeur GENIE ([Chambers1996] et [Young2000] pour plus de détails) proposent des scénarios pour tester les impacts de l'offre de stationnement sur le développement de la ville. D'autres travaux [Arnott1999] présentent un modèle basé sur la stochasticité des places vacantes. Le choix de l'approche stochastique s'explique par les tours que font les conducteurs pour trouver une place.

Certaines études [Petiot2001] s'inspirent de ceux de Arnott et utilisent un modèle qui formalise les aspects comportementaux parking avec la représentation d'une zone urbaine. Suite à la confrontation entre l'offre et la demande de stationnement, il en résulte une congestion externe au parking et un temps additionnel de trajet. Le modèle est structuré en quatre modules : structure spatiale, la génération des déplacements, le parking et les conditions statiques d'équilibre. Le modèle suppose une symétrie spatiale qui est représentée par la circonférence d'un cercle, ainsi l'infrastructure (les routes et des parkings) est assumée par une surface homogène et isotrope. Comme hypothèse, il n'y pas de congestion et la demande de stationnement est issue directement de la demande de déplacements.

4.6.2 Scénarios pour le choix d'un comportement lors de l'absence d'une place de stationnement

Maintenant considérons un conducteur se rendant en ville pour effectuer une activité (fixe ou flexible) et essayant de trouver une place pour se garer dans le parking qu'il avait classé premier de la liste avant son départ. Si une place non-reservée est disponible, une fois le véhicule garé, l'agent "conducteur" devient piéton. Si aucune place n'est disponible (parking "on-street" ou "off-street"), nous proposons quatre alternatives possibles [Boussier2006b] (voir *Figure 4-23*).

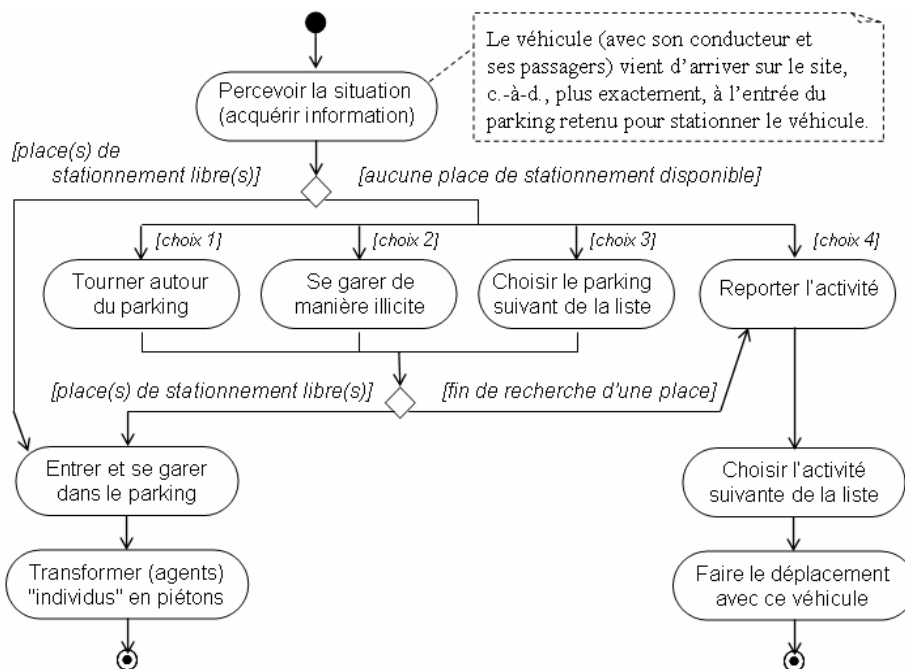


Figure 4-23. Comportements de l'agent "conducteur" arrivant sur le lieu de stationnement

L'agent "conducteur" peut :

- A1 : faire des tours autour du parking en espérant qu'une place se libère,
- A2 : se diriger vers le parking qu'il a classé en deuxième position,
- A3 : se garer illicitement sur le trajet,
- A4 : différer cette activité (la planifier à un autre moment dans son agenda) et passer à l'activité suivante figurant dans son agenda.

4.6.3 Choix d'un comportement à La Rochelle en l'absence de place

S'agissant de classer des **alternatives hétérogènes** qui sont évaluées par une fréquence de choix, la contrainte imposée par l'élaboration des scénarios de ce type d'alternative est que toutes les variables d'entrée soient communes (sinon toute comparaison de scores est caduque). Les variables internes testées sont : météo, nombre de personnes, durée de l'activité, distance, prix parking, importance activité.

Pour les variables de sortie, la réponse apparaît sous la forme d'une fréquence de choix. Nous nous trouvons dans le cas qui nécessite l'emploi des plans orthogonaux couplé à la fusion d'informations par Dezert-Smarandache et le modèle de Vigier (voir **annexe Anx. F-6**).

Pour chaque catégorie d'agents, les niveaux des variables internes qui seront évaluées comme significatives sont disponibles comme suit :

- dans leur agenda personnel (durée de l'activité, degré d'importance et type d'activité)
- l'infrastructure (distance entre parking et destination)
- le module parking (pour le prix).

Les niveaux des variables externes (arbitrairement les mêmes que pour l'étape choix du parking) peuvent être renseignés auprès du module trafic et par le modèle de vision à réaliser (degré de congestion inférieur ou supérieur à une vitesse de seuil, information existante ou non, incidents survenus ou non suite à des interactions entre agents).

La démarche d'élaboration du modèle décisionnel et celle du mécanisme d'apprentissage peuvent être contenues dans une même enquête, du fait du nombre réduit de variables à tester. L'application de la méthode de Vigier permet d'élaborer quatre modèles pour les alternatives correspondant aux variables qui justifient le choix de l'alternative (en amont) et l'effet des conditions trafic (en aval). Après l'analyse de la variance (ANOVA), sont retenues uniquement les variables et les interactions significatives.

Prenons comme exemple l'alternative A1 "faire des tours autour du parking en espérant qu'une place se libère". Pour la décision préalable, il y a seulement les conditions météorologiques (agent "information"), la durée de l'activité (agenda de l'agent "individu") et l'importance de l'activité (agenda de l'agent "individu") à renseigner auprès de l'agent "individu-conducteur" de la catégorie "étudiant". Pour la phase d'apprentissage, seul le degré de congestion est important.

$$S_{A_i} = 1,6 + (0,16 - 0,16) \text{ météo} + (0,34 - 0,34) \text{ durée} + (0,7 - 0,7) \text{ importance} + (0,09 - 0,09) \text{ congestion}$$

Pour l'alternative A3 "stationnement illicite", les seules variables significatives sont la distance parking-destination (module "occupation du sol"), la durée de l'activité (agenda) et l'importance de cette dernière (agenda). Aucune variable associée aux conditions trafic n'affecte son choix, il n'y aura donc pas de phase d'apprentissage.

$$S_{A_3} = 0,4 + (0,3 - 0,3) \text{ météo} + (0,6 - 0,6) \text{ durée} + (0,4 - 0,4) \text{ distance} + (-0,8 - 0,8) \text{ importance}$$

Pour le premier déplacement, chaque agent "individu", selon sa catégorie et les niveaux des variables d'entrée, calcule le score et fait un choix entre les quatre alternatives. Pour le scénario suivant (météo = "favorable", durée = "longue", importance de l'activité = "faible", distance jusqu'à la destination = "longue"), les scores sont respectivement :

$S_{A_1} = 2,9$ pour « tourner autour du parking » et $S_{A_3} = 0,1$ pour « se garer illicitement ».

Le modèle donne que l'agent "individu-étudiant" va effectuer des tours autour du parking en attendant qu'une place se libère.

Pour le prochain déplacement, par le mécanisme d'apprentissage, l'agent "individu" aura intégré les effets des conditions trafic et fera peut être un autre choix.

Bien sûr, le régulateur peut utiliser d'autres variables à tester. Il est également possible d'enlever ou d'ajouter des alternatives (pas plus de deux afin, dans ce dernier cas, d'éviter la lourdeur de l'algorithme de Dezert-Smarandache).

Supposons par exemple, un cas qui peut arriver fréquemment, qu'il n'y ait pas un deuxième parking à moins de 500m par rapport à la destination. Dans ce cas, les masses sont redistribuées et le classement se fait avec les trois alternatives restantes (selon la procédure décrite dans le paragraphe §□ pour le choix modal).

4.7 A la recherche d'une place de stationnement

4.7.1 Quelles hypothèses prendre

En admettant qu'il n'y ait aucune place de stationnement disponible, l'agent "individu-conducteur" a le choix entre les quatre alternatives présentées antérieurement. Dans tous les cas, ceci signifie qu'un agent s'immerge de nouveau dans le trafic et doit chercher un itinéraire, soit pour faire des tours autour de ce parking, soit pour se rendre au parking de son deuxième choix, soit pour trouver une place illicite, soit abandonner et se rendre vers le lieu de la prochaine activité. En pratique, l'agent "individu-conducteur" peut :

- continuer sa route (s'il s'agit d'un parking "on-street" ou d'un parking avec panneaux indiquant que le parking "off-street" ou souterrain est complet)
- ressortir du parking "off-street" et suivre la direction de la voie associée à la sortie.

A ce niveau, nous sommes face à deux problématiques.

- **1-) Sur quels critères est effectué le choix préliminaire de l'itinéraire dans la zone ?**

Il est relativement rare qu'il existe un itinéraire unique permettant de relier une origine à une destination (un parking avec un autre, dans notre cas). Si en région rurale le nombre de possibilités pour relier deux points donnés est, généralement, relativement restreint, le principal problème apparaissant lors de la calibration d'un modèle de choix de route en ville vient du fait de la forte corrélation entre les différents chemins possibles. En effet, il est relativement fréquent que certaines rues et certaines portions de routes fassent partie simultanément de plusieurs chemins d'où le besoin de développer des modèles relativement complexes. Avant de pouvoir calibrer un modèle de choix de route, il convient bien évidemment de déterminer l'ensemble de choix de chaque agent "individu-conducteur". Une des possibilités est de considérer que l'ensemble de choix d'un individu est l'ensemble de tous les chemins du réseau dans la zone analysée. Cette manière de résoudre le problème induit une explosion de la taille des ensembles de choix et engendre plus de problèmes qu'elle n'en résout [Henn2001]. Dans la pratique, il existe plusieurs méthodes qui permettent de générer un ensemble de choix : certains utilisent le chemin le plus court [Bhat2003b] (mais ce n'est pas le plus sécurisant dans tous les cas !), d'autres la durée la plus courte [Ettema2003] et enfin il y a des adeptes des méthodes par exclusion (il serait inutile d'intégrer à cet ensemble un chemin, par exemple, qui serait dix fois plus long que le plus court chemin.).

Cette dernière démarche, qui nous semble plus appropriée, exige pourtant une forte connaissance de la cartographie d'une ville, ce qui est envisageable vu la granularité de notre représentation spatiale de l'infrastructure (sans le souci particulier du détail). Le choix d'un itinéraire à la recherche d'une place de stationnement fera l'objet d'une modélisation ne faisant intervenir qu'un nombre limité d'alternatives.

- **2-) Comment intégrer les ajustements d'itinéraire dus aux interactions entre agents ?**

Si on tente de reproduire un comportement réaliste des usagers du réseau routier, alors que les choix d'un mode de transport, d'une destination (et son parking associé) ou du covoiturage peuvent être jugés comme des décisions prises exclusivement en amont et qu'ils ne feront pas l'objet de changements en temps réel, il n'en est pas de même avec un itinéraire. Comment admettre que le choix d'itinéraire (souvent ignoré ou simplifié dans les modèles à base d'activités ou à quatre étapes) se ferait une fois pour toutes au début du déplacement sans pouvoir s'ajuster au fur et à mesure selon des conditions de trafic défavorables (bouchons, route en travaux, interactions avec les autres agents, ...) (voir les travaux dans [Doniec2005] et [Bonte2006]) ? Cela est encore plus vrai pour les touristes, qui ne disposent pas d'une base de connaissances sur les caractéristiques de la zone urbaine et qui baseront leur décision essentiellement sur les informations issues d'un modèle de perception (signalisation, informations en temps réel, ...).

Comme nous l'avons précisé dès le début, nos travaux ne concernent pas les décisions prises par un agent "conducteur" immergé dans le trafic qui sont un sujet à part entière, mais

nous admettons volontiers qu'il faut coupler deux étapes (décision en amont et ajustement en temps réel). Prenons l'exemple ci-dessus qui traitait le cas d'un agent local souhaitant revenir au parking "off-street" pour se rendre à une activité urgente.

- **D'abord, le choix préliminaire (l'intention) est pris individuellement et l'agent tente à optimiser son objectif (la minimisation du temps).**

En l'absence d'une place de stationnement, un agent local, s'appuie sur sa base de connaissances, même si celle-ci est floue, étant liée aux caractéristiques de la zone, afin de "prédéfinir" un itinéraire. Nous considérons qu'un agent "individu-conducteur", quelle que soit la catégorie à laquelle il appartient, cherche à optimiser la Valeur du Temps (VOT), donc à réduire le temps de trajet (pour le concept VOT voir [De Lapparent2004b], [Hess2004]).

- **Ensuite, ce choix préliminaire peut s'ajuster en fonction des choix d'autres agents.** L'agent "conducteur" n'est pas seul, d'autres peuvent se trouver sur la même route et faire un choix similaire ou, encore, tout simplement, parce que les itinéraires peuvent partager des ressources communes (tronçons de route, carrefours, passage piétons, ...). Dans ce cas, les agents peuvent se gêner mutuellement et ainsi augmenter le temps ressenti par chacun.

Le processus décisionnel d'un agent local prenant en compte les deux phases, à chaque intersection, peut être illustré comme dans *Figure 4-24*.

Reste le cas des agents "touristes" qui ne disposent pas de bases de connaissances sur la zone aussi bien que le cas des locaux dans des grandes villes, pour lesquels le choix doit se faire en temps réel (ou sur le moment) et non pas d'une façon prédéterminée.

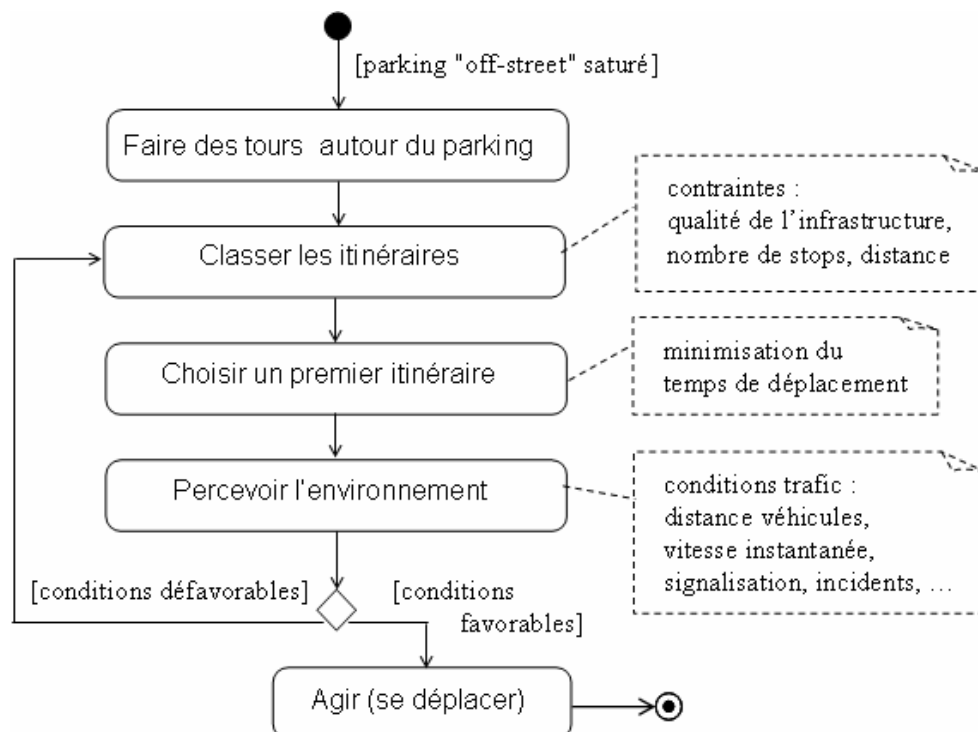


Figure 4-24. Processus décisionnel au niveau de chaque intersection

Remarque : En couplant un modèle de choix en amont et un module de vision, nous allons pouvoir nous affranchir d'une problématique, jugée difficilement abordable en modélisation de déplacements : l'explosion combinatoire engendrée par le calcul d'itinéraires pouvant desservir un même parking en ville (et le raisonnement peut être poursuivie pour le choix d'itinéraire parking-origine/parking-destination). En effet, à chaque intersection, l'agent choisira un itinéraire qui répondra à la fois aux contraintes de circulation perçues et à la minimisation de la durée de déplacement.

Toutes les conditions seront réunies pour une prise de décision en temps réel, dans la mesure où un système exhaustif de signalisation est prévu pour notre simulateur, aussi bien que l'introduction de règles inscrites dans le code de circulation. Le défi sera alors d'être en mesure de maintenir la cohérence entre ces deux types de modèles décisionnels et de les enrichir en considérant les interactions nouvelles auxquelles une entité peut être sujette et de dégager des comportements émergents.

En attendant le développement du modèle de vision, cette partie n'abordera que le modèle associé aux intentions d'un agent local (itinéraire pressenti).

4.7.2 Quel itinéraire "pressenti" lors de la recherche d'une place de stationnement

On admettra que pour chercher le parking de son deuxième choix (A2) ou pour se rendre à une autre activité (A4), il prend le chemin le plus court (algorithme de Dijkstra [Ben-Akiva1999]). Ce point de vue devient pourtant moins réaliste pour les alternatives « tourner autour du parking (A1) » et « se garer illicitement (A3) », car dans ces cas, l'agent "individu-conducteur" doit rester dans la zone du point d'attractivité où doit se dérouler l'activité.

Ainsi, nous sommes partis de cette dernière considération et avons distingué quatre scénarios simplifiés à analyser (Figure 4-25).

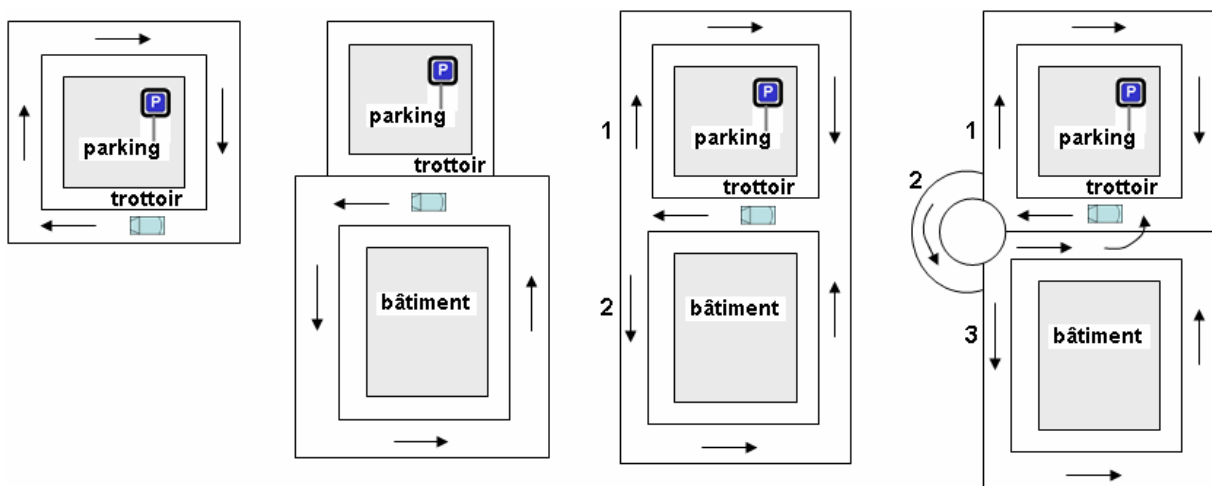


Figure 4-25. Scénarios de recherche d'une place de stationnement autour du parking

Pour les deux premiers scénarios (à gauche dans *Figure 4-25*), la simulation est relativement simple. Elle prend en compte les feux, les sens interdits ou les routes barrées. L'agent "individu-conducteur" poursuit sa route jusqu'à la prochaine route abordable vers la droite ou la gauche en augmentant ainsi la distance du trajet en boucle. Le déplacement du couple d'agents "voiture-conducteur" est reproduit par une simulation microscopique du flux (selon les travaux de Chabrol et Sarramia [Chabrol2003] dont nous avons évoqué quelques aspects dans le chapitre 1). Le mouvement d'un véhicule est déterminé par des caractéristiques de l'agent "conducteur", les performances de l'agent "véhicule" et les interactions avec la géométrie de l'infrastructure, les panneaux et inter agents conducteurs ou piétons. Dans les deux autres cas présentés (à droite dans *Figure 4-25*), l'agent "individu-conducteur" se trouve confronté à deux choix au niveau d'une intersection ou d'un rond-point. Dans le dernier cas, le scénario peut être : l'agent "individu-conducteur" peut tourner à droite, faire le tour du rond-point et revenir par la même route ou faire le tour du rond-point et faire le tour du parking par la gauche ou la droite.

Cette fois-ci, nous souhaitons tester des variables d'entrée ayant des niveaux proches ou étant perçues avec un certain degré d'imprécision. Pour modéliser le comportement d'un conducteur devant une intersection, nous appliquons l'approche de la logique floue que nous avons développée pour le choix d'une destination en raison des variables difficilement définissables comme l'attractivité et l'accessibilité (chapitre 4 du paragraphe §4.3.1). Elle est basée sur l'utilisation d'une table de vérité élaborée par un groupe de travail. Les variables retenues sont :

- le nombre de stops (ou feux),
- la distance à parcourir en voiture,
- la qualité de l'infrastructure (tourner à gauche sans voie aménagée, tourner à droite sans voie aménagée, tourner avec voie aménagée).

Ces données sont fournies par le module "occupation du sol" et "trafic". La variable de sortie est le temps du trajet qu'il faudra minimiser. Un exemple d'une table de vérité correspondant à une activité fixe, pour des agents "locaux", est présenté dans *Figure 4-26*.

		peu			moyen			nombreux		
		près	milieu	loin	près	milieu	loin	près	milieu	loin
INFRASTRUCTURE	mauvaise									
	moyenne									
	bonne									

TEMPS :	réduit		moyen		élevé	
----------------	--------	--	-------	--	-------	--

Figure 4-26. Table de vérité pour le cas d'une activité fixe

Après fuzzification et inférence, le choix porte sur l'alternative correspondant au temps minimal. Dans le cas d'une activité flexible, nous proposons les mêmes variables d'entrée,

mais la table de vérité est différente car l'activité n'est plus urgente et, par rapport à une activité fixe, plusieurs combinaisons peuvent être perçues comme à temps "réduit" ou "moyen".

La variable "nombre de stops ou ralentisseurs" permet de déclencher un mécanisme d'apprentissage. Si lors de l'itinéraire choisi l'agent est soumis à plusieurs ralentissements que celui défini par l'infrastructure, le temps sera considéré et gardé en mémoire pour le prochain reclassement. Ceci est juste un exemple, l'utilisateur du simulateur aura la possibilité de tester d'autres variables d'entrée, de préférence un nombre ne dépassant pas 3 à cause de la lourdeur de l'algorithme par logique floue.

Si le modèle décisionnel devait se réduire à ce panier de variables de choix, il est bien sûr impératif que le régulateur fixe des conditions de fin (par exemple, un temps limite ou un nombre) « pour faire des tours ». Quand ces dernières sont vérifiées, l'agent "individu-conducteur" devrait alors se reporter sur un autre choix (score inférieur) en l'absence d'une place disponible.

4.8 Conclusion

L'offre de stationnement et sa qualité sont cruciales pour assurer la performance d'un système de transport. Mais les modèles de stationnement sont les parents pauvres de la modélisation de la demande de déplacement. Il existe des travaux qui examinent l'influence de l'offre de stationnement sur les mouvements de trafic, le choix modal, le coût du transport, le coût d'habitation dans une zone et sur les impacts sociaux. Certains sont basés sur des approches empiriques ou économiques, d'autres sur des enquêtes réalisées par des organismes et enfin, ces dernières années, on peut assister à de timides tentatives de développement d'outils de simulation prenant en compte les offres de stationnement. Il n'existe pas, à notre connaissance, des modèles prenant en compte des aspects comportementaux reliés au degré d'urgence d'une activité ou à la perception de la facilité d'accéder au parking. Cela s'explique, entre autres, par la tendance de traiter le stationnement comme une entité à part, sans lien réel avec les autres étapes.

Sur le plan conceptuel, couplant le modèle à base d'activités et celui à quatre étapes, le module stationnement de notre simulateur essaie de réhabiliter l'entité parking. Nous sommes donc partis de l'idée que pour un usager local un trajet en voiture est un enchaînement d'un parking à un autre (parking - parking). Présentée dans le chapitre précédent, nous avons testé l'approche pour développer des modèles décisionnels concernant le choix d'une destination et du mode de transport après négociation pour des catégories particulières placées dans un environnement particulier (ville de La Rochelle). Ces phases de la chaîne de déplacement ont retenu notre attention car ce sont celles qui vont affecter le plus l'activité de stationnement à court et moyen terme.

Nous avons cherché à développer un modèle de choix des parkings ainsi que modéliser des comportements potentiels pour les agents "individus-conducteurs" en l'absence d'une place de stationnement : faire des tours en attendant qu'une place de stationnement se libère, se diriger vers le parking suivant dans le classement de l'agent "individu" (selon ses critères de sélection), se garer illicitement ou reporter l'activité à un autre moment (re-planification de

celle-ci dans l'agenda lors de la journée, de la semaine ou plus tard). La logique floue a été utilisée pour le choix d'un itinéraire autour des parkings pour les résidents locaux (selon le type d'activité) et les touristes.

L'ensemble des modèles présentés est, bien sûr, typique à une ville et à des catégories sociodémographiques ciblées, raisons pour lesquelles nous insistons sur les objectifs de ces études de cas :

- montrer que la démarche d'élaboration des modèles décisionnels développée dans le chapitre 3 est facilement applicable à toutes les phases de la chaîne de déplacements, avantage considérable par rapport à la diversité d'approches dans la littérature ;
- montrer la flexibilité dont dispose le régulateur pour tester des variables internes et externes dont il souhaite connaître les impacts sur la décision des usagers , aussi bien que des valeurs "seuil" pour les variables.

Nous verrons par la suite comment les décisions des agents peuvent être agrégées et exploitées par un régulateur trafic pour l'analyse et la prévision des activités de stationnement, aussi bien que pour la mise en place de stratégies multicritères et multi niveaux.

Chapitre 5 - Le régulateur intégré au système

Chapitre 5 - Le régulateur intégré dans le système	193
5.1 Introduction	194
5.2 Simulation de l'activité de stationnement	195
5.2.1 Bref état de l'art des outils avec modules de gestion de parkings.....	195
5.2.2 Quelques remarques sur les modèles et outils intégrant l'interaction trafic-stationnement	196
5.2.3 Types de parkings.....	196
5.2.4 Notre modélisation et représentation des parkings	197
5.3 Démonstrateur initié.....	198
5.3.1 Représentation d'une zone urbaine et hypothèses simplificatrices.....	198
5.3.2 Exemple de scénarios testés	203
5.4 Exploitation du démonstrateur par le régulateur	205
5.4.1 Prévision de la demande de stationnement	205
5.4.2 Description de l'activité de stationnement d'une zone urbaine	207
5.4.2.A Capacités de stationnement au niveau d'une zone j C_{STATj}	207
5.4.2.B Taux de rotation (τ_{rot}).....	208
5.4.2.C Taux d'utilisation des parkings (cu_j).....	209
5.4.2.D Au niveau du démonstrateur	209
5.4.3 Etude des effets du déséquilibre offre-demande de stationnement	210
5.4.3.A Temps de recherche d'une place de stationnement (t_{rech}).....	210
5.4.3.B Taux de congestion (τ).....	211
5.4.3.C Au niveau du démonstrateur	213
5.4.4 Simulation des stratégies.....	214
5.5 Interactivité régulateur - démonstrateur	215
5.5.1 Une aide à la décision : présentation séquentielle des résultats	216

5.5.2	Une aide à l'aide à la décision : recherche de stratégies d'optimisation.....	220
5.6	Conclusion.....	224

5.1 Introduction

Différentes enquêtes ont démontré que le stationnement est la troisième préoccupation dans la gestion des transports et des espaces urbains. Ceci peut être considéré comme étant normal puisque, une automobile stationne pendant 95 % de sa durée de vie en moyenne, ce qui, selon les spécialistes trafic, n'est pas sans avoir d'incidence sur les conditions de circulation en milieu urbain. Elle est aussi une grande consommatrice d'espace (10 m² pour un emplacement en voirie), volet délicat sur lequel les acteurs de l'aménagement du territoire doivent se pencher. Pour les uns et les autres, l'optimisation de la gestion des parkings est une condition sine qua non pour que les quartiers les plus denses restent accessibles. Pour cela, certains parlent de la règle des 1-4-8, un emplacement pour une voiture est égal à un pour quatre motos et est égal à un pour huit vélos.

L'activité des parkings et les conséquences engendrées ne sont pas faciles à décrire et à prévoir du fait de la diversité des offres de stationnement ainsi que des variables permettant de décrire l'activité des parkings. L'analyse de cette dernière est liée aux caractéristiques des parkings aussi bien qu'aux flux des voitures qui cherchent à se garer, et du résultat d'une organisation sophistiquée de la chaîne de déplacements de chaque individu.

Un des objectifs de nos travaux de thèse est de répondre aux attentes des régulateurs trafic afin de simuler l'activité de stationnement en prenant en compte les particularités de la ville étudiée et en intégrant un aspect comportemental fort.

Cela nécessite une approche qui fait correspondre des comportements effectués à un niveau microscopique (détaillés dans les chapitres précédents) à des variables globales mesurées à un niveau macroscopique (taux d'utilisation des parkings, taux de congestion dû à l'absence des places disponibles, etc.). Pour ce faire, nous avons également initié le développement d'un démonstrateur qui permet à un régulateur trafic de corrélérer la demande et l'offre de stationnement, aussi bien que tester une stratégie visant soit directement l'activité de stationnement, soit l'amélioration de la mobilité urbaine avec des répercussions indirectes sur les conditions de stationnement.

Nous finirons par une proposition d'optimisation multi niveaux, permettant de satisfaire conjointement les cahiers de charges des uns (régulateurs trafic, urbanistes) et les préférences des autres (usagers) et qui pourrait être mise en œuvre pour définir les caractéristiques d'un parking et des services associés.

5.2 Simulation de l'activité de stationnement

5.2.1 Bref état de l'art des outils avec modules de gestion de parkings

Parmi les outils de simulation trafic, il en existe peu prenant en compte les activités au niveau des parkings et cela, d'une façon souvent simpliste ; en voici quelques uns.

Dans l'implantation des modules de **EMME/2**, Spiess [Spiess1996] s'intéresse à un modèle de choix du parking pour deux cas distincts : parking sans contrainte de capacité et parking avec contrainte de capacité. Dans la mesure où il n'y a pas de contrainte, un simple modèle Logit décrit très bien des parcours du type "Park&Ride" en utilisant une fonction dite d'impédance qui n'est pas forcément explicitée (il peut s'agir du prix du stationnement). Quant au cas d'un parking à capacité réduite, il fait apparaître des termes qui correspondent à une impédance additionnelle qui devrait être imposée au parking afin de différer suffisamment de voyages potentiels aux autres parkings ayant une capacité donnée.

Le but du modèle microscopique **CORSIM** (CORridor SIMulation) [Owen2000] est de représenter les conditions de trafic en temps réel. Dans ce modèle, les véhicules sont déplacés à chaque seconde et les panneaux de signalisation, les incidents ou les parkings sont réactualisés toutes les secondes. La zone parking, de type "on-street", apparaît afin de représenter des activités qui peuvent empiéter sur le mouvement des voitures. L'activité du parking se déroule sur la voie 1 si la rue présente deux voies et si la liaison n'a qu'une voie, en dehors, des deux côtés de la rue. La durée moyenne d'un événement dans le parking est inférieure à 100 secondes alors qu'il est envisagé au moins 14 événements par heure.

VISSIM apparaît comme un modèle de simulation microscopique avec l'habileté d'obtenir des détails sur l'état de chaque véhicule sur des échelles de temps et cela avec un niveau d'exactitude intéressant [Yadlapati2004]. L'intérêt de VISSIM est de faire apparaître la complexité du comportement au niveau des intersections, prenant en compte des situations dans lesquelles des véhicules peuvent ralentir pour se mélanger aux autres. Un autre avantage de VISSIM est le fait qu'il représente les activités des parkings "on-street", aussi bien que ceux des doubles parkings. VISSIM possède un modèle de contrôle appelé NEMA et des algorithmes adaptatifs ; des contrôleurs réels peuvent être intégrés et évalués assez facilement avec une interface temps réel. Dans sa dernière version (2005), les auteurs cherchent à affiner l'étude de l'activité des parkings en ajoutant la notion d'attractivité des sites.

NETSIM [Smartest1999] est utilisé pour la simulation microscopique et l'analyse du trafic urbain et des voies périphériques. La simulation prend en compte les différents types de véhicules (automobiles, bus, etc.), l'interaction avec les piétons, les signaux trafic (feux, panneaux, etc.), les parkings "on-street" et de l'animation graphique. Les résultats concernent, par véhicule, la vitesse moyenne, le nombre de stops, la longueur de la file, les informations concernant origine-destination du véhicule, les circuits des bus, etc.

De Palma et Marchal [DePalma1996] présentent le modèle **METROPOLIS** qui adopte une approche mésoscopique dans la mesure où la description du réseau s'apparente à l'approche macroscopique (faible nombre de paramètres et réseau de grande taille) mais où, toutefois, les usagers ont des caractéristiques individuelles qui ne sont pas agrégées dans la

simulation. METROPOLIS propose un système intégré de gestion du trafic urbain. Le modèle comporte également une étape de modélisation de la recherche d'une place de stationnement. Les sorties du modèle sont les répartitions horaires des instants de départ par nœud, ainsi que la répartition horaire des trafics sur les arcs.

5.2.2 Quelques remarques sur les modèles et outils intégrant l'interaction trafic-stationnement

A l'analyse des modèles et outils pour la simulation de l'interaction trafic-stationnement, on peut s'interroger sur la représentation des comportements des usagers des parkings qui n'intègrent pas la dispersion de leurs comportements. Les choix des grandeurs sont souvent basés sur des lois probabilistes ou des résultats statistiques de cas ; aussi, des hypothèses simplificatrices rendent les modèles peu réalistes. La ville est souvent considérée comme spatialement symétrique et des emplacements des parkings sont fixés. La demande pour les parkings est issue de la demande de déplacements. Les opportunités de déplacements sont générées par des processus exogènes, souvent stochastique, invariant dans le temps. Le plus souvent, la vitesse constante des véhicules, peu importe la densité des véhicules, est la même en roulant normalement ou en cherchant une place pour se garer. De même, il y a une homogénéité temporelle et spatiale qui n'est pas l'illustration d'un cas réel.

Le peu de simulateurs opérationnels abordant l'offre de stationnement sont intéressants pour établir des relations entre les caractéristiques des parkings, le trafic et l'aménagement du territoire, mais insuffisants pour une étude prévisionnelle. Ce manque de représentation limite également toute analyse de l'effet de changement de l'offre de stationnement sur l'aménagement du territoire. En l'absence d'un modèle comportemental prenant en compte l'hétérogénéité des choix, la simulation des flux dans une zone possédant des parkings reste un aspect à approfondir.

5.2.3 Types de parkings

Il existe plusieurs critères de classification des parkings :

- **selon leur emplacement, type de places et durée limitée de stationnement :** [Smartest1999], [Wilbur2000] classent les parkings en deux catégories :
 - sur la voirie (on-street : sans restrictions, restriction 1h, restriction 15min, places pour handicapés, places pour véhicules lourds, réservés) ;
 - en dehors de la voirie, avec ou sans aménagement de voie (off-street : sans restrictions, restriction 2h, restriction 15min, places handicapés, places employeurs, places véhicules lourds, réservés).
- **selon leur emplacement et la tarification :**
D'autres classements sont plus affinés comme par exemple dans [Hess2004] retenant 5 types de parkings :
 - libre sur la voirie ("free on-street"),
 - payant sur la voirie ("charged-on-street"), payant dans les parkings ("charged-off-street"),

- parking à utilisation spéciale (par exemple le "car-sharing"),
- parking illicite.
- parkings résidentiels qui ne sont pas attribués uniquement aux résidents d'un immeuble ou d'un quartier, mais aussi aux visiteurs.

- **selon leur localisation par rapport au centre-ville :**

Pour différencier les parkings de centre-ville de ceux de la périphérie, un point de vue peut être issu de considérations purement comportementales.

- Un parking de centre-ville est selon [Shoup1999] approprié à une personne qui : a) fait du covoiturage - b) se gare pour une courte durée - c) marche lentement - d) dépense une somme importante pour réduire son temps de marche à pied.
- Au contraire, un parking de périphérie est approprié à une personne qui : a) se déplace seule - b) se gare pour une longue durée - c) marche vite - d) dépense peu d'argent pour réduire son temps de marche à pied.

5.2.4 Notre modélisation et représentation des parkings

Nous avons présenté le diagramme de classes de l'offre de stationnement associé à notre simulateur (paragraphe §2.4.7 du chapitre 2) en spécifiant les types de parkings (public, privé, à places réservées), le type de parking (on-street, off-street, souterrain), le prix, la capacité d'accueil, la localisation. Pour décrire l'activité des parkings, nous avons identifié des interactions entre trois types d'agents : modes de transport (vélo, voiture, bus, ...), offres de stationnement (parkings privés, publics, ...) et individus (locaux ou touristes) (voir *Figure 5-1*).

Ces groupes concernant les agents sont détaillés dans les diagrammes de classes présentés dans le paragraphe §2.4 du chapitre 2.

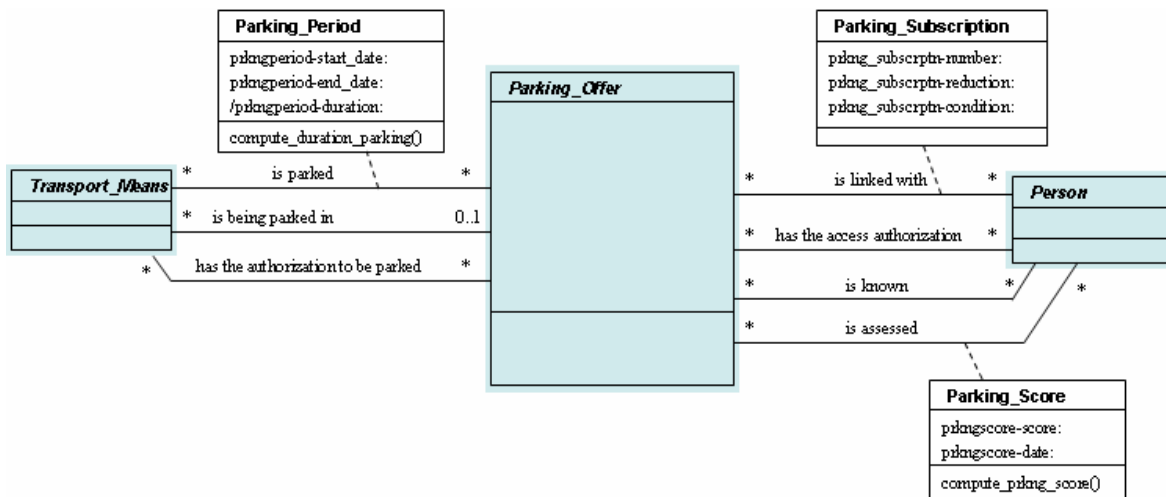


Figure 5-1. Diagramme de classes des interrelations entre les parkings et les autres agents

Par la suite dans ce mémoire, nous nous intéresserons aux parkings dits "off-street" les plus approuvés, ces dernières années, par les régulateurs de trafic et urbanistes (au détriment de ceux dits "on-street").

A partir de la représentation en plaques (paragraphe §1.3.1.A, chapitre 1) élaborée par notre équipe, la représentation des parkings est illustrée dans *Figure 5-2* [Augeraud2006].

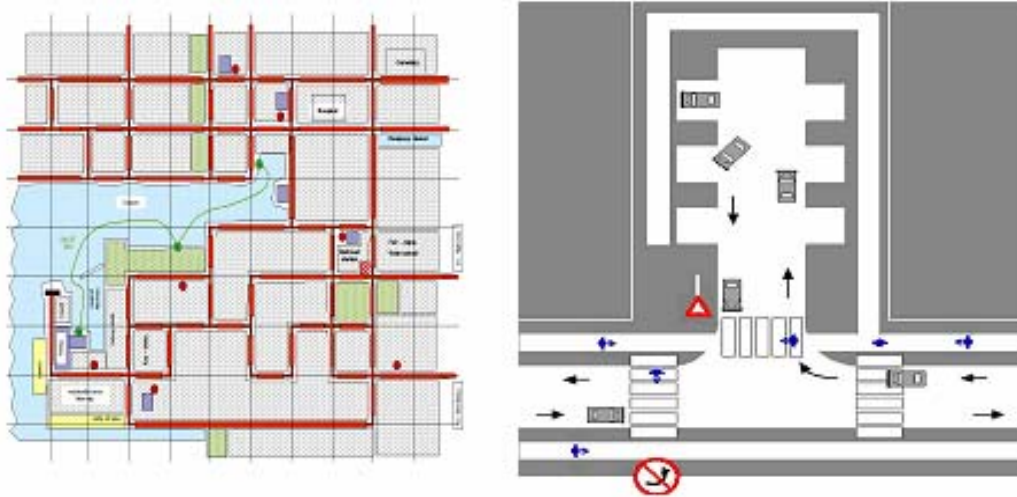


Figure 5-2. Représentations des parkings à l'échelle macroscopique et microscopique

5.3 Démonstrateur initié

5.3.1 Représentation d'une zone urbaine et hypothèses simplificatrices

Le développement de notre démonstrateur s'est effectué en deux phases :

- Phase 1 : Afin de pouvoir afficher un réseau routier contenant des parkings, des voitures ainsi que des piétons au niveau d'une zone urbaine (assemblage de plaques décrites dans le paragraphe §1.3.1.A du chapitre 1), une application logicielle (environnement C++ et DirectX) a été initiée avec un binôme d'étudiants IMA de l'Université de La Rochelle. Le manque de détail au niveau de la représentation des parkings s'explique par le fait que nous ne nous intéressons pas, dans le cadre de ces travaux, aux manœuvres effectuées par le conducteur pour stationner son véhicule.
- Phase 2 : Ce travail a été poursuivi avec un étudiant Socrates de l'Université suisse HEVs afin d'intégrer des modèles décisionnels décrivant le choix des parkings selon la catégorie sociodémographique ainsi que le comportement d'un conducteur en l'absence d'une place de stationnement.
De même, le modèle de vision étant en cours de développement, la représentation véhicule-conducteur est simplifiée (objet se déplaçant sur la grille).

Les légendes des couleurs utilisées pour le démonstrateur sont dans *Tableau 5-1* et *Tableau 5-2*.

Tableau 5-1. Légende des couleurs pour les mobiles se déplaçant sur la grille















Couleur	libellé	Affectation aux mobiles
	bleu	Véhicule cherchant à se garer
	rouge	Véhicule s'étant déjà garé
	gris foncé	Voiture A (fait partie du scénario)
	gris clair	Voiture B (fait partie du scénario)
	bleu clair	Piéton

Tableau 5-2. Légende des couleurs utilisées dans la plaque 3D du démonstrateur

Couleur	libellé	Numéro	Affectation à la grille
	vert	0	Zone libre
	noir	1	Point E/S pour les véhicules
	gris foncé	2	Route avec 2 sens de circulation
	gris clair	3	Intersection
	bleu	4	Point E/S du parking
	vert foncé	5	Trottoir (pour piétons)
	ocre	6	Point E/S pour les piétons
	blanc	7	Passage pour piétons
	rouge	8	Point destination (pour le scénario joué)

Dans *Figure 5-3*, est présentée une image figée de l'animation à un instant t .

La grille représente une zone d'une ville avec un ou plusieurs parkings, des routes avec deux sens de circulation et des trottoirs. Egalement, on peut observer les voitures entrer, sortir du réseau, se déplacer, changer de direction, entrer, sortir du parking ainsi que les piétons. Deux types de représentations sont possibles pour chaque voiture, bleu pour les voitures cherchant à se garer et rouge pour celles qui ont déjà stationnées dans un parking. Les piétons, quant à eux, peuvent se déplacer sur les trottoirs (en vert foncé) mais peuvent également emprunter les passages piétons (en blanc) (existence d'anti-collision, le piéton est prioritaire).

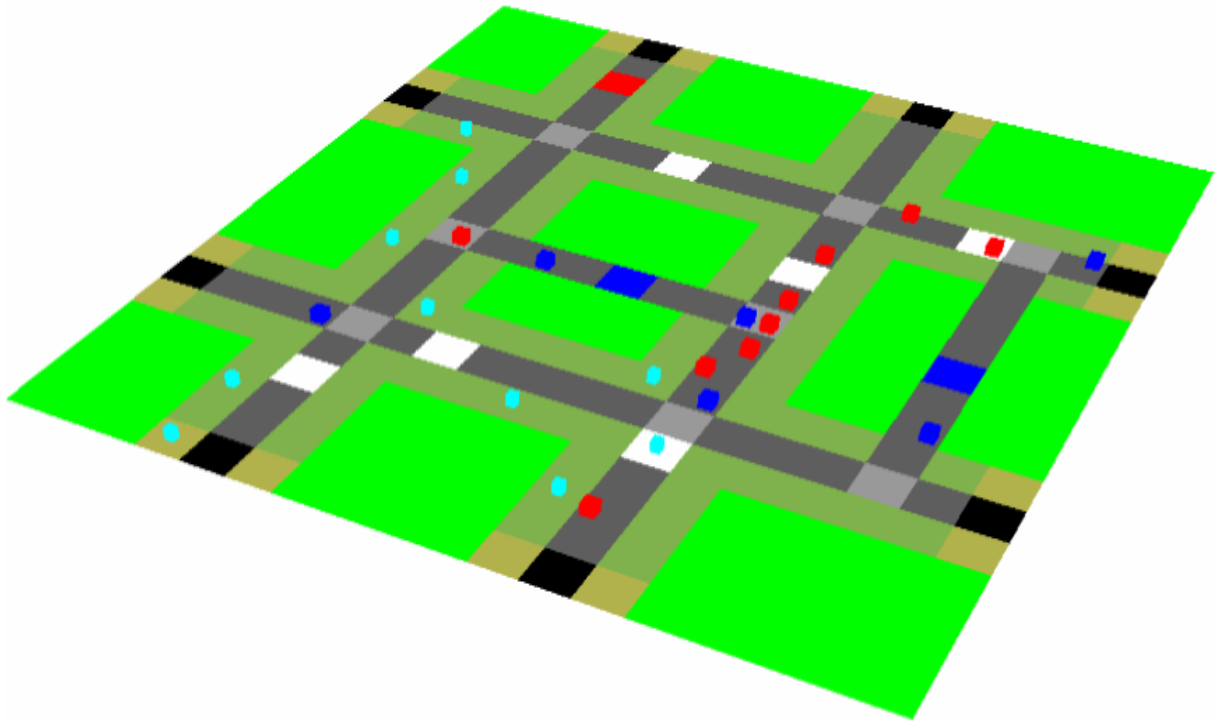


Figure 5-3. Grille du démonstrateur représentant une zone urbaine

Etant donné que toutes les étapes de la chaîne de déplacement n'ont pas encore été traitées, il n'est pas possible d'isoler les agents "individus" (avec leurs agendas, vitesses de marche à pied, ...) par leur catégorie sociodémographique, ni de déterminer quand et où il rentre sur la grille. Pour l'instant, nous avons posé des hypothèses simplificatrices permettant de nous focaliser sur les aspects liés au choix préliminaires.

- **Pour le déplacement des piétons**, ils ont des vitesses inférieures aux véhicules, qui sont pour l'instant fixées par le régulateur (nous rappelons que ce sont des données qui apparaissent dans les caractéristiques de chaque agent, selon sa catégorie sociodémographique, qui pourront être exploitées une fois identifié le piéton). Les piétons ne peuvent pas faire demi-tour au cours de leur déplacement.
- **Pour le déplacement des véhicules sur la grille**, dans la mesure où le choix d'itinéraire entre le parking d'origine et celui de destination n'a pas été abordé, les voitures entrent sur la plaque de façon arbitraire. Sur la grille, les véhicules respectent certaines contraintes. Aux intersections, les véhicules ne peuvent revenir sur leur chemin (demi-tour). Pour se déplacer entre deux points de la grille (deux parkings par exemple), le couple véhicule - agent choisit, pour l'instant, l'itinéraire le plus court (le développement du module de vision permettra d'intégrer à la fois les choix préliminaires d'un itinéraire associés à l'infrastructure et au type d'activité à mener, ainsi que des ajustements des trajets dus aux interactions inter agents). Des calculs de distance sont réalisés entre les nouvelles positions possibles et la ou les entrées de parking présente(s) dans la grille (Figure 5-4).

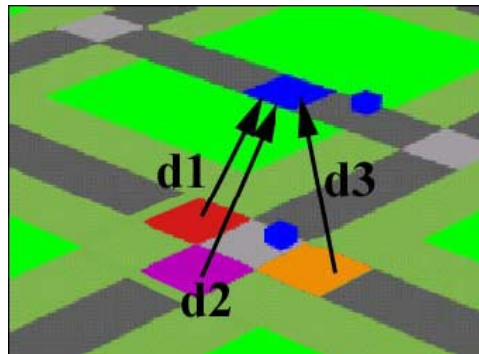


Figure 5-4. Calcul des distances aux entrées du parking

- **Aux niveaux des intersections**, nous avons supposé que, lorsque la voiture arrive sur une intersection, les cases voisines de l'intersection sont observées afin de voir quelles sont celles candidates, le demi-tour étant exclu (Figure 5-5). Un tableau des vecteurs directeur candidat est ainsi obtenu et une loi probabiliste (stade actuel du démonstrateur) permet d'établir un itinéraire pour chaque agent "individu-conducteur".

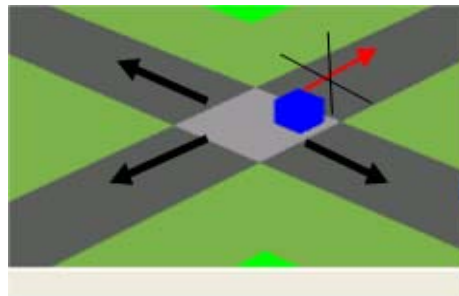


Figure 5-5. Directions admises pour un véhicule (association d'agents "voiture-individu") au niveau d'une intersection

- **au niveau des parkings**, si le parking est plein, les véhicules ne peuvent pas se garer et continuent leur route. S'il reste des places dans le parking, la voiture entre et disparaît pendant une durée fixée arbitrairement. Lorsque les voitures sont garées dans le parking, un décompte du temps s'effectue afin de savoir à quel moment la voiture doit sortir du parking (réapparaître sur la grille). Dans le futur, lorsque l'agent sera identifié, chacun disposera d'un agenda avec une durée de l'activité à effectuer, du temps nécessaire pour effectuer le trajet aller-retour parking-destination en tant que piéton selon sa vitesse de marche à pied et la distance parking - destination.

Le schéma de principe (Figure 5-6) montre les différentes étapes et états d'une voiture pour l'interface homme-machine. Cette description concerne les phases du véhicule entrant dans le parking jusqu'à sa sortie de la plaque. Elle est complétée par Figure 5-7.

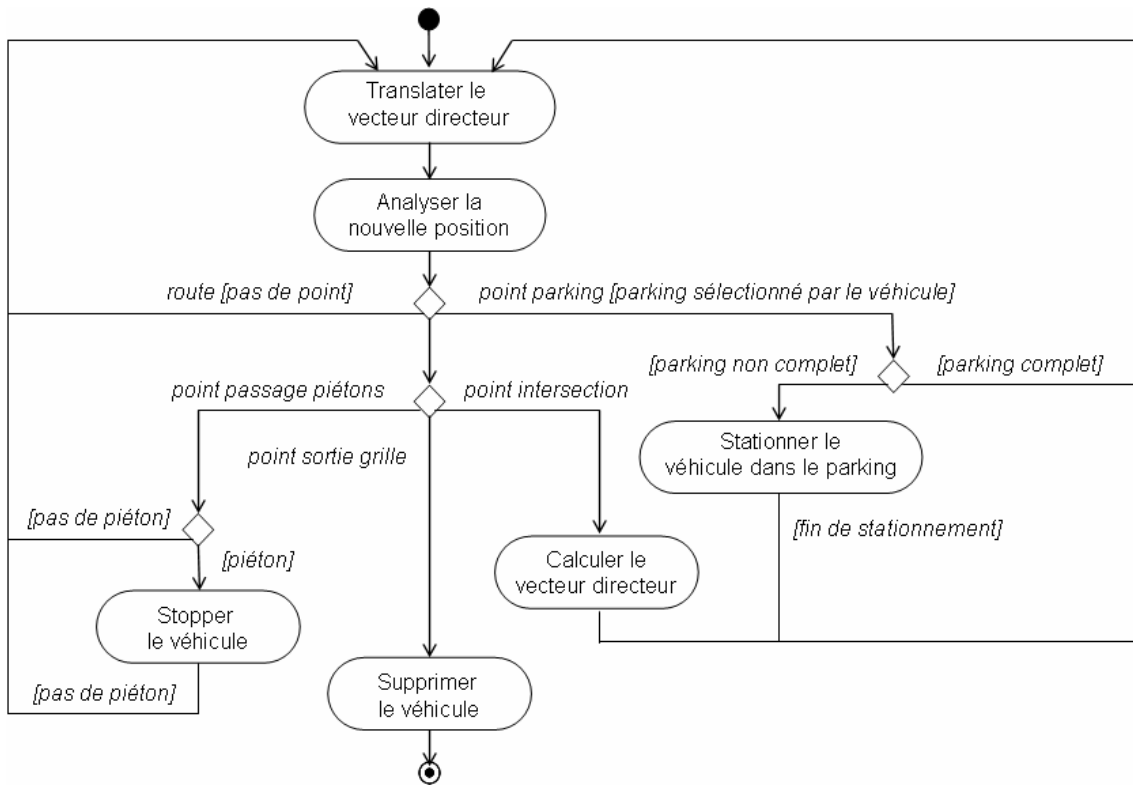


Figure 5-6. Actions possibles pour une voiture

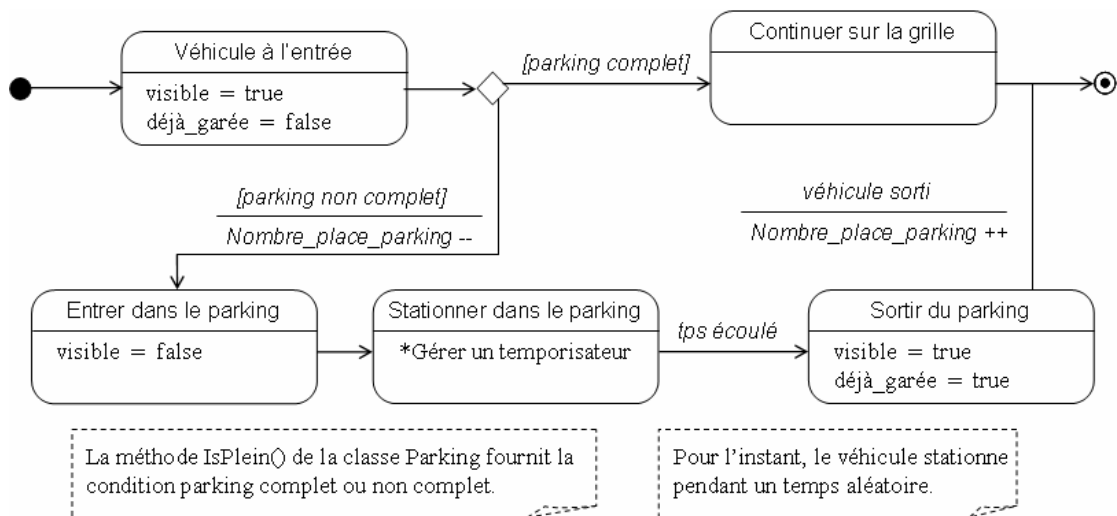


Figure 5-7. Etapes "entrée-sortie" d'un parking

Bien que des maillons de la chaîne de déplacement manquent pour décrire entièrement les mouvements, il sera néanmoins possible d'employer ce premier démonstrateur pour illustrer les impacts du dimensionnement des parkings "off-street", des emplacements, des modifications d'infrastructure et de tarification. A partir d'études de cas, des modèles décisionnels ont été implémentés selon des scénarios décrits dans le paragraphe suivant.

5.3.2 Exemple de scénarios testés

A partir des modèles décisionnels obtenus dans le chapitre précédent pour les catégories "étudiants" et "travailleurs", il est possible de simuler le comportement des agents conducteurs pour la phase de choix d'un parking et comportement des usagers en l'absence d'une place disponible.

Nous nous sommes placés dans le contexte suivant (Figure 5-8).

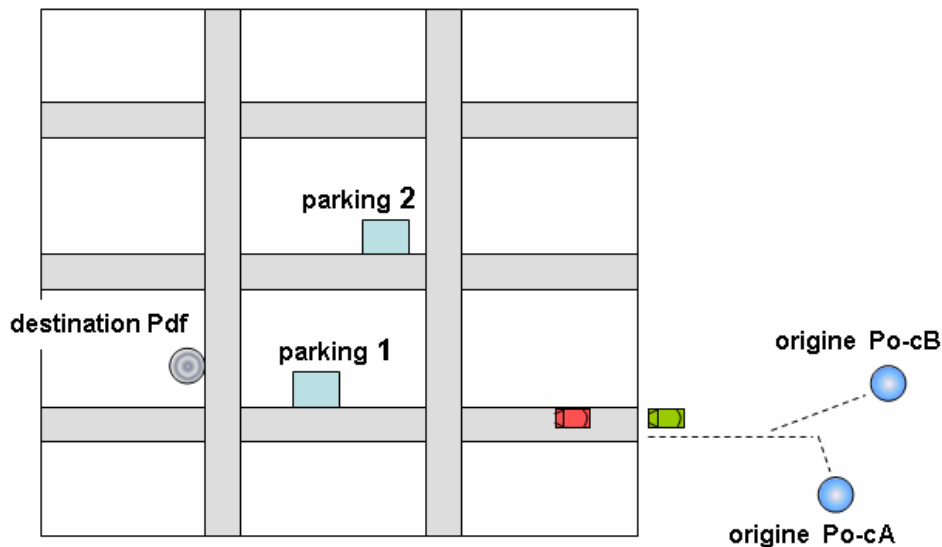


Figure 5-8. Description d'un scénario testé avec le démonstrateur

- Deux conducteurs A et B en provenance de deux parkings d'origine différents (Po-cA, Po-cB). L'accessibilité à la zone est différente : 4 routes pour l'agent travailleur A et 1 route pour l'agent étudiant B. Ils ont des préférences différentes (catégories sociodémographiques différentes) et des priorités différentes (selon leurs agendas) même s'ils cherchent à se rendre à la même destination Pdf. Ils rentrent sur la grille par le même point d'entrée dans un intervalle de temps arbitraire (donc paramétrable).
- Il n'y a pas de parking réservé et nous considérons que la zone de recherche d'une place de stationnement ne dépasse pas une distance de 500 mètres autour du point d'attraction (résultats issus d'une analyse statistique sur le choix des parkings lors de nos travaux de DEA [Boussier2003]). Dans ces conditions, deux parkings "off-street" avec des caractéristiques différentes sont implantés.
- Lorsque les deux véhicules entrent sur la plaque (*par le même point d'entrée*), ils prendront les chemins les plus courts pour atteindre le parking de destination qu'ils ont sélectionné.

Les modèles implémentés pour le choix du parking correspondent à l'étude décrite dans le paragraphe §4.5.3. Chaque agent local fera un classement des parkings et choisira celui qui optimise son score.

- Agent-conducteur A : catégorie travailleur

Voir Équation 5-12 :

$$S = 39,85 + (12,6 \quad -12,6)A + (11,75 \quad -11,75)B + (3,47 \quad -3,47)F + (6,5 \quad -6,5)G + \begin{pmatrix} 4,04 & -4,04 \\ -4,04 & 4,04 \end{pmatrix}AG$$

pour le parking P1 : $\text{ScoreA_P1} = 39,85 - 12,6 + 11,75 + 3,5 + 6,5 - 4 \approx 45$

pour le parking P2 : $\text{ScoreA_P2} = 39,85 + 12,6 - 11,75 + 3,5 - 6,5 - 4 \approx 34$

L'agent-conducteur A choisit le parking P1 (score le plus élevé) et se gare pendant un certain temps pour mener son activité (disparaît de la grille), quittant ensuite le parking et la grille ;

- Agent-conducteur B : catégorie étudiant

Voir Équation 5-11 :

$$S = 39,98 + (12,7 \quad -12,7)A + (7,64 \quad -7,64)B + (4,5 \quad -4,5)C + (6,77 \quad -6,77)G + \begin{pmatrix} 4,36 & -4,36 \\ -4,36 & 4,36 \end{pmatrix}AG$$

pour le parking P1 : $\text{ScoreB_P1} = 40 - 12,7 + 7,6 - 4,5 - 6,8 + 4,4 = 28$

pour le parking P2 : $\text{ScoreB_P2} = 40 + 12,7 - 7,6 - 4,5 + 6,8 + 4,4 = 52$

L'agent-conducteur B choisit le parking P2 (score le plus élevé). N'ayant pas trouvé de place, il utilise les modèles élaborés dans le paragraphe §4.6.3 :

$$S(\text{Alt1}) = 1,6 + (0,2 \quad -0,2) \text{ météo} + (0,4 \quad -0,4) \text{ durée_activité} + (0,7 \quad -0,7) \text{ importance_activité}$$

$$S(\text{Alt2}) = 0,9 + (0,6 \quad -0,6) \text{ distance} + (0,5 \quad -0,5) \text{ prix} + (0,4 \quad -0,4) \text{ importance_activité}$$

$$S(\text{Alt3}) = 0,4 + (-0,3 \quad 0,3) \text{ météo} + (0,6 \quad -0,6) \text{ durée_stationnement} + (0,4 \quad -0,4) \text{ distance} + (-0,8 \quad 0,8) \text{ importance_activité}$$

$$S(\text{Alt4}) = 0,3 + (0,1 \quad -0,1) \text{ nbr_personnes} + (0,2 \quad -0,2) \text{ importance_activité}$$

Les scores sont respectivement :

$$S(\text{Alt1}) = 1,6 + 0,2 + 0,4 + 0,7 = 2,9$$

$$S(\text{Alt2}) = 0,9 + 0,6 + 0,5 + 0,4 = 2,4$$

$$S(\text{Alt3}) = 0,4 - 0,3 + 0,6 + 0,4 - 0,8 = 0,3$$

$$S(\text{Alt4}) = 0,3 + 0,1 + 0,2 = 0,6$$

L'agent "conducteur-étudiant" adoptera la première alternative, c'est-à-dire fera des tours autour du parking en attendant qu'une place se libère. Une condition d'arrêt (nombre de tours)

est imposée, au delà de laquelle, il se reportera sur l'alternative ayant le score suivant (déplacement vers le 2^{ème} parking).

Au stade actuel du développement, les phases de recherche d'itinéraire n'ont pas été implémentées, étant (pour la partie décisionnelle et apprentissage) jugées fortement corrélées avec le modèle de vision et irréaliste d'en faire abstraction.

Selon les interactions inter agents (congestion, information en temps réel, ...) ou dans un contexte urbanisme-transport dynamique (un nouveau parking, par exemple), les phases d'apprentissage vont affiner les modèles de choix préliminaire ; le classement des alternatives peut évoluer, comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, à la fois pour le choix du parking que pour le comportement en l'absence d'une place de stationnement.

5.4 Exploitation du démonstrateur par le régulateur

5.4.1 Prévision de la demande de stationnement

Les modèles à base d'activités qui intègrent l'activité de stationnement considèrent au mieux que la demande pour les parkings est directement issue de la demande de déplacements. Ce point de vue n'est pas contestable si les autres phases de la chaîne de déplacements sont délibérément négligées : le fait qu'il y a un choix modal par exemple, ou encore, un choix de destination pour les activités multi sites qui complexifie la définition du rapport offre-demande de stationnement pour une zone urbaine.

Dans un contexte évolutif, cette approche montre ses insuffisances, dans la mesure où, à demande de déplacements quasi identique, la demande de stationnement peut être fortement affectée par l'apparition d'un nouveau mode de transport (service partagé : car-pooling, car-sharing ...).

En rassemblant l'ensemble de communications de notre module d'organisation des déplacements (choix de destination, choix de parking) (voir *Figure 5-9*), on s'aperçoit qu'à partir de décisions prises par chaque agent "individu" et transmises à l'agent "pexavvi", le régulateur peut disposer de la distribution des individus par mode, destination et donc de la demande de stationnement par zone urbaine. De même, à partir des comportements des agents en l'absence d'une place de stationnement et d'un itinéraire autour d'un parking, il devrait être envisageable d'étudier les effets de congestion induits lors de la recherche d'une place de stationnement.

Reprenons la chaîne d'organisation des déplacements basée sur un couplage hybride d'étapes du modèle quatre-étapes et celui à base d'activités (paragraphe §1.4.3, chapitre 1) ; nous rappelons qu'à ce stade de développement, la génération de population est une étape exogène (soit basée sur des enquêtes ménages, soit distribuée d'une façon uniforme par zones urbaines). Quant à l'agenda individuel, selon la catégorie sociodémographique à laquelle appartiendra un agent "individu", il intégrera le même type et hiérarchisation d'activités : emploi, école, "shopping" ou récréatives (dans ANNEXE H - nous avons proposé des agendas "typiques" à partir de résultats de travaux issus d'enquêtes ménages).

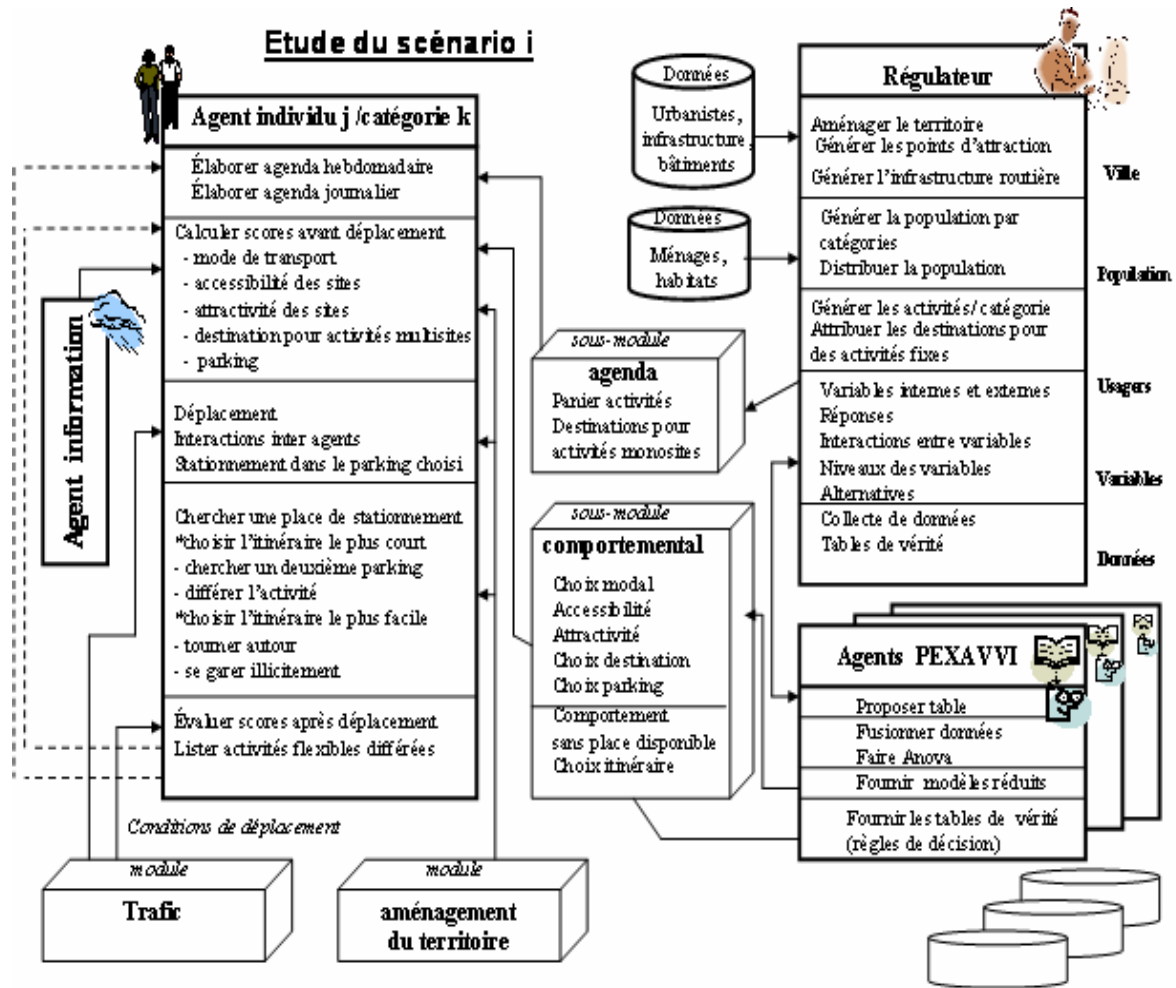


Figure 5-9. Relations entre les modules d'organisation des déplacements

Prenons le cas des agents ayant inscrit dans leurs agendas l'activité « faire des courses » à partir de 17 h (Figure 5-10).

Cette activité pouvant se dérouler sur plusieurs sites va être classée par chaque agent, en fonction de sa catégorie sociodémographique, selon l'attractivité, l'accessibilité et la distance domicile - site. Après une éventuelle négociation, chaque agent choisit son mode de transport et le parking pressenti pour un déplacement en voiture. Chaque agent prend ces décisions en amont du déplacement selon les modèles réduits de choix préliminaire (chapitre 4) et en fonction de variables significatives correspondantes à sa catégorie. Toute activité démarrant à 17 h peut être étudiée de la même façon. L'agent "pexavvi" réunit l'ensemble de choix par mode, destination et parking puis fournit au régulateur une représentation agrégée des flux selon les destinations, les modes et les catégories, amenant ainsi à une estimation de la demande de stationnement pour une zone urbaine.

Bien sûr, les interactions inter agents et les changements dans un contexte urbanisme-transport dynamique se répercutant sur les coefficients des modèles décisionnels (incluant les effets d'apprentissage), ces distributions deviendront à leur tour évolutives.

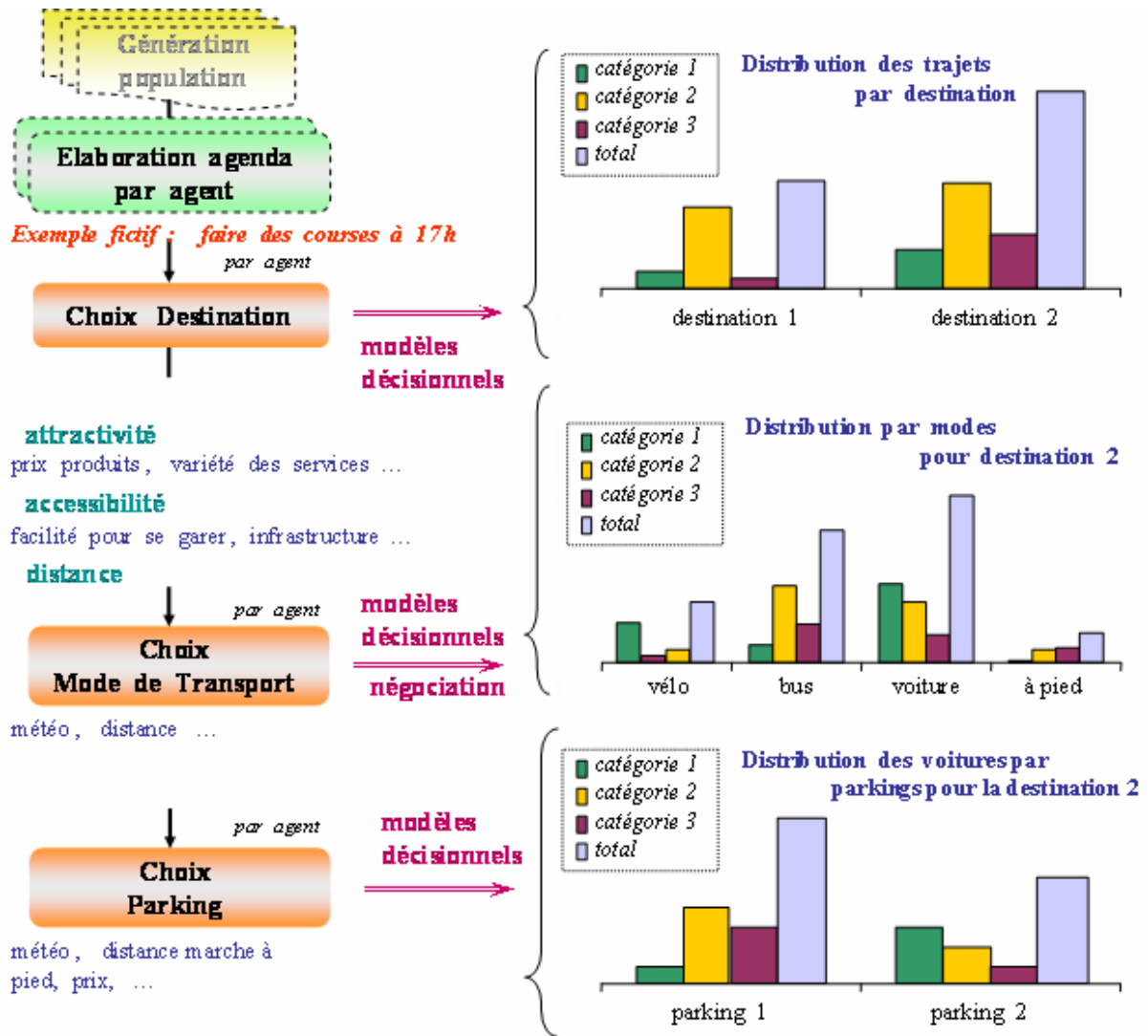


Figure 5-10. Graphes de distribution des choix des individus par étape

5.4.2 Description de l'activité de stationnement d'une zone urbaine

5.4.2.A Capacités de stationnement au niveau d'une zone j C_{STATj}

Le plus souvent, les simulateurs utilisent une estimation du nombre de places globales (gratuites et payantes) sur voirie et le décompte du nombre de places payantes en parc public. Cependant, ces deux types d'informations ne reconstituent pas le parc de stationnement dans la mesure où n'est pas pris en considération le nombre de places des parkings privés et notamment les places de stationnement offertes par les employeurs. Un moyen de contourner ce problème est de ne pas prendre en considération dans la demande de stationnement, les actifs disposant d'une place de stationnement fournie par l'employeur.

Afin d'intégrer le stationnement dans une étude globale de flux, un niveau de détail important est envisagé pour le module "occupation du sol" de notre simulateur pour lequel

une variété de parkings est prévue, en terme d'emplacement, de tarification, de statut (réservé, privé, ...) - voir le diagramme de classes pour les parkings, paragraphe §2.4.7 du chapitre 2. Dans ce cas, il n'y aura aucune difficulté particulière pour connaître avec précision la capacité de stationnement d'une zone (parkings privés, publics).

5.4.2.B Taux de rotation (τ_{rot})

Pour décrire l'activité d'un parking, la capacité de stationnement d'une zone doit être pondérée d'un coefficient de rotation moyen des véhicules sur les places de stationnement disponibles, ceci afin de prendre en compte les flux de véhicules sur la place de stationnement (arrivées et départs). Le taux de rotation d'un parc de stationnement est le nombre de véhicules ayant utilisé une place de stationnement au cours d'une période de temps donnée. Certains travaux s'appuient sur des observations ou des enquêtes [Masson2000] qui prennent un taux de rotation global (quel que soit le type de stationnement) variant de 3 à 8 véhicules par jour et par place.

Dans notre cas, comme il s'agit d'une analyse désagrégée, la durée de stationnement est connue pour chaque agent "véhicule", dans la mesure où chaque agent individu connaît :

- la durée moyenne pour l'activité t_{moy} qui justifie son stationnement (inscrite dans son agenda et fournie par les agents "points d'attraction"),
- la distance d_{p-d} par le chemin le plus court entre parking-destination en tant que piéton (module "occupation du sol")
- sa vitesse de marche à pied v_{moy} (à partir de ses propres caractéristiques).

Dans ce cas, pour une activité donnée, la durée de stationnement ΔT_i de chaque agent se calcule comme suit :

Équation 5-1 :

$$\Delta T_i = t_{moy} + \frac{2d_{p-d}}{v_{moy}} ..$$

Pour un panier de n activités se déroulant autour d'un même parking (à moins de 500 m, selon notre étude de cas) et séparées par des distances d_{dj-dk} , la durée de stationnement est :

Équation 5-2 :

$$\Delta T_i = \frac{d_{p-d_1}}{v_{moy}} + \sum_{j=2}^n \frac{d_{dj-d_k}}{v_{moy}} + \sum_{j=1}^n t_{moy_j} + \frac{d_{dn-p}}{v_{moy}}$$

Le régulateur dispose ainsi du taux de rotation du stationnement comme rapport entre le nombre d'arrivées dans le parking pendant un laps de temps déterminé (par exemple, une heure) et la capacité du parking.

5.4.2.C Taux d'utilisation des parkings (cu_j)

Le taux d'utilisation des capacités de stationnement est une autre caractéristique qui témoigne de l'activité d'un parking et peut s'exprimer en fonction du nombre de voitures garées dans la zone, de la capacité de stationnement de la zone et du taux de rotation moyen des véhicules sur les places de stationnement de la zone [Masson2000] :

Équation 5-3 :

$$cu_j = \frac{(T_j * \tau_{parc}) / tu_{vh}}{C_{STATj} * \tau_{rot}}$$

- avec cu_j – taux d'utilisation des capacités de stationnement dans la zone j
 T_j – nombre de voitures garées dans la zone j
 τ_{parc} – nombre de personnes disposant d'un parc entreprise dans la zone j
 tu_{vh} – taux moyen d'occupation d'un véhicule
 C_{STATj} – capacité globale de stationnement dans la zone j
 τ_{rot} – taux de rotation des véhicules sur les places de stationnement de la zone j

Le régulateur dispose de ces données à partir du module "occupation du sol", le nombre de covoiturages inscrits dans les agendas des agents "individus" et respectivement le taux de rotation pour chaque parking calculé préalablement.

5.4.2.D Au niveau du démonstrateur

Côté démonstrateur, des informations sont disponibles automatiquement en temps réel afin de compléter l'affichage de la grille :

- le nombre de voitures présentes sur la grille,
- le nombre de voitures cherchant à se garer,
- le nombre de voitures dans le parking avec la capacité maximale de ce dernier,
- le nombre total de voitures s'étant garées dans un parking depuis le début de la simulation,
- l'état complet du parking par l'affichage en rouge (le nombre de places disponibles est géré par l'agent "parking").

Notre démonstrateur, pour l'instant, affiche uniquement un seul des critères principaux listés dans les paragraphes précédents qui est la capacité du parking (*Figure 5-11*).

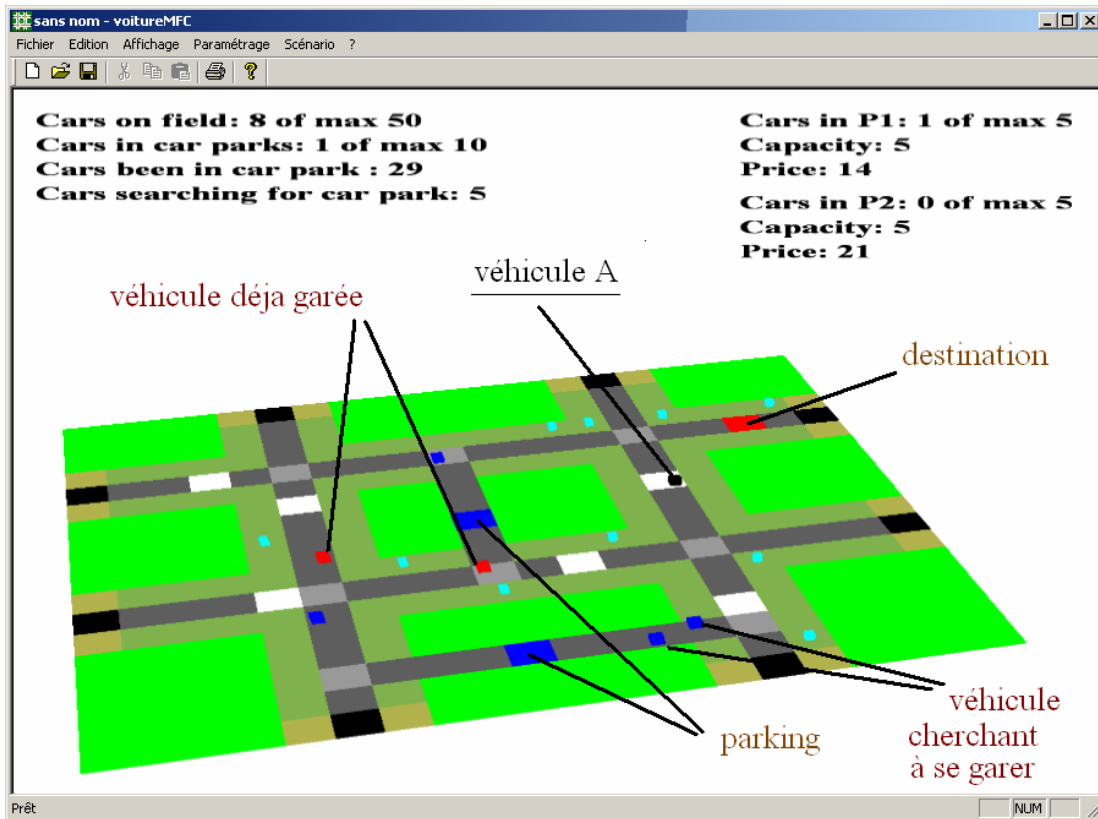


Figure 5-11. Démonstrateur simulant une zone possédant des parkings

5.4.3 Etude des effets du déséquilibre offre-demande de stationnement

La plupart des modèles traitant de la demande de stationnement considèrent qu'une fonction linéaire et additive relie les variables de taux d'occupation des sols d'une zone (comme le travail, les écoles et les lieux habitations) à la demande de stationnement [Tong2004]. En fonction des variables du taux d'occupation des sols, de la fonction demande de stationnement et des types de parkings de chaque zone, des modèles ont été élaborés en considérant uniquement la demande de stationnement et en négligeant le côté offre. Pourtant des considérations prenant en compte l'équilibre demande-offre montrent que c'est une approche inévitable pour une représentation réaliste [Lam1999], [Shoup1999].

Nous partons de l'idée que les problèmes de stationnement ne doivent pas être imputés uniquement à une capacité insuffisante des parkings (mais aussi à la tarification, à la facilité d'accès etc., comme vu dans le chapitre précédent). Les conséquences sont pourtant les mêmes, à savoir, un temps de recherche de place de stationnement qui induit des effets de congestion non négligeables. Pour analyser les conséquences d'une offre de stationnement en désaccord avec la demande, nous utilisons deux indicateurs décrits ci-dessous.

5.4.3.A Temps de recherche d'une place de stationnement (t_{rech})

Cette grandeur est essentielle, à la fois pour la connaissance de l'activité des parkings que pour l'étude des effets de congestion dus à la recherche d'une place pour stationner. Malgré

son intérêt, la plupart des simulations se basent sur des données moyennées issues d'observations (par exemple dans les travaux de [Masson2000], le temps minimum considéré est de 4 minutes et le temps maximum de 15 minutes ; Arnott [Arnott2005] utilise un temps moyen de 7,8 minutes). Malgré une représentation semblant réaliste, ces données restent arbitraires et propres à une certaine zone d'une certaine ville. Le temps de recherche d'une place de stationnement a également fait l'objet de peu d'études théoriques qui s'appuient le plus souvent sur les travaux de Cullinane [Cullinane1993]. Il propose un modèle dynamique de choix de stationnement dont le fondement est purement intuitif et dans lequel il distingue le stationnement licite et le stationnement illicite en fonction du taux d'utilisation des parkings (cu_j).

Dans la mesure où nous avons développé des modèles comportementaux pour chaque alternative (faire des tours autour du parking ou se garer illicitement) et pour les choix correspondants des itinéraires, il n'y a pas de difficulté particulière pour connaître la distance parcourue par un agent dans une zone donnée. Sa vitesse instantanée sera également renseignée par le modèle "car-following" employé dans le module trafic. Dans ce cas, le temps discrétisé de recherche d'une place disponible (illicite ou licite) dans la zone j sera estimé comme suit :

Équation 5-4 :

$$t_{rechj} = \sum_{i=1}^n \frac{d_{ij}}{v_{ij}}$$

Il est également possible d'affiner cette valeur en introduisant deux intervalles de temps correspondant à l'entrée du véhicule dans le parking et à l'immersion du véhicule dans le trafic (cas où le parking d'origine est "off-street", sans indication sur l'état "complet").

Ici aussi, le régulateur doit fixer des conditions de fin (une valeur limite du temps) pour la recherche d'une place autorisée ou une illicite autour du parking. Une fois la condition remplie, l'agent "conducteur" se rend au deuxième parking ou reporte l'activité, en fonction de son classement personnel (voir chapitre 4).

5.4.3.B Taux de congestion (τ)

Mises à part les voitures qui transitent et qui se rendent vers un parking hors zone, l'état d'encombrement des routes dans des zones à forte attractivité est dû à deux causes bien distinctes qui sont, paradoxalement proposés comme des solutions alternatives :

- **les places de parking "on-street"** qui sont souvent vues comme les plus convoitées et qui attirent le niveau le plus élevé de trafic sur la voie. Il y a donc une relation directe entre le taux de rotation et le niveau de trafic induit.
- **les places de parking "off-street" ou souterrains**, via les ralentissements dus aux entrées et sorties, aussi bien qu'à la recherche d'une place de stationnement évoquée dans les paragraphes précédents.

Ces scénarios sont pris en considération dans la conception du simulateur, dans la mesure où nous envisageons l'introduction de tous les types de parkings (se reporter au diagramme de classes, paragraphe §2.4.7 du chapitre 2) aussi bien qu'un système de signalisation exhaustif. La congestion due au déséquilibre offre-demande de stationnement se manifeste principalement de trois manières :

- **par une baisse de la vitesse ou baisse de la qualité de service** : c'est le cas usuel lorsque la demande n'excède pas les capacités de l'offre ; c'est la relation classique débit/vitesse ;
- **par formation de files d'attente** : lorsque la demande excède l'offre, il y a formation de files d'attente, conduisant à une baisse de l'efficacité du système de transport ;
- **par des instabilités dues à la vitesse ou aux débits** : c'est une conséquence des deux points précédents ; il ne faut pas raisonner "en moyenne", mais prendre en compte les variations sur une même période, qui conduisent à des modifications importantes des paramètres mesurables (débit/vitesse).

Il n'y a pratiquement pas de travaux menés sur les interrelations entre l'offre de stationnement et l'état de congestion des routes dû à la recherche d'une place disponible. Pour étudier l'effet de la recherche d'une place de stationnement sur le degré de congestion du trafic, il n'y a, à notre connaissance, qu'un seul travail proposant un lien parking saturé/trafic [Arnott2005].

Cette approche ne fait pas de distinction comportementale entre les usagers des parkings, leur choix étant arbitraire. La ville de Manhattan (totale symétrie) est prise pour cadre. Les conditions de trafic sont considérées comme étant les mêmes pendant la période d'étude. Tous les parkings sont considérés "on-street". Les destinations sont uniformément distribuées.

Il existe plusieurs modèles sur la congestion ou l'hyper congestion sur les routes dues à la différence de vitesses entre véhicules [Verhoef1999], [Arnott2001], [Crozet2001], [Van Dender2003], [Muller2005], mais ils sont, pour la plupart, basés sur des approches statiques et calibrés à partir de considérations économiques. Des outils très performants de supervision ont été développés ces dernières années (voir les travaux de Scemama [Scemama2000], [Scemama2004]) allant jusqu'à simuler les impacts d'un système d'information des voyageurs [Zargayouna2003].

En utilisant la théorie développée par Arnott [Arnott2005], nous avons considéré que, pour un tronçon de route donné, l'indicateur dimensionnel du taux de congestion peut être écrit comme suit :

Équation 5-5 :

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 - \frac{q}{q_{sat}}}$$

où τ_0 – constante établie arbitrairement et qui correspond à un état de congestion négligeable à une vitesse moyenne jugée "raisonnable" (à définir par le régulateur)

q – densité de trafic dans des conditions normales de trafic (nombre de véhicules par intervalle de temps qui peut être renseigné à partir du module trafic)

q_{sat} – densité de trafic quand le taux de saturation d'un parking est atteint (connu à partir du module infrastructure).

5.4.3.C Au niveau du démonstrateur

Pour notre simulateur en cours d'étude, le déplacement et les processus décisionnels d'un agent "individu" étant reproduits par une simulation microscopique du flux (chaque véhicule individuel peut être suivi et interrogé), il sera possible de connaître les vitesses et les positions des véhicules sur le réseau dans une zone donnée.

Le régulateur peut disposer de représentations dans le temps concernant l'évolution de ces indicateurs pour une zone, auxquels nous avons ajouté des indicateurs liés au trafic qui nous ont semblé intéressants pour une analyse discrétisée par créneaux horaires : le nombre de voitures en échec, le taux de places vacantes, le nombre de voitures dans la zone (*Figure 5-12*).

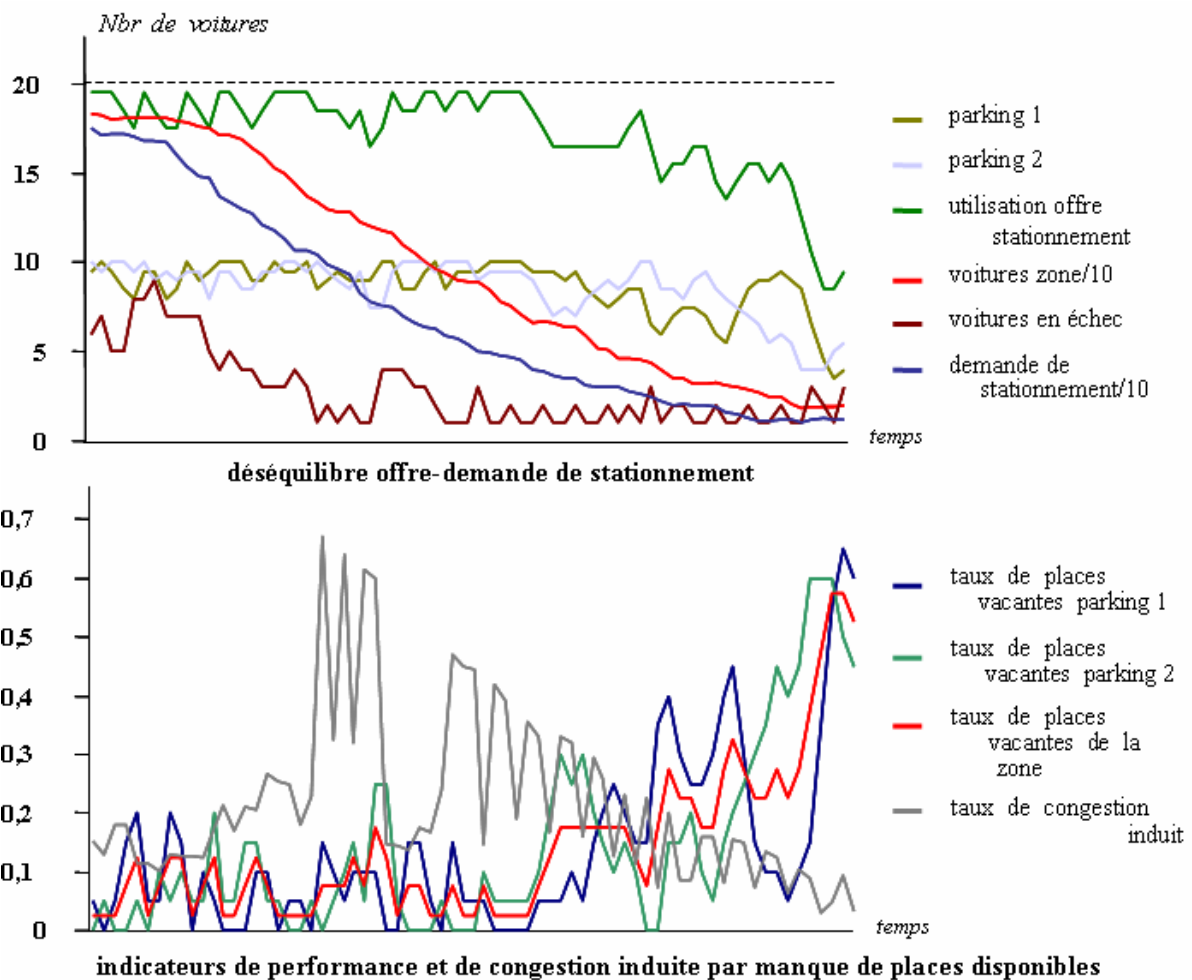


Figure 5-12. Ensemble des courbes décrivant l'activité d'une zone possédant deux parkings

5.4.4 Simulation des stratégies

De Palma [DePalma2001] rappelle qu'il y a deux décennies, les décideurs croyaient que les problèmes de parkings étaient une conséquence du manque de places de stationnement. Ce point de vue naïf est vrai si les changements des décisions des automobilistes sont négligés à moyen ou court terme (comme le choix modal, par exemple). Ces dernières années, il a été admis que les systèmes de transport sont plus subtiles dans le sens où, une bonne gestion de l'offre de stationnement doit réduire le temps de recherche d'une place de stationnement, donc amener à la baisse du prix généralisé d'une voiture et induire un changement dans le comportement des usagers [Masson2000].

Tous les aspects concernant l'activité des parkings et ses conséquences n'ont pas été abordés. En amont, la simulation n'est pas alimentée par des modèles qui permettraient de connaître quel véhicule, en quel point et à quel moment il entre sur la grille. Afin que l'application développée soit la plus paramétrable possible, le régulateur peut gérer des paramètres concernant le réseau :

- le nombre maximum de voitures dans le réseau,
- la capacité du parking,
- le nombre de parkings sur la plaque.

Figure 5-13 montre une vue avec les principales caractéristiques utiles au régulateur lors de la simulation avec notre démonstrateur.

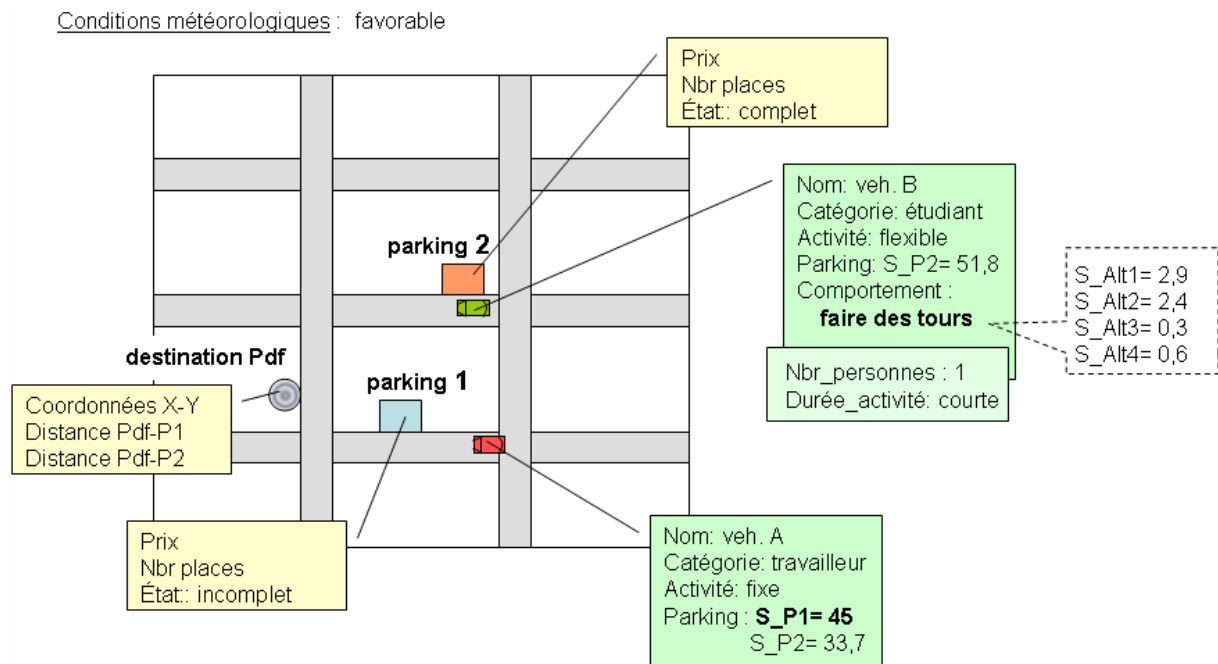


Figure 5-13. Vue décrivant un scénario pour le démonstrateur version N+1

A partir du démonstrateur initié, deux types d'exploitations peuvent être envisagés par le régulateur :

- 1) soit le régulateur souhaite **simuler les impacts des préférences dans un contexte déjà existant** ; dans ce cas, les niveaux des variables sont fixés et renseignés comme suit :
 - dans les caractéristiques des agents "individus" (vitesse de marche à pied faible ou élevée),
 - dans leur agenda personnel (covoiturage ou non, activité urgente ou non, durée de l'activité)
 - l'infrastructure (facilité d'accès à un site à travers le nombre de routes amenant au parking, distance entre parking et destination)
 - le module parking (pour le prix).
- 2) soit le régulateur souhaite **simuler les effets de la tarification sous contraintes d'une capacité de stationnement et les impacts sur de catégories sociodémographiques** ; dans ce cas, des boîtes de dialogue permettent respectivement de modifier les caractéristiques des parkings et de suivre l'évolution des préférences (*Figure 5-14*).



Figure 5-14. Boîtes de dialogue de paramétrage des parkings et voitures

En pratique, nous admettons volontiers qu'aucun régulateur ne se lancera dans des interprétations issues des chiffres dont uniquement le concepteur et les agents ont le secret. Nous verrons par la suite qu'une présentation graphique synthétisera et facilitera leur interprétation, jusqu'à suggérer des scénarios maximisant des préférences.

5.5 Interactivité régulateur - démonstrateur

Si cette interactivité est évidente lorsque le régulateur, en tant qu'acteur, s'immerge dans l'environnement 3D, elle est généralement beaucoup moins marquée lorsque le régulateur est passif (ou "simple" utilisateur).

Une certaine souplesse d'utilisation, adaptation et surtout une aide... à l'aide à la décision, restent des exigences des utilisateurs de ce type d'outil que nous avons largement évoqué dans le chapitre 1. Autrement dit, un utilisateur n'est pas hostile à une approche type SMA « boîte noire », à partir du moment où il est pris en considération lors de l'étude du système (il est dans la boucle de développement) et a aussi la maîtrise des variables à tester, ainsi qu'une certaine lisibilité des résultats de ses simulations (*Figure 5-15*).

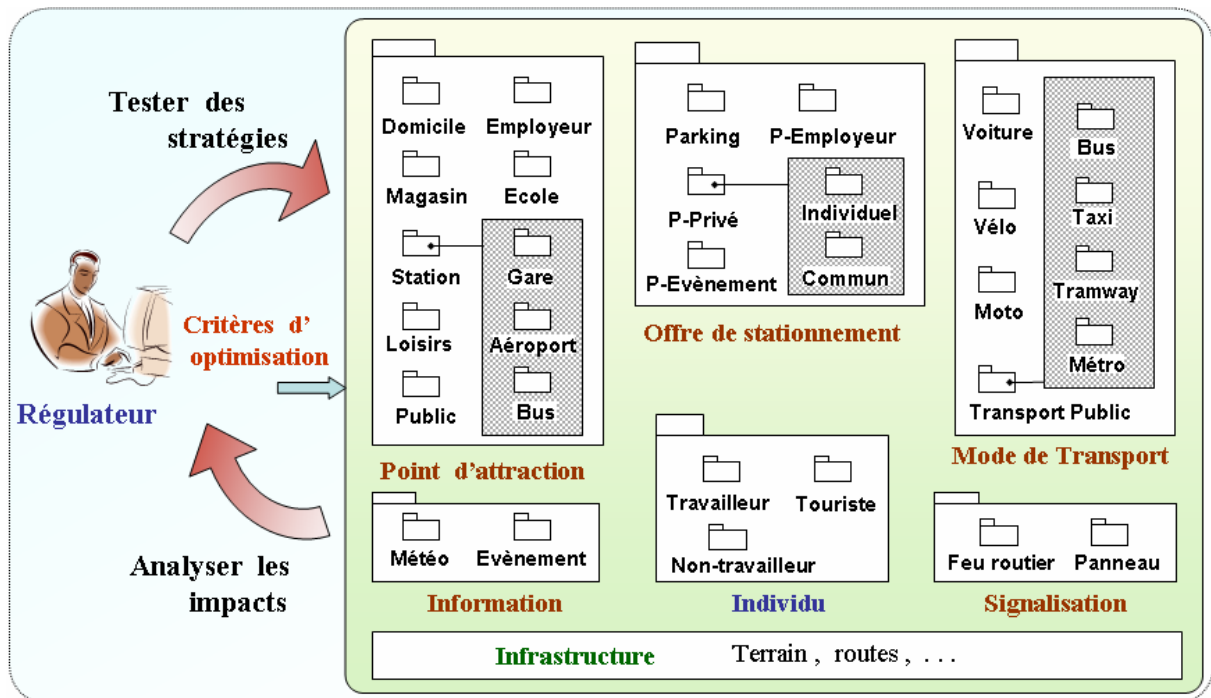


Figure 5-15. Interaction du régulateur avec le démonstrateur

5.5.1 Une aide à la décision : présentation séquentielle des résultats

La gestion des parkings est un composant essentiel pour la gestion des demandes de déplacements et une problématique complexe dans l'élaboration des plans de déplacements urbains (P.D.U.) des villes. Les stratégies pour une meilleure gestion de l'activité des parkings ne manquent pas (durée admise de stationnement, tarification, incitation à l'usage des transports publics ou des parkings "off-street"), ni les démarches employées, d'ailleurs.

- Si le maximum admissible de la durée de stationnement décroît, le niveau du trafic attiré par la rue croît. Les manœuvres pour se garer sur les places "on-street" peuvent également contribuer à des phénomènes comme la congestion, les retards, les accidents [Black1995], [Youssif2004]. Dans les rues à fort trafic de bus, la baisse de la vitesse peut avoir un impact négatif sur la qualité de service du système de transport et peut affecter l'attractivité pour le transport public.
- Augmenter la tarification n'est pas toujours efficace. Ces mesures peuvent permettre de faciliter l'accès aux centres-villes pour les visiteurs aux dépens des migrants alternants qui travaillent dans ces quartiers. Mais de par leur aspect contraignant, ces réglementations sont susceptibles d'inciter les résidents à fuir vers les périphéries de ville et donc de nuire aux commerces de ces quartiers.
- Encourager l'utilisation d'autres moyens de transport, couplé avec la mise en place des parkings relais, pourrait être une solution. Cependant, elle risque d'être coûteuse et imprévisible, car l'étude des pratiques modales indique que la réponse des usagers potentiels face au choix modal est très hétérogène et dépend de facteurs sociologiques

souvent très éloignés des caractéristiques généralement prises en compte dans les études et modélisation du choix modal. Prendre la voiture pour se rendre à un point d'attraction ayant des places réservées peut être plus apprécié que de bénéficier d'un transport public à moindre coût (exemple des zones commerciales).

- Reste, peut-être, la possibilité d'encourager l'utilisation des parkings "off-street" ou souterrains, d'où l'intérêt de signaler leur présence pour des visiteurs qui ne disposent pas d'une connaissance des zones.

Comprendre les facteurs qui influent le comportement des automobilistes est d'une importance primordiale, bien qu'on admettra volontiers qu'ils ne font pas de spéculations mathématiques pour choisir où stationner. La complexité des décisions, liée aux nombres de variables qui concourent au choix, aux effets dues aux conditions de déplacement, aux changements de comportement, rendent les effets d'une stratégie mise en place par le régulateur peu prévisibles. Ces effets peuvent même être en réel décalage avec ceux escomptés (Figure 5-16).

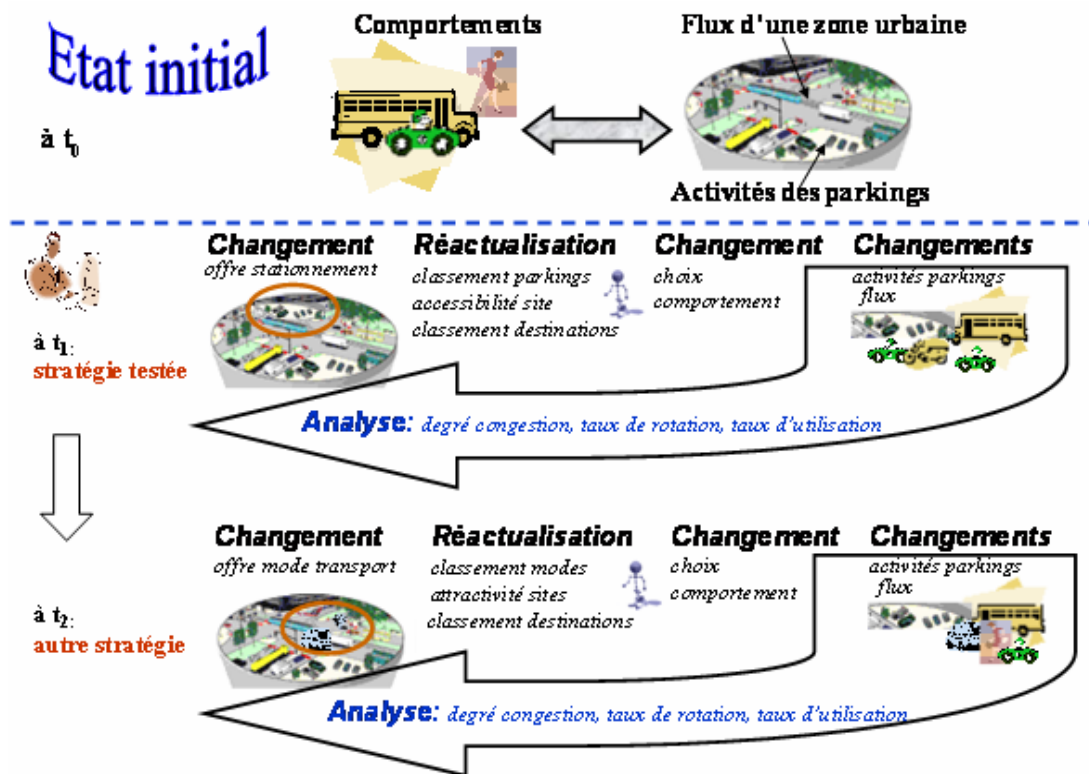


Figure 5-16. Effets de la mise en place des stratégies

Tournés vers les simulateurs de trafic, les décideurs trouvent peu d'informations sur l'aspect comportemental pouvant suggérer une stratégie plutôt qu'une autre. Ils mettent en cause le processus "boîte noire" qu'ils ressentent plutôt comme un outil de décision (100% simulateur), plus que comme un « outil d'aide à la décision » (80% simulateur, 20% utilisateur).

Lors d'une simulation informatique, la solution pourrait être une présentation séquentielle des résultats intermédiaires de la simulation aidant le régulateur à prévoir le comportement des agents (*Figure 5-17*).

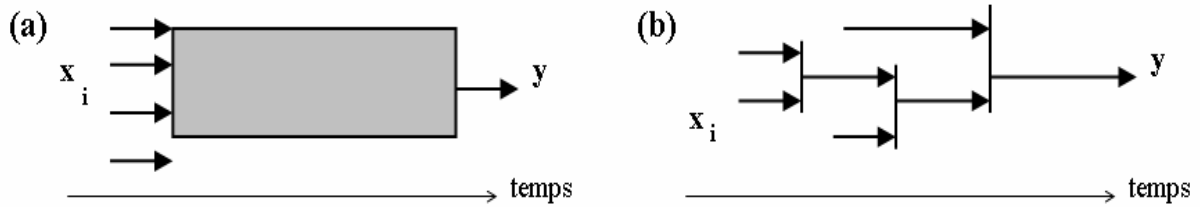


Figure 5-17. (a) Vision "boîte noire" - (b) Vision séquentielle

Prenons par exemple le problème du choix d'un parking. Chaque agent "individu", selon sa catégorie sociale, dispose d'un modèle réduit de choix prenant en compte les variables internes et externes. Il prendra toujours les décisions qui maximisent son score selon un modèle réduit du type :

Équation 5-6 :

$$Y = M + (a_1 \quad a_2)A + (b_1 \quad b_2)B + \dots$$

La robustesse du choix de l'agent "conducteur" suite aux interactions inter agents lors du déplacement (« fidélité » lors de la phase d'apprentissage) est générée par le rapport signal/bruit obtenu par le modèle de Vigier à partir du plan produit:

Équation 5-7 :

$$s/n = s/n_{moy} + (s/n_{A1} \quad s/n_{A2})A + (s/n_{B1} \quad s/n_{B2})B + \dots$$

Ce sont des informations auxquelles, même si le régulateur peut avoir accès, restent opaques par leur difficulté d'interprétation. Un des avantages du modèle Vigier est justement la manière synthétique et claire de présenter les effets moyens des variables et des rapports signal/bruit (voir l'exemple *Figure 5-18*).

Prenons un exemple fictif. Supposons que, lors de la mise en place d'une stratégie, le régulateur s'intéresse au comportement d'une catégorie X et qu'il étudie les effets de plusieurs variables sur la perception de la qualité du stationnement dans une certaine zone de la ville. Après élaboration de l'enquête et traitement de données, l'agent "pexavvi" désigne comme variables significatives quatre d'entre elles :

- A - facilité d'accès, avec A₁ "difficile", A₂ "facile"
- B - distance de marche à pied, avec B₁ "faible", B₂ "élevé"
- C - prix du parking/heure, avec C₁ "faible", C₂ "élevé"
- D – type de parking, avec D₁ "on-street", D₂ "off-street"

Les variables externes, reliées aux conditions trafic dues aux interactions avec les autres agents "conducteurs-véhicules" sont, arbitrairement : degré de congestion, information en temps réel, degré de sécurité.

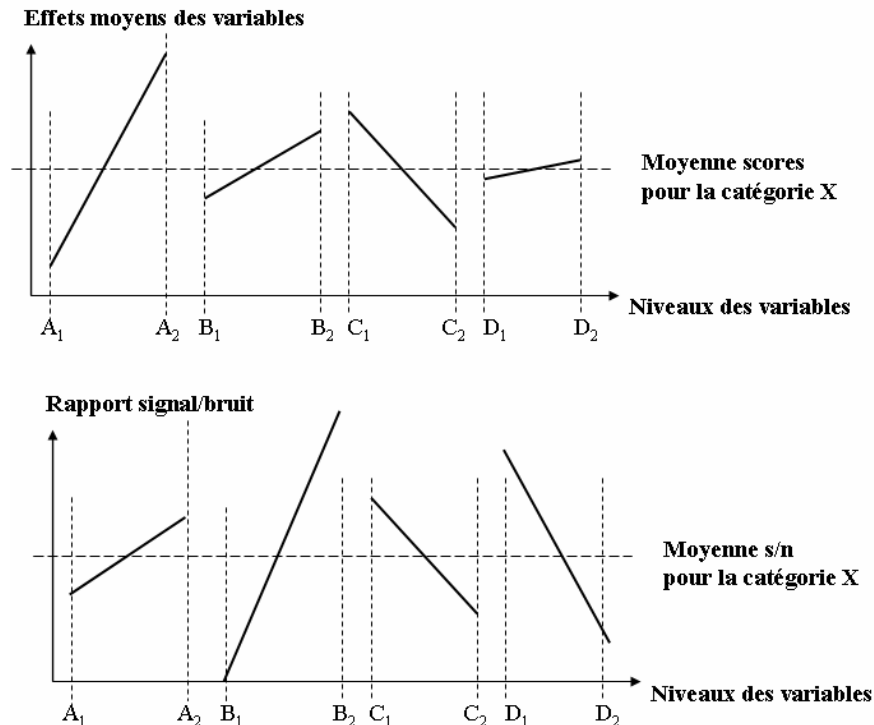


Figure 5-18. Exemple (fictif) des effets moyens et des rapports signal/bruit en fonction des variables d'entrée

A travers ces graphes, le régulateur dispose d'un aperçu explicite des préférences de cette catégorie d'agents "conducteurs" et d'une vision qui se prête facilement à une étude prévisionnelle.

- A partir du premier graphe (effets moyens des variables) :
 - La variable A (facilité d'accès) influe le plus sur la perception de la qualité du service, suivie par le prix du parking
 - Pour maximiser son score l'agent "individu" choisirait le scénario avec le jeu de niveaux « A2 B2 C1 D2 ».
- A partir du deuxième graphe (effets moyens des rapports signal/bruit) :
 - Du fait que le rapport s/n varie peu pour la variable A, la perception de la facilité d'accès est une variable dont l'effet reste quasi-inchangé, quelles que soient les conditions trafic. La phase d'apprentissage n'aura donc que très peu d'effet sur le choix des agents.
 - La variable D (type de parking) modifie peu la qualité de stationnement perçue par les agents de cette catégorie. En revanche, le rapport s/n correspondant fluctue fortement et ce, qu'il s'agisse d'un parking on-street ou off-street. Si le régulateur souhaite assurer un comportement "fidèle", insensible aux interactions inter agents, il doit choisir le niveau D₁ (implémenter un parking on-street).

A travers ce type de représentation, et pour chaque catégorie sociodémographique, le régulateur peut évaluer le comportement des agents "individus" selon les scénarios et tester une stratégie qui serait en accord avec ses objectifs.

5.5.2 Une aide à l'aide à la décision : recherche de stratégies d'optimisation

Shoup s'est intéressé à la relation qui existe entre l'offre de stationnement et la demande de déplacements [Shoup1999]. Il a comparé le nombre de déplacements des véhicules par jour vers les restaurants avec la demande de stationnement autour de ces restaurants. Les résultats trouvés sont en désaccord avec les attentes, à savoir que certains parkings sont respectivement en sous-charge ou sur-charge, alors que le suivi du développement des parkings pour chaque zone a vraisemblablement été conduit pour différents sites et à différents moments à partir du suivi de la génération des déplacements.

Ce "bizarre" taux de rotation suggère alors un problème sérieux : l'offre de stationnement et la génération des déplacements seraient-ils des indicateurs trompeurs pour le transport et l'aménagement du territoire ?

Une des raisons de ce constat est que, en désaccord avec les urbanistes, le modèle des spécialistes de trafic était basé sur des simulations faites pour un parking libre (non-payant). Les parkings à faible prix stimulent la demande de déplacements. Les déplacements observés deviennent des indicateurs pour concevoir une infrastructure de transport pour amener les véhicules vers les parkings. De leur côté, les développeurs urbains limitent le développement pour prévenir la congestion autour des sites offrant des places non-payantes. A cause de ce raisonnement en boucle, les parkings sont, selon Shoup, « ... the tail that wags two dogs - transportation and land use. » (*traduction* : « la laisse qui remue deux chiens »), les deux chiens étant le trafic et l'aménagement du territoire.

A ce contexte compliqué et parfois contrasté s'ajoutent, non seulement, les points de vues différents des acteurs qui interviennent dans la prise de décision, mais aussi le ressenti des usagers. Néanmoins tout le monde s'accorde sur le fait que l'efficacité des mesures dépend en grande partie de la perception qu'a un usager du réseau routier et de la qualité des services offerts. Lorsqu'il convient de trouver un compromis, ceci signifie qu'il ne suffit pas d'estimer les effets des variables puis de les comparer à part, que ce soit pour retenir un scénario (combinaison de niveaux) ou que ce soit pour amener des éléments de compréhension des phénomènes induits.

La recherche d'un optimum consiste à définir une combinaison de niveaux de variables permettant de satisfaire aux mieux les cahiers des charges des uns (ingénieurs trafic et urbanistes) et les préférences des autres (usagers de toutes les catégories).

Dans ce cas, il faudrait compléter notre démarche par une des méthodes d'optimisation multicritères, parmi lesquelles l'utilisation des *fonctions de désirabilité* trouve sa place [Doehlert1970] (voir annexe Anx. E-4).

Nous proposons d'adapter cette méthode à l'utilisation des enquêtes à préférences déclarées.

Considérons une stratégie fictive qui consiste à introduire un "Park&Ride" dans une zone urbaine à travers les indicateurs suivants : A - le prix/heure, B - la distance du nouveau parking par rapport à la zone concentrant les points d'attraction, C - la capacité de

stationnement du parking, D - la fréquence de la desserte (le bus de liaison). Il semble évident que ces indicateurs n'ont pas la même importance et ne sont pas perçus de la même manière par les spécialistes trafic, les urbanistes et les usagers (différents à leur tour selon la catégorie sociodémographique).

Initialement, il s'agit d'étudier un plan orthogonal visant à étudier l'effet de quatre variables pour lesquelles, afin de simplifier, sont utilisés seulement deux niveaux pour chacune (maximum 16 scénarios à évaluer). Mais l'étude d'un optimum nécessite la construction des réseaux uniformes de Doehlert et s'appuie sur la définition d'un simplexe régulier initial dont les coordonnées des sommets sont facilement calculables si on procède par récurrence (voir annexe Anx. E-4 pour l'explication de l'algorithme de construction des réseaux). Les deux niveaux des plans orthogonaux deviennent les valeurs minimales et maximales admissibles. Par exemple, nous aurions :

$$A \in [0.5 ; 4] \text{ euros/h} ; B \in [100 ; 500] \text{ m} ; C \in [30 ; 80] \text{ places} ; A \in [1 ; 5] \text{ bus/h}$$

Ainsi, pour un plan à quatre variables chacune à deux niveaux, l'enquête est ramenée à 21 questions (un peu lourd semble-t-il, mais très efficace) avec A à 5 niveaux, B à 7 niveaux, C à 3 niveaux, D à 3 niveaux (tous compris dans la plage des 2 niveaux limites définis par le régulateur).

Il s'agit de 21 questions sur 315 scénarios possibles. Cette fois-ci, le modèle Vigier ne peut pas être utilisé pour estimer les scénarios non évalués car le plan n'est pas orthogonal. Grâce à la méthode des moindres carrés, on peut estimer les coefficients de chaque modèle de score et les résidus (écarts entre les scores obtenus et les scores issus des modèles). Le modèle est de second ordre (présenté dans l'annexe Anx. E-1) :

Équation 5-8 :

$$S = b_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n e_{ii} x_i^2$$

avec $x_i, x_j \dots$ étant les valeurs codées des niveaux étudiés des variables qui sont sur des échelles différentes. La relation de codage consiste à transformer la valeur v_i correspondante à la variable V en une valeur codée x_i (voir annexe Anx. E-4).

Une partie de ce plan est présentée dans *Tableau 5-3*.

Supposons, par exemple, que les réponses soient données sur une échelle de 1 à 5 (possibilité de les répéter, bien sûr).

Tableau 5-3. Plan réduit soumis à des régulateurs et des catégories d'individus pour l'exemple d'implantation d'un "Park&Ride"

n° question	Variables d'entrée				Réponses (score)				
	prix (h)	distance (m)	capacité stationnement	fréquence bus (nb/h)	Régulateur	Urbaniste	Catégorie X	...	Catégorie Y
1	3	300	50	4	1	2	1,45	...	2,15
...
3	2	265	45	6	2	2	2,6	...	1,8
...
21	2,8	325	63	5	4	1	3,85	...	2,13

La recherche de l'optimum se fait selon trois étapes :

- Transformer chaque réponse (ou moyenne des réponses d'individus appartenant à un même groupe) à partir d'une fonction de désirabilité individuelle d_i dont la nature dépend des objectifs à atteindre (pour tous les acteurs, il s'agit de maximiser le score).
Pour chaque scénario et pour chaque bénéficiaire du service (régulateur, urbaniste, usagers selon une catégorie), la désirabilité individuelle peut se déterminer comme suit :

Équation 5-9 :

$$d_i = \frac{S_{max} - S_i}{S_{max} - S_{min}}$$

avec $S_{max} = 5$, $S_{min} = 1$ et S_i étant le score obtenu pour le scénario i .

- Définir pour chaque scénario i une fonction de désirabilité globale (d_{ig}) à partir de la moyenne géométrique des fonctions de désirabilité individuelle (la pondérer éventuellement pour prendre en compte l'importance relative de la réponse) :

Équation 5-10 :

$$d_{ig} = (d_{i1}^{w1} d_{i2}^{w2} d_{i3}^{w3} \dots)^{\frac{1}{w1+w2+w3+\dots}}$$

- Le poids (entre 1 et 10) accordé à chaque groupe (régulateur, urbaniste, catégories X, Y, etc.) est laissé à l'appréciation de l'utilisateur du simulateur. Pour les catégories sociodémographiques, il peut être envisagé d'utiliser, comme critère d'attribution des poids, le nombre de personnes par catégorie. L'utilisateur peut vouloir favoriser les

préférences d'une certaine catégorie (par exemple, les travailleurs), au quel cas il envisagera un autre jeu de poids.

- Chercher les niveaux des variables qui permettent d'atteindre le maximum de la fonction de désirabilité globale (dans le cas où la combinaison n'est pas dans le plan, le modèle pour la désirabilité globale peut être appliqué afin de la retrouver.).

Il en résulte un scénario optimal : prix = 2,3 euros/h, distance = 400 m, capacité du parking = 60 places, fréquence des bus = 4/h. Il est également possible de fournir un modèle de désirabilité par groupe et, à travers l'analyse de la variance, de déterminer les variables significatives pour les uns et pour les autres.

Ces algorithmes seront en charge de l'agent "pexavvi" qui fournira un module "élaboration des scénarios" à la disposition du régulateur. Ainsi, la boucle sera bouclée, avec de l'aide pour l'aide à la décision.

Les démarches présentées dans ce paragraphe permettent de valoriser l'interactivité régulateur-simulateur de deux manières (Figure 5-19) :

- soit le régulateur a une stratégie fixée, et dans ce cas, il peut prévoir les comportements des usagers face au changement induit ;
- soit le régulateur cherche une stratégie offrant une solution de compromis pour satisfaire au mieux l'ensemble de préférences, et ici, il maximise la désirabilité globale.

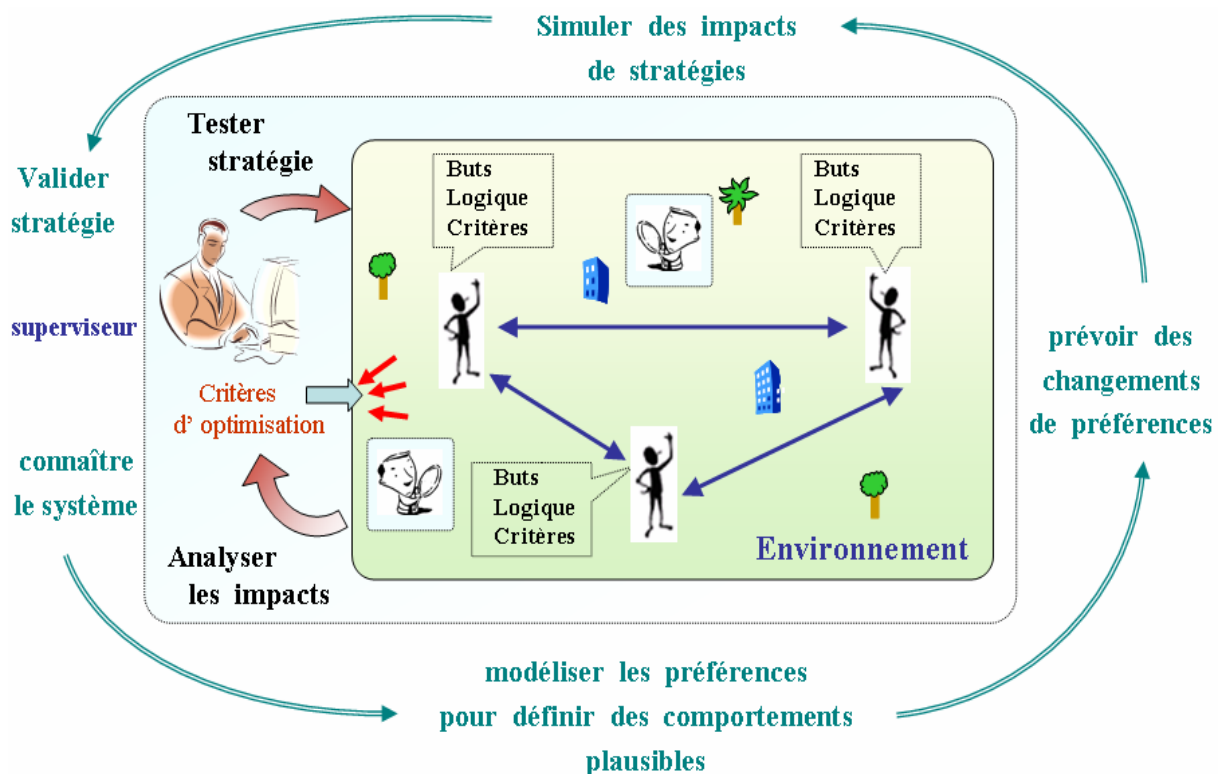


Figure 5-19. Le régulateur est dans la boucle

Ce type d'approche peut être employé dans tous les systèmes sociétaux pour la simulation des effets des stratégies ou la recherche d'un optimum centralisé. Reste, bien sûr, à la charge du superviseur, une étape délicate qui dépasse le cadre d'une simple approche algorithmique : quels poids et pour quels bénéficiaires ?

5.6 Conclusion

L'insatisfaction par rapport aux résultats fournis par les études de trafic, séquentielles pour la plupart, a généré un débat sur les hypothèses implicites utilisées dans ces approches et sur l'intérêt de penser le transport urbain, et en particulier les parkings, en termes de réseau et non plus uniquement en termes d'infrastructure isolée.

Une partie de ce chapitre est consacrée à la description d'un démonstrateur qui a été initié lors de nos travaux avec plusieurs objectifs :

- permettre au régulateur de prévoir la demande de stationnement pour une zone urbaine en prenant la chaîne des déplacements dans son ensemble. L'organisation des déplacements est basée sur l'ensemble de choix (modal, partage de mode de transport, destinations, parkings) faits par l'utilisateur du réseau routier pour satisfaire à ses activités. A partir de décisions que chaque agent déclenche au moyen de ses modèles décisionnels, un régulateur trafic peut connaître la distribution des flux par mode de transport, par destination ainsi que la demande de stationnement par zone.

- définir (ou adapter) des indicateurs macroscopiques permettant au régulateur de décrire l'activité de stationnement par zone (taux de rotation, d'utilisation) et les effets de congestion induits à la recherche d'une place de stationnement (temps de recherche, taux de congestion). Pour ce faire, des indicateurs trafic ont été également introduits permettant une étude discrétisée par créneaux horaires, selon les catégories sociodémographiques, le type d'activités à mener (nombre de voitures cherchant à se garer, nombre de voitures en échec, etc.).

- simuler les effets des stratégies urbanisme-transport sur l'activité de stationnement en parcourant les étapes de la chaîne des déplacements ou bien au niveau des parkings en tant que tels (tarification, modification de la capacité de stationnement d'une zone, etc.).

Les régulateurs trafic perçoivent trop souvent les simulateurs comme des boîtes noires de « prise de décision ». A partir de leurs attentes, nous avons donc ajouté au démonstrateur la possibilité de bénéficier d'une certaine lisibilité des résultats par une présentation séquentielle et conviviale de résultats ou des tendances comportementales. De plus, le régulateur dispose de flexibilité pour ses simulations largement évoquées lors des chapitres précédents (choix catégories sociodémographiques, variables et niveaux à tester).

A une époque où tout le monde s'accorde sur le fait que le trafic et ses conséquences sont « l'affaire de tous » (régulateurs, urbanistes, sociologues, écologistes, usagers du réseau routier,...), nous avons proposé une démarche d'optimisation centralisée visant à mettre en accord superviseurs et bénéficiaires des services pour la mise en œuvre d'un projet transport, ceci en satisfaisant au mieux les objectifs des uns et les préférences des autres.

Conclusions générales

Dans ce mémoire, nous nous sommes principalement intéressés à l'élaboration de modèles comportementaux d'un individu qui, confronté à un ensemble fini d'éventualités, doit évaluer, classer et faire un choix en fonction de ses propres caractéristiques ou aspirations, et des attributs de chaque modalité de son univers de choix.

Nos travaux se sont déroulés dans le cadre du développement d'un simulateur 3D de trafic urbain multimodal basé sur le paradigme multi agents, un sujet relativement récent au sein de notre équipe de recherche. Ce simulateur se démarque par la volonté de fournir un outil "personnalisé" pour la construction d'une ville à l'aide de composants (plaques, bâtiments, etc.) réutilisables et par la possibilité de tester, d'une façon interactive, des comportements évolutifs des usagers du réseau routier dans un contexte transport-urbanisation spécifique à une certaine ville. Dans la quête d'une représentation réaliste des comportements des entités décisionnelles, les modèles proposés dans la littérature se sont souvent heurtés à l'importance des calculs impliqués par la prise en compte d'un nombre important de variables, mais aussi aux données nécessaires issues d'enquêtes à mener. La manipulation de ces outils se révèle être lourde avec un caractère peu flexible et peu transposable.

Partis de difficultés liées à la modélisation des systèmes sociaux qui opèrent avec des entités décisionnelles hétérogènes dans un contexte fortement dynamique, nous avons cadré nos études autour de plusieurs aspects.

- Il ne s'agit pas d'établir des modèles "universels" transposables, mais de proposer un cadre méthodologique qui sera exploité par un régulateur (utilisateur) avec une grande flexibilité dans la définition des variables à tester, de leurs niveaux et des catégories sociodémographiques dont il souhaite connaître le comportement.
- Négliger des variables de choix ne doit pas être imposé par des nécessités de simplification analytique et de coûts calculatoires excessifs engendrés au simulateur.
- Les préférences des agents "individus" appartenant à une même catégorie sociodémographiques sont considérées identiques au départ. Cependant, leurs comportements doivent s'individualiser grâce aux expériences issues de déplacements effectués, d'éventuelles négociations entre eux et aux changements urbanisme-transport en terme d'offres et/ou contraintes.

- Une représentation réaliste des comportements des usagers du réseau routier d'une certaine ville nécessite d'intégrer la qualité d'un service telle qu'elle est perçue par ses usagers.
- Le régulateur doit être dans la boucle. Il doit, d'une part, avoir des informations sur les choix potentiels des agents "individus" afin d'envisager des stratégies en matière de transport et urbanisme. Par ailleurs, il doit pouvoir tester des stratégies qui doivent satisfaire à son cahier des charges et aux préférences des usagers du réseau routier.
- Une attention particulière est accordée à la demande de stationnement, une étape à part entière pour nous, absente dans la plupart des simulateurs opérationnels.

A partir d'un modèle conceptuel sur l'organisation des déplacements (étapes imbriquées des modèles à 4 étapes et celui à base d'activités) que nous avons adapté à nos objectifs, nous avons proposé une architecture modulaire et un modèle informatique utilisant la technologie multi agents. Son élaboration s'appuie sur les formalismes UML et les réseaux de Petri colorés afin de spécifier et de décrire les interrelations inter agents lors des phases de déplacements qui sont en lien direct avec l'offre et la demande de stationnement en ville (choix modal et de destinations).

Le cadre méthodique que nous proposons pour la modélisation des comportements et de l'apprentissage est un de nos principaux apports. Il s'appuie, outre sur les performances d'une *simulation multi agents*, sur un couplage original de concepts issus de plusieurs domaines : *le marketing* (enquêtes à préférences déclarées), *les techniques d'optimisation des procédés industriels* (plans orthogonaux, méthode de Vigier), *les outils statistiques qualité* (indicateur de robustesse), *des techniques de Data Mining* (théorie de l'évidence et logique floue).

Appliqué à la modélisation de la demande de déplacement, les principaux intérêts de ce cadre méthodologique sont les suivants.

- Les enquêtes à préférences déclarées, couplées avec les plans orthogonaux, alimentent le simulateur avec des données dont le traitement, par la méthode de Vigier, permet d'aboutir à des modèles décisionnels pour classer les alternatives ou les services mis à la disposition des agents "individus". Il est également envisageable de faire ressortir les effets des interactions entre les variables de choix, un manque évident de la plupart de modèles classiques.
- Un comportement spécifique est obtenu pour toutes les catégories sociodémographiques, dont la discrétisation est à la charge du régulateur. Cette approche de classification concerne aussi bien les alternatives dites homogènes (comme le choix entre plusieurs destinations, parkings), que les alternatives dites hétérogènes (choix modal, comportement devant le déséquilibre offre-demande de stationnement). L'approche de Dezert-Smarandache permet de fusionner les données en prenant en compte les caractères indécis et conflictuel des informations.
- Les modèles intègrent à la fois les variables associées aux choix préliminaires au déplacement (partie décisionnelle), que des variables gérées par les interactions entre

agents "individus" lors du déplacement (partie apprentissage par jugement interne). L'indicateur de robustesse traduit le degré de « fidélité » des agents individus pour un choix préliminaire devant des fluctuations dues à des conditions trafic exogènes au jeu de variables qui a généré le choix. Cet indicateur peut également être employé pour départager des alternatives ayant des scores proches.

- L'application de l'analyse de la variance permet d'opérer avec un nombre important de variables d'entrée aussi bien quantitatives (prix, distance, ...), que qualitatives (type d'activité, météo, ...), que mal spécifiées ou floues (accessibilité, attractivité, affinité pour un site, ...), sans pour autant induire des coûts calculatoires prohibitifs.
- Les modèles de choix et d'apprentissage sont évolutifs car ils permettent la quantification des effets dus à des changements de l'environnement (modification des alternatives proposées, par exemple).
- Enfin, et c'est une originalité, l'ensemble de décisions lors de la phase d'organisation des déplacements est traité avec la même démarche de modélisation, ce qui permet de palier aux inconvénients des approches classiques qui abordent ces aspects d'une façon séquentielle, avec une évidente difficulté de relier les "morceaux".

Le cadre méthodique proposé a été testé auprès de plusieurs catégories sociodémographiques (ville de La Rochelle) pour définir le comportement des usagers face aux choix modal, de destination pour les activités à sites multiples, ou encore pour le parking. Ces modèles ont été utilisés pour un démonstrateur, permettant d'analyser l'activité de stationnement et simuler les effets de stratégies de transport, afin de valider la viabilité et fiabilité de notre approche.

Un autre apport lié aux objectifs de notre simulateur est la valorisation de l'interactivité régulateur-simulateur. Elle est évidente quand le régulateur, en tant qu'acteur, va s'immerger dans l'environnement 3D. Elle est, généralement, beaucoup moins marquée lorsque le régulateur est passif.

Dans ce contexte, nous proposons plusieurs formes d'interactivité :

- C'est le simulateur qui propose au régulateur le type de questionnaire à soumettre, ceci par le biais d'un agent sous-traitant nommé « pexavi » ayant en charge le traitement numérique des informations.
- Dans l'esprit d'une démarche d'aide à la décision séquentielle, le régulateur aura accès à des informations facilement interprétables sur les variables les plus significatives qui gèrent le comportement d'un agent "individu", aussi bien qu'à l'effet quantifié sur les changements de comportement pour chaque catégorie sociodémographique. Ceci lui permettra de tester des stratégies dont les impacts ont un caractère déjà prévisible.
- Partant du principe d'une optimisation centralisée, nous proposons une approche basée sur la méthode de Doehlert qui permet de suggérer au régulateur des combinaisons des niveaux de variables (stratégies) qui satisferaient (au mieux) les cahiers de charges des décideurs (transport et urbaniste) et les préférences des usagers. Pour un même objectif,

cette approche est applicable à la recherche d'un optimum pour tous les systèmes sociétaux complexes.

Enfin, par l'application du cadre méthodique présenté auparavant, nous avons apporté une contribution dans la modélisation des activités des parkings et des conséquences du déséquilibre offre-demande de stationnement. Il est possible de classer les agents "individus", qui vont se diriger vers un parking, et leur comportement en l'absence d'une place de stationnement (faire des tours autour du parking, se garer illicitement, se rendre au parking classé deuxième ou reporter l'activité). Dans ce cas, le régulateur peut connaître le temps de recherche d'une place de stationnement pour tous les agents "conducteur", selon les scénarios testés, ainsi que des grandeurs qui caractérisent l'activité de stationnement au niveau d'une zone (le taux de rotation et le taux d'utilisation des parkings). Un modèle de choix d'itinéraire basé sur la logique floue permet de mettre en évidence le taux de congestion induit par la recherche d'une place disponible (stationnement licite ou illicite).

Travaux à poursuivre

Au sein d'une équipe lancée dans un projet d'envergure, comme le développement d'un simulateur de trafic urbain multimodal 3D, l'idée d'aborder à la fois tous les défis est aussi alléchante qu'utopique.

La plus grande difficulté rencontrée sur le plan applicatif a été, sans doute, de se familiariser avec d'innombrables notions, modèles, approches trafic pour les diverses phases des déplacements urbains dans le but de les analyser, les comparer, les compléter et les adapter à nos objectifs. La simulation des comportements des individus nous a également hissé dans des études sociologiques et nous a fait découvrir les prouesses des théories microéconomiques.

Tous les aspects concernant l'activité des parkings et ses conséquences n'ont pas été abordés. Le cadre méthodique doit être enrichi avec tous les formalismes illustrant l'interaction entre agents (en particulier par le développement d'un module de perception pour les agents "individus"), afin de dégager des méta comportements et des convergences vers des états globaux du système, à des niveaux de granularité différents, tout au long de la chaîne de déplacements.

Sur le plan conceptuel, bien que nous ayons proposé quelques pistes (voir ANNEXE H -), plusieurs phases de la modélisation des déplacements n'ont pas encore été abordées : l'élaboration des agendas et le reclassement des activités différées, le choix des destinations fixes, le choix d'une heure de départ, le choix d'un itinéraire entre deux parkings. Ainsi, en amont, la simulation n'est pas alimentée par des modèles qui permettraient de connaître quel véhicule, en quel point et à quel moment il entre sur la grille. En aval, le déséquilibre demande-offre de stationnement mérite qu'on lui associe des effets environnementaux (pollutions atmosphérique ou sonore) en vue de greffer à notre simulateur un module environnement. Dans ANNEXE H -, nous avons également proposé une méthode destinée à la représentation cartographique de l'activité de stationnement et du flux engendré par le déséquilibre offre-demande de stationnement selon plusieurs échelles spatiales et pourrait être étendue à une carte de polluants et bruit.

La simulation de l'activité d'un parking initiée (application logicielle en C++ et DirectX) est, de ce fait, incomplète car nous ne pouvons pas encore identifier la voiture, le moment et la route empruntée pour se diriger vers le parking de destination.

Dans l'esprit du développement d'un outil interactif convivial, une maquette devrait être soumise à des potentiels superviseurs, afin de tester l'ergonomie lors des phases de spécification (élaboration des enquêtes, tables de vérités), de manipulation des résultats intermédiaires et d'interprétation des informations pour le choix d'une stratégie à optimisation "centralisée".

Nous souhaitons participer à une démarche de conception où chacun des experts impliqués dans le développement du simulateur, puisse modéliser la connaissance et le comportement dynamique des entités auxquelles il s'intéresse (l'immersion des entités dans le trafic, l'aspect multimodal, l'environnement 3D, ...). Un travail de longue haleine sera de maintenir la cohérence entre ces modèles et de les enrichir en considérant les interactions nouvelles auxquelles une entité peut être sujette. A partir de différents composants pouvant s'exécuter indépendamment, l'objectif sera alors d'être en mesure de générer des systèmes globaux avec des comportements émergents.

Travaux à partager

L'originalité de notre approche est d'avoir tenté de réunir des concepts et des outils issus de plusieurs domaines au service de la simulation d'un système complexe.

L'applicabilité de notre cadre méthodique doit être validée pour la simulation de tout système sociétal complexe (entreprises, marchés,...) opérant dans un contexte dynamique, avec des entités décisionnelles hétérogènes, animées par des comportements, buts, contraintes différents.

Bibliographie

[Aamodt1994] AAMODT A. PLAZA E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *Artificial Intelligence Communications*, volume 7, n° 1, 1994, p. 39–59.

[Adam2000] ADAM Emmanuel. *Modèle d'organisation multi-agent pour l'aide au travail coopératif dans les processus d'entreprise : application aux systèmes administratifs complexes*. Th : Informatique : Valenciennes : 2000, 248 p.

[Afsa Essafi2003] AFSA ESSAFI C. Les modèles logit polytomiques non ordonnés : théorie et applications. In : INSEE, Unité Méthodologie Statistique. *Série des Documents de Travail*, 2003, 101 p.

<http://www.insee.fr/fr/nom_def_met/methodes/doc_travail/docs_doc_travail/0301.pdf >

[consulté le 10 octobre 2005].

[Aha1991] AHA D., KIBLER D., ALBERT M. Instance-based learning algorithms. *Machine Learning*, volume 6, 1991, p. 37-66.

[Al-Aomar2002] AL-AOMAR R. A robust simulation-based multicriteria optimization methodology. *Proceedings of the 34th conference on Winter simulation*, december 2002, San Diego, California (USA), volume 2, p. 1931-1939.

[Algers2001] ALGERS S., ELIASSON J., MATTSSON L.G. Activity-based model development to support transport planning in the Stockholm region. *Proceedings of the 41th Congress of the European Regional Science Association*, august 2001, Zagreb, Croatia, 29 p.

[Al-Jammal2003] AL-JAMMAL R., PARKANY E. Integration of qualitative and quantitative methodologies framework and quick examples. *Transportation Research Record*, n° 1854, 2003, p. 171-179.

[Anli2005] ANLI A., KOLSKI C., ABED M. Principes et architecture pour la personnalisation d'information en interaction homme-machine, application à l'information transport. In : ACM Press. *Proceedings of the 17ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, 2005, Toulouse, France. New York : USA, 2005, p. 123-130. ISBN 1595931929.

- [Antille2000] ANTILLE N. *Analyse théorique et empirique de modèles de choix discrets. rapport de projet*. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000, 42 p.
- [Arentze2000] ARENTZE T., HOFMAN F., VAN MOURIK H., TIMMERMANS H.J.P. ALBATROSS: A multi-agent rule-based model of activity pattern decisions. *Transportation Research Record*, n° 1706, 2000, p. 136-144.
- [Arentze2000b] ARENTZE T.A., TIMMERMANS H.J.P. *ALBATROSS – A Learning-Based Transportation Oriented Simulation System*. Den Haag : CIP-DATA Koninklijke Bibliotheek, 2000.
- [Arentze2001] ARENTZE T.A., TIMMERMANS H.J.P. A coevolutionary approach to extracting and predicting linked sets of complex decision rules from activity diary data. *Transportation Research Record*, n° 1752, 2001, p. 126-132.
- [Arentze2003] ARENTZE T.A., TIMMERMANS H.J.P. Measuring Impacts of Condition Variables in Rule-Based Models of Space-Time Choice Behavior: Method and Empirical Illustration. *Geographical Analysis*, 2003, volume 35, p. 24-45.
- [Arentze2003b] ARENTZE T., BORGERS A., DELMISTRO R., TIMMERMANS H.J.P. Transport Stated Choice Responses: Effects of Task Complexity, Presentation Format and Literacy. *Transport Research E*, 2003, volume 39, p. 229-244.
- [Arnott1999] ARNOTT R., ROWSE J. Modeling Parking. *Journal of Urban Economics*, volume 45, n° 1, 1999, p. 97-124.
- [Arnott2001] ARNOTT R. The economic theory of urban traffic congestion: a microscopic research agenda. *Paper presented at CESifo Venice Summer Institute, Workshop on Environmental Economics and the Economics of Congestion*, july 2001, Venice, Italy, 35 p.
<<http://FMWWW.bc.edu/EC-V/Arnott.fac.html>> [consulté le 20 mars 2005].
- [Arnott2005] ARNOTT R., INCI E. An integrated model of downtown parking and traffic congestion. *Proceedings of the Annual Meeting of ASSA on Expanding the Frontiers of Economics*, january 2005, Philadelphia (PA), USA, 32 p.
- [Augeraud2005] AUGERAUD M., BOUSSIÉ J.M., COLLE F., ESTRAILLIER P., SARRAMIA D. Simulation approach for Urban Traffic System: a multi-agent approach. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, may 2005, Marrakech, Maroc, 10 p.

- [Augeraud2006] AUGERAUD M., SARRAMIA D., COLLE F., BOUSSIER J.M. Aide à la décision pour la conception de systèmes complexes: une approche multi agents. *Proceedings of the 6th Conférence Francophone de Modélisation et Simulation*, avril 2006, Rabat, Maroc, p. 785-794.
- [Avrillon2005] AVRILLON Laetitia. *Démarche de résolution de problèmes qualité dans le cadre de produits nouveaux de haute technologie*. Th : Génie Industriel : Annecy : 2005, 222 p.
- [Axhausen2002] AXHAUSEN K.W., ZIMMERMANN A., SCHONFELDER S., RINDSFUSER G., HAUPT T. Observing the rhythms of daily life: A six-week travel diary. *Transportation*, volume 29, n° 2, 2002, p. 95-124.
- [Badour2005] BADOUR P. *Vers une nouvelle cartographie urbaine*. <<http://www.technart.net/metamorph/mem/pascal/sommaire.html>> [consulté le 06 juin 2005].
- [Bailey1995] BAILEY T.C., GATRELL A.C. *Interactive Spatial Data Analysis*, Harlow : Longman Scientific and Technical, 1995, 436 p. ISBN 0582244935.
- [Banos2005] BANOS A., GODARA A., LASSARRE S. Simulating pedestrians and cars behaviours in a virtual city : an agent-based approach. *Proceedings of the ECCS'05 conference*, november 2005, Paris, France.
- [Banos2005b] BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T. Approche multi-agents de la ville en mouvement. *Proceedings of the Joint Conference on Multi-Agent Modeling for Environment Management*, mars 2005, Bourg St Maurice, France.
- [Barboux2005] BARBAUX A. Réduire le nombre d'expériences grâce aux statistiques. *Usine Nouvelle*, novembre 2005, n°2984, p. 74-76. ISSN 0042126x.
- [Barbuceanu1997] BARBUCEANU M. Coordinating agents by role based social constraints and conversation plans. *Proceedings of the Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'97)*, 1997, p. 16-21.
< <http://citeseer.ist.psu.edu/barbuceanu97coordinating.html> > [consulté le 27 septembre 2006]
- [Bartolomei2002] BARTOLOMEI, LAROCHE. *Bilan des pratiques et attentes de modélisation des collectivités locales : rapport d'étude final*. Paris : GESMAD, 2002, 179 p.
- [Batty2003] BATTY M. *Agent-based pedestrian modelling. Working paper series*. London : CASA, University College London, january 2003, 28 p. ISSN 14671298.

- [Bauer2001] BAUER B. UML class diagrams revisited in the context of agent-based systems. In : WOOLDRIDGE M., CIANCARINI P., WEISS G. Eds. *Proceedings of Agent-Oriented Software Engineering (AOSE'01)*, may 2001, Montréal, Canada. London : Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, volume 2222, 2001, p. 101-118.
- [Bauzer2006] BAUZER-MEDEIROS C., CARLES O., DEVUYST F., HUGUENEY B., JOLIVEAU M., JOMIER G., MANOUVRIER M., NAIJA Y., SCEMAMA G., STEFFAN L. Vers un entrepôt de données pour le trafic routier. *Proceedings of the 2^{ième} journée francophone sur les Entrepôts de Données et l'Analyse en ligne (EDA)*, juin 2006, Versailles, France, 15 p.
- [Bazzan1999] BAZZAN A.L.C., WAHLE J., KLUGL F. Agents in Traffic Modelling - From Reactive to Social Behaviour. In : BURGARD W., CHRISTALLER T., CREMERS A. (eds). *Lecture Notes In Computer Science, Advances in Artificial Intelligence*. London : Springer-Verlag, 1999, volume 1701, p. 303-306. ISBN 3540664955.
- [Becker1987] BECKER M.H., JANZ N.K. Behavioral science perspectives on health hazard/health risk appraisal. *Health Service Research*, volume 22, n° 4, 1987, p. 537-551.
- [Bellman1978] BELLMAN R.E. *An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think ?* San Francisco : BOYD & FRASER Publishing Company, 1978.
- [Bellomo2004] BELLOMO M., OCCELLI S. *Experimenting a multi-agent model: the SIMAC model. working paper n°184/2004*. Torino : IRES Piemonte, 2004, 45 p. <<http://213.254.4.222/cataloghi/pdfires/612.pdf>> [consulté le 23 septembre 2006].
- [Ben-Akiva1979] BEN-AKIVA M., LERMAN S. Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility. In : HENSHER D., STOPHER P. Eds. *Behavioural Travel Modelling*. London : Croom Helm, 1979, p. 654-679.
- [Ben-Akiva1998] BEN-AKIVA M., BOWMAN J.L. Activity Based Travel Demand Model Systems. In : MARCOTTE P., NGUYEN S. Eds. *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*. Kluwer Academic Publishers, 1998, 11 p.
- [Ben-Akiva1998b] BEN-AKIVA M., BOWMAN J., RAMMING S., WALKER J. Behavioral Realism in Urban Transportation Planning Models. *Proceedings of the Transportation Models in the Policy-Making Process, A Symposium in Memory of Greig Harvey*, march 1998, Pacific Grove, California, 16 p.

- [Ben-Akiva1999] BEN-AKIVA M., BIERLAIRE M. Discrete choice methods and their applications to short-term travel decisions. In : HALL R.W. Eds. *Handbook of Transportation Science*, 1999, p. 5-34.
- [Berry2001] BERRY L. *La société des agents, rapport de synthèse*, 2001, 14 p. [consulté le 20 décembre 2002].
- [Bhat2003] BHAT C.R., SRINIVASAN S., GUO J.Y., SIVAKUMAR A. *Activity-based travel-demand modelling for metropolitan areas in texas: a microsimulation framework for forecasting*. Austin : Center for Transportation Research, University of Texas, february 2003, 56 p.
- [Bhat2003b] BHAT C.R., ZHAO H., POPURI Y, STINSON M., POINDEXTER S. *Transportation control effectiveness in ozone non-attainment areas: final report*. Austin : Center for Transportation Research, University of Texas, july 2003, 170 p.
- [Bhat2004] BHAT C.R., GOSSSEN R. Mixed Multinomial Logit Model Analysis of Weekend Recreational Episode Type Choice. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2004, volume 38, n° 9, p. 767-787.
- [Bhouri2002] BHOURI N. *Intermodalité, bilan et perspectives des systèmes informatiques : rapport de convention DTT*. Paris : INRETS : 2002, 95 p.
- [Bhouri2002b] BHOURI N., SCEMAMA G. Intermodality in urban management systems: state of art. *Proceedings of the 9th European Working Group on Transportation*, june 2002, Bari, Italy, 6 p.
- [Bifulco1993] BIFULCO G.N. A stochastic user equilibrium assignment model for the evaluation of parking policies. *European Journal of Operational Research*, volume 71, 1993, p. 269-287.
- [Bjorner2006] BJÖRNER D. *Software Engineering, Specification of Systems and Languages, volume 2*. Berlin : Springer, 2006, 780 p.
- [Black1995] BLACK C., HALLSWORTH A. Jam Dodgers: A Study of Attitudes and Responses to Traffic Congestion. *Traffic Research Unit*. Portsmouth : University of Portsmouth, 1995.
- [Blain1997] BLAIN L. Creating an Auto Access Transit Cost Matrix. *Proceedings of the 12th Annual International EMME/2 Users' Group Conference*, San Francisco, USA, october 1997, 10 p. <www.inro.ca/en/pres_pap/international/ieug97/e2sf.pdf> [consulté le 15 octobre 2006].

- [Bonte2006] BONTE L., ESPIE S., MATHIEU P. Modélisation et simulation des usagers deux roues motorisés dans ARCHISIM. *Proceedings of the Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2006)*, octobre 2006, Annecy, France.
- [Bos2003] BOS I., ETTEMA D., MOLIN E. Modeling the effect of travel time uncertainty and traffic information on the use of Park and Ride facilities. *Proceedings of the Euro-Workshop on Behavioural responses to ITS*, avril 2003, Eindhoven, The Netherlands, 18 p.
- [Bos2005] BOS I., VAN DER HEIJDEN R., MOLIN E., TIMMERMANS H.J.P. Traveler preference for park&ride facilities: empirical evidence of generalizability. *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, january 2005, Washington DC, USA, 18 p.
- [Boulanger2003] BOULANGER P., BRECHET T. *Analyse comparative des classes de modèles. Document libre*. Institut pour un développement durable, 2003. <<http://users.skynet.be/idd/documents/model/models200103.pdf>> [consulté le 21 septembre 2006].
- [Bourdon2002] BOURDON F. Systèmes multi-agents. Cours DEA. Caen : Université de Caen, 2002. [consulté le 20 décembre 2002].
- [Bourjot2006] BOURJOT C. *Systèmes Multi-Agents : modélisation et simulation informatique de comportements collectifs. Cours de Master 2 Sciences Cognitives*. [en ligne]. Nancy : Université de Nancy, 2006, 151 p. [consulté le 24 septembre 2006].
- [Boussier2003] BOUSSIER Jean-Marie. *Systèmes multi agents, outils d'aide à la gestion et à l'extension du système de libre-service de véhicules électriques. Rapport de stage de DEA*. DEA Image et Calculs. La Rochelle : Université de La Rochelle, 2003, 144 p.
- [Boussier2004] BOUSSIER J.M., ESTRAILLIER P., BREUIL D. Liselec, a multi-agents system. *Proceedings of the International Symposium IEEE on Vehicle Power and Propulsion*, october 2004, Paris, France, 5 p.
- [Boussier2005] BOUSSIER J.M., ION L., BREUIL D., BENHABIB S. Optimisation of car fleet exploitation using statistical and fuzzy logic approaches. BREBBIA C.A., WADHWA L.C. Eds. *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Transport and the Environment in the 21st Century*, avril 2005, Algarve, Portugal. Southampton : WIT Press : 2005, p. 37-46.

- [Boussier2005b] BOUSSIER J.M., ESTRAILLIER P., AUGERAUD M., SARRAMIA D. Agenda elaboration of driver agents in a virtual city. *Proceedings of the Workshop on Multi-agents for modelling Complex Systems, European Conference on Complex Systems (ECCS'05)*, november 2005, Paris, France, 15 p.
- [Boussier2006] BOUSSIER J.M., ESTRAILLIER P., SARRAMIA D., AUGERAUD M. Approach to design behavioural models for traffic network users: choice of transport mode. In : VAN LEEUWEN J.P., TIMMERMANS H.J.P. Eds. *Innovation in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Dordrecht : Springer : 2006, p. 151-166. ISBN 101402050593.
- [Boussier2006b] BOUSSIER J.M., ESTRAILLIER P., SARRAMIA D., AUGERAUD M., Using agent-based of driver behaviour in the context of car park optimization. *Proceedings of the 3rd International IEEE Conference on Intelligent Systems*, september 2006, London, United Kingdom, p. 395-400.
- [Boussier2006c] BOUSSIER J.M., ION L., POPESCU C., MITU A., VLAD D. Methodology to evaluate the quality of public services. *Proceedings of the 9th Toulon-Verona Conference on Excellence in Services*, september 2006, Paisley, Scotland, p. 176-185.
- [Breckle2000] BRECKLE H. A Multi-Agent Framework for Planning and Managing Mobility Services. In : TIM I.J. et al. Eds. *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence, Workshop on Agent Technologies and Their Application Scenarios in Logistics*, august 2000, Berlin, Deutschland. p. 17-20.
- [Briot2001] BRIOT J.P., DEMAZEAU Y., et al. *Principes et architecture des systèmes multi-agents*. In : BRIOT J.P., DEMAZEAU Y. Eds. Paris, Hermès : 2001.
- [Brooks1991] BROOKS R.A. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence Journal*, volume 47, 1991, p. 139-159.
- [Buffet2003] BUFFET Olivier. *Une double approche modulaire de l'apprentissage par renforcement pour des agents intelligents adaptatifs*. Th : Informatique : Nancy I : 2003, 238 p.
- [Buliung2005] BULIUNG R.N. Activity/Travel behaviour research: approaches and findings with identification of research themes and emerging methods. *Working Paper Series*. Hamilton : CSPA, McMaster University, march 2005, 50 p.

- [Cardon2001] CARDON A. Etude de la conception du contrôle comportemental d'une organisation massive d'agents. *Les automates intelligents, robotique, vie artificielle, réalité virtuelle. La Revue mensuelle* [en ligne]. n° 22, 2001, 61 p.
<<http://www.admiroutes.asso.fr/larevue/2001/22/Robot.pdf>> [consulté le 22 septembre 2006].
Disponible sur [admiroutes](http://www.admiroutes.asso.fr) (< <http://www.admiroutes.asso.fr> >).
- [Cascetta2001] CASCETTA E. *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [Castro1999] CASTRO Flavio. *Repérage des points adresses pour les bâtiments*. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999, 76 p.
- [Cetin2003] CETIN N., BURRI A., NAGEL K. A Large-Scale Agent-Based Traffic Microsimulation Based On Queue Model. *Proceedings of the 3rd Swiss Transport Research Conference*, march 2003, Monte Verita, Switzerland, 24 p.
- [Chabrol2003] CHABROL M., SARRAMIA D. Modélisation hybride et simulation combinée des Systèmes de Trafic Urbain. *Proceedings of the 4^{ième} conférence francophone MOSIM'03 sur Organisation et conduite d'activité dans l'industrie net les services*, avril 2003, Toulouse, France, p. 358-365.
- [Chaib-Draa2001] CHAIB-DRAA B., JARRAS I., MOULIN B. Systèmes multiagents : Principes généraux et applications. In : BRIOT J.P., DEMAZEAU Y. Eds. *Principes et architecture des systèmes multi-agents*. Paris, Hermès : 2001.
- [Chambers1996] CHAMBERS L., TAYLOR M.A.P. Planning with GENIE: a model for forecasting and decision making. *Environment and Planning B: Planning and Design*, volume 23, 1996, p. 697-709.
- [Champion1999] CHAMPION A., MANDIAU R., KOLSKI C., HEIDET A., KEMENY A. *Traffic generation with the SCANer© II simulator : towards a multi-agent architecture*. Proceedings of the Driving Simulation Conference (DSC'99), july 1999, Paris, France, 15 p.
- [Charton2003] CHARTON Romaric. *Des agents intelligents dans un environnement de communication multimédia; vers la conception de services adaptatifs*. Th. : Informatique : Nancy I : 2003, 200 p.
- [Charypar2005] CHARYPAR D., NAGEL K. Q-Learning for Flexible Learning of Daily Activity Plans. *Transportation Research Record*, n° 1935 , 2005, p. 163-169.

- [Chen2004] CHEN R., MAHMASSANI H.S. Travel time perception and learning mechanisms in traffic networks. *Transportation Research Record*, n° 1894, 2004, p. 209-221.
- [Chicoisne2002] CHICOISNE Guillaume. *Dialogue entre agents naturels et agents artificiels: une application aux communautés virtuelles*. Th : Informatique : Grenoble : 2002, 267 p.
- [Choy2003] CHOY M.C., CHEU R., SRINIVASAN D., LOGI F. Real-Time coordinated signal control through use of agents with online reinforcement learning. *Transportation Research Record*, n° 1836, 2003, p. 64-75.
- [Cirillo2002] CIRILLO C., AXHAUSEN K.W. Comparing urban activity travel behaviour. *Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, january 2002, Washington (DC), USA.
- [Cirillo2003] CIRILLO C., CORNELIS E., LEGRAIN L., TOINT P. Combining spatial and temporal dimensions in destination choice model. *Proceedings of the European Transport Conference 2003 (ETC 2003)*, October 2003, Strasbourg, France, 15 p.
- [Cirillo2005] CIRILLO C. *Les modèles de choix discrets. Présentation de cours*. Bruxelles : CIEM (Centre Interuniversitaire d'Etude de la Mobilité), mai 2005, 40 p. <perso.fundp.ac.be/~grt/ciem/ciem3.pdf> [consulté le 20 septembre 2006].
- [Coombe1997] COOMBE D, GUEST P., BATES J., LE MASURIER P. Study of parking and traffic demand: The Research Programme. *Traffic Engineering and Control*, 1997.
- [Cost1999] COST R.S., CHEN Y., FININ T., LABROU Y., PENG Y. Modeling agent conversation with colored Petri Nets. *Proceedings and Working notes of the Autonomous Agents'99 Workshop on Specifying and Implementing Conversation Policies*, may 1999, Seattle, (USA), 8 p.
- [Crowder2003] CROWDER M., WALTON C.M. Developing an Intelligent Parking System for the University. of Texas at Austin. Research Report. Austin : Center for Transportation Research, University of Texas, may 2003, 71 p. <swutc.tamu.edu/Reports/167229-1.pdf> [consulté le 24 mars 2006].
- [Crozet2001] CROZET Y., MARLOT G. Congestion and road pricing: where is the "bug" ? *Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research (WCTR'01)*, july 2001, Seoul, South Korea, 18 p.

- [Cullinane1993] CULLINANE K. An aggregate dynamic model of the parking compliance decision. *International journal of transport economics*, volume XX, n°1, 1993.
- [De Lapparent2004] DE LAPPARENT M. Capital automobile et contraintes de capacité dans le ménage: quid des choix individuels du mode de transport pour les déplacements domicile-travail? Les séminaires du Laboratoire de Microéconométrie CREST, janvier 2004, Malakoff, France, 33 p. <<http://www.crest.fr/seminaires/lmi/lapparent.pdf>> [consulté le 10 septembre 2006].
- [De Lapparent2004b] DE LAPPARENT Matthieu. *De la valeur du temps à la valeur du risque de perte de temps dans les transports : le cas des déplacements domicile-travail*. Th : Sciences Economiques : Paris I Panthéon-Sorbonne, 2004, 191p.
- [Delauche2003] DELAUCHE Flavien. *Optimisation statistique du rendement paramétrique de microsystèmes (MEMS)*. Th : Micro-électronique : Montpellier II, 2003, 162 p.
- [Dell'Orco2003] DELL'ORCO M., OTTOMANELLI M., SASSANELLI D. Modelling uncertainty in parking choice behaviour. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, january 2003, Washington (DC), USA, 20 p.
- [Demazeau1995] DEMAZEAU Y. From Interactions To Collective Behaviour in Agent-Based Systems. *Proceedings of the first European Conference on Cognitive Science*, avril 1995, Saint-Malo, France, p. 117-132.
- [Demazeau2001] DEMAZEAU Yves. *VOYELLES. Rapport d'Habilitation à Diriger des Recherches*. Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire Leibniz, 2001.
- [Dempster1968] DEMPSTER A.P. A generalisation of Bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1968, p. 205-247.
- [Denoeux2005] DENOEUX T. Application du formalisme des Fonctions de Croyance en fusion d'informations et en Classification. *Séminaire INRETS*, janvier 2005, Paris, France, 81p.
- [DePalma1996] DE PALMA A., MARSHALL F. METROPOLIS, un outil de simulation du trafic urbain. *Revue Transports*, n° 378, 1996, p. 204-215.
- [DePalma1998] DE PALMA A., SANCHEZ O. *Accessibilité dans un système de transport en environnement concurrentiel. Working paper*. Cergy-Pontoise : Université de Cergy-Pontoise, THEMA (Théorie Economique, Modélisation et Applications), 1998, 16 p.

<<http://www.u-cergy.fr/IMG/98-04Sanchez.pdf>> [consulté le 23 mars 2005]

[DePalma2001] DE PALMA A., FONTAN C. *Choix modal et valeurs du temps en Ile-de-France : rapport de travail*. Cergy-Pontoise : THEMA, 2001, 32 p.

[DePalma2001b] DE PALMA A., NESTEROV Y. Park and Ride for the morning and evening commute. Rapport de travail. Cergy-Pontoise : THEMA, 2001, 18 p.

<www.u-cergy.fr/IMG/2001-16DePalma.pdf> [consulté le 23 mars 2005].

[DePalma2004] DE PALMA A., NGUYEN-LUONG D., MOTAMEDI K., MOYANO J. SIMAURIF, *Modèle dynamique de simulation de l'interaction urbanisation-transports en Région Ile-de-France : rapport final 1^o année*. Cergy-Pontoise : IAURIF-THEMA, 2004, 148 p.

[Derycke1982] DERYCKE P.H. *Economie et planification urbaines - Tome 2 : Théories et modèles*. In : PUF Eds. Paris : Collection Themis Sciences Economiques, 1982, 406 p.

[DeSchutter2003] DE SCHUTTER B., HOOGENDOORN S.P., SCHUURMAN H., STRAMIGIOLI S. A multi-agent case-based traffic control scenario evaluation system. *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'03)*, october 2003, Shanghai, China, volume 1, p. 678-683. ISBN 0780381254.

[De Vries2002] DE VRIES B., JESSURUN A.J., DIJKSTRA J. Conformance Checking by Capturing and Simulating Human Behaviour in the Built Environment. *Proceedings of the 6th Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, july 2002, Ellecom, The Netherlands, 14 p.

[Dezert-Smarandache2004] SMARANDACHE F., DEZERT J. (Eds). *Advances and applications of DSMT for information fusion (Collected works)*. Rehoboth : American Research Press, volume 1, 2004, 438 p.

<<http://www.gallup.unm.edu/~smarandache/DSMT-book1.pdf>> [consulté le 10 juillet 2006].

[Dezert-Smarandache2006] SMARANDACHE F., DEZERT J. (Eds). *Advances and applications of DSMT for information fusion (Collected works)*. Rehoboth : American Research Press, volume 2, 2006, 461 p.

<<http://www.gallup.unm.edu/~smarandache/DSMT-book2.pdf>> [consulté le 10 juillet 2006].

[Diaz2001] DIAZ A., VASQUEZ V., WAINER G. Application of the ATLAS language in models of urban traffic. *Proceedings of the 34th Annual Simulation Symposium (SS'01)*, april 2001, Seattle, USA, p. 311-318. ISBN 0769510922.

- [Dijkstra1959] DIJKSTRA E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, volume 1, p. 269-271.
- [Dijkstra2000] DIJKSTRA J., TIMMERMANS H.J.P. A Multi-Agent Systems Approach for Visualizing Simulated Behavior to Support the Assessment of Design Performance. *Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Agents*, Barcelona, Spain, 2000, 5 p.
- [Dijst1997] DIJST M., VIDAKOVIC V. Individual action space in the city. In : ETTEMA D.F., TIMMERMANS H.J.P. Eds. *Activity-based approaches to travel analysis*. Oxford : Elsevier Press, 1997, p. 117-134.
- [Doehlert1970] DOEHLERT D.H. Uniform shell designs. *Journal of royal statistical society*, série C, n°19, 1970, p. 231-239.
- [Doherty2000] DOHERTY S.T. An Activity Scheduling Process Approach to Understanding Travel Behaviour. *Proceedings of the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January 2000, Washington (DC), USA.
- [Doherty2002] DOHERTY S.T., MILLER E.J., AXHAUSEN K.W., GARLING T. A Conceptual Model of the Weekly Household Activity-Travel Scheduling Process. In : STERN E., SALOMON I., BOVY P. Eds. *Travel Behaviour: Spatial Patterns, Congestion and Modelling*. Cheltenham : U.K., Edward Elgar Publishing Limited, 2002, p. 233-264.
- [Doniec2005] DONIEC A., ESPIÉ S., MANDIAU R., PIECHOWIAK S. Towards anticipation in traffic simulation at junctions. *Proceedings of International Workshop on Modelling Driver Behaviour in Automotive Environment, Humanist Network*, May 2005, Ispra, Italy, p.242-250.
- [Doniec2006] DONIEC A., ESPIÉ S., MANDIAU R., PIECHOWIAK S. Traffic simulation at junction: non-normative practices vs. deadlocks. *Proceedings of the Joint International Conference on Computing and Decision Making and Building Engineering*, June 2006, Montreal, Canada, p. 2564-2573. ISBN 2921145588.
- [DPdoc1997] DIRECTION DE LA PREVISION. *Transports urbains et calcul économique : document de travail*. Paris : Ministère de l'économie, 1997, 74 p.
- [Drogoul1993] DROGOUL A. *De la simulation Multi-Agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les Systèmes Multi-Agents*. Th : Informatique : Paris VI, 1993, 231 p.

- [Dupuy1975] DUPUY G. *Une technique de planification au service de l'automobile : les modèles de trafic urbain*. Paris : Copédith, 1975, 203 p.
- [Dutech1999] DUTECH Alain. *Apprentissage d'environnement : approches cognitives et comportementales*. Th : ENSAE : Toulouse : 1999.
- [El Hmam2006] EL HMAM M.S., ABOUAISSA H., JOLLY D., BENASSER A. Simulation hybride de flux de trafic basée sur les systèmes multi-agents. *Proceedings of the 6th Conference Francophone de Modélisation et Simulation*, avril 2006, Rabat, Maroc, 10 p.
- [Enoch2002] ENOCH M. Supporting Car-Sharing: a worldwide review. *5th Framework Programme City of Tomorrow*. London : Life Support Production, 2002, 71 p.
- <http://www.londoncarclubs.net/ccpdfs/pt2%20www.pdf> [consulté le 10 octobre 2006].
- [Erhardt2005] ERHARDT G.D., KURTH D.L., SABINA E.E., MYUNG S. A market-based parking cost forecasting framework for traditional and microsimulation modelling applications. *Transportation Research Record*, n° 1921, 2005, p. 79-88.
- [Eshuis2003] ESHUIS R., WIERINGA R. Comparing Petri Net and Activity Diagram Variants for Workflow Modelling - A Quest for Reactive Petri Nets. In : EHRIG H., REISIG W., ROZENBERG G. et al. (eds.). *Lecture Notes in Computer Science: Petri Net Technology for Communication-Based Systems: Advances in Petri Nets*. Heidelberg : Springer-Verlag, volume 2472, 2003, p. 321-351.
- [Espié1994] ESPIÉ S., SAAD F., SCHNETZLER B. et al. Microscopic traffic simulation and driver behaviour modeling: the ARCHISIM project. *Proceedings of the Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents*, september 1994, Lille, France.
- [Etraillier1992] ESTRAILLIER P., GIRAULT C. Applying petri net theory to the modelling, analysis and prototyping of distributed systems. *International Workshop on Emerging Technologies for Factory Automation: State of the Art and Future Directions*. IEEE/SICE, august 1992.
- [Etraillier1996] ESTRAILLIER P., KORDON F. Structuration of large scale petri nets: an association with higher level formalism for the design of multi-agent systems. *Proceedings of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics Information, Intelligence and Systems*, October 1996, Beijing, China.
- [Etraillier2002] ESTRAILLIER P. *Des automates aux réseaux de Petri. Cours DEA Image et Calculs*. La Rochelle : Université La Rochelle, 2002.

- [Ettema2003] ETTEMA D., TAMMINGA G., TIMMERMANS H.J.P., ARENTZE T. A micro-simulation model system of departure time and route choice under travel time uncertainty. *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research*, august 2003, Lucerne, Switzerland, 19 p.
- [Ez-Zahraouy2004] EZ-ZAHRAOUY H., BENRIHANE Z., BENYOUSSEF A. The Effect of absorbing sites on the one-dimensional cellular automaton traffic flow with open boundaries. *International Journal of Modern Physics B*, volume 18, n° 16, 2004, p. 2347-2360.
- [Ferber1995] FERBER J. *Les systèmes multiagents, Vers une intelligence collective*. Paris : InterEditions, 1995.
- [Ferrand1997] FERRAND Nils. *Modèles Mulri-Agents pour l'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire*. Th : Informatique : Grenoble : 1997, 305 p.
- [Fiany2001] FIANYO E., TREUIL J.P., DEMAZEAU Y., PINSSON S. OSIRIS : une architecture multi-agent de couplage de processus physiques pour simuler le fonctionnement hydro-salin d'une region irriguée. *Proceedings of the 3^{ième} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'01)*, avril 2001, Troyes, France, p. 1029-1035.
- [Florea2002] FLOREA A., KAYSER D., PENTIUC S. et al. *Agents Intelligents* [Cours en ligne]. Politechnica University of Bucharest, 2002. < <http://turing.cs.pub.ro/auf2/> > [consulté le 22 mars 2005].
- [Florian1980] FLORIAN M., LOS M. Impact of the Supply of Parking Spaces on Parking Lot Choice. *Transportation Research B*, volume 14, n° (1/2), 1980, p. 155-163.
- [Forrester1969] FORRESTER J.W. *Urban Dynamics*. Cambridge : MIT Press, 1969.
- [Fustier1988] FUSTIER B. Les interactions spatiales. In : PONSARD C. *Analyse économique spatiale*. Paris : PUF, 1988, p. 193-230.
- [Galland2001] GALLAND Stéphane. *Approche Multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites*. Th : Informatique : Saint-Etienne : 2001, 292 p.
- [Garcia-Serrano2003] GARCIA-SERRANO A.M., TERUEL D., CARBONE F., MENDEZ V.D. FIPA-compliant MAS development for road traffic management with a Knowledge-Based approach: the TRACK-R agents. *Proceedings of the Workshop in Challenges in Open Agent Environments, International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS'03)*, july 2003, Melbourne, Australia, 4 p.

- [Gärling1993] GARLING T., KWAN M.P., GOLLEDGE R.G. *Computational-Process Modelling of Household Activity Scheduling. Working Paper UCTC No. 217*. Berkeley : The University of California Transportation Center, december 1993, 33 p.
- [Gayda1994] GAYDA S. Etude des comportements des automobilistes en matière de stationnement près du lieu de travail à l'aide d'une enquête de type préférences déclarées. *Les Cahiers du MET (collection trafics)*, 1994, 29 p.
- [Gayda1998] GAYDA S. Enquête "Préférences Déclarées" sur le choix de localisation résidentielle et le choix modal à Bruxelles. *Proceedings of the Congrès international francophone de l'ATEC*, janvier 1998, Paris, France, 14 p.
- [Gérard2001] GERARD P., SIGAUD O. Généralisation et apprentissage latent dans les systèmes de classeurs. *Extraction des connaissances*, vol.1, n°3, 2001, p.87-114.
- [Gilgen2000] GILGEN Marc. *Normes et standards pour données géographiques*. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000, 74 p.
- [Gleizes2002] GLEIZES M.P. *Systèmes multi-agents et intelligence artificielle distribuée. Cours DEA*. Toulouse : Université Paul Sabatier, 2002.
- [Gloor2003] GLOOR C., CAVENS D., LANGE E., NAGEL K., SCHMID W. A pedestrian simulation for very large scale applications. In : KOCH A., MANDL P. (Hrsg.). *Multi-Agenten-Systeme in der Geographie*, 2003, 16 p.
- [Goodwin1992] GOODWIN P.B. A review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes. *Journal of Transport Economics and Policy*, n° 26, 1992, p. 155-170.
- [Gould2002] GOULD J., GOLOB T.F. Consumer E-Commerce, virtual accessibility and sustainable transport. In : BLACK W.R., NIJKAMP P. Eds. *Social Change and Sustainable Transport*. Bloomington : Indiana University Press, 2002, p. 279-285.
- [Goulias2004] GOULIAS K.G., BRADLEY M., NORONHA V., GOLLEDGE R., VOVSHA P.S. Data needs for innovative modelling. *Workshop resource paper of the National Household Travel Survey Conference on Understanding our Nation's Travel*, november 2004, Washington DC, USA, 65 p.
- [Goupy2006] GOUPY J. Les Plans d'expériences. *La Revue MODULAD*, n° 34, juillet 2006, p. 74-116. [en ligne] < www-rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-34/Goupy-34/goupy-34.pdf > [consulté le 24 septembre 2006].

- [Guo2001] GUO J.Y., BHAT C.R. *Representation and analysis plan and data needs analysis for the activity-travel system*. Austin : Center for Transportation Research, University of Texas, february 2001, 46 p.
- [Gur1984] GUR Y.J., BEIMBORN E.A. Analysis of Parking in Urban Centers: Equilibrium Assignment Approach. *Transportation Research Record*, n° 957, 1984, p. 55-62.
- [Ha Duong2006] HA DUONG Minh. *Modèles de Précaution en Économie : introduction aux probabilités imprécises. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches*. Paris : Université de Paris I, Panthéon-Sorbonne, 2006, 189 p.
- [Hägerstrand1970] HÄGERSTRAND T. What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 1970, volume 24, p. 7-21.
- [Hait2000] HAIT Ferial Benachour. *Modélisation et apprentissage d'agents artificiels adaptés à un marché financier*. Th : Informatique : Paris XII, 2000.
- [Hammadou2004] HAMMADOU H., THOMAS I., TINDEMANS H., WITLOX F., VAN HOFSTRAETEN D., VERHETSEL A. How to incorporate the spatial dimension in destination choice models ? *Proceedings of the XLème colloque de l'ASRDLF*, septembre 2004, Bruxelles, Belgique, 27 p.
- [Han2004] HAN Q., DELLAERT B., Van RAAIJ F., TIMMERMANS H.J.P. Modeling Impact of Emerging Uncertain Time-Dependent Aggregate Activity-Travel Patterns on Individual Activity Participation and Timing Decisions. *Transportation Research Record*, n°1894, 2004, p. 28-36.
- [Hansen1959] HANSEN W. G. How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, volume 25, 1959, p. 73-76.
- [Harrouet2000] HARROUET Fabrice. *oRis: s'immerger par le langage pour le prototypage d'univers virtuels à base d'entités autonomes*. Th : Informatique : Brest : 2000, 284 p.
- [Hassas2003] HASSAS Salima. *Systèmes complexes à base de Multi-Agents situés*. Mémoire HDR : Informatique : Lyon I : 2003, 80 p.
- [Hebb1949] HEBB D.O. *The organisation of behavior*. New-York : WILEY J. and Sons, 1949.
- [Hélary2005] HELARY J.M. Le plus court chemin [article en ligne]. Interstices [17 novembre 2005]. <http://interstices.info/display.jsp?id=c_15578&portal=j_97&printView=true> [consulté le 26 septembre 2006].

- [Henn2001] HENN Vincent. *Information routière et affectation du trafic : vers une modélisation floue*. Th : Informatique : Saint Etienne : 2001, 243 p.
- [Hernandez2001] HERNANDEZ J.Z., OSSOWSKI S., GARCIA-SERRANO A. On Multiagent Co-ordination Architectures: A Traffic Management Case Study. *Proceedings of the 34th annual Hawaii International Conference on System Sciences*, january 2001, Hawaii, USA, volume 3, 9 p.
- [Hess2004] HESS S., POLAK J.W. An analysis of parking behaviour using discrete choice models calibrated on SP datasets. *ERSA conference papers*. [en ligne]. Vienna : European Regional Science Association, august 2004, 29 p.
< <http://www.ersa.org/ersaconfs/ersa04/PDF/60.pdf> > [consulté le 23 mars 2005].
- [Hess2005] HESS S., DALY A., BATES J. *Departure time and mode choice: analysis of three stated preference data sets*. London : Departement for Transport, july 2005, 279 p.
< http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft_econappr/documents/page/dft_econappr_040159.pdf > [consulté le 20 septembre 2006].
- [Hess2006] HESS S., POLAK J.W. Mixed logit estimation of parking type choice. *Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., USA, 2006, 23 p.
- [Hoogendoorn2000] HOOGENDOORN-LANSER S., HOOGENDOORN S.P. Travel choice behavior in public transport networks: A fuzzy genetic approach. *Proceedings of the 5th TRAIL Annual Congress on Five Years Crossroads of Theory and Practice*, 1999, 21 p.
- [Hopfield1982] HOPFIELD J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volume 79, 1982, p. 2554–2558.
- [Huang2000] HUANG H.J., YANG H., BELL M.G.H. The models and economics of carpools. *The Annals of Regional Science*, volume 34, n° 1, 2000, p. 55-68
- [Hunt2001] HUNT J.D., DONNELLY R., ABRAHAM J.E., BATTEN C., FREEDMAN J., HICKS J., COSTINETT P.J., UPTON W.J. Design of a statewide land use transport interaction model for Oregon. *Proceedings of the 9th World Conference for Transport Research*, july 2001, Seoul, South Korea.

[INSEE-RP1999] INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ETUDES ECONOMIQUES. Recensement de la population. [Documentation en ligne]. [page d'accueil de la rubrique sur le site de l'INSSE].

< http://www.recensement.insee.fr/RP99/rp99/page_accueil.paccueil > [consulté le 10 octobre 2005].

[Ishida2000] ISHIDA T. Understanding Digital Cities. In : ISHIDA T., ISBISTER K. Eds. *Digital Cities: Experiences, Technologies and Future Perspectives. Lecture Notes in Computer Science*, 2000, volume 1765, 11 p.

[Itami2004] ITAMI R., RAULINGS R., MaCLAREN G., HIRST K., GIMBLETT R., ZANON D., CHLADEK P. RBSim 2: Simulating the complex interactions between human movement and the outdoor recreation environment. *Journal for Nature Conservation*, January 2004, volume 11, n°4, p. 278-286.

[Janssens2004] JANSSENS D., WETS G., BRIJS T., VANHOOF K., ARENTZE T.A., TIMMERMANS H.J.P. Improving performance of multiagent rule-based model for activity pattern decisions with bayesian networks. *Transportation Research Record*, n°1894, 2004, p. 75-83.

[Jarras2002] JARRAS I., CHAIB-DRAA B. Aperçu sur les systèmes multiagents. *Scientific Series*. Montréal : CIRANO, 2002, 45 p. ISSN 11988177.

[Jars2005] JARS Isabelle. Contribution des sciences sociales dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée: ALONE, un modèle hybride d'agent apprenant. Th : Informatique : Lyon I : 2005, 229 p.

[Jensen1997] JENSEN K. *Coloured Petri Nets: basic concepts, analysis methods and practical uses*. Berlin : Springer-Verlag, 1997.

[Jensen1998] JENSEN K. An Introduction to the Practical Use of Coloured Petri Nets. In : REISIG W., ROZENBERG G. (eds.). *Lecture Notes in Computer Science: Lectures on Petri Nets II: Applications*, volume 1492, 1998, p. 237-292.

[JeuxCityLife] MONTE CRISTO. *CityLife: un city builder de plus ?* <www.jeuxvideopc.com/articles/299-city-life-city-builder-plus> [consulté le 10 septembre 2006].

[JeuxSimCity] MAXIS. SimCity. <<http://www.simjeux.fr>> [consulté le 10 septembre 2006].

- [JeuxTycoon] ATARI. *TycoonCity*. <<http://www.atari.com/tycoonciti/>> [consulté le 10 septembre 2006].
- [JMAC2004] JOURNEE MULTI-AGENTS ET COMPOSANTS : symposium (2004 : Paris), 68 p.
- [Jones1990] JONES P., KOPPELMAN F., ORFEUIL J.P. Activity analysis: State-of-the-art and future directions. In : JONES P.M. (eds). *Developpements in dynamic and activity-based approaches to travel analysis*. Aldershot : Gower Publishing, 1990, p. 34-55.
- [Jou1997] JOU R.C., MAHMASSANI H.S. Comparative Analysis of Day-to-Day Trip-Chaining Behaviour of Urban Commuters in Two Cities. *Transportation Research Record*, n° 1607, 1997, p. 163-170.
- [Kanafani1983] KANAFANI A. *Transportation demand analysis*. New-York : McGraw-Hill Book Company, 1983, 316 p.
- [Kim2004] KIM S., ULFARSSON G.F. Travel mode choice of the Eldely: effects of personal, household, neighbourhood, and trip characteristics. *Transportation Research Record*, n° 1894, 2004, p. 117-126.
- [Kitamura1998] KITAMURA R., FUJII S. Two computational process models of activity-travel behavior. In : GARLING T., LAITILA T., WESTIN K. (eds.). *Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling*, 1998, p. 251-279.
- [Kolski2004] KOLSKI C., PETIT-ROZE C., ANLI A., ABED M., GRISLIN-LE STRUGEON E., EZZEDINE H., TRABELSI A. La plasticité vue sous l'angle de la personnalisation ou selon les besoins vis-à-vis de l'information transport. *Journées thématiques de l'AS Plasticité du RTP 16 IHM*, août 2004, Namur, Belgique.
- [Koppelman2005] KOPPELMAN F.S., GARROW L.A. Efficient estimation of nested logit models using choice-based samples: example applications. *Transportation Research Record*, n° 1921, 2005, p. 63-69.
- [Krantz1971] KRANTZ D.H., LUCE R.D., SUPPES P., TVERSKY A. *Additive and polynomial representations*. New-York : Academic Press, 1971, 577 p. (Foundations of measurement, volume 1).
- [Kriaa2000] KRIAA H., GOUARDERES G. Analyse et Conception Révisable par Interaction entre Acteurs (ACRIA). *Proceedings of the Congrès scientifique Ingénierie des Systèmes et NTIC (NîmesTIC'2000)*, septembre 2000, Nîmes, France, p. 425-434.

- [Ktitarev1997] KTITAREV D.V., CHOWDHURY D., WOLF D.E. Stochastic traffic model with random deceleration probabilities: queueing and power-law gap distribution. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, volume 30, n° 8, 1997, p. 221-227.
- [Kukla2001] KUKLA R., KERRIDGE J., WILLIS A., HINE J. PEDFLOW : Development of an Autonomous Agent Model of Pedestrian Flow. *Transportation Research Record*, n° 1774, 2001, p. 11-17.
- [Kurri2004] KURRI J. Parking Policy Measures and Their Effects on Shopping and Work Trips. In : BEUTHE M, HIMANEN V, REGGIANI A, ZAMPARINI L (Eds.). *Transport Developments and Innovations in an Evolving World. Advances in Spatial Sciences series*. Berlin : Springer-Verlag, 2004, p. 147-167.
- [Lahiri2002] LAHIRI K., GAO J. Bayesian analysis of nested logit model by Markov chain Monte Carlo. *Journal of econometrics*. Amsterdam : Elsevier Publisher, volume 111, n° 1, 2002, p. 103-133. ISSN 03044076.
- [Lam1999] LAM W.H.K., YIN Y. An activity-based time-dependent traffic assignment model. *Transportation Research Part B*, n° 35, 2001, p. 549-574.
- [Lamy1999] LAMY S., RUAS A., DEMAZEAU Y., JACKSON M., MACKANESS W., WEIBEL R. The application of agents in automated map generalisation. *Proceedings of the 19th International Cartographic Conference*, august 1999, Ottawa, Canada, volume 2, p. 1225-1234.
- [Laumonier2004] LAUMONIER Julien. Contrôle de systèmes multiagents asynchrones : application aux systèmes de transport intelligents. Th : Informatique : Ste Foy, Québec : 2004, 93 p.
- [Laurent2006] LAURENT R.A.. *Elimination par attributs et choix probabiliste. Working papers*. Paris : Campus Paris Jourdan, mars 2006, 31 p.
- <<http://reynald.laurent.free.fr/index2.htm>> [consulté le 20 septembre 2006].
- [Lefevre2001] LEFEVRE E., COLOT O., VANNOORENBERGHE P., DE BRUCQ D. Informations et combinaison : les liaisons conflictuelles. *Traitement du Signal*, volume 18, n°3, 2001, p.161-177.
- [Lemelin2005] LEMELIN A. *Méthodes quantitatives des sciences sociales appliquées aux études urbaines et régionales, chapitre 4-3 (Modèles à variable dépendante qualitative)*. [en ligne]. Montréal : Université du Québec, Institut National de Recherche Scientifique, 10

janvier 2005, 8 p. <http://www.ucs.inrs.ca/Cours/Lemelin/EUR8213/4_3.pdf> [consulté le 10 septembre 2006].

[Le Strugeon1995] LE STRUGEON E. *Une méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs*. Th : Informatique : Valenciennes : 1995.

[Leurent1997] LEURENT Fabien. *Pour certifier un modèle de trafic, application à l'affectation bi-critères*. Th : Transport ENPC : Arcueil : 1997.

[Lin1991] LIN L.J. Self-improvement based on reinforcement learning, planning and teaching. In : BIMBAUM L.A., COLLINS G.C. Eds. *Proceedings of the 8th Workshop on Machine Learning ML'91*, june 1991, Evanston, USA. San Mateo : American Association for Artificial Intelligence, 1991, p. 323-327.

[Litman2006] LITMAN T. *Parking Management, strategies, evaluation and planning. Summarized report of the book "Parking Management, Best Practices"*. Victoria : Victoria Transport Policy Institute, april 2006, 28 p.

[Louvière1987] LOUVIERE J. An experimental design approach to the development of conjoint based simulation systems with an application to forecasting future retirement choices. In : GOLLEDGE, TIMMERMANS H.J.P. (eds.). *Behavioral Modeling in Geography and Planning*. London : Croom Helm Publisher : 1987.

[Maccubbin2000] MACCUBBIN R.P., HOEL L.A. *Evaluating ITS Parking Management Strategies: a systems approach.. Final research report*. Richmond : University of Virginia, may 2000, 93 p. <cts.virginia.edu/docs/UVACTS-14-13-29.pdf> [consulté le 12 septembre 2006].

[Manikonda2001] MANIKONDA V., LEVY R., SATAPATHY G., LOVELL D.J., CHANG P.C., TEITTINEN A. Autonomous agents for traffic simulation and control. *Transportation Research Record*, n°1774, 2001, p. 1-10.

[Manski2000] MANSKI C.F. Economic Analysis of Social Interactions. *Journal of Economic Perspectives*, volume 14, n° 3, 2000, p. 115-136.

[Marchal2003] MARCHAL F. Integration of time of usage in large-scale simulations. *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research*, august 2003, Lucerne, Switzerland, 15 p.

[Marchau2001] MARCHAU V. Stated preferences of european drivers regarding advanced assistance systems (ADAS). *European Journal of Transport and Infrastructure Research*,

volume 1, n° 3 (Implementation Issues on Automated Driver Assistance Systems), september 2001, p. 291-308. ISSN 15677141.

[Masson1998] MASSON S. Interactions entre système de transport et système de localisation, de l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*. Lyon : LET (Laboratoire d'Economie des Transport) : 1998, n°33, p. 79-108.

[Masson2000] MASSON Sophie. *Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*. Th : Sciences Economiques, mention économie de transport : Lyon II : 2000, 570 p.

[Mathieu2001] MATHIEU P., ROUTIER J.C., SECQ Y. Dynamic skill learning: a support to agent evolution. *Proceedings of the AISB'01, symposium on Adaptive Agents and Multi-Agent Systems*, march 2001, Heslington, United Kingdom, p. 25-32.

[Mathieu2003] MATHIEU P., ROUTIER J.C., SECQ Y. RIO: Roles, Interactions and Organizations. *Proceedings of the 3rd International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems (CEEMAS 2003)*, june 2003, Prague, Czech Republic, p. 147-157.

[Mathieu2004] MATHIEU P., VERRONS M.H. Three different kinds of negotiation applications achieved with GeNCA. *Proceedings of the International Conference on Advances in Intelligent Systems – Theory and Applications (AISTA'2004)*, november 2004, Kirchberg, Luxembourg.

[Mathieu2005] MATHIEU P., PICAULT S. Towards an interaction-based design of behaviors. *Proceedings of the 3rd European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS'2005)*, december 2005, Brussels, Belgium.

[Mazouzi2001] MAZOUZI Hamza. *Ingénierie des protocoles d'interaction : des systèmes distribués aux systèmes multi-agents*. Th : Informatique : Parix IX, Dauphine : 2001, 161 p.

[McFadden2000] MCFADDEN D. (2000). Disaggregate behavioral travel demand's RUM side: A 30-year retrospective. *Proceedings of the 9th International Association for Travel Behaviour Research Meeting (IATBR)*, june 2000, Goldcoast, Australia, 43 p.

[McNally1996] MCNALLY M.G. *An activity-based microsimulation model for travel demand forecasting*. Irvine : University of California, 1996, 21 p.

[MIRO2005] MIRO. Modélisation Intra-urbaine des Rythmes quOtidien. [page d'accueil du site] <<http://lifc.univ-fcomte.fr/~lang/MIRO/>> [consulté le 13 juillet 2005].

- [Misra2003] MISRA R., BHAT C.R., SRINIVASAN S. A continuous time representation and modeling framework for the analysis of nonworker activity-travel patterns : tour and episode attributes. *Transportation Research Record*, n°1831, 2003, p. 11-20.
- [Muller2000] MÜLLER P.A., GAERTNER N. *Modélisation objet avec UML*. Paris : Eyrolles Publisher, 2000, 520 p.
- [Muller2005] MULLER T.H.J., MISKA M.P., ZUYLEN H.J. Monitoring traffic under congestion. *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, january 2005, Washington (D.C), USA, 16 p.
- [Munizaga2005] MUNIZAGA M.A., ALZAREZ-DAZIANO R. Testing Mixed Logit and Probit Models by Simulation. *Transportation Research Record*, n° 1921, 2005, p. 53-62.
- [Nagel2003] NAGEL K., MARCHAL F. Computational methods for multi-agent simulations of travel behaviour. *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research*, august 2003, Lucerne, Switzerland, 50 p.
- [Nagel2004] NAGEL Kai. Multi-agent transportation simulation. Draft of forthcoming book, february 2, 2004, 245 p.
- < <http://www.vsp.tu-berlin.de/archive/sim-archive/publications/book/book.pdf>> [consulté le 24 septembre 2006].
- [Nance1994] NANCE R. Conical methodology : an evolutionary convergence of systems and software engineering. In : FEIGENBAUM E., FELDMAN J. (Eds). *Computers and Thought*, 1994, p. 109-133.
- [Newmark2005] NEWMARK G.L., PLAUT P.O. Shopping trip-chaining behavior at malls in a transitional economy. *Transportation Research Record*, n° 1939, 2005, p 174-183.
- [Nguyen2004] NGUYEN D.M., DROGOUL A., DUONG V. Conception d'un simulateur multi-agents pour la Gestion du Trafic Aérien. *Proceedings of the Recherche Informatique Vietnam & Francophonie conference (RIVF'04)*, february 2004, Hanoi, Vietnam, p. 33-40.
- [Nielsen2006] NIELSEN K., APPEL J., DEMAZEAU Y. Applying Artificial Intelligence to Cooperating Agricultural Robots. *Proceedings of the 3rd IFIP Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations*, june 2006, Athens, Greece. 8p.
- [Noth2003] NOTH M., BORNING A., WADDELL P. An extensible modular architecture for simulating urban development, transportation and environmental impacts. *Computers, Environment and Urban Systems*, volume 27, n° 2, march 2003, p. 181-203.

- [Nour Eldin1981] NOUR ELDIN M.S., EL-REEDY T.Y., ISMAIL H.K. A Combined Parking and Traffic Assignment Model. *Traffic Engineering and Control*, volume 22, n°10, 1981, p. 524-530.
- [OFTA2004] OFTA. Systèmes multi-agents (ARAGO 29) février 2004, 288 p.
- [adresse du site] <<http://perso.orange.fr/ofta/index/htm>>
- [Ogawa2001] OGAWA K., AKIYAMA T. Traffic simulation model on urban expressway with individual vehicle description. *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Transport Systems*, october 2001, Sydney, Australia, p.
- [OGC2005] OGC Inc. (Open Geospatial Consortium Inc.). *OpenGIS Location Services (OpenLS): Core Services*. 2005, 165 p. <<http://www.opengis.org/standards/olscore/>> [consulté le 21 septembre 2006].
- [O'Kelly2003] O'KELLY M., NAGEL K., DOHERTY S. *Microsimulation and the Activity Scheduling Process: Views from the STELLA workshop. Position paper written in response to STELLA workshop*. Newcastle : STELLA project, may 2003, 8 p.
- <http://www.vsp.tu-berlin.de/archive/sim-archive/publications/Okelly_Nagel_Doherty_STELLA/> [consulté le 23 septembre 2006].
- workshop in Newcastle
- [Olaru2003] OLARU D., SMITH B. Modelling daily activity schedules with fuzzy Logic. *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research*, august 2003, Lucerne, Switzerland, 26 p.
- [Owen2000] OWEN L.E., ZHANG Y., RAO L., McHALE G. Traffic flow simulation using CORSIM. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, december 2000, Orlando, USA, 5 p.
- [Paquet2004] PAQUET S. Cours Intelligence Artificielle, partie 2: les agents intelligents [Cours en ligne]. Université de Laval - Québec, 2004
- <[www.damas.ift.ulaval.ca/~coursIA2/Fichiers/Acetates/Chapitre2\(4NB\).pdf](http://www.damas.ift.ulaval.ca/~coursIA2/Fichiers/Acetates/Chapitre2(4NB).pdf)> [consulté le 21 février 2007].
- [Paruchuri2002] PARUCHURI P., PULLALAREVU A.R., KARLAPALEM K. Multi Agent Simulation Of Unorganized Traffic. *Proceedings of the first International joint Conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1*, july 2002, Bologna, Italy, p. 176-183.

- [Pas1987] PAS E.I., KOPPELMAN F.S. An examination of the determinants of day-to-day variability in individuals' urban travel behavior. *Transportation*, volume 14, 1987, p. 3-20.
- [Patrice1999] PATRICE B., JEAN M. *Automobiles pour la ville à l'horizon 2010 : Nouvelles gestions de l'automobile urbaine. Partenariats avec le transport public*. Lyon : CERTU, avril 1999, 120 p.
- [Pekkola2002] PEKKOLA S. Critical Approach to 3D Virtual Realities for Group Work. *Proceedings of the second Nordic conference on Human-computer interaction*, 2002, Aarhus, Denmark. ACM International Conference Proceeding Series, volume 31, 2002, p. 129-138.
- [Pendyala2005] PENDYALA R.M., KITAMURA R., KIKUCHI A., YAMAMOTO T., FUJII S. FAMOS: the Florida Activity MObility Simulator. *Transportation Research Record*, n° 1921, 2005, p. 123-130.
- [Petiot2001] PETIOT R. On-street parking fees, optimal fines and individual decision-making. *Proceedings of the 9th World Conference of Transport Research*, Seoul, South Korea, 2001, 18 p.
- [Petri1962] PETRI C.A. Kommunikation mit Automaten. *Schriften des IMM 2*, 1962, Bonn, Deutschland.
- [Pezzoli2001] PEZZOLI F. Processus d'évaluation dans le stationnement automobile à domicile. Formalisation floue du niveau d'acceptation des automobilistes devant une politique de gestion du stationnement contraignante. *Actes des Cinquièmes Rencontres de ThéoQuant*, février 2001, Besançon, France, 11 p.
- [Polak1990] POLAK J., AXHAUSEN K.W., ERRIGTON T. The application of the CLAMP to the analysis of parking policy in Birmingham city centre. *Proceedings of the 18th PTRC Summer Annual Meeting*, 1990, Brighton, United Kingdom.
- [Postorino2002] POSTORINO M.N., VERSACI M. A fuzzy approach to simulate the user mode choice behaviour. *Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference*, 2002, Bari, Italy, 5p.
- [Pozsgay2001] POZSGAY M.A., BHAT C.R. *Modeling attraction-end choice for urban recreational trips: implications for transportation, air quality and land-use planning*. Research report of SWUTC. Austin: University of Texas at Austin, 2001, 65 p.

- [Prasetyo2003] PRASETYO I., KUKUDA D., YOSHINO H., YAI T. Analysis of travel time saving benefit by understanding individual needs and value of activity time: Case study of Toyko and Jakarta. *Transportation Research Record*, n°1854, 2003, p. 12-21.
- [Predit2000] PREDIT. *Evaluation des modèles de prévision de trafic*. Paris : PREDIT, 2000, 5 p.
- [Pribyl2005] PRIBYL O., GOULIAS K.G. Simulation of daily activity patterns incorporating interactions within household: algorithm overview and performance. *Transportation Research Record*, n° 1926, 2005, p. 135-141.
- [Rachlin1994] RACHLIN J., KASIF S., SALZBERG S., AHA D.W. Towards a Better Understanding for Memory-Based Reasoning Systems. *Proceedings of the 11th International Conference on Machine Learning*, july 1994, New Brunswick, USA. San Francisco : Morgan Kaufmann, 1994, p. 242-250.
- [Raney2002] RANEY B., NAGEL K. Iterative Route Planning for Modular Transportation Simulation. *Proceedings of the 2nd Swiss Transport Research Conference*, march 2002, Monte Verita, Switzerland, 21 p.
- [Raney2003] RANEY B., NAGEL K. An agent-based simulation model of Swiss travel, first results. *Proceedings of the 3rd Swiss Transport Research Conference*, march 2003, Monte Verita, Switzerland, 23 p.
- [Raney2004] RANEY B., NAGEL K. Iterative Route Planning for Modular Transportation Simulation. *Future Generation Computer Systems*. Amsterdam : Elsevier Science Publisher, volume 20, n°7, 2004, p. 1101-1118. 2004 ISSN 0167739X.
- [Raux1998] RAUX C. *Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise*. Lyon : LET-SEMALY, 1998, 64 p.
- [Ray2003] RAY Cyril. *ATLAS, une plate-forme pour la modélisation et la simulation de systèmes désagrégés*. Th : Informatique : Rennes I : 2003, 160 p.
- [Richard2001] RICHARD Nadine. *Description de comportements d'agents autonomes évoluant dans des mondes virtuels*. Th : ENST : Paris VI : 2001, 241 p.
- [Ricordel2001] RICORDEL Pierre-Michel. *Programmation orientée multi-agents : développement et déploiement de systèmes multi-agents Voyelles*. Th : Informatique : Grenoble : 2001, 133 p.

- [Rindt2003] RINDT C.R., MARCA J.E., McNALLY M.G. An agent-based activity microsimulation Kernel using a negotiation metaphor. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January 2003, Washington (DC), USA, 14 p.
- [Roberts1997] ROBERTS M., SIMMONDS D.C. A strategic modelling approach for urban transport policy development. *Traffic Engineering and Control*, 1997, p. 377-384.
- [Roozmond1999] D.A. *Architecture of an Agent Based Urban Intersection Control System*. TRAIL Research School. Delft : Faculty of Civil Engineering and Geosciences, University of Technology, October 1999, 14 p.
- <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/13187/ftp:zSzzSzcci.ct.tudelft.nlzSztrail99.pdf/arc_hitecture-of-an-agent.pdf> [consulté le 23 septembre 2006].
- [Roques2001] ROQUES P. *UML par la pratique*. Paris : ed. Eyrolles, 2001, 302 p.
- [RPG2000] Conceptual Model Development and Validation. *Special Topic in the DoD Recommended Practices Guide for VV&A*, 2000, 31 p.
- < vva.dmsomil/Special_Topics/Conceptual/conceptual-pr.PDF> [consulté le 21 septembre 2006].
- [Rumbaugh1995] RUMBAUGH J. What is a method ? *Journal of Object Oriented Programming*. 1995, volume 8, n°6, p. 10–16, 26.
- [Russel2003] RUSSEL S.J., NORVIG P. Artificial Intelligence: a Modern Approach. In : Prentice-Hall Eds. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, 2003, p. 1132.
- [Sabas2001] SABAS A. *Systèmes multi-agents : une analyse comparative des méthodologies de développement, mémoire maîtrise*. Trois Rivières : Université Quebec, 2001, 147 p. [consulté le 20 décembre 2002].
- [Sarramia2002] SARRAMIA David. *ASCI-mi : une méthodologie de modélisation multiple et incrémentielle, application aux systèmes de trafic urbain*. Th : Informatique : Clermont-Ferrand II : 2002, 303 p.
- [Sarramia2005] SARRAMIA D. *et al. Construction interactive et modélisation réaliste d'une ville moderne dans le cadre d'un jeu vidéo de nouvelle génération. Réponse à Appel à projet*. La Rochelle : Université La Rochelle, 2005, 32 p.
- [Sattayhatewa2003] SATTAYHATEWA P., SMITH R.L. Development of parking choice models for special events. *Transportation Research Record*, n° 1858, 2003, p. 31-38.

- [Scemama2000] SCEMAMA G., BLAQUIERE A., OLIVERO P. Claire ++ observatory: a new tool to know and assess congestion on road networks. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS'2000)*, november 2000, Torino, Italy.
- [Scemama2004] SCEMAMA G., CARLES O. Claire-Siti, public road transport network management control: an unified approach. *Proceedings of the 12th IEE International Conference on Road Transport Information&Control (RTIC'04)*, april 2004, London, UK.
- [Scemama2005] SCEMAMA G. Supervision des réseaux multimodaux, CLAIRE-SITI [En ligne], mai 2005. <<http://recits.inrets.fr/imprimersans49.html>> [consulté le 10 janvier 2007].
- [Scemama-siteWeb] SCEMAMA G. CLAIRE, traffic supervisor for congestion management. [En ligne]. <<http://www.inrets.fr/ur/maia/scemama/claire.html>> [consulté le 14 octobre 2005].
- [Schelhorn1999] SCHELHORN T., O'SULLIVAN D., HAKLAY M., THURSTAIN-GOODWIN M. *Streets: an agend-based pedestrian model. Working paper series*. London : CASA, University College London, april 1999, 14 p. ISSN 14671298.
- [Schleiffer2002] SCHLEIFFER R. Agend-based architecture for advanced in vehicle traveler information systems. *Proceedings of the 24th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR'02)*, 2002, Sydney, Australia, 14 p.
- [Schlich2003] SCHLICH R. Homogenous groups of travellers. *Proceedings of the 10th International conference on Travel Behaviour Research*, august 2003, Lucerne, Switzerland, 30 p.
- [Schnetzler1999] SCHNETZLER B. *La valeur du temps*. Paris : INRETS, 1999, 20 p.
- [Schönfelder2002] SCHONFELDER S., AXHAUSEN K.W. *Measuring the size and structure of human activity spaces, the longitudinal perspective. Working paper*. Zürich : Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), september 2002, 49 p.
- [Schulze1997] SCHULZE T., FLIESS T. Urban traffic simulation with psycho-physical vehicle following models. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, December 1997, Atlanta, USA, p. 1222-1229.
- [Shafer1976] SHAFER G. *A mathematical theory of evidence*. Princeton : Princeton University press, 1976.
- [Shiftan2003] SHIFTAN Y., BEN-AKIVA M., PROUSSALOGLOU K., DE JONG G., POPURI Y., KASTURIRANGAN K., BEKHOR S. Activity-based modeling as a tool for

better understanding travel behaviour. *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research*, august 2003, Lucerne, Switzerland, 25 p.

[Shoup1999] SHOUP D. The trouble with minimum parking requirements. *Transportation Research Part A*, volume 33, 1999, p. 549-574.

[Simma2003] SIMMA A., AXHAUSEN K.W. Interactions Between Travel Behaviour, Accessibility and Personal Characteristics: the Case of Upper Austria. *European Journal on Transport Infrastructure and Research*, 2003, volume 3 (2), p. 179-197. <<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=incoll&nr=905>> [consulté le 21 septembre 2006].

[Smale1974] SMALE S. Global analysis and economics IIA: Extension of a theorem of Debreu. *Journal of Mathematical Economics*, volume 1, n° 1, 1974, p. 1-14.

[Smartest1999] SMARTEST (Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests) project. *Best Practice Manual*. Leeds: University of Leeds, may 1999, 89 p. <<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/>> <.../smartest/deliv8.PDF> [consulté le 12 septembre 2006].

[Smets1992] SMETS P. The transferable belief model for experts' judgments and reliability problems. *Analysis and Management of uncertainty: Theory and Applications*. Elsevier Science Publishers, 1992.

[Smets1994] SMETS P., KENNES R. The Transferable belief model. *Artificial Intelligence*, n°66, 1994, p. 191-234.

[Spiess1996] SPIESS H. *A Logit Parking Choice Model with Explicit Capacities. Working Paper*. [en ligne]. Aegerten : EMME/2 Support Center, 1996, 8 p. <http://www.inro.ca/en/pres_pap/papers/parkcap.pdf> [consulté le 12 novembre 2005].

[Srinivasan2002] SRINIVASAN K.K., MAHMASSANI H.S. *Dynamic Decision and Adjustment Processes In Commuter Behavior Under Real-Time Information. Research report*. Austin : University of Texas, Center of Transportation Research, 2002, 252 p.

[Stefan2003] STEFAN Peter. *Combined use of reinforcement learning and simulated annealing : algorithms and applications*. Th : Information science : Miskolc : 2003, 119.

[Stefan2005] STEFAN K.J., McMILLAN J.D.P., HUNT J.D. An urban commercial vehicle movement model for calgary. *Transportation Research Record*, n° 1921, 2005, p 1-10.

- [Steiner2003] STEINER R.L., LI I., SHAD P., BROWN M. *Multimodal trade-off analysis in traffic impact studies. Final report*. Gainesville : University of Florida, 2003, 119 p.
- [Stern2002] STERN E., RICHARDSON H.W. Behavioral modeling of road users – current research and future needs. *Paper of the Focus group 3 Consolidation and Exploration Meeting, STELLA project*, january 2003, Washington, USA, 25 p.
- [Still2000] STILL B., SIMMONDS D. Parking restraint policy and urban vitality. In : TAYLOR & FRANCIS Group Publisher. *Transport Reviews*, volume 20, n° 3, july 2000, p. 291-316.
- [STMontréal2002] SOCIETE DE TRANSPORT DE MONTREAL. *Faire le choix du transport en commun*. Montréal : STM, 2002, 24 p.
- [Stolzmann1998] STOLZMANN W. Anticipatory classifier systems. *Proceeding of the 3rd Annual Conference*, july 1998, San Francisco, USA, p. 658-664.
- [StPetBrg2005] *Saint Petersburg time and space*.
<<http://www.spb.300.ru/pages/page.phtml?id=1>> [consulté le 06 juin 2005].
- [Strachey1966] STRACHEY C. Towards a formal semantics. In : STEEL T.B. (Eds). *Formal Language Description Languages or Computer Programming*. Amsterdam : 1966, p. 198-220.
- [Sunitiyoso2006] SUNITIYOSO Y. Social-psychological aspects in the dynamics of travellers mode choice behaviour. *Proceedings of the 3rd Annual FBE (Faculty of the Built Environment) Postgraduate conference*, may 2006, Bristol, United Kingdom.
- [Sutton1999] SUTTON R.S., PRECUP D., SINGH S. Between MDPs and Semi-MDPs: Learning, planning, and representing knowledge at multiple temporal scales. *Artificial Intelligence*, volume 112, 1999, p. 181-211.
- [Szeto2005] SZETO W.Y. *Modal choice* [cours en ligne]. Dublin : Trinity College, Departement of Civil, Structural and Environmental Engineering, february 2005, 11 p.
<www.tcd.ie/Civil_engineering/Staff/Wai.Szeto/transport/7.%20modal%20choice-R.pdf>
[consulté le 20 juillet 2005]
- [Taguchi1987] TAGUCHI G. *System of Experimental Design*. Dearbon : Don Clausing UniPub/Kraus International Publications, 1987.

- [Tallon2002] TALLON J.M., BILLOT A., CHATEAUNEUF A., GILBOA I. Sharing beliefs and the absence of betting in the choquet expected utility model. *Statistical Papers*, n° 43, 2002, p. 127-136.
- [Tan2000] TAN A.A.W., DE VRIES B. Using a Virtual Environment for Understanding Real-World Travel Behavior. *Proceedings of the 5th Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, august 2000, Nijkerk, The Netherlands, 11 p.
- [Teknomo1997] TECKNOMO K., HOKAO K. Parking Behavior in Central Business District- A Case Study of Surabaya, Indonesia. *EASTS Journal*, volume 2, n° 2, 1997, p. 551-570.
- [Télliez2003] TELLEZ R.A. *Learning in agents and multiagents systems. Working document.* 2003, 12 p. < <http://www.ouroboros.org/learning.pdf> > [consulté le 20 juillet 2006]
- [Thériault2005] THERIAULT M., DES ROSIERS F., JOERIN F. Modelling accessibility to urban services using fuzzy logic: A comparative analysis of two methods. *Journal of Property Investment and Finance*, volume 23, n° 1, 2005, p. 22-54.
- [Thevenin2002] THEVENIN Thomas. *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains, une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine.* Th : Géographie : Besançon : 2002, 261 p.
- [Timmermans2002] TIMMERMANS H.J.P., ARENTZE T., JOH C.H. Analysing space-time behaviour: new approaches to old problems. *Progress in Human Geography*, volume 26, n°2, 2002, p. 175-190.
- [Tong2004] TONG C.O., WONG S.C., LAU W.W.T. A demand-supply equilibrium model for parking services in Hong Kong. *Hong Kong Institution of Engineers Transactions*, volume 11, 2004, p. 48-53.
- [Torrens2000] TORRENS P.M. *Paper 20: How land-use transportation models work.* London : CASA, University College London : 2000, 75 p. ISSN 14671298.
- [Transims] TRANSIMS, TRansportation ANalysis and SIMulation System, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. < <http://transims.tsasa.lanl.gov> > [consulté le 24 septembre 2006].
- [Tsimhoni2003] TSIMHONI O., LIU Y. Steering a driving simulator using the queuing network-model human processor (QN-MHP). *Proceedings of the Second International*

Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, July 2003, Park City - Utah, USA, p. 81-85.

[Tsopeles2001] TSOPELAS I., LING D.J., McCARTHY T.J. Driver attitudes to the PGI System in Manchester. *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the University Transport Studies Group (UTSG)*, January 2001, Oxford, United Kingdom, 12 p.

[Vanbergue2000] VANBERGUE D. Modélisation de phénomènes urbains: Simulation des migrations intra-urbaines. In : PESTY S., SAYETTAT-FRAU C. Eds. *Systèmes multi-agents – Méthodologie, Technologie et Expériences*. Paris : Hermès : 2000, 12 p.

[Van Dender2003] VAN DENDER K., PROOST S. *Optimal urban transport pricing with congestion and economies of density and costly public funds*. ETE working paper. Leuven : Energy Transport Environment (ETE), 2003, 29 p.

[Van Katwijk2005] VAN KATWIJK R.T., VAN KONINGSBRUGGEN P., DE SCHUTTER B., HELLENDOORN J. Test bed for multi-agent control systems in road traffic management. *Transportation Research Record*, n° 1910, 2005, p. 108-115.

[Van Waerden2003] VAN WAERDEN P., BORGES A., TIMMERMANS H.J.P. Travelers micro-behavior at parking lots: a model of parking choice behavior. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January 2003, Washington (DC), USA, 20 p.

[Verhoef1999] VERHOEF E.T. Time, speeds, flows and densities in static models of road traffic congestion and congestion pricing. *Proceedings of the 38th meetings of the European Regional Science Association*, September 1998, Vienna, Austria. *Regional Science and Urban Economics*, volume 29, n° 3, 1999, p. 341-369.

[Verhoeven2005] VERHOEVEN M., ARENTZE T., TIMMERMANS H.J.P., VAN DER WAERDEN P. Modeling the impact of key events on long-term transport mode choice decisions: a decision network approach using event history data. *Transportation Research Record*, n° 1926, 2005, p. 106-114.

[Vermot-Desroches1994] VERMOT-DESROCHES B. Interactions spatiales. In : AURAY J.P., BAILLY A., DERYCKE P.H., HURIOT J.M. *Encyclopédie d'économie spatiale*. Paris : Economica, 1994, p. 61-66.

[Vigier1988] VIGIER M. *Pratique des plans d'expériences: méthodologie Taguchi*. Paris : Les Editions d'Organisation, 1988, 195 p.

- [Waddell2001] WADDELL P., OUTWATER M., BHAT C. *Recommendations for Integrated Land Use and Travel Models: Final Report to the Puget Sound Regional Council on Land Use and Travel Demand Forecasting Models*. Seattle : University of Washington, 2001, 172 p. <www.psrc.org/datapubs/pubs/model_designrecommendations.pdf> [consulté le 21 septembre 2006].
- [Wahle2001] WAHLE J., SCHRECKENBERG M. A Multi-Agent System for On-Line Simulations based on Real-World Traffic Data. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, january 2001, Hawaii, USA, 9 p.
- [Watkins1989] WATKINS C.J. *Learning with delayed rewards*. Ph D. dissertation : psychology : Cambridge : 1989.
- [Watkins1992] WATKINS C., DAYAN P. Q-learning. *Machine Learning*, volume 8, 1992, p. 279-292.
- [Wegener1994] WEGENER M. Operational Urban Models: State of the Art. *Journal of the American Planning Association*, volume 59, 1994, p. 17-29.
- [Wegener1996] WEGENER M. Reduction of CO2 emissions of transport by reorganisation of urban activities. In : HAYASHI Y., ROY J. (Eds). *Transport, land-use and the environment*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 103-124.
- [Weiss1989] WEISS S.M., KAPOULEAS I. An Empirical Comparison of Pattern Recognition, Neural Nets and Machine Learning Classification Methods. *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, august 1989, Detroit, USA. New-York : Morgan Kaufmann, 1989, p. 788-793.
- [Whittle2000] WHITTLE J., SCHUMANN J. Generating Statechart Designs from Scenarios. *Proceedings of the 22nd International Conference on Software Engineering (ICSE 2000)*, june 2000, Limerick, Ireland. New-York : ACM, 2000, p. 314-323.
- [Wiering2004] WIERING M., Van VEENEN J., VREEKEN J., KOOPMAN A. Intelligent Traffic Light Control. *Information and Computing Sciences*. Utrecht : Utrecht university, 2004, 31 p. <www.cs.uu.nl> [consulté le 23 septembre 2006]. Technical report UU-CS-2004-029.
- [Wilbur2000] WILBUR SMITH ASSOCIATES. *Parking evaluation. Background paper 2*. Cary : Town of Cary, august 2000, 23 p.

- <www.townofcary.org/depts/dsdepts/P&Z/tcap/2wsaparkingrev.pdf> [consulté le 15 mars 2005]
- [Wilson1970] WILSON A.G. *Entropy in urban and regional modelling*. London : Pion, 1970.
- [Wooldridge1995] WOOLDRIDGE M., JENNINGS N.R. Agent theories, architectures, and languages. In : WOOLDRIDGE, JENNINGS (eds). *Intelligent Agents*. London : Springer Verlag, 1995, p. 1-22.
- [Xie2003] XIE C.; LU J., PARKANY E. Work travel mode choice modeling with Data Mining decision trees and neural networks. *Transportation Research Record*, n° 1854, 2003, p. 50-61.
- [Yadlapati2004] YADLAPATI S.S., PARK B. *Development and testing of variable speed limit control logics for work zones using simulation*. Research report. Charlottesville : University of Virginia, Center for Transportation Studies, 2004, 102 p.
- < <http://cts.virginia.edu/docs/UVACTS-13-0-43.pdf> > [consulté le 17 mars 2006].
- [Yamamoto2002] YAMAMOTO T. NAKAYAMA S., KITAMURA R. In-Vehicle route recommendation system with learning by neural networks. *Proceedings of Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, October 2002, Tsukuba, Japan.
- [Yamamoto2004] YAMAMOTO T., KITAMURA R., PENDYALA R.M. Comparative analysis of time-space prism vertices for out-of-home activity engagement on working and non-working days. *Environment and Planning B: planning and design*, volume 31, n° 2, 2004, p. 235-250.
- [Young2000] YOUNG W. Modeling Parking. In : HENSHER D., BUTTON K.J. Eds. *Handbook of Transport Modelling*. Oxford : Elsevier Science, volume 1, 1997, p. 409-420.
- [Youssif2004] YOUSSEF S., PURNAWAN. Traffic operation at on-street parking facilities. *Proceedings of the Institution Civil Engineers, Transport*, [en ligne], volume 157, n°3, 2004, p. 189-194. < <http://www.atypon-link.com/TELF/doi/pdf/10.1680/tran.157.3.189.41182> > [consulté le 26 septembre 2006].
- [Zadeh1965] ZADEH L.A. Fuzzy sets. *Information and Computation*, volume 8, 1965, p. 338-353.

[Zargayouna2003] ZARGAYOUNA H.M. *Systèmes d'information de voyageurs : conception d'un Système Multi-Agents. Rapport de stage de DEA*. DEA Informatique: Systèmes Intelligents. Paris : Université Paris IX Dauphine, 2003, 71 p.

[Zhang2004] ZHANG L., LEVINSON D. Agent-Based Approach to Travel Demand Modeling Exploratory Analysis. *Transportation Research Record*, n° 1898, 2004, p. 28–36.

[Zhang2005] ZHANG J., FUJIWARA A., KUSAKABE T. A new discrete choice model with endogenous generation of choice set based on the principle of relative utility maximization. *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, january 2005, Washington (DC), USA, 14 p.

ANNEXE A - Approches et environnements pour la modélisation des déplacements

Nous présenterons une brève synthèse des outils et d'environnements les plus employés (pour une synthèse détaillée voir les travaux de [Masson2000], [Arentze2001], [Waddell2001], [Axhausen2002], [Timmermans2002], [Bhat2003b], [DePalma2004], [Buliung2005]).

Anx. A-1. Interrelations transport-urbanisme

• MODELES INTEGRES D'URBANISATION ET DE TRANSPORT

Les modèles intégrés d'urbanisation et de transport soutiennent l'idée que la structure et la performance du système de transport fournissent des opportunités à la mobilité. Mais sur le long terme, elles influencent les schémas spatiaux de croissance et le niveau de l'activité économique à travers l'accessibilité qu'elles procurent. Le modèle interactif est par nature un modèle constitué de sous-modèles urbains. [Wegener1996] distingue huit types de sous-systèmes urbains : les réseaux, le mode d'occupation des sols, les lieux d'emplois, les lieux de résidences, l'emploi, la population, le transport de marchandises et les déplacements de personnes. Tous ces modules opèrent avec des modèles basés sur des données socio-économiques, des approches microéconomiques, urbanistes, trafic, etc.

Dans *Tableau-Anx1*, nous avons réuni les principaux types de modèles prenant en considération l'aménagement du territoire et le transport. Dans l'annexe Anx. A-2, est donné un bref aperçu d'outils et environnements basés sur cette approche.

(liens bibliographiques de *Tableau-Anx1*: [Masson2000], [Derycke1982], [Vermot-Desroches1994], [Fustier1988], [Wilson1970])

Tableau-Anx1. Modèles de déplacement urbain intégrés

<i>Approche</i>	<i>Principe</i>	<i>Remarques</i>
<p>Modèles stratégiques [Masson2000] [Derycke1982]</p>	<p>- ces modèles ont pour principe de fonctionner avec un nombre de zones réduit, une représentation de l'offre de transport par des relations flux-vitesses entre les zones, et une prise en compte des rétroactions de l'état de l'offre sur la demande. Les modifications de la demande de transport sont d'une part, engendrées par des variables exogènes au modèle (effets dus à l'utilisation des sols, des revenus, de la possession de la voiture particulière) et d'autre part, provoquées par des variations de conditions de transport, exprimées par des coûts généralisés. Les modèles stratégiques prennent en compte l'ensemble du système de transport, c'est-à-dire les modes privés, les modes publics et les interactions entre ces modes. Ces modèles ont également la particularité de rendre compte des réactions des usagers suite à des variations des conditions de transport: modification du choix d'itinéraire, du choix du mode ou de celui de la destination du déplacement.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - le besoin de données leur "appétit" en données les rendent difficilement applicables - le manque de transparence : l'approche de simulation est de type "boîte noire" - le caractère statique : les aspects dynamiques sont quasi-inexistants - résolution inadéquate : qui se traduit par des erreurs ou interprétations déformées avec par ailleurs un caractère prédictif mitigé.
<p>Modèles d'interaction spatiale [Vermont1994] [Fustier1988], [Wilson, 1970]</p>	<p>- les premiers modèles d'interaction spatiale se sont basés principalement sur l'analogie gravitaire. Dans ces modèles, les sols occupés par des activités sont définis comme des unités d'espaces agrégés ou des zones contenant un certain nombre d'activités. Ces agrégats interagissent, générant des flux de nature diverse, qui peuvent être des flux concrets comme les déplacements, les migrations, les transports de marchandises ou de façon plus abstraite, comme des dépendances, des diffusions, des opportunités. Chaque zone est décrite selon un nombre d'attributs. Les zones sont reliées aux autres par des infrastructures de transport. La forme gravitaire des modèles d'interaction spatiale établit l'interaction entre deux zones en proportion avec le nombre d'activités dans chaque zone (masse) et en proportion inverse à la friction imposée par une infrastructure particulière qui les connecte entre elles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - le caractère peu « comportemental » : ils sont basés sur des approches formelles qui tronquent l'aspect comportemental et rendent les simulations plus ou moins représentatives de la réalité. - caractère incomplet : peu d'informations sur les activités de stationnement

L'inventaire exhaustif des interactions dressé par l'équipe IAURIF (Cergy Pontoise) (*Figure-Anx1* [DePalma2004]) montre le besoin d'un cadrage préliminaire ; des interactions fortes et complexes, plus ou moins pertinentes selon l'échelle spatio-temporelle, existent entre urbanisation, demande de déplacement et offre de transport et le tout évolue dans un ensemble de contraintes urbaines, environnementales, politiques et légales qui ne peuvent être ignorées.

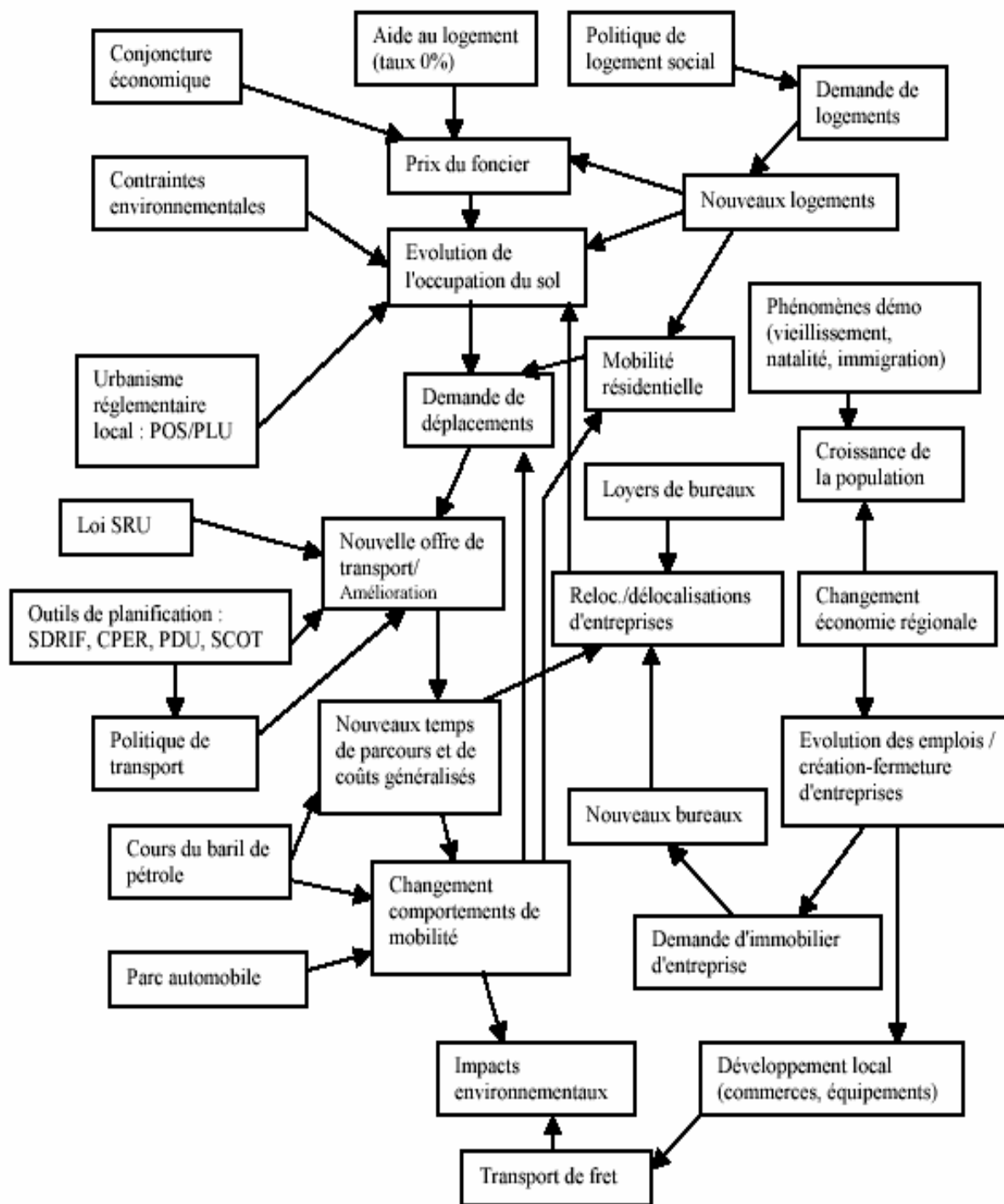


Figure-Anx1. Schéma des interactions du système urbanisation-transports [DePalma2004]

La recherche sur les modèles d'interaction entre transport et localisation est relativement récente (*Figure-Anx2*) (voir [Torrens2000] et [Waddell2001] pour des synthèses détaillées sur les modèles opérationnels). Elle s'est particulièrement développée dans les pays anglo-saxons, dans des pays plus interventionnistes comme la Suède, ou encore dans le cas des pays où les problèmes urbains sont de grande ampleur comme au Japon. A cette problématique de l'interaction transport-urbanisation de long terme, est très vite venue se greffer celle de l'interaction avec l'environnement. Parmi les approches les plus connues selon le cycle d'interaction [Wegener1996] présenté ci-dessous (*Figure-Anx2*), on peut distinguer deux courants : les modèles stratégiques et les modèles interactifs.

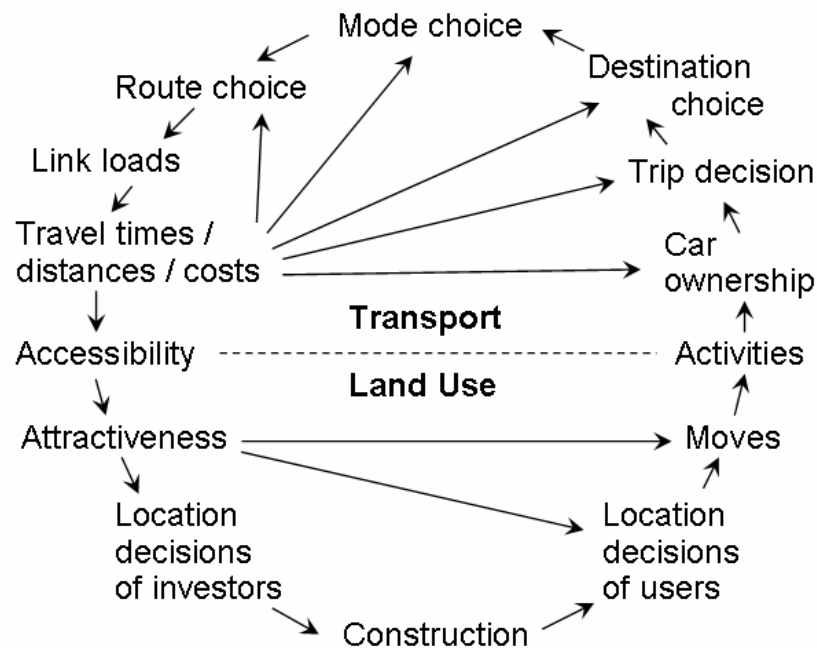


Figure-Anx2. Cycle d'interaction transport-urbanisation [Wegener1996]

- **MODELE OCCUPATION DES SOLS**

- **Modèle 2D**

Définir un découpage géographique pour un modèle de transport nécessite de concilier un certain nombre de contraintes : disponibilité des données, formes urbaines, typologie socio-économique, etc. Dans ce genre de modèles, la région urbaine est représentée comme un ensemble de zones discrètes. Des travaux [Steiner2003] ont déjà proposé une méthode pour représenter le réseau de chaque mode à l'aide des polygones. Pour l'échelle choisie, un réseau avec une bonne connectivité contient 50 polygones (voir *Figure-Anx3* pour un exemple).

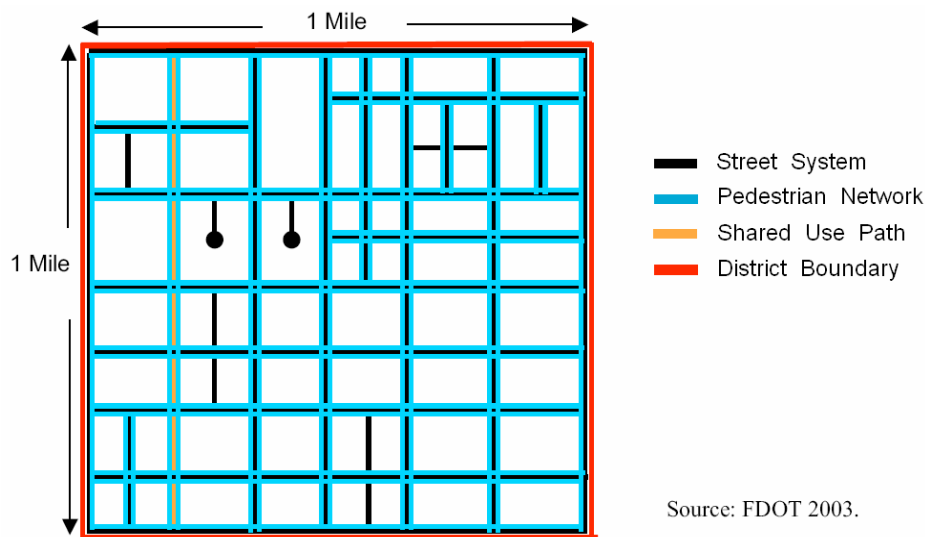


Figure-Anx3. Réseau à 52 polygones [Steiner2003]

Modèle 3D

La simulation urbaine 3D n'en est qu'à ses débuts. Les premières tentatives montrent bien toute la difficulté de représenter graphiquement un environnement aussi complexe.

Le jeu **SimCity** est présenté ainsi par son guide d'utilisation : « (...) Lorsque vous jouez à SimCity 2000, vous devenez l'urbaniste, l'investisseur et le maire d'un nombre illimité de villes. Vous pouvez prendre en main et diriger toutes les villes du programme ou ériger vos propres villes à partir de zéro. (...). L'un des défis les plus importants de SimCity consiste à maintenir une ville énorme sans compromettre la qualité de la vie de vos habitants, sans faire faillite alors que vous tentez de maintenir les infrastructures en place et sans avoir à augmenter les impôts au point où les commerces se mettent à fuir. SimCity 2000 vous donne l'occasion de vous mesurer aux dilemmes auxquels les maires du monde entier font face ».

D'autres jeux de type City Builder visent aussi à permettre à des personnes de jouer avec une ville comme si elles en étaient l'architecte, le gestionnaire ou le maire (voir *Figure-Anx4* [JeuxTycoon], [JeuxCityLife]).



Figure-Anx4. Image provenant de TycoonCity (Atari) et CityLife (Monte Cristo)

Les travaux sur le mode de représentation réaliste de la ville se font de plus en plus nombreux, mais sont encore sujets à critiques quant à leur qualité. Voir les travaux de synthèse de [Ishida2000], [Pekkola2002] et [Badour2005]. Un pionnier dans le domaine est le logiciel "Saint-Petersburg 300" [StPetBrg2005] où chaque bâtiment ou chaque rue est créé comme une copie de son prototype réel ; le visiteur est capable de se déplacer dans le centre ville à des instants différents de la journée en connaissant sa position, en choisissant sa destination. En même temps, la personne immergée dans l'environnement 3D peut recevoir des informations sociales, culturelles et historiques sur certains points d'attraction (bâtiments, monuments historiques ou parcs).

- **OUTILS ET APPROCHES INTEGRES URBANISME - TRANSPORT**

Devant le nombre et la diversité des modèles intégrés développés ces dernières années, il convient de faire le point de façon à porter un regard critique sur les performances de ces modèles. Pour ce faire, les différentes équipes de recherche ont été regroupées en 1981 au sein de l'International Study Group on Land Use / Transport Interaction (ISGLUTI). Le principe d'évaluation d'un modèle est le suivant : chaque modèle a été appliqué à la ville pour laquelle il avait été calibré au départ et ensuite, le même modèle, a été appliqué à plusieurs villes.

Une brève description des approches qui nous semblent intéressants par leurs aspects transport-urbanisation est donnée ci-après :

TOPAZ est un modèle d'optimisation de la structure urbaine. La représentation du système de transport est relativement sophistiquée. Les indicateurs de transport constituent en effet des éléments déterminants de la localisation (résidentielle et des activités). Le modèle présente une véritable phase de distribution des flux, fondée sur le principe de maximisation de l'entropie à double contrainte, ainsi qu'une phase de choix modal de type probabiliste (entre le rail et la route). Ainsi, TOPAZ est à la fois un modèle d'optimisation des localisations et de prévisions des flux.

CALUTAS a été conçu initialement avec, pour objectif, d'évaluer l'impact en matière de structuration urbaine de la construction d'un pont sur la baie de Tokyo. Il s'agit d'évaluer l'impact de la construction d'une infrastructure, et dès lors, les transports se doivent d'être saisis à un niveau relativement fin, d'où la présence d'un modèle de transport relativement conséquent et quasi exhaustif. Comme on se situe dans un espace vaste et dense, les auteurs ont opté pour une modélisation à deux niveaux : un niveau grossier avec de vastes zones à l'intérieur desquelles une première affectation est réalisée, puis une localisation fine à l'intérieur de chacune de ces zones.

On a donc bien ici un modèle pleinement intégré dans la mesure où les effets d'une modification dans le système de transport trouvent leurs répercussions dans le processus de structuration spatiale, répercussions qui vont elles-mêmes conduire à des modifications dans le système de transport qui se traduiront par de nouvelles modifications lors de la période de simulation suivante. Toutefois, cette intégration prend plutôt la forme d'un enchaînement entre un modèle de structuration spatiale et un modèle de transport classique, et non pas d'une imbrication des deux modèles pour n'en former qu'un seul.

ITLUP se propose de simuler la localisation résidentielle des ménages et la localisation des activités ainsi que les trafics qui en résultent à partir des données sur l'emploi par secteur (quatre secteurs sont distingués), sur la population par catégorie (quatre catégories sont là aussi isolées) et sur le réseau de transport existant. Pour ce faire, le modèle a recours à une technique d'interaction spatiale généralisée de type maximisation de l'entropie. Pour la partie transport du modèle, on a une structure séquentielle avec une phase de génération et de distribution des trafics simultanément à la phase de localisation consistant en l'application de matrices de probabilités de flux à partir des différentes localisations estimées. A la suite de quoi, on applique une phase de choix modal de type probabiliste, et enfin une procédure d'affectation sur le réseau (à cette occasion, quatre types d'algorithmes sont utilisés au choix).

LILT lie un modèle de localisation de type Lowry à un modèle de transport conventionnel. Cependant, ce modèle est relativement complet puisqu'il traite de la construction de l'habitat, de la localisation des emplois et de tout ce qui touche au système de transport, y compris les problèmes de motorisation.

DORTMUND propose d'évaluer les conséquences en termes de structuration spatiale et de transport de l'évolution économique appréhendée par l'évolution de l'emploi dans chaque secteur et de la population elle-même désagrégée très fortement suivant des critères socio-économiques.

TRANUS a été développé par De la Barra et Perez depuis 1982 et peut être appliqué à l'échelle urbaine ou régionale. Il a deux objectifs : premièrement, la simulation des effets probables des politiques d'urbanisation et des projets de transport et deuxièmement, l'évaluation de ces effets à un niveau social et économique.

Certains autres outils de simulation sont dits intégrés car ils incluent également les aspects liés à la pollution.

FLEXSYT II a été développé à l'Université de Floride et représente un outil de simulation microscopique pour les études de planification des transports. Il utilise un langage de contrôle du trafic spécial appelé FLEXCOL-76 basé sur les règles de l'algèbre booléenne. Il est possible d'envisager des études détaillées comme : intersections et routes prioritaires, stops pour les transports publics, etc et cela pour des véhicules privés aussi bien que des camions, tramways, bus, piétons. A la base, le modèle est considéré comme intégré, dans la mesure où, en dehors des indicateurs de trafic, apparaissent des aspects environnementaux comme la consommation du carburant et les émissions de gaz toxiques.

ECOSIM est un modèle macroscopique de diffusion qui a besoin des informations comme les conditions atmosphériques, la vitesse et la direction des vents qui sont fournies par des capteurs. Le problème se pose pour les véhicules stationnant dans un parking pour lesquels les mesures sont difficiles car il n'y a pas de données durant l'arrêt.

Le projet OSSA se propose d'analyser ces aspects en complétant des modèles « purement » environnementaux déjà existants (**COPERT-EU**, **MVEI7G-USA**, **MICET-Suisse**). Les indicateurs à introduire dans le modèle sont : le type de polluant, le type du véhicule en fonction du carburant, l'état du véhicule au moment de la mesure (vitesse).

ILUMASS (Integrated Land-Use Modelling and Transportation System Simulation) est un modèle microscopique de simulation dynamique des flux du trafic urbain prenant en compte les changements au niveau de l'aménagement du territoire et ceux dus aux changements de la demande de transport (développement démographique, formation de ménages, construction de bâtiments résidentiels ou non, migration des ménages). Les impacts environnementaux comme le bruit dû au trafic, ou les conséquences de l'exposition de la population à la pollution atmosphérique sont également inclus.

ISHTAR est un projet européen en cours de développement. Il vise à modéliser toute la chaîne des causes à effets, depuis les différentes politiques urbaines et économiques jusqu'à l'efficacité du système de transports. Ce modèle s'intéresse aux impacts environnementaux (émissions de polluants et de bruit), à leur monétarisation et aux impacts sur la santé (maladies et décès provoqués).

SIMAUTRIE, simulateur d'un projet Predit, est actuellement en cours de développement ; le modèle intégré est constitué de deux modèles principaux, celui d'urbanisation UrbanSim et celui de trafic METROPOLIS. Ces deux fonctionnent actuellement de manière individuelle.

Anx. A-2. Aspects liés aux modèles "purement" trafic

• MODELES " PUREMENT " TRAFIC

Ils s'intègrent dans une branche de l'ingénierie civile développée sous le nom d'ingénierie de trafic. Ces modèles décrivent d'une manière mathématique l'infrastructure du réseau (composants statiques) et les interactions entre les véhicules et les opérateurs (composants mobiles) à l'intérieur de l'infrastructure. Plusieurs aspects peuvent être abordés : étude du trafic routier, corrélations entre débits et vitesses, investigation de la performance du trafic aux croisements, etc. Ces modèles sont intéressants dans le cadre de notre thèse, par exemple, pour une analyse de problèmes de congestion, la simulation du trafic après l'introduction d'un nouveau parking, ... La modélisation du trafic routier est abordée par plusieurs types de méthodes : les modèles statiques qui prennent en compte des équations de flux, des modèles dynamiques continus qui considèrent le trafic comme un fluide, et les modèles à événements discrets.

Les premières approches, comme la méthode des facteurs de croissance, sont classifiées comme rudimentaires alors que, après les années soixante, trois courants se distinguent : modèles hydrodynamiques, la théorie des files d'attente et les modèles de poursuite.

(liens bibliographiques de *Tableau-Anx2* : [Masson2000], [Ogawa2001], [Forrester1969], [Cetin2003], [Ktitarev1997], [Tsimhoni2003], [Wahle2001], [Ez-Zahraouy2004], [Diaz2001], [Schulze1997], [Verhoef1999], [Dupuy1975].)

Tableau-Anx2. Modélisation de déplacement urbain "purement" trafic

<i>Approche</i>	<i>Principe</i>	<i>Remarques</i>
<p>Méthode des facteurs de croissance (voir [Masson2000] pour synthèse)</p>	<p>- le trafic futur est proportionnel à l'actuel (extrapolation linéaire du trafic à partir de l'accroissement prévu des variables caractéristiques des zones d'origine et de destination)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - la lourdeur des calculs : recours à des méthodes d'itération lourdes - la rigidité : ces modèles se contentent de multiplier les trafics déjà existants - le caractère peu prédictif : réellement opérationnels qu'à court ou moyen terme - incomplet : aucune information sur les activités de stationnement.
<p>Modèle hydrodynamique [Ogawa2001]</p>	<p>- basé sur la théorie des deux fluides avec véhicules en mouvement et stationnaires (arrêtés à un stop, bloquant une voie, arrêtés par la congestion). Pour les voitures en stationnement, il ne s'agit pas de véhicules arrêtés sur un parking. Le modèle est basé sur deux approches : la vitesse moyenne des véhicules est proportionnelle à la fraction des véhicules en mouvement et le temps d'arrêt d'un véhicule est donné par le temps moyen associé à tous les véhicules.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - le caractère restreint d'application : du fait de leur caractère macroscopique, ils sont plutôt applicables pour des voies rapides - apparition d'aberrations : le flux peut devenir instable et donner lieu à des bouchons fictifs - incomplet : aucune information sur les activités de stationnement.
<p>Ingénierie de trafic</p> <ul style="list-style-type: none"> • la dynamique des systèmes [Forrester1969] • les modèles de files d'attente (queuing model) 	<p>Cette méthodologie fournit un ensemble de procédures de modélisation, des outils :</p> <ul style="list-style-type: none"> • méthodologie développée à partir d'équations différentielles pour la simulation des systèmes continus qui tente d'expliquer le comportement des systèmes complexes à partir des actions conjuguées des parties du système en se basant sur un réseau de relations de cause à effet toutes caractérisées par des équations mathématiques (constituées de structures en boucles de rétroaction) • méthodologie qui procède par événements successifs programmés dans une liste qui contient tous les événements futurs à simuler. Les événements passés, une fois simulés, sont retirés de cette liste. Dans une approche classique on utilise une liste triée par 	<ul style="list-style-type: none"> - l'échelle restreinte : ces outils sont employés pour la conception et la modélisation des zones de taille petite du réseau routier (carrefours, jonctions, plans de feux, gares). - l'utilisation restreinte : pour les files d'attente, aucune action ne se produit entre deux événements et il est peu envisageable de prendre en compte toutes les entités en mouvement (par exemple les piétons) ; pour les automates, il est nécessaire de considérer un nombre d'états restreint par cellule.

(suite de *Tableau-Anx2* : Modèles de déplacement urbain "purement" trafic)

<p>[Cetin2003], [Kittarev1997], [Tsimhoni2003]</p> <ul style="list-style-type: none"> • les automates cellulaires <p>[Wahle2001], [Ez-Zahraouy2004], [Diaz2001]</p>	<p>le temps croissant et on consomme en tête de liste. Par ailleurs, une source génère des événements qui sont distribués par un serveur (alimente la file) et consommés par un client.</p> <ul style="list-style-type: none"> • sont représentés par des grilles carrées où chaque case (site) est constituée de N cellules. Chaque cellule peut être libre ou occupée et correspond à un emplacement possible pour un élément constitutif du système complexe simulé. L'évolution d'un automate cellulaire est traditionnellement fondée sur l'application de transformations locales, à partir d'un état initial. Ces transformations, appelées les règles de transition, sont appliquées séquentiellement dans un processus itératif. Tous les sites du réseau sont traités simultanément en appliquant le même ensemble de règles d'évolution. Les automates cellulaires sont en général rapides d'exécution et l'accès direct aux sites voisins permet d'appliquer efficacement les règles locales. 	<ul style="list-style-type: none"> - la réutilisation : il est généralement difficile de définir des composants réutilisables pour d'autres applications - les données : le nombre d'informations contenues dans les données statistiques est très important et difficile à rassembler - incomplet : information superficielle sur les activités de stationnement.
<ul style="list-style-type: none"> • les modèles de poursuite "car following" <p>[Schultze1997], [Verhoef1999]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • modèles de nature microscopique qui tentent d'associer le comportement du conducteur (perception, prise de décision et contrôle) à des variables illustrant le trafic sur une file (position, vitesse ...). Pour extrapoler leur utilisation à des voies rapides, ces modèles sont souvent couplés à un modèle de changement de voie et à un autre d'acceptation des distances. 	<ul style="list-style-type: none"> - peu réalistes : aspects comportementaux peu abordés
<ul style="list-style-type: none"> • les modèles d'affectation <p>[Dupuy1975]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • souvent à tendance économétrique, ils ont pour tâche d'estimer la répartition des déplacements sur les diverses composantes d'un réseau de transport (liens qui possèdent un sens de circulation et dont les intersec-tions sont représentées par des nœuds). A chaque lien est affectée une fonction d'impédance, laquelle tient compte du niveau de service offert (longueur, nombre de voies, temps d'attente et de correspondance pour les transports collectifs, temps de parcours, coûts, confort). La plupart de ces modèles d'affectation repose sur la théorie des graphes. 	

- **NOTRE CHOIX : MODELE DE POURSUITE (" CAR - FOLLOWING ")**

Un modèle poursuite (ou "car following") est un modèle microscopique pour lequel chaque entité (voiture par exemple) possède ses caractéristiques : vitesse, destination, position absolue dans l'espace et relative par rapport aux voies du réseau routier, accélération. Le modèle adapté à notre simulateur a été largement discuté et développé lors des travaux de Chabrol [Chabrol2003], Sarramia [Sarramia2002]. Nous présenterons uniquement le principe basé sur trois étapes distinctes, dans la mesure où le modèle servira à simuler le trafic autour des parkings :

- **générer un nombre de voitures et leur affecter une vitesse** par rapport au débit $Q_i(n)$ et à la vitesse du flux $v_i(n)$ à l'aide d'une loi de Poisson. L'utilisation d'un principe de correction est nécessaire comme suit : supposons que le nombre de véhicules à générer soit :

$$N = \frac{(\Delta x \times Q_i(n))}{3600}$$

avec Δx -le pas de temps de la simulation et $Q_i(n)$ - le débit en véhicules/heure

Des temps inter-arrivée sont générés par chacun de ces N véhicules. Le terme h_i permet de quantifier le temps inter-arrivée généré pour le véhicule i :

$$h_i = (H - h_{min}) \times (1 - \log(1 - R))$$

avec R – nombre aléatoire positif sous-unitaire, h_{min} – temps minimal d'inter-arrivée des véhicules, H - temps moyen d'inter-arrivée des véhicules

Un facteur de correction multiplicateur permettra d'éviter les faux encombrements, alors que l'affectation des vitesses se fera selon une loi normale tronquée.

- **affecter une voie** aux véhicules générés : cela s'effectue en prenant en considération l'itinéraire des véhicules ou selon une loi de probabilité (par exemple, une loi binomiale)
- **calculer des grandeurs macroscopiques** de la zone microscopique utilisée pour les transferts (par exemple, la concentration et l'offre du tronçon microscopique).

- **ENVIRONNEMENTS BASES SUR LES MODELES TRAFIC**

Voir aussi l'état de l'art tracé par Bhourri et Scemama dans [Bhourri2002] pour une synthèse sur les outils à caractère multimodal et une analyse critique des performances.

HUTSIM est un micro-simulateur orienté-objet, développé sans discontinuité depuis ces 30 dernières années (Helsinki University of Technology), il est particulièrement adapté aux

intersections avec signalisations et aux zones réduites du réseau. Il est également envisageable de l'employer pour l'étude des ronds-points ou du trafic piétons, vélos. Il peut être également couplé avec des systèmes de contrôle réel afin de tester et d'évaluer différentes stratégies de contrôle.

PARAMICS est un outil de simulation microscopique qui permet de représenter un réseau comme une série de liaisons ayant des propriétés bien définies : largeur de la route, type de route, vitesse limite sur la route, nombre de voies. L'accès à des voies est restreint à un seul type de véhicules, en revanche le réseau peut décrire les parkings des véhicules, les arrêts de bus, les feux.

MITSIM (Microscopic Traffic SIMulator) est réputé pour être un outil très flexible avec une interface conviviale où chaque véhicule est représenté par un rectangle susceptible de changer de voie. Un accident pouvant se produire servira comme test pour la conception d'un système de management du trafic adapté, tout comme les informations concernant tous les véhicules (vitesse, type) et les changements ponctuels dus aux problèmes météo, par exemple.

ARCADY, PICADY et OSCADY sont des outils conçus pour simuler aux niveaux des ronds-points, des jonctions prioritaires et des panneaux de trafic, les effets d'un scénario de congestion et d'estimer les résultats des changements de routes avec ou sans la prise en considération des aspects de sécurité (accidents) sur le réseau.

TRANSYT (Traffic Network Study Tool) est un modèle macroscopique déterministe de simulation et d'optimisation ; il est employé pour le contrôle du trafic. Une version récente est capable de simuler le trafic sur une artère routière de 50 intersections avec plus de 200 directions possibles.

CASSANDRA (Cognizant Adaptive Simulation system for Applications in Numerous Different Relevant Areas) est un simulateur de trafic basé sur une approche mésoscopique fondée sur les concepts suivants : représentation des entités mobiles discrètes pour les véhicules en utilisant une description macroscopique, prise en compte des aspects environnementaux, optimisation des conditions de trafic par processus itératif. L'utilisation des Réseaux de Petri a permis la description des entités du trafic statiques et mobiles (intersections, bouts de route, véhicules). Cela a conféré une flexibilité pour la construction modulaire et la reconstruction de la topologie du modèle de trafic et permet aussi de rechercher des solutions optimales.

SATURN (Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks) est à la fois un outil de simulation de trafic et un modèle d'affectation pour l'analyse du contrôle de trafic (typiquement il y a 100 à 200 nœuds pour 1000 jonctions).

VISUM est un outil de planification des transports qui combine des aspects du transport public et privé. Il permet par exemple de visualiser dans une zone établie, le flux de véhicules et passagers au niveau des stops ou des points de liaison.

CLAIRE avec l'extension SITI (pour Système Intelligent pour le Transport Intermodal [Scemama2005]) est un système de supervision des réseaux multimodaux intégrant et traitant

des données très variées issues des divers systèmes de transport (gestion du trafic routier, du stationnement, de flottes de transport en commun). Le système permet de suivre le fonctionnement des réseaux à travers un nombre d'indicateurs (débit, concentration, vitesses, ponctualité, temps de transfert, émission de polluants, ...) avec ou sans facteurs perturbateurs (chantiers, manifestations, grands événements, accidents). Bâtie sur un modèle spatio-temporel, la fonction diagnostic informe de façon conjointe des perturbations qui affectent les différents réseaux ; à partir de ces constats, le système offre la possibilité de décider des actions de régulation et d'intervention par les opérateurs.

Anx. A-3. Approches et environnements basés sur les modèles comportementaux

EMME/2 (INRO Consultants Canada) est un modèle multimodal qui s'appuie sur une base de données stockée sous forme matricielle relative aux nœuds, liens, intersections et cela pour une trentaine de modes de transport (bus, véhicules, piétons, vélos, ...); il est possible d'étudier les interactions entre les véhicules se trouvant sur un même axe, comme par exemple l'impact du nombre de véhicules sur la vitesse des bus ou la contribution des bus à la congestion des artères. Cet outil peut être utilisé pour implémenter virtuellement des demandes de déplacement et s'appuie sur le modèle classique à quatre étapes ; il peut être utilisé pour implémenter les modèles de génération, d'attraction et de choix.

TransCad est une plateforme intégrée qui combine un SIG (Système d'Information Géographique) et les capacités de transport ; cet outil est essentiellement destiné à l'usage des professionnels pour rassembler, contrôler, analyser les données de transport. Il peut également proposer entre une origine et une destination, avec ou sans points intermédiaires, des choix d'itinéraires selon la distance, le coût, l'accessibilité.

TRIPS est utilisé pour modéliser les systèmes de transport selon l'approche des quatre étapes (génération, distribution, choix modal et affectation). Il est employé pour des analyses stratégiques et pour modéliser des périodes de pointe avec une description détaillée des intersections, multimodale, multiroute.

AIMSUN2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) est généralement utilisé pour tester des systèmes de contrôle pour des nouveaux trafics (trajets, modifications sur une route ...) ou encore pour évaluer l'impact d'une infrastructure avant sa construction. Il s'agit d'un modèle microscopique qui permet deux types de simulations : une basée sur les flux, l'autre sur la matrice O-D et le choix des routes.

ACTSIM (Acces Traffic Microsimulation) est un micro-simulateur dynamique prend en compte la distribution de la population et peut être de ce fait adapté à l'étude du trafic aux heures de pointe mais aussi aux parkings et aux passages piétons. Cet outil contient un modèle de poursuite, un modèle de changement de voie, un modèle parking, un pour les passages

piétons. Le modèle de simulation fournit des résultats numériques et a été utilisé avec succès pour les planifications dans les aéroports et des études de conception.

PELOPS est un très puissant outil de simulation microscopique qui fournit des données macroscopiques réalistes. A travers ses quatre modules (Stretch, Decision, Handling and Vehicle), l'approche permettra de prendre en compte les interactions entre l'utilisateur, le véhicule et le trafic.

PACSIM est un modèle dynamique, de comportement, multimodal en terme de modèle d'affectation développé par GRT-Belgique. Il accorde une attention particulière aux intersections, points de rencontre des flux, sources de conflits et de bouchons. Des événements non récurrents comme les accidents, les congestions peuvent être modélisés et, contrairement à la plupart des modèles, il ne s'appuie pas sur l'hypothèse d'une route connue d'avance par le chauffeur. Le choix d'itinéraire peut être modélisé.

HIPERTRANS est un simulateur couplé à un système de contrôle urbain avec le software s'appuyant sur PACSIM. Il est possible de l'employer à plusieurs effets. Il peut fournir des informations sur l'état général du trafic ou réaliser de la simulation en temps réel suite à des informations fournies par un système de contrôle du trafic réel tout aussi bien que faire des prévisions.

METROPOLIS est un outil de simulation qui adopte une approche mésoscopique (faible nombre de paramètres et réseau de grande taille mais, toutefois, les usagers ont des caractéristiques individuelles qui ne sont pas agrégées dans la simulation).et propose un système intégré de gestion du trafic urbain. Cet outil de modélisation dynamique permet de déterminer au mieux l'impact des mesures visant à réduire la congestion. Il prend en compte la variation de l'offre au cours de la période analysée et décrit de manière endogène la variation de la matrice O-D au cours de la journée. Il décrit le mouvement des navetteurs dans le cadre des déplacements du domicile vers le lieu de travail. Le conducteur est supposé effectuer des choix en matière de déplacements (choix modal, choix de l'heure de départ et du temps de trajet) en fonction de règles heuristiques. Les individus, dans le modèle, sont supposés disposer de capacités cognitives limitées. Le modèle comporte également une étape de modélisation de la recherche d'une place de stationnement.

CARLA est un modèle développé à Oxford et a été conçu pour déterminer le nombre de cheminements spatio-temporels qu'un individu peut suivre pour effectuer son programme d'activités.

STARCHILD reprend un certain nombre de principes de la Time geography et de CARLA afin d'analyser les programmes d'activités des ménages en fonction d'attributs aussi variés que la durée du parcours, les temps d'attente et les différents types d'activités. Il est considéré comme le premier modèle opérationnel de l'approche Espace-Temps-Activité.

ANNEXE B - Outils et techniques de modélisation

Anx. B-1. Comparaison des conceptions Objet et Agent

Afin de définir et contrôler le comportement des systèmes informatiques, se sont développées, dans la littérature, deux approches qui peuvent être perçues comme deux étapes successives dans l'élaboration des systèmes.

- **CONCEPTION "OBJET" DES SYSTEMES**

Elle utilise comme concept de base l'objet qui « est un concept ou une abstraction ou encore le correspondant d'une certaine chose physique, qu'on dote d'une définition précise et non ambiguë et de limites comportementales strictement définies. C'est donc une entité qui a une identité permanente, un état et un comportement, à la fois précis et stables » (citation de J. Rumbaugh [Rumbaugh1995]).

La réaction d'un objet aux sollicitations étant fixée, le comportement d'un système objet est donné par l'ensemble des comportements de tous les objets qui sont pris en considération un à un. De ce fait, un système objet est un système permanent, constant, qui suit ses interactions avec l'environnement. S'il est également appelé système "fermé" [Cardon2001], ce n'est pas dû au fait qu'il n'a pas de communication avec l'environnement, mais parce qu'il est défini d'une façon indépendante. Son comportement est typiquement déterministe car il produit lors du fonctionnement ce qu'on sait qu'il doit produire et ce qui a été fixé lors de sa conception (mises à part les erreurs). De ce fait, l'approche orientée-objet ne fournit pas un ensemble adéquat de concepts et de mécanismes pour modéliser un système de transport dans lequel les rapports entre les entités évoluent d'une façon dynamique selon des règles comportementales qui leur sont propres.

- **CONCEPTION "AGENT" DES SYSTEMES**

Elle utilise comme concept de base l'agent qui « est une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents » (citation de J. Ferber [Ferber1995]).

Bien qu'il existe dans la littérature de nombreuses autres définitions pour les termes objet et agent, adaptées au type d'utilisation, toutes ne se gardent pas à éviter la confusion entre "agent" et "objet". Si un agent purement communicant peut être vu comme un objet "amélioré", un objet peut passer pour une sorte d'agent "dégénéré". Pour augmenter la confusion, certains groupes de recherche implémentent, pour des raisons pratiques, les agents sous la forme d'objets ou acteurs [Jarras2002]. En effet, tout comme les agents, les objets encapsulent leur état interne (leurs données ne sont pas accessibles à tous). Mais si le concept d'agent comme objet distribué est très proche de celui de l'objet, il n'en est pas de même de l'agent comme entité décisionnelle.

Dans *Figure-Anx5* est montrée cette distinction entre la structure d'un objet et celle d'un agent [Harrouet2000].

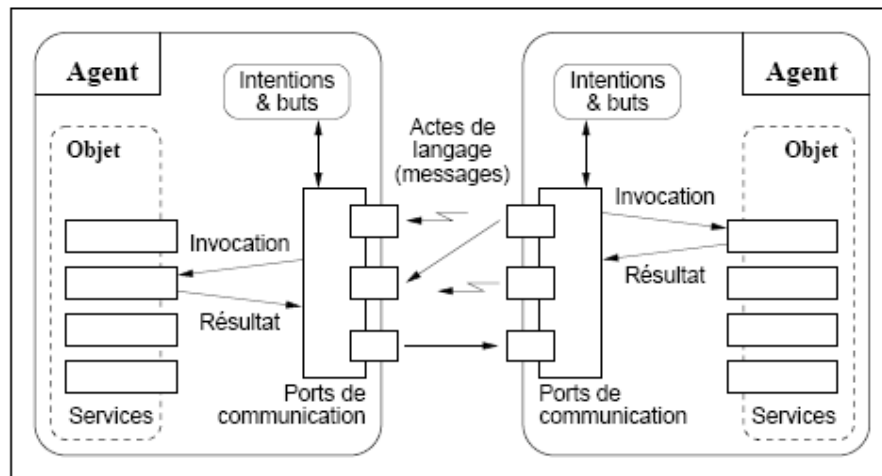


Figure-Anx5. Schéma de comparaison Objet-Agent [Harrouet2000]

Un objet est une "boîte noire" avec une interface qui permet sa manipulation. Il met à disposition un ensemble de méthodes (services) qui s'exécutent de manière impérative et délivrent un résultat selon le schéma *client/serveur*. En revanche, pour avoir recours aux services d'un agent, il faut lui faire parvenir un message qu'il traitera en fonction de ses propres objectifs. Le traitement de ce message peut, bien entendu, provoquer une invocation de la méthode concernée comme dans le cas d'un objet, mais les intentions et buts agissent comme un filtre en ce qui concerne le déclenchement de ce traitement [Forrester1969]. Un agent, recevra une requête et décidera de son propre gré s'il doit poser ou non une action. A l'encontre de l'objet, l'agent peut refuser une mission s'il se juge incompétent ou affecté à une autre tâche. Cela suppose que les agents disposent d'un mécanisme permettant de guetter, de recevoir, de stocker et de transmettre des messages.

Une seconde différence provient du caractère flexible (réactif, proactif et social) du comportement d'un agent. Bien que certains spécialistes disent qu'il est possible de bâtir un programme orienté-objet intégrant ces caractéristiques, on doit tout de même voir que le modèle standard d'un objet ne dit rien à propos de ces types de comportements [Jarras2002].

Egalement, dans une approche orientée-agent, les interactions entre agents ne seront pas complètement définies lors de la construction ; elles sont évolutives et font de l'organisation d'agents un système dynamique défini comme "instable".

Du fait de ces différences, les systèmes "objets" et "agents" ont donc logiquement des finalités différentes.

Anx. B-2. Agents et Système Multi Agent

• LES AGENTS

Le terme "agent" est employé (à tort et à travers) pour désigner un type d'entités informatiques ; son nom synthétique (du latin *agere* = agir) tend à gommer les différences qui existent entre différentes approches [Berry2001], [Chaib-Draa2001]. Cependant, la lecture de tels ouvrages ne fait qu'ajouter à la confusion que nous semblons voir régner autour de la notion d'agent tant les thèmes abordés sont divers. Il y a peu de points communs entre les différentes réalisations traitant d'agents. Certains estiment qu'il ne faut pas chercher à tout prix une définition parfaite de ce terme, alors que d'autres veulent établir des critères stricts afin de canaliser le discours. En fait, la communauté "multi agents" a abandonné l'idée de se mettre d'accord sur une définition universelle de ce que représente un agent. On se contente d'adapter la définition selon les applications. En pratique, les agents vont d'éléments d'exécution simples à des entités complexes qui peuvent exhiber un comportement rationnel. On peut considérer néanmoins que ses attributs primaires sont l'autonomie, l'apprentissage et la coopération (voir *Figure-Anx6* [Sabas2001]).

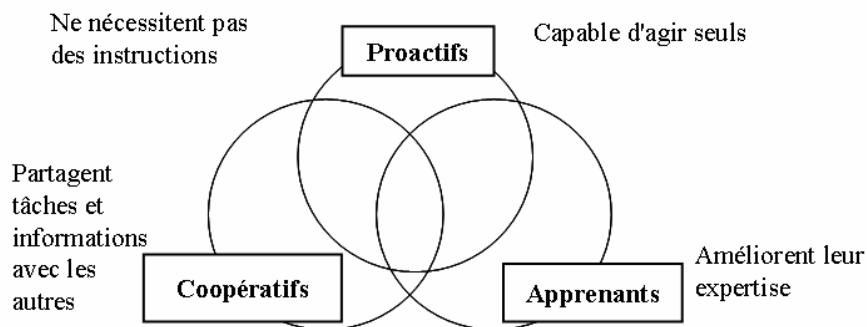


Figure-Anx6. Schéma d'agents logiciels [Sabas2001]

Certains auteurs leur prêtent également des attributs secondaires comme la persistance (fidélité dans le temps), la véridicité (a-t-il toujours raison ?) ou encore des attributs émotionnels et mentaux. Dans ce dernier cas, les agents sont dotés de structures de données appelées "états mentaux" à partir desquelles ils peuvent raisonner. Diverses catégories d'états mentaux ont été retenues par les chercheurs dont notamment les croyances, les désirs, les intentions ou buts, les capacités, etc.

Les critères de classification des agents sont multiples, dont trois d'entre eux sont les plus fréquents dans la littérature :

- **agent réactif (non intelligent)** qui possède une perception locale et incomplète de l'environnement ; il ne tient pas compte de son passé, réagit directement aux stimuli.
- **agent cognitif (intelligent)** qui possède une représentation explicite de son environnement et des autres agents ; il peut tenir compte de ses états internes passés, dispose d'un but précis et est communicatif.
- **agent hybride** qui est un concept faisant que la distinction entre agents cognitifs, capables de raisonner, et agents réactifs, qui ne font que "réagir immédiatement" aux stimuli

perçus, tend à disparaître. Il reprend les caractéristiques des agents réactifs et des agents cognitifs pour former une entité capable de se comporter encore différemment.

L'environnement est primordial dans la définition d'un agent dans la mesure où il peut être vu comme un ensemble de ressources dont il dispose et de règles guidant son évolution et subissant les conséquences de ses actions (voir les travaux de synthèse [OFTA2004]). Russell et Norvig [Russel2003] considèrent qu'un agent est n'importe quelle entité (physique ou informatique) qui perçoit son environnement à travers ses capteurs et qui agit selon ses effecteurs (voir *Figure-Anx7* [Chicoisne2002]).

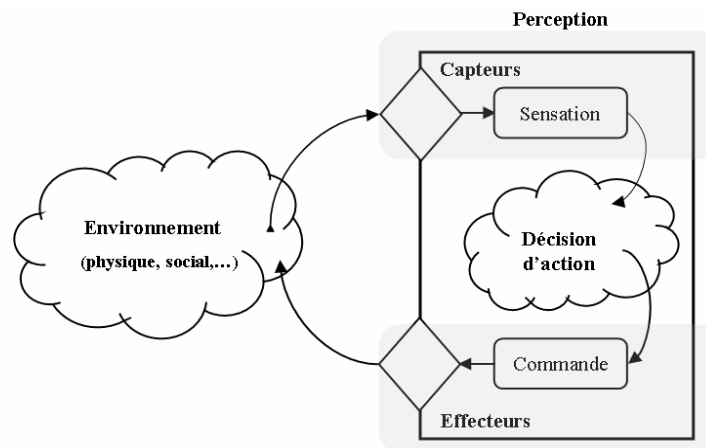


Figure-Anx7. Structure classique d'un agent logiciel [Chicoisne2002]

Les modèles d'agent sont également nombreux, non seulement selon le domaine d'application, le niveau de l'abstraction, des caractéristiques prépondérantes des agents, mais ils diffèrent aussi par le type de représentation des connaissances ou encore par le type de contrôle mis en œuvre. Il existe d'abondants et riches ouvrages traitant du sujet, par exemple, voir [Briot2001], [OFTA2004].

En fait, dans la plupart des applications, l'usage d'un agent en tant qu'entité individuelle a peu d'intérêt, son véritable intérêt étant en tant que composant d'un SMA.

• LES SYSTEMES MULTI AGENTS (SMA)

Les systèmes agents (voir [Bourdon2002], [Florea2002], [Bourjot2006]) sont des systèmes dotés d'une forte autonomie comportementale, ce qui leur confèrent le caractère d'auto-organisation.

Les systèmes multi agents (SMA) sont l'objet d'un domaine d'études récent (années 1980) issu de la rencontre de l'Intelligence Artificielle, des Systèmes Distribués et de la programmation (voir *Figure-Anx8*) avec comme points communs, respectivement l'autonomie de décision, la décentralisation et l'architecture logicielle [Charton2003].

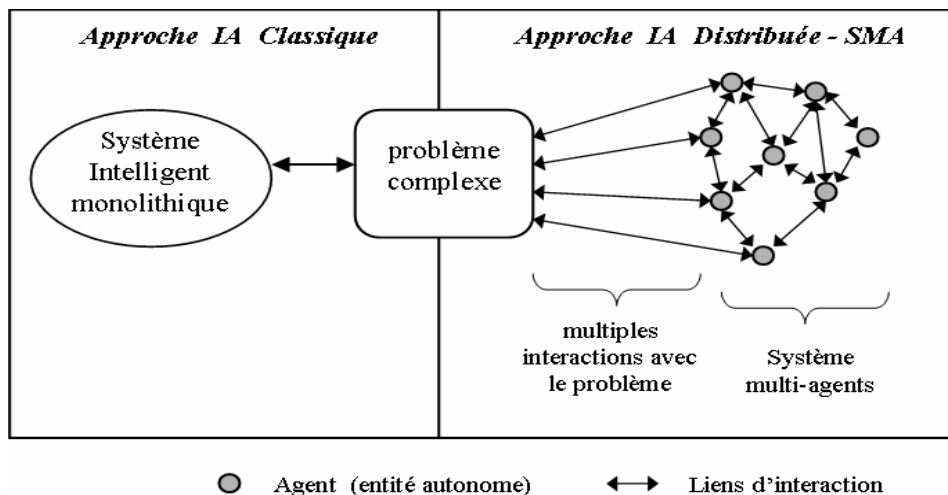


Figure-Anx8. Comparaison entre les approches IA et IAD / SMA [Charton2003]

L'idée à l'origine de la construction des SMA est de faire coopérer plusieurs intelligences en travail d'équipe, plutôt que d'essayer de résoudre un problème par une seule entité intelligente [Demazeau1995]. Les définitions concernant la structure d'un SMA [Ferber1995], [Le Strugeon1995], [Demazeau2001], [Ricordel2001] ne manquent pas bien qu'elles se rejoignent à travers certains aspects comme interactions agent-agent ou agent-environnement.

Jennings et Wooldridge considèrent les agents comme des unités intentionnelles dotées essentiellement de l'autonomie de décision [Wooldridge1995]. Ils défendent la thèse que la solution pour la construction d'un système multi agents passe uniquement par la réalisation formelle d'un modèle d'agent et par son implémentation.

L'autre courant, dont fait partie Ferber, affirme que « certains en restent là et considèrent alors que tout est dit » et qu'il faut penser d'abord interaction et ensuite déduire la structure intentionnelle des agents et non l'inverse. Un système multi agents se distingue d'une "collection" d'agents indépendants par le fait que c'est un ensemble d'agents agissant et interagissant dans un environnement commun. « Le tout est plus que la somme des parties ».

L'interaction entre les agents « est plus qu'un simple échange de messages : un des aspects d'interaction montre une conversation basée sur un échange partagé et conventionné de messages » (citation de [Barbuceanu1997]). Elle se traduit par la mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Selon Gleizes [Gleizes2002], une situation d'interaction est définie comme l'ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs, en prenant en compte des contraintes plus ou moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles (par exemple, mise en commun d'expertises, collision de voitures, échange de données, etc.).

Des travaux récents [Mathieu2003] défendent les avantages d'une représentation des comportements d'agents basée sur la notion d'interaction. La notion d'agent et celle d'interaction sont dissociées, chacune pouvant faire l'objet d'une ontologie propre. Cette approche a notamment pour avantage de faciliter la réutilisabilité des interactions qui sont bien souvent génériques dans des contextes où les agents ne le sont pas.

L'interaction entre agents est basée sur la communication, les actes de langage, les protocoles d'interaction (pour des compléments, se reporter aux actes de [JMAC2004]).

Pour Barbuceanu [Barbuceanu1997], il y a uniquement deux protocoles distincts d'interactions qui sont la coordination et la coopération qui inclue la négociation (voir le modèle de négociation GeNCA [Mathieu2004]).

Selon l'étude bibliographique menée pour nos travaux, il n'y a pas actuellement un outil standard pour aider à la conception et à la validation des protocoles d'interaction. Elles peuvent se faire à l'aide de plusieurs formalismes sur lesquels nous ne nous attarderons pas (voir l'ouvrage sous la direction de J.P. Briot et Y. Demazeau [Briot2001]) :

- graphes état - transition : graphe dirigé dans lequel figurent des états et des transitions
- graphes de raisonnement : représentation graphique générale dans laquelle figurent la communication, mais aussi les états de raisonnement
- réseaux de Petri : diagramme de communication entre deux agents
- langages formels : par exemple, langage Z basé sur la théorie des ensembles et la logique
- langages de description des protocoles : par exemple, langage COOL qui décrit les protocoles par des règles de transitions d'états

Anx. B-3. UML pour notre usage

- **UML EN GENERAL**

UML se veut un langage (et formalisme) universel pour spécifier, construire, décrire et documenter des systèmes logiciels. Il existe différentes classes de méthodes disponibles qui sont à même de modéliser une organisation en vue d'une spécification d'un système d'information distribué. UML n'est pas encore une méthode, mais un langage qui reprend et améliore les formalismes des principales modélisations objets. A la fin de 1994, James E. RUMBAUGH (méthode OMT) et Grady BOOCH (méthode BOOCH), constatant que l'évolution parallèle des méthodes objets ne faisait plus progresser la technologie, décident d'unifier leurs travaux au sein d'une méthode unique : la méthode unifiée (Unified Method ou UM). Un an plus tard, Ivar JACOBSON (créateur des cas d'utilisation ou "use cases") rejoint ce groupe. En 1996, la méthode unifiée devient UML (Unified Modeling Language), un langage de modélisation objet.

La notation UML se concentre sur la description des artefacts du développement de logiciels plutôt que sur la formalisation du processus de développement lui-même. Cette notation est générique, extensible et configurable par l'utilisateur. UML se décompose en plusieurs sous-ensembles [Muller2000], [Roques2001] :

- **les vues :**

Ce sont les observables du système. Elles décrivent le système d'un point de vue donné, qui peut être organisationnel, dynamique, temporel, architectural, géographique, logique, etc. En combinant toutes ces vues il est possible de définir (ou retrouver) le système complet. Ils existent plusieurs types de vues (voir *Figure-Anx9*).

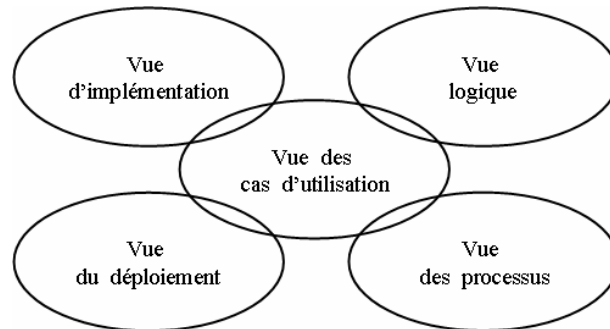


Figure-Anx9. Les vues selon UML

- vue des **cas d'utilisation** : c'est la description du système "vu" par les acteurs du système. Elle correspond aux besoins attendus par chaque acteur (c'est le QUOI et le QUI).
- vue **logique** : c'est la définition du système vu de l'intérieur. Elle explique comment peuvent être satisfaits les besoins des acteurs (c'est le COMMENT).
- vue d'**implémentation** : elle définit les dépendances entre les modules.
- vue des **processus** : c'est la vue temporelle et technique, qui met en œuvre les notions de tâches concurrentes, stimuli, contrôle, synchronisation, etc.
- vue de **déploiement** : elle décrit la position géographique et l'architecture physique de chaque élément du système (c'est le OÙ).
- **les diagrammes** : Ce sont des éléments graphiques. Ceux-ci décrivent le contenu des vues, qui sont des notions abstraites. Les diagrammes peuvent faire partie de plusieurs vues.
- **les modèles d'éléments** : Ce sont les briques des diagrammes UML. Ces modèles sont utilisés dans plusieurs types de diagramme. Exemple d'élément : cas d'utilisation, classe, association, etc.

Jusqu'à la version 1.5, UML comprend les 9 diagrammes suivants : le diagramme de classes, le diagramme d'objets, le diagramme de collaboration, les cas d'utilisation, le diagramme de séquences, le diagramme d'activités, le diagramme d'états, le diagramme de déploiement et le diagramme de composants (voir *Figure-Anx10*).

La version 2 d'UML introduit quatre diagrammes supplémentaires. Ceci ne vient pas modifier nos choix et démarches, puisque n'impactant pas les diagrammes que nous utilisons.

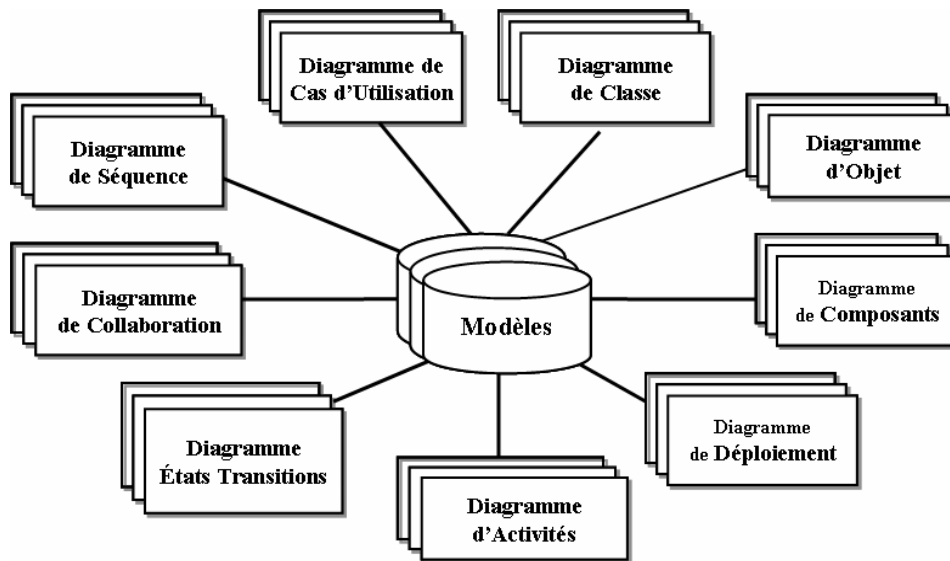


Figure-Anx10. Les diagrammes UML, une vue particulière du système

• UML ET LES SYSTEMES MULTI AGENTS (SMA)

Un avantage d'UML, exploité dans la modélisation et la simulation des organisations par SMA, est qu'il existe un grand nombre d'outils de modélisation supportant la méta modélisation UML. Ces outils permettent à partir d'un méta modèle quelconque de pouvoir éditer et modifier les modèles correspondants (voir Figure-Anx11 [Galland2001]).

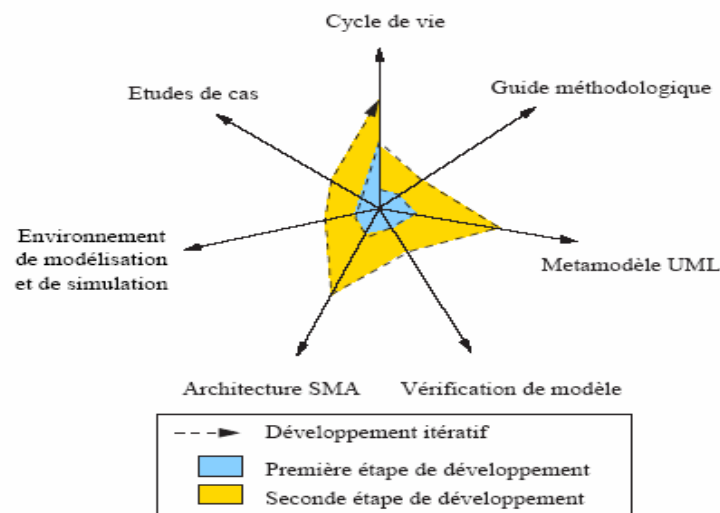


Figure-Anx11. Approche SMA – UML dans un environnement de modélisation et simulation [Galland2001]

Dans le cadre d'une modélisation orientée agents, l'emploi des diagrammes peut se faire selon des approches différentes ; deux exemples sont présentés dans Figure-Anx12 [Kriaa2000].

- Approche "cas d'utilisation" : Le système à construire est regardé du point de vue de l'utilisateur. Un "cas d'utilisation" s'adresse à un acteur qui va solliciter le système et regroupe une séquence d'actions à réaliser par le système.
- Approche Agent : Des changements observés lors d'un processus ont pour origine des actes de langage (speech-act). Ils sont généralisés en toute transaction entre les acteurs impliqués dans le processus, le processus et son contexte spatio-temporel.

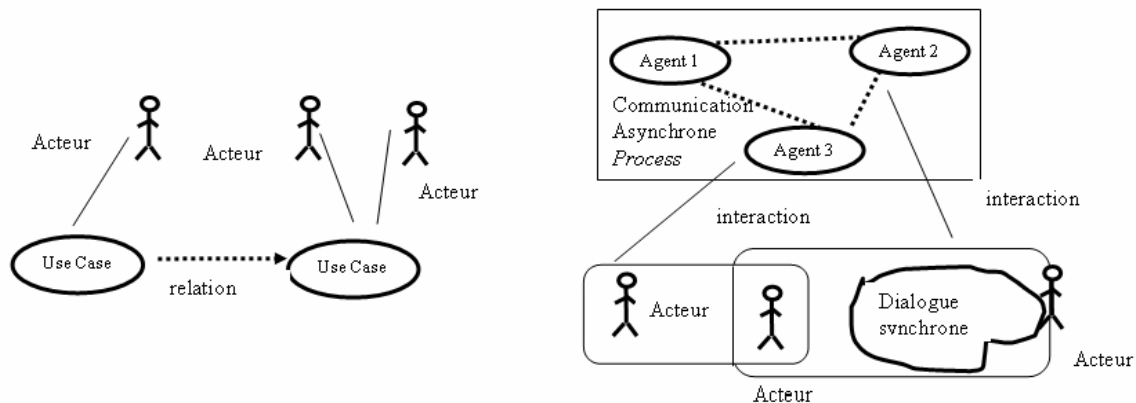


Figure-Anx12. Communication synchrones et asynchrones [Kriaa2000]

Sous le terme de dynamique, nous regroupons trois aspects transverses, complémentaires et fortement corrélés : l'expression de la coopération, coordination des actions et interactions entre agents. La coopération entre les entités d'un système est souvent modélisée par deux diagrammes : diagramme de séquence pour la suite séquentielle des interactions, diagramme de collaboration pour une représentation spatiale des interactions. Malgré le fait que ce sont d'excellents moyens pour capturer les besoins et le dialogue entre les concepteurs, ils ne décrivent que des scénarios particuliers entre les entités et ne sont en aucun cas représentatifs de tous les comportements possibles du système.

Pour pallier cet inconvénient, les utilisateurs d'UML peuvent faire appel à un diagramme états-transitions (STATECHART) très approprié, si les opérations sont séquentielles, et efficace pour représenter la concurrence et l'asynchronisme [Whittle2000]. Des diagrammes d'instance (séquence) permettent de décrire d'une manière graphique les communications entre processus. Cependant, l'inconvénient est la multiplicité des scénarios devant être écrits pour représenter le plus fidèlement possible l'activité d'un système. Les propriétés attendues du système sont généralement décrites de manière informelle et sont difficilement vérifiables. Pour modéliser des agents et des systèmes multi agents, UML en soi reste insuffisant, malgré des travaux de développement de méthodes basées sur la notation UML dans le cadre agent (AUML par exemple [Bauer2001]).

Dans le cadre de nos travaux, nous utilisons des diagrammes UML dans plusieurs buts :

- **diagramme "cas d'utilisation"** (Use Case) : pour exprimer les besoins de l'exploitant (laisser imaginer et exprimer à l'exploitant comment il entend utiliser l'outil). Nous les

avons également utilisés pour illustrer des classes de scénarios (singularités, cas particuliers),

- **diagramme d'activités** (Activity diagram) : pour décrire et spécifier les activités ,
- **diagramme d'états** (State diagram) : pour montrer l'aspect dynamique en décrivant les différents états dans lesquels peut se trouver un agent conducteur par exemple ,
- **diagramme de classes** (Class diagram) : pour représenter, du point de vue statique, une catégorie ou un groupe d'agents qui ont des rôles similaires et des caractéristiques communes (agents conducteurs, par exemple). Il nous a également servi à la description des relations entre certains agents (par exemple, bâtiment, agent conducteur).

Anx. B-4. Réseaux de Petri (et l'extension Colorée)

• **RESEAUX DE PETRI**

Notre attention s'est tournée vers des langages plus formels, comme les automates cellulaires ou les réseaux de Petri.

Les automates sont des objets informatiques bien connus en théorie des langages. Un automate permet de décrire de manière formelle le comportement d'un protocole. Utiliser un automate fini déterministe pour décrire le comportement d'un protocole permet de disposer d'une représentation graphique très lisible, compréhensible et intuitive. De plus, un tel formalisme est sans ambiguïté. Il permet de décrire le motif que doivent respecter les conversations qui se conforment au protocole. On peut donc envisager de générer automatiquement, à partir d'un automate de comportement, du code qui sera directement interprétable par un agent logiciel. Toutefois, ce formalisme nous limite généralement aux protocoles qui impliquent deux participants.

D'autres formalismes peuvent être utilisés pour spécifier le comportement d'un protocole : les réseaux de Petri [Strachey1966], les réseaux de Petri colorés [Jensen1997], [Jensen1998], [Bjorner2006]. Quel que soit le formalisme utilisé, un certain nombre de propriétés sur les protocoles peuvent être spécifiées de manière formelle, puis vérifiées.

Un réseau de Petri peut permettre de suivre les flux de données dans une organisation complexe, ainsi que des déplacements des acteurs entre les espaces de travail. Un réseau de Petri est un graphe orienté biparti dont les nœuds sont l'union des places (qui peuvent être des activités) et des transitions (ces dernières sont étiquetées par une lettre). Les arcs, symbolisés par des chiffres, relient une place à une transition ou vice-versa.

En s'appuyant sur l'algèbre linéaire, les réseaux de Petri ont des applications diverses. Ils permettent de modéliser la supervision des systèmes discontinus, des activités parallèles ou en concurrence, ou encore des protocoles de communication. L'aspect graphique permet de visualiser les processus et de faciliter la conception et la communication des modèles de comportement tandis que la formulation mathématique assure à ce formalisme des bases solides. Les réseaux de Petri apportent la notion de fusion de transitions (rendez-vous) qui

n'existait pas pour les automates à états finis et permettent en plus d'exprimer des choix non-déterministes.

• **RESEAUX DE PETRI ET LES SYSTEMES MULTI AGENTS (SMA)**

Dans le cadre d'une modélisation à base d'agents, plusieurs utilisations des réseaux sont possibles [Etraillier1992], [Etraillier1996], [Cost1999], par exemple, en associant aux places les activités ou les acteurs. Dans *Figure-Anx13*, [Adam2000], l'acteur est symbolisé par un jeton qui change de place au même titre que l'acteur change d'activité. Les transitions représentent les événements tels que la fin d'une activité ou l'arrivée d'une interruption. Si une personne réalisant l'activité 1 est interrompue, le jeton change de place et reste dans la place de gestion d'interruption tant que l'acteur n'a pas terminé de gérer toutes les interruptions.

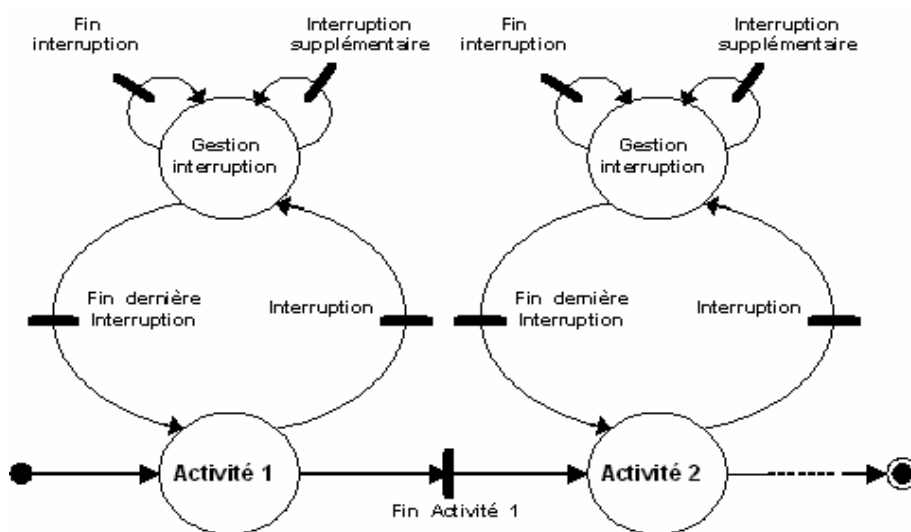


Figure-Anx13. Activité représentée par une place dans un réseaux de Petri [Adam2000]

Dans *Figure-Anx14* est représenté un exemple d'interaction modélisé par un automate. Dans cet exemple, un état de l'automate représente l'état d'un système à deux agents A et B et une transition représente une interaction [Charton2003].

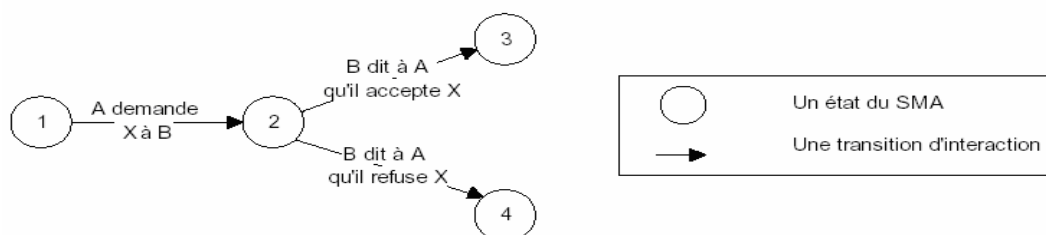


Figure-Anx14. Exemple d'automate à états modélisant une interaction [Charton2003]

Le même exemple d'interaction est modélisé à l'aide d'un réseau de Pétri (*Figure-Anx15*). Les places du réseau représentent les états internes de l'agent et les messages en cours

d'acheminement, alors que les transitions représentent des synchronisations sur les messages et des conditions d'application d'actions.

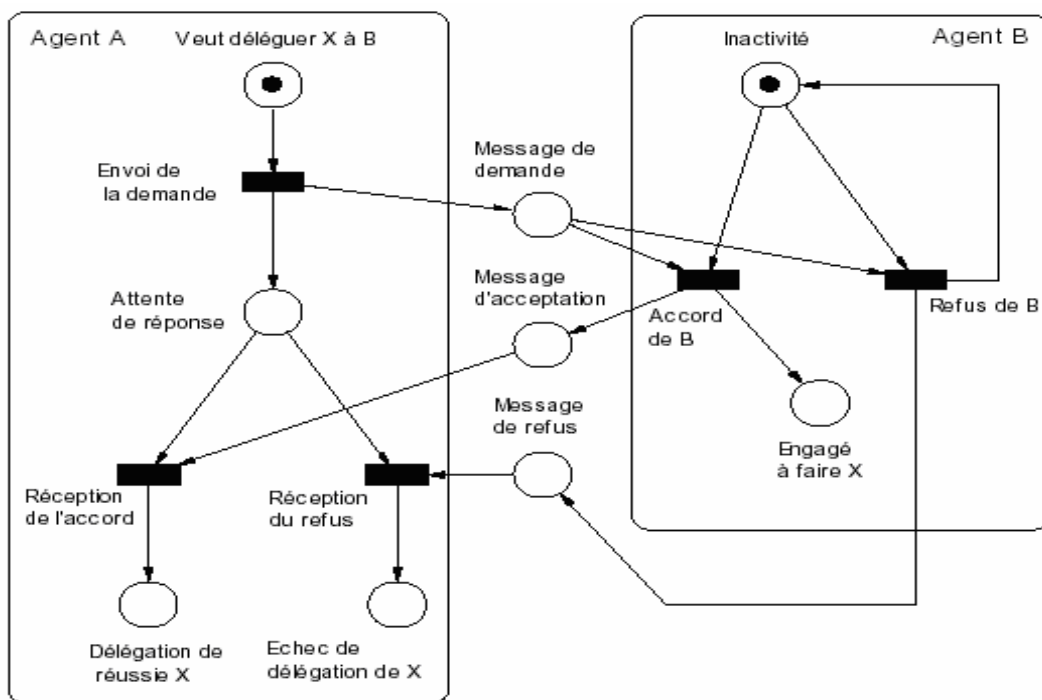


Figure-Anx15. Exemple de réseau de Petri modélisant la même interaction [Charton2003]

Les réseaux de Petri permettent aussi de décrire la communication en préservant des capacités de validation et de vérification (voir l'exemple Figure-Anx16 - cours de F. Bourdon).

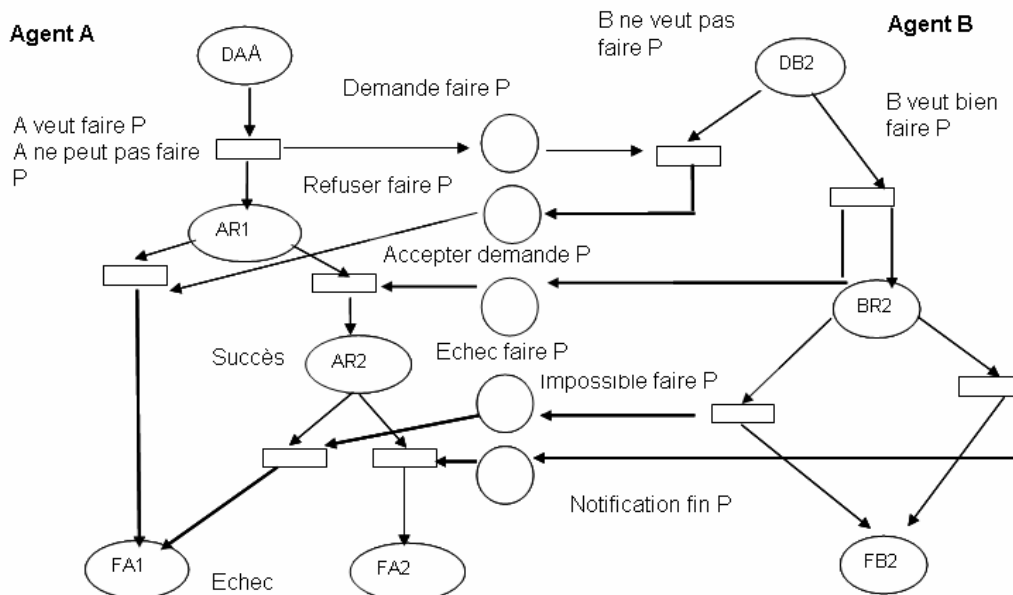


Figure-Anx16. Acte de langage représenté par un réseau de Petri [Bourdon2002]

Bien que les réseaux de Petri permettent de modéliser aisément les synchronisations, le partage de ressources et d'autres mécanismes similaires, ils présentent deux limitations :

- impossibilité de transporter une information structurée car les places ne contiennent que des jetons uniformes,
- il faut définir de manière explicite le comportement d'objets différents qui se comportent d'une manière identique.

Pour l'approche SMA, ces limitations font défaut surtout pour la modélisation des protocoles d'interaction quand plusieurs agents participants au même protocole ont le même comportement et que les objets qu'on cherche à modéliser sont complexes (messages, structure de données, ...).

Les réseaux de Petri laissent de côté deux aspects :

- ils s'adressent surtout à des modèles à agents cognitifs (l'interaction entre les différentes entités du système n'est pas approfondie),
- la dynamique du système se limite aux changements d'états des instances d'agents existant au début de la simulation [Adam2000].
- **LES RESEAUX DE PETRI COLORES (RdPC)**

Afin d'enrichir le pouvoir d'expression des réseaux de Petri, le formalisme a été étendu et plusieurs variantes ont été proposées, dont les **réseaux de Petri Colorés** [Jensen1997], [Bjorner2006]. Les réseaux de Petri Colorés sont des réseaux de Petri dans lesquels les jetons portent des couleurs. Une couleur est une information attachée à un jeton ; cette information permet de différencier les jetons entre eux et peut être de type quelconque. Ainsi, les arcs ne sont pas seulement étiquetés par le nombre de jetons mais en plus par les couleurs de ces jetons. Le franchissement d'une transition est conditionné par la présence dans les places en entrée du nombre de jetons nécessaires qui en plus satisfont les couleurs qui étiquettent les arcs. Après le franchissement d'une transition, les jetons selon la spécificité des arcs d'entrée sont retirés des places en entrée tandis que, à la (aux) place(s) en sortie de cette transition sont ajoutés les jetons selon la spécificité des arcs de sortie.

En général les places représentent les états des agents dans le cadre d'une conversation et les transitions modélisent des unités de traitement comme des envois, réceptions et traitements de messages. Concernant le traitement d'un message par un agent, cela consiste en la récupération des paramètres en entrée (jetons de couleur) et la "fourniture" en sortie d'autres jetons, selon les règles de franchissement. Les arcs représentent les mécanismes d'envoi de messages et permettent les changements d'états alors qu'un état de conversation correspond au marquage courant dans le réseau.

Un agent qui initie la conversation émet le premier message. Le marquage initial est défini de telle sorte que le rôle qui initie la conversation puisse franchir la première transition.

Les transitions de fin, dédiées ou communes, ont toutes une sémantique particulière en spécifiant tous les cas envisageables de fin des interactions.

• **NOTRE ETUDE DE CAS : NEGOCIATION POUR COVOITURAGE**

A partir des représentations dans le mémoire paragraphe §4.4.2.B.1, les réseaux de Petri suivants sont élaborés. Dans un premier temps, chaque place et transition des réseaux de Petri sont nommées (voir *Figure-Anx17*).

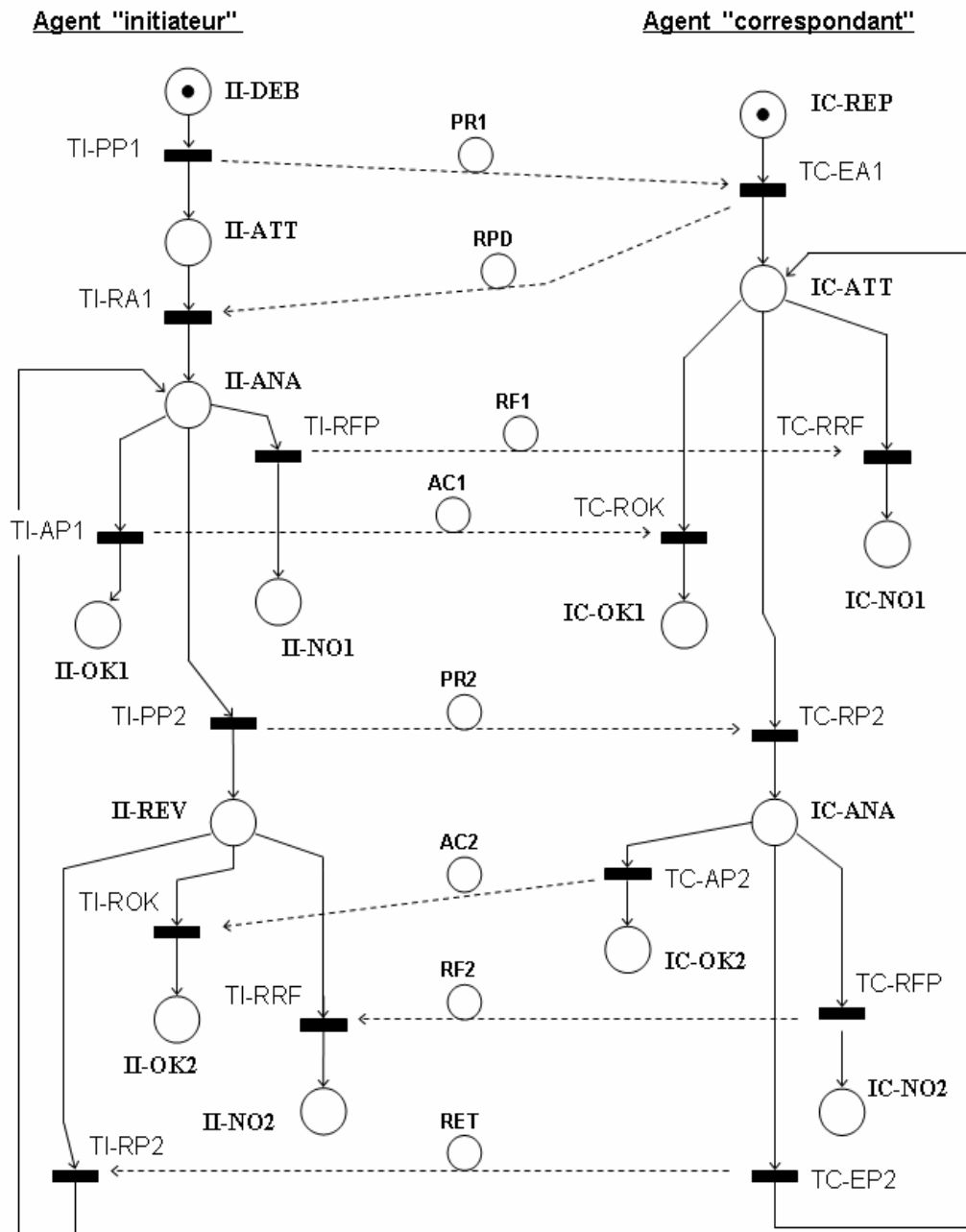


Figure-Anx17. Nommages des places et transitions des réseaux de Petri colorés.

Volontairement pour ne pas surcharger les figures, les réseaux de Petri sont incomplets et montrent uniquement le côté fonctionnel. Il manque les arcs et transitions reliant les places OK1, NO1, OK2 et NO2 vers les places respectivement DEB et REP afin qu'il y ait d'autres négociations possibles dans le temps. Les étiquettes sont recensées dans *Tableau-Anx3*.

Tableau-Anx3. Liste des libellés des places et transitions

II-xxx	place xxx de l'agent Individu Initiateur de la négociation
IC-zzz	place zzz de l'agent Individu Correspondant de la négociation
DEB	place « début »
ATT	place « attente de la réponse »
ANA	place « analyse de la réponse »
OKi	place i « OK pour faire du covoiturage »
NOj	place j « désaccord pour faire du covoiturage »
REV	place « révision de la proposition »
REP	place « repos, en attente d'une négociation »
TI-aaa	transition aaa du réseau de Petri de l'agent Initiateur
TC-ccc	transition ccc du réseau de Petri de l'agent Correspondant
PR1	message « proposition 1 »
RPD	message « réponse au début à la proposition 1 »
RF1	message « refus de la proposition 1 »
AC1	message « acceptation de la proposition 1 »
PR2	message « proposition 2 »
RF2	message « refus de la proposition 2 »
AC2	message « acceptation de la proposition 2 »
RET	message « raffinement de la proposition »

ANNEXE C - Simulateurs à base d'activités utilisant les SMA

Anx. C-1. Simulateur TRANSIMS

TRANSIMS remplace le processus 4 étapes par une approche multi agents. Certains le voient même comme une extension bénéfique du modèle à quatre étapes avec les compléments suivants :

- A chaque instant, la position de chaque voyageur peut être connue.
- Les flux de trafic peuvent être analysés à travers le réseau routier entier, y compris les rues à faible capacité ou les voies d'accélération.
- A chaque mobile et lors de chaque seconde peuvent être attachées une vitesse spontanée et une accélération ; l'objectif est de remonter aux émissions polluantes qui s'expriment à l'aide de valeurs instantanées.
- Pour un véhicule garé, on peut connaître le lieu et le temps d'arrêt.

Modules : Chacun modélise un point différent de décision pour chaque agent:

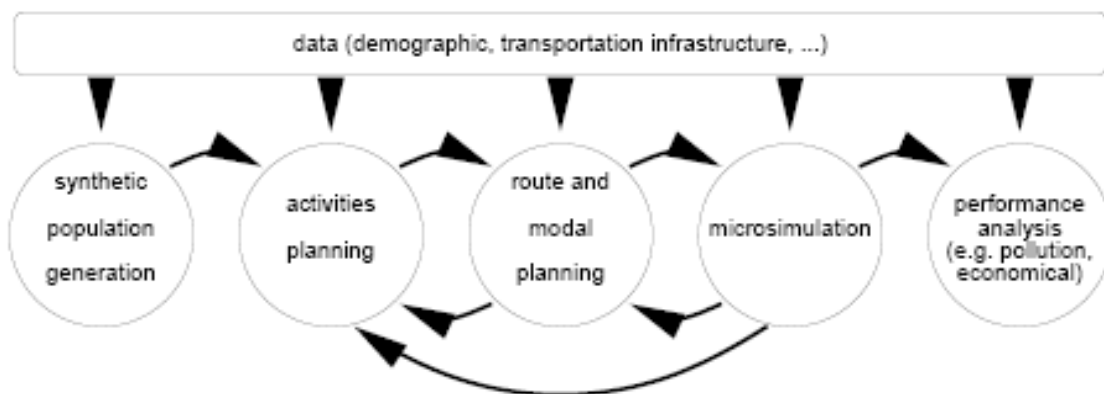


Figure-Anx20. Schéma des modules de simulation de TRANSIMS [Nagel2004]

- **un module "génération de population"** : Il est en cours de développement afin que des caractéristiques sociodémographiques des individus soient prises en considération.
- **module "générateur d'activités"** : Il renseigne, pour chaque agent et pour une journée, le planning des activités (commerce, travail, récréatives, ...), le début, la durée. Le plan d'un agent est une liste d'activités (que doit faire l'agent) pour 24 h et les trajets qui les connectent (comment faire pour passer d'une activité à une autre). *L'algorithme pour la génération des activités est basé sur le théorème de l'utilité.*
- **module "planning de déplacement"** : Pour chaque individu, des modes sont sélectionnés et des routes sont générées. Les déplacements sont décrits aussi par un système d'informations sur le mode. *Le choix de l'itinéraire est fait selon un algorithme dit de Dijkstra [Dijkstra1959] afin de minimiser la fonction de coût [Hélary2005].*

- **module "simulation de mobilité"** : Les individus développent des plans et le module les exécute simultanément, ce qui peut se traduire par des problèmes de congestion suite à des interactions entre agents. *Le modèle est du type "poursuite"* ce qui est adapté à la prise en considération des intersections, ronds-points et feux. Il existe environ 50 simulations/jour pour un seul scénario, ce qui veut dire que la vitesse de calcul doit être 100 fois plus importante qu'en temps réel, avec des centaines de liens (segments de route) et les quelques millions d'usagers.
- **module "feedback"** : Comme les plans sont fonction du degré de congestion des routes et que l'état de congestion est lié aux plans à effectuer, ce module permet une adaptation des plans via une *méthode itérative* proche des techniques de relaxation de l'analyse numérique. Lors des itérations, l'agent conducteur se sert de sa mémoire à partir d'un "score" établi pour chaque plan. La durée du déplacement est déterminée à l'aide de la *théorie de l'utilité*.

Limites : Il est impossible d'obtenir une licence incluant le code source en dehors des Etats-Unis. Par conséquent, il est difficile de s'exprimer sur certaines performances informatiques de TRANSIMS. Nous aborderons donc uniquement les aspects conceptuels. Les principaux points à soulever de TRANSIMS nous semblent être les suivants :

- Les modèles de choix sont essentiellement basés sur des considérations économiques à travers l'application de la théorie de l'utilité.
- Il n'existe pas une différenciation selon les caractéristiques démographiques ; la feuille de route ne fait pas non plus allusion à ces aspects. Cela peut amener à des scénarios irréalistes ; par exemple, un agent peut vivre dans un bâtiment avant d'y être arrivé.
- Les mécanismes de "feedback" oublient les anciens plans et leurs performances. C'est à dire que le module de génération des agendas est très sollicité, et ce en l'absence de processus d'apprentissage.
- L'idée de base sur l'aspect multimodal est le fait que tout changement modal passe par la marche à pied. Même si une voiture est garée dans un parking, l'agent doit se déplacer pour la rejoindre. Pourtant, TRANSIMS ne bénéficie pas d'un vrai module pédestre, ce qui est un important handicap lors des simulations correspondant à des villes à tradition piétonnière.
- Il n'y a pas de différenciation entre le transport public et le transport privé. Ainsi, un conducteur d'une voiture privée peut être amené à "ramasser" des personnes comme un bus.
- La simulation manipule des itinéraires connus que les agents doivent suivre; ainsi elle exclue les promenades sur les places étendues des vieilles villes où une personne ne saurait où elle se trouve.

- Aucun module ne peut anticiper ce qu'il se passera dans un autre. Ainsi, une forte fluctuation de l'état de congestion peut amener à rater le train sans envisager de prendre un autre moyen de transport.

Travaux en cours : Des travaux en cours tentent de gommer certaines défaillances sans mettre en cause les idées de base de TRANSIMS. Les principaux ajustements d'un point de vue technique sont :

- les différents fichiers TRANSIMS sont remplacés par des fichiers de format XML. Ces fichiers contiendront, agent par agent, toute information les concernant.
- un agent ne pourra pas être "partagé" ; cela veut dire que la simulation trafic exécute les plans journaliers de chacun.
- un agent "database" mémorise la trace des plans antérieurs et les performances de ces plans.

Anx. C-2. Simulateur ALBATROSS

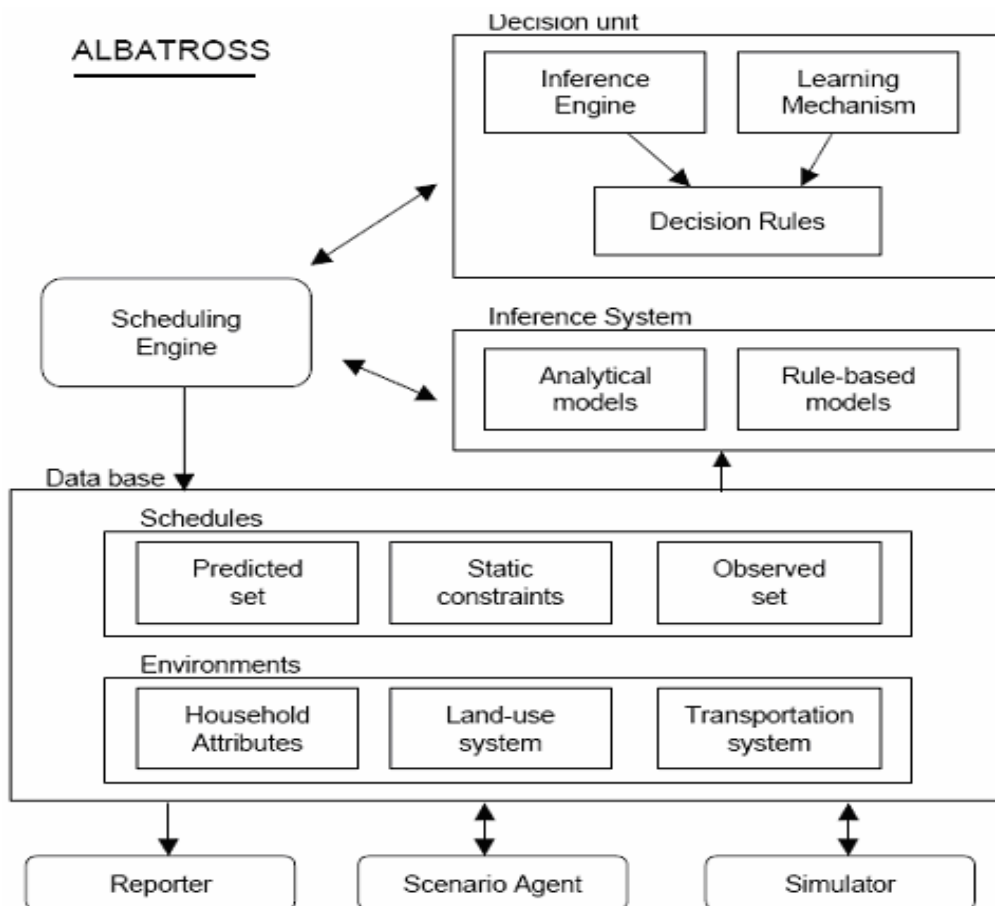


Figure-Anx21. Modules du simulateur ALBATROSS

- **moteur d'ordonnement (scheduling engine)** : Il gère le processus d'ordonnement des activités. L'idée est de reproduire la manière adoptée par les ménages pour les choix des activités et celle de planifier. *Le modèle est de type probabiliste* et prend en compte des contraintes spatio-temporelles. Il identifie des informations intéressantes produites par l'unité de décision (**Decision unit**) en mettant à profit le système d'inférence (**Inference System**) et un mécanisme d'apprentissage (**Learning Mechanism**) afin d'obtenir un plan de déplacement préliminaire.
- **module "Database"** : Il contient des informations concernant l'aire de l'étude (caractéristiques des ménages et attributs de la population, des données d'aménagement du territoire comme la location et les heures d'ouverture des activités, les caractéristiques du système de transport par mode). Il délivre les informations par ménage et par jour de la semaine. Les informations sont partagées en deux catégories. Le jeu d'observation (**Observed Set**) utilise pour comparer le déroulement des activités générées par le modèle et les données recueillies. Les contraintes statiques (**Static Constraints**) contiennent des informations concernant les contraintes des ménages ou par individu qui sont nécessaires aux modules "moteur d'ordonnement"
- **Predicted Set** : "jeu de prévision" qui stocke les plans générés.
- **Reporter** : Il génère des statistiques pour analyser les impacts et évalue la concordance entre les données générées et les résultats observés
- **Scenario Agent** : Il aide l'utilisateur à définir et manipuler les données d'entrée pour établir des scénarios à étudier (comme par exemple la composition des ménages, la constitution des agendas ou les deux).

Le simulateur fonctionne dans l'environnement Windows. Les résultats des scénarios peuvent être stockés sous EXCEL 5.0. Une question concerne le temps de calcul. La seule information disponible dans le livre détaillé d'Arentze et Timmermans [Arentze2000b] est que les simulations peuvent prendre beaucoup de temps, et sont fonction des scénarios à traiter.

Limites : Suite à cette analyse, les principaux aspects à soulever sont les suivants.

- Concernant les activités récréatives ou de "magasins", à cause d'une information incomplète pour chaque individu, son environnement cognitif est défini.
- A travers des modèles analytiques et des modèles décisionnels, le système d'inférence prend en considération les contraintes qui sont stables et ne varient pas avec les personnes ou l'environnement.
- Les modèles de choix associés à ALBATROSS ne font pas appel à une formulation mathématique et produisent l'effet d'une boîte noire.

- L'obtention des règles de décision (arbre de décision, [Arentze2003]) issues de données empiriques peut être vue comme dépourvue de rigueur statistique et économétrique. Cela rend difficile la généralisation de leurs résultats et l'application d'une évaluation.
- Aucune tentative n'est faite pour modéliser explicitement l'ordre des activités, qui est considéré (et assumé) comme donné.
- ALBATROSS ne permet pas de redistribuer les activités parmi les jours de la semaine.
- Les processus de décision sont séquentiels. Cela peut inhiber les décisions à long terme en donnant priorités à celles à court terme.
- Dans sa version actuelle, ALBATROSS ne fournit pas de renseignement sur la distribution spatiale du trafic et de ses impacts.

Travaux en cours : Des travaux en cours tentent de revoir certains aspects.

- Une nouvelle version du processus de distribution des activités est actuellement développée et est formée de deux étapes. Le planning prévisionnel est ensuite retravaillé pour éliminer les incohérences ou les conflits entre les décisions à long et à court terme. Dans le plan d'exécution, les événements non planifiés seront également redistribués. Actuellement, seulement le module de planning prévisionnel est mis en place.
- Une étude plus récente essaie d'améliorer ALBATROSS afin de modéliser l'élaboration de l'agenda. L'idée est de s'appuyer sur un cadre conceptuel qui décompose la formation des ordres du jour d'activité en un certain nombre de décisions élémentaires disposées selon une hiérarchie (ou arbre). Le cadre, cependant, n'est pas encore totalement opérationnel.
- Dernièrement [Janssens2004], une approche bayésienne a été proposée pour pouvoir illustrer le comportement des agents lors des choix.
- Des travaux initialisés par Tan [Tan2000] visent à étudier le comportement des voyageurs dans un monde virtuel (Eindhoven). L'objectif est d'utiliser le monde virtuel comme un instrument pour collecter des données nécessaires à la modélisation des activités et pour faire apparaître des règles de décision pour l'ordonnancement des activités.

ANNEXE D - Mécanismes d'apprentissage

Anx. D-1. Apprentissage mono agent

Les chercheurs en intelligence artificielle ont prêté une grande attention durant ces dix dernières années aux techniques d'apprentissage (voir [Buffet2003], [Téllez2003], [Stefan2003] et [Mathieu2001]) lançant ainsi la recherche sur la piste de modèles capables d'apprendre, utiles à la fois pour simuler les processus cognitifs des individus ainsi que pour

modéliser des sociétés entières qui s'adaptent au fil du temps à de nouvelles circonstances. Par exemple, le domaine du "Machine Learning" (ML) [Weiss1989] a fait beaucoup d'adeptes dans la communauté de l'IAD pour résoudre les problèmes d'apprentissage dans les systèmes multi agents en développant le principe du "Distributed Machine Learning" (DML) [Lin1991]. Dans la théorie du ML, quand on s'intéresse à un agent apprenant dans un environnement inconnu, tout autre agent qui coexiste avec cet agent dans le même environnement est considéré comme faisant partie de l'environnement.

Des travaux [Paquet2004] proposent qu'un agent apprenant fonctionne selon l'architecture présentée dans *Figure-Anx22*. Le module de performance contient les connaissances et les procédures pour choisir les actions ; le module nommé Critique observe l'agent et donne des informations au module d'apprentissage. Ce dernier modifie le module de performance, tandis que le générateur de problèmes identifie les possibilités d'amélioration et suggère les expérimentations.

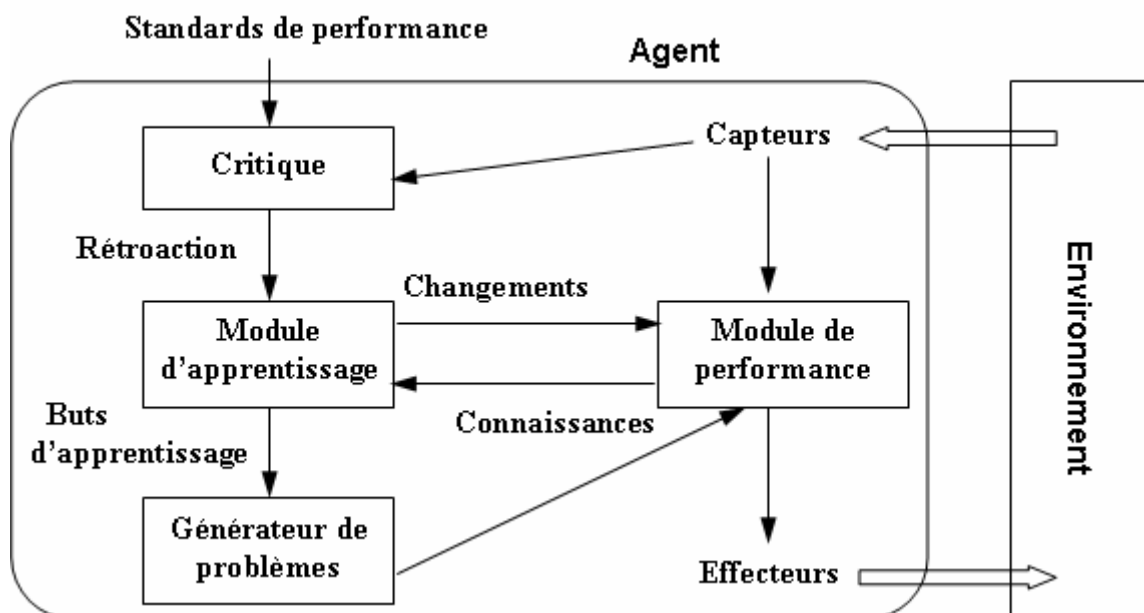


Figure-Anx22. Architecture d'un agent pour l'apprentissage [Paquet2004]

Malgré une grande variété de formes d'apprentissage dénombrées, il y a différents critères importants pour départager ces méthodes [Hait2000]. Nous allons voir les principaux types d'apprentissages :

- L'apprentissage par cœur (rote learning) [Rachlin1994] : Il consiste en l'acquisition de connaissances et d'aptitudes sans recourir à une modification de l'agent apprenant ou à des inférences de sa part. Il y a absence de généralisation. Les connaissances mémorisées ne peuvent pas être réutilisées dans des situations nouvelles.
- L'apprentissage par instruction (instance based learning) [Aha1991] : Il consiste en l'acquisition de connaissances et d'aptitudes qui nécessitent une transformation de l'état interne de l'agent apprenant par l'intégration de nouvelles représentations de son environnement. L'apprentissage est caractérisé par une forme locale de généralisation. Les

instructions sont mémorisées et utilisées si nécessaire dans le contexte qui leur est propre pour résoudre certaines tâches.

- L'apprentissage par la pratique et l'exemple : Il consiste en l'acquisition de connaissances pour la caractérisation et la discrimination d'un concept. Ce genre d'apprentissage se caractérise par la généralisation globale qu'il nécessite. Les exemples initiaux sont oubliés et une connaissance générale (qui, quelque part, comprime ces exemples) est stockée sous forme d'un arbre de décision, un ensemble de règles, réseaux de neurones, etc.
- L'apprentissage par renforcement (la pratique et l'expérience) : Il consiste en l'acquisition d'aptitudes à partir d'un environnement inconnu. C'est une forme d'apprentissage par "feed-back" qui se caractérise par une forme indirecte de supervision, c'est à dire que le renforcement produit par l'environnement est utilisé pour l'apprentissage, est soit une fonction "fitness" dans le cas des algorithmes génétiques, soit une récompense dans le cas d'un apprentissage par renforcement [Hait2000]. Le raisonnement à partir de l'expérience est, selon Hassas [Hassas2003] un paradigme qui se situe dans le prolongement du raisonnement à partir de cas (RPC) [Aamodt1994]. Ce dernier est une des méthodes de raisonnement par analogie, inspirée de la psychologie cognitive. Il consiste à réutiliser des expériences passées développées lors de la résolution de problèmes, pour résoudre de nouveaux problèmes identifiés comme similaires.

En pratique, il existe deux principales classes d'approches dont peut se servir le processus d'apprentissage agent (voir [Buffet2003] pour une présentation détaillée).

- Les modèles biologiques : comme par exemple la loi de Hebb [Hebb1949], laquelle a conduit au modèle de réseau de neurones présenté par [Hopfield1982]. On dispose alors d'un outil qui se base sur des traitements numériques, ce qui répond au caractère situé de l'agent et permet à la fois de gérer l'incertitude et d'éviter l'emploi de symboles.
- Les approches mathématiques : (voir parmi leurs initiateurs [Bellman1978], [Dutech1999], [Sutton1999]) Plusieurs domaines des mathématiques ont amené des outils récents des plus efficaces pour travailler sur l'apprentissage par renforcement : *la théorie des probabilités*, outil capable de représenter et gérer l'incertitude, les *chaînes de Markov*, formalisme (au sein de la théorie des probabilités) permettant l'étude d'un système dont l'évolution est décrite par des lois stochastiques, *la théorie de la décision*, issue de la recherche opérationnelle, qui s'intéresse à un problème fondamental pour un agent, celui de la prise de décision et enfin *la théorie de l'utilité*, parce qu'elle apporte la notion d'évaluation d'une décision, notion qui peut être mise en correspondance avec la notion de performance.

Pour une vue globale sur les mécanismes d'apprentissage, voir les travaux qui utilisent le formalisme de la logique floue [Choy2003], d'autres la théorie bayésienne [Chen2004] ou théorie markovienne [Buffet2003].

Anx. D-2. Apprentissage multi agents

Reste à savoir comment le processus d'apprentissage mono agent est exploité dans un contexte de système multi agents. A la question apprentissage individuel et/ou collectif, on peut rappeler qu'un système multi agents peut utiliser l'apprentissage de deux manières, soit faire interagir des agents qui apprennent, soit faire évoluer par apprentissage les interactions entre agents. Il existe quelques approches particulières, dont nous citons les plus utilisées dans le domaine du transport :

- Adaptive load balancing : Un agent, au sein d'un système multi agents, doit choisir par exemple parmi un ensemble de restaurants. Chaque agent prend une décision de façon autonome mais la performance du restaurant (donc des agents qui l'utilisent) est fonction de sa capacité et du nombre d'agents qui l'utilisent.
- Emergent load balancing : Tous les agents utilisent la même règle qui s'appuie sur l'historique (estimation de l'efficacité de chaque ressource). Les agents vont communiquer pour optimiser leur décision. Des groupes d'agents qui communiquent se forment.
- Expérience ICMAS '96 : L'ensemble des agents profitent de l'expérience et des requêtes de chacun. Il s'en suit une mémorisation collective.

Anx. D-3. Quelques approches d'apprentissage

Parmi les types d'apprentissage présentés, nous nous orientons vers l'approche d'**apprentissage par renforcement** qui est un concept d'apprentissage non supervisé de stratégies d'actions pour des agents autonomes. L'idée de base pour un apprentissage par renforcement est de capter les aspects les plus importants d'un problème réel face à un agent apprenant et interagissant avec son environnement pour la réalisation d'un but précis. L'apprentissage par renforcement n'étant pas défini en terme de méthodes d'apprentissage mais en terme de problème d'apprentissage, toute méthode qui paraît adaptée à la résolution d'un problème peut être considérée comme une méthode d'apprentissage par renforcement [Hait2000].

Une autre méthode ayant beaucoup d'adeptes est le mécanisme basé sur les **systèmes de classeurs** (LCS) (voir [Gérard2001Brooks1991] pour une synthèse détaillée). Dans ces systèmes, la perception de l'environnement est associée aux actions sous la forme de règles de type condition-action appelées classeurs. Le principe général consiste à générer et manipuler les règles en fonction des interactions avec l'environnement et d'utiliser différents mécanismes, généralement stochastiques, pour explorer l'espace des classeurs possibles. L'agent perçoit une situation sous la forme d'un ensemble d'attributs. Parmi les classeurs appris, le système identifie ceux dont les conditions sont comparables avec la situation courante, puis choisit un classeur dans cet ensemble. Pour favoriser l'exploration de l'environnement par l'agent, le LCS élimine un certain nombre de classeurs les moins bien adaptés à chaque pas de temps et les remplace par d'autres. Ces nouveaux classeurs sont créés par croisements et mutations des classeurs qui ont les plus fortes valeurs sélectives.

Des travaux vont jusqu'à associer l'anticipation à l'apprentissage dans les systèmes à base de classifieurs [Stolzmann1998], l'anticipation déclenchant un mécanisme de sélection

d'actions permettant la détection a priori des situations inter bloquantes dans une simulation microscopique du trafic dans le simulateur ARCHISIM [Doniec2005].

L'architecture réactive la plus connue et la plus influente est celle proposée par Brooks [Brooks1991]. Elle s'appelle **architecture de subsomption** et est composée de plusieurs modules, chacun étant responsable de la réalisation d'une tâche simple. Des modules, s'appelant modules de compétences, correspondent à des comportements spécifiques pour accomplir une tâche particulière. Pour la perception de l'environnement, plusieurs modules peuvent assumer l'exécution d'une action différente. Pour choisir l'action la plus opportune, les modules sont organisés en couches hiérarchisées, chacune ayant une priorité différente. Les couches supérieures correspondent à des tâches plus abstraites qui sont détaillées à l'aide des tâches plus concrètes et plus simples, les couches supérieures ayant une priorité plus faible que les couches inférieures. Un module sur une couche inférieure est responsable d'une tâche plus simple mais plus "urgente". Dans ce but, le fonctionnement d'un module situé sur une couche supérieure est subordonné à un module inférieur. Un module sur une couche inférieure peut modifier l'entrée d'un module supérieur au moyen d'un nœud de suppression, et invalider l'action du module supérieur au moyen d'un nœud d'inhibition. C'est cette organisation qui justifie l'appellation de subsomption.

Le fonctionnement de l'agent est décrit par un ensemble de règles de comportement correspondant à la paire condition – action. La condition correspond à une perception de l'environnement et l'action à une action possible d'un module de compétence. Les conflits entre les tâches existantes d'un agent subsomptif sont gérés par des règles de priorité et de domination d'une tâche sur une autre.

ANNEXE E - Plans orthogonaux, fusion d'informations et indicateur de robustesse

Anx. E-1. Modélisation des effets moyens à l'aide des plans orthogonaux

Une classification des modèles employés pour l'évaluation d'une réponse est faite dans les travaux de Delauche [Delauche2003]) :

- **Modèle linéaire sans interaction**

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i$$

Ce modèle nécessite n+1 simulations pour être défini. Il est souvent utilisé pour faire du "factor screening", c'est à dire identifier par une approche de type analyse de sensibilité les facteurs non critiques pour éventuellement les éliminer du processus d'optimisation qu'ils alourdissent inutilement.

- **Modèle linéaire avec l'ensemble des interactions**

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum c_{ij} x_i x_j + \sum h_{ijk} x_i x_j x_k + \sum p_{ijkl\dots n} x_i x_j x_k \dots x_n$$

Il faut au moins 2^n simulations pour être défini. Bien sûr, si on estime un des termes non intéressant, celui-ci n'apparaîtra pas dans le polynôme, ainsi une simulation sera économisée. C'est généralement le cas des interactions d'ordre supérieur à 2 qui ont très rarement un rôle significatif à jouer d'un point de vue physique.

- **Modèle linéaire avec interactions d'ordre 1 (modèle factoriel)**

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum c_{ij} x_i x_j$$

Ce modèle nécessite au moins $n+1+n(n-1)/2$ simulations pour fixer ses coefficients. Il est utilisé notamment lorsque la direction d'un optimum est recherchée.

- **Modèle du second degré (modèle quadratique)**

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum c_{ij} x_i x_j + \sum e_{ii} x_i^2$$

C'est le modèle factoriel auquel ont été ajoutés les termes quadratiques. Il nécessite donc au moins $2^{n+1+n(n-1)/2}$ simulations pour être entièrement défini. Il est utilisé lorsque l'optimum doit être localisé. Dans ce cas, l'hypothèse faite est qu'il se trouve dans le domaine de validité du polynôme. Nous allons nous en servir pour la recherche d'un optimum centralisé (chapitre 5, paragraphe §5.5.2).

Anx. E-2. Principe et applications de la théorie de Dezert-Smarandache

Si on dispose de k sources d'information (les personnes interrogées dans notre cas), la matrice des jeux de masses peut être écrite de la manière suivante :

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{k1} & m_{k1} & \dots & m_{kd} \end{bmatrix}$$

Le jeu de masses correspondant est obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$m_{M(\theta)}(A) = \phi(A)[S_1(A) + S_2(A) + S_3(A)]$$

Pour comprendre la signification de ces termes, on introduit tout d'abord la règle de fusion de DSMT libre basée sur ce qui est appelé **l'architecture du réseau** (Figure-Anx23) [Dezert-Smarandache2004]. Dans le cas de deux sources, elle contient dans une première couche les masses m_1 (source S_1) des éléments focaux A_i , $i = 1, \dots, n$; puis dans la deuxième couche, les masses m_2 (source S_2) des éléments focaux B_j , $j = 1, \dots, k$. Chaque nœud du réseau de la couche 2 est relié à un nœud de la couche 1. La couche de droite montre toutes les intersections possibles : $A_i \cap B_j$. La dernière étape consiste à compresser (ou additionner) toutes les masses avec les mêmes éléments focaux.

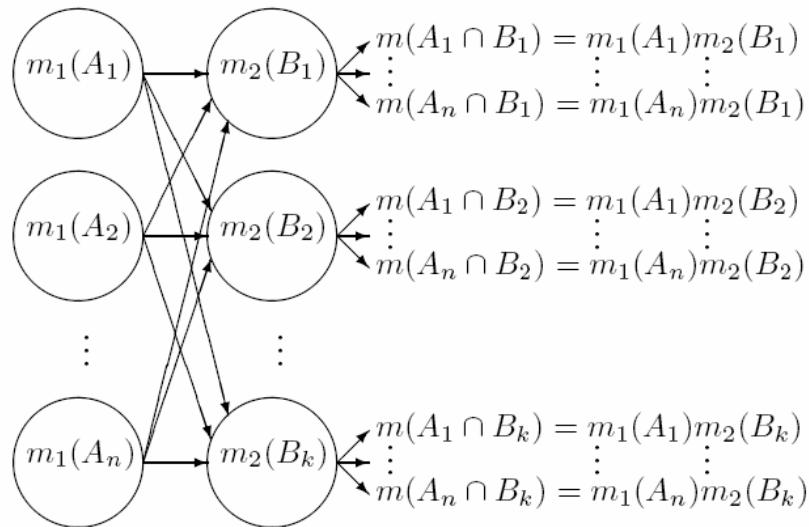


Figure-Anx23. Représentation de la règle classique de DSMT pour $M_f^{(\Theta)}$ [Dezert-Smarandache2004]

Pour mieux comprendre leur signification, soit la matrice M formée de deux sous-matrices : M_{\emptyset} , dont les colonnes contiennent les éléments nuls et M_N contenant les sous-ensembles non nuls. La formule présentée ci-dessus est formée de quatre termes :

- le terme $\phi(A)$ est une fonction définie comme suit :

$$\phi(A)=1 \text{ si } A \notin \emptyset \text{ et } \phi(A)=0 \text{ si } A \in \emptyset$$

- le terme S_1 est la somme de tous les produits résultant de la multiplication des éléments des colonnes selon l'architecture DSMT tel que l'intersection soit non nulle (c.-à-d. la somme des masses de tous les sous-ensembles non vides avant que toute masse des sous-ensembles vides absolus ou relatifs ne soit transférée) :

$$S_1(A) = m_{M_f^{(\Theta)}}(A) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^{\Theta} \\ (X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k) = A}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i)$$

- le terme S_2 est la somme des produits résultants des multiplications de M_{\emptyset} d'après l'architecture de DSMT, c.-à-d. une somme partielle des masses des sous-ensembles vides transférées vers l'ignorance ou les singletons :

$$S_2(A) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in \phi \\ (U=A) \vee [(U \in \phi) \wedge (A=I)]}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i)$$

- le terme S_3 est la somme de tous les produits résultant des multiplications des colonnes des M_\emptyset et M_N c.-à-d. la somme des masses des sous-ensembles vides transférée à des sous-ensembles non vides qu'il reste:

$$S_3(A) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^\emptyset \\ (X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k) \in \phi \\ (X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_k) = A}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i)$$

On peut distinguer quelques propriétés remarquables :

- par définition, $m_{M_{f(\emptyset)}}(\phi) = 0$
- la condition ci-dessous est toujours remplie :

$$\sum_{A \in D^\emptyset} m_{M(\emptyset)}(A) = \sum_{A \in D^\emptyset} \phi(A) [S_1(A) + S_2(A) + S_3(A)] = 1$$

Un processus de décision peut être décomposé en deux étapes distinctes comme ci-après (Figure-Anx24, [Dezert-Smarandache2004]).

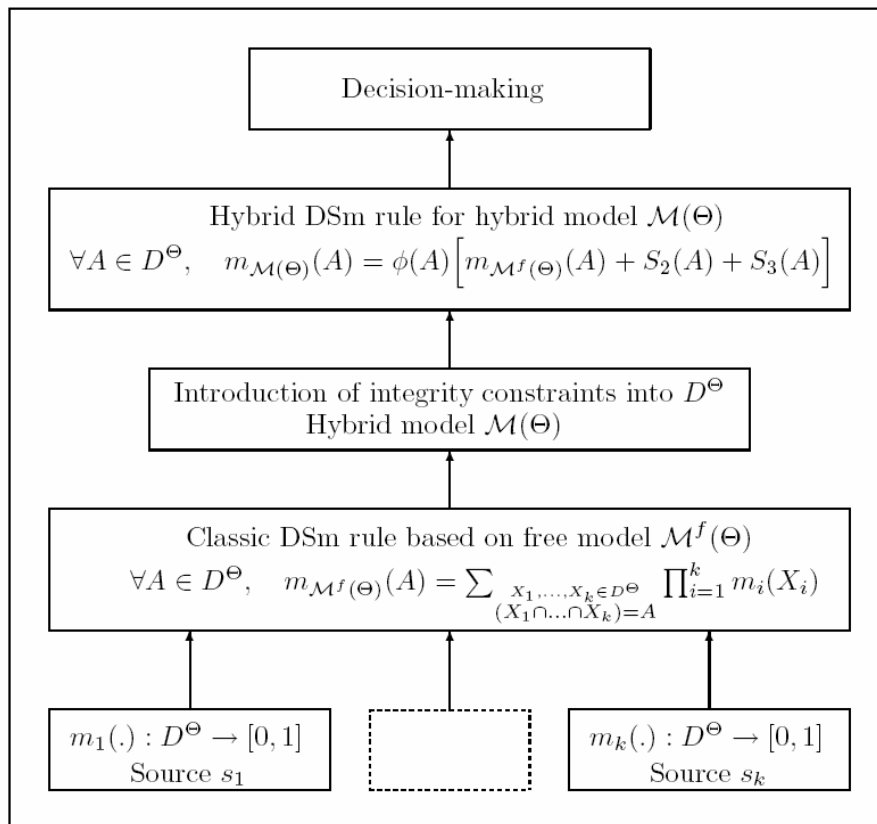


Figure-Anx24. Processus de décision avec l'approche de Dezert-Smarandache hybride [Dezert-Smarandache2004]

Les deux étapes sont :

- Evaluer la somme S_1 . Cette étape préserve les propriétés de commutativité et l'associativité de la combinaison. Lorsqu'il n'y a pas de contrainte, la règle hybride de DSMT se réduit à celle classique car :

$$\phi(A) = 1 \quad \text{et} \quad S_2(A) = S_3(A) = 0$$

- Cette deuxième étape est nécessaire uniquement si une information fiable sur une contrainte doit être prise en considération. Il existe des propositions $A = \emptyset$ pour lesquelles $\phi(A) = 0$. Pour ces propositions aucun calcul n'est nécessaire. Cela réduit considérablement le coût des calculs.

Dans le cas où les intersections entre les singletons sont nulles, en appliquant le modèle hybride, on se ramène aux règles de combinaison de Shafer.

Cette nouvelle théorie de fusion de données permet, d'une part, d'intégrer des conjonctions d'hypothèses, et d'autre part, de régler les cas où les sources sont en fort conflit tout en manipulant un cadre de discernement « open world ». Nous nous sommes servis lors de la fusion de données pour le choix des alternatives hétérogènes.

Son application présente pourtant l'inconvénient de devenir très laborieuse pour un cadre de discernement de plus de 6 hypothèses. Par exemple, pour un cadre de discernement de 3 hypothèses, la théorie de Dezert-Smarandache (DSMT) propose un hyperensemble de 18 éléments non nuls tels que présentés dans Anx. E-2 [Dezert-Smarandache2004] (alors que la théorie de Dempster-Schafer n'inclut que 8 éléments).

Tableau-Anx4. Eléments de l'hyperensemble D^Θ de la DSMT [Dezert-Smarandache2004]

Elements of $D^{\Theta=\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}}$	
$\alpha_0 \triangleq \emptyset$	
$\alpha_1 \triangleq \theta_1 \cap \theta_2 \cap \theta_3$	$\alpha_{10} \triangleq \theta_2$
$\alpha_2 \triangleq \theta_1 \cap \theta_2$	$\alpha_{11} \triangleq \theta_3$
$\alpha_3 \triangleq \theta_1 \cap \theta_3$	$\alpha_{12} \triangleq (\theta_1 \cap \theta_2) \cup \theta_3$
$\alpha_4 \triangleq \theta_2 \cap \theta_3$	$\alpha_{13} \triangleq (\theta_1 \cap \theta_3) \cup \theta_2$
$\alpha_5 \triangleq (\theta_1 \cup \theta_2) \cap \theta_3$	$\alpha_{14} \triangleq (\theta_2 \cap \theta_3) \cup \theta_1$
$\alpha_6 \triangleq (\theta_1 \cup \theta_3) \cap \theta_2$	$\alpha_{15} \triangleq \theta_1 \cup \theta_2$
$\alpha_7 \triangleq (\theta_2 \cup \theta_3) \cap \theta_1$	$\alpha_{16} \triangleq \theta_1 \cup \theta_3$
$\alpha_8 \triangleq (\theta_1 \cap \theta_2) \cup (\theta_1 \cap \theta_3) \cup (\theta_2 \cap \theta_3)$	$\alpha_{17} \triangleq \theta_2 \cup \theta_3$
$\alpha_9 \triangleq \theta_1$	$\alpha_{18} \triangleq \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$

Cette complexité algorithmique peut être très pénalisante de point de vue de la mémoire pour stocker les éléments, voir *Tableau-Anx5* [Dezert-Smarandache2004].

Tableau-Anx5. Estimation de la taille mémoire requise pour mémoriser les éléments de D^Θ

$|\Theta| = n$	size/elem.	# of elem.	Size of D^Θ
2	1 byte	4	4 bytes
3	1 byte	18	18 bytes
4	2 bytes	166	0.32 Kb
5	4 bytes	7579	30 Kb
6	8 bytes	7828352	59 Mb
7	16 bytes	$\approx 2.4 \cdot 10^{12}$	$3.6 \cdot 10^4$ Gb
8	32 bytes	$\approx 5.6 \cdot 10^{22}$	$1.7 \cdot 10^{15}$ Gb

Dans notre cas beaucoup de conjonctions sont nuls, se qui simplifie beaucoup les calculs engendrés (on ne peut pas choisir à voyager en même temps et en voiture et en bus).

Anx. E-3. Le rapport signal/bruit

Ce concept est issu du besoin de rendre un procédé industriel robuste (insensible aux bruits de fond). Dans le cas où on cherche à obtenir une valeur cible, la modélisation de la fonction dite « perte de qualité » L (loss function), convertie en réponse financière est de la forme [Taguchi1987] :

$$L_i = h(y_i - y_{\text{cible}})^2$$

où la constante h permet de convertir une réponse donnée dans une unité financière.

Pour une production de n objets, on peut définir la tendance centrale de la distribution des résultats d'essais à partir de la moyenne arithmétique :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

La dispersion des résultats est donnée par la variance :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

A l'aide de la fonction de perte individuelle, on peut écrire la perte financière moyenne :

$$\begin{aligned}\bar{L} &= \frac{h}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{cible})^2 = \frac{h}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) + (\bar{y} - y_{cible})]^2 \\ &= \frac{h}{n} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_{cible})^2 + 2 \underbrace{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\bar{y} - y_{cible})}_{= 0} \right]\end{aligned}$$

En utilisant la définition de la variance on obtient :

$$\bar{L} = h \left[\sigma^2 + (y_i - y_{cible})^2 \right]$$

Pour un scénario donnée, la perte financière moyenne est d'autant plus importante que la moyenne des résultats est éloignée de la valeur cible et que la dispersion de cette valeur moyenne est importante.

On définit, par similitude avec le traitement du signal, une nouvelle réponse appelée signal/bruit (signal to noise ratio) (s/n en décibels) afin de garantir les propriétés d'additivité des effets moyens comme suit :

$$s/n = -10 \log_{10} \left[\sigma^2 + (y_i - y_{cible})^2 \right]$$

Ce rapport prend les formes présentées dans *Tableau 3-5* (*Tableau 3-5*). Les 3 formes standards du rapport s/n [traduit de Al-Aomar2002]) selon à ce que la réponse est à maximiser, minimiser ou une valeur nominale. Ce rapport trouve son intérêt dans notre cas pour deux raisons :

- il permettra de départager des alternatives à scores proches mais pour lesquelles les préférences des agents peuvent fluctuer selon les conditions trafic
- il permettra de faire le choix de niveaux (pour les paramètres non-significatifs) afin que le choix soit robuste (peu influencé) par les conditions externes.

Anx. E-4. Méthode de Doehlert

Doehlert a proposé une méthode de construction originale de plans qui est basée sur des propriétés géométriques et qui consiste à couvrir de la manière la plus uniforme possible l'enveloppe du cadre expérimental (dans notre cas elle est déterminée par les valeurs minimales et maximales de scores que vont donner les personnes).

Il s'agit cette fois-ci d'un plan qui n'est pas orthogonal parce que toutes les variables ne possèdent pas le même nombre de niveaux.

La construction des réseaux de Doehlert s'appuie sur la définition d'un simplexe initial dont les coordonnées des sommets sont facilement calculables (un exemple pour trois variables est présenté dans *Figure-Anx25*). On obtient une sphère de rayon unitaire après l'opération de codage. La relation de codage consiste à transformer la valeur v_i

correspondante à la variable V en une valeur codée x_i à partir du centre de l'étendue de variation de la variable V et de la moitié de son étendue :

$$x_i = \frac{V_i - \left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \right)}{\left(\frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \right)}$$

Ce codage permet également au régulateur de fixer les valeurs des niveaux dans le questionnaire qui sera soumis.

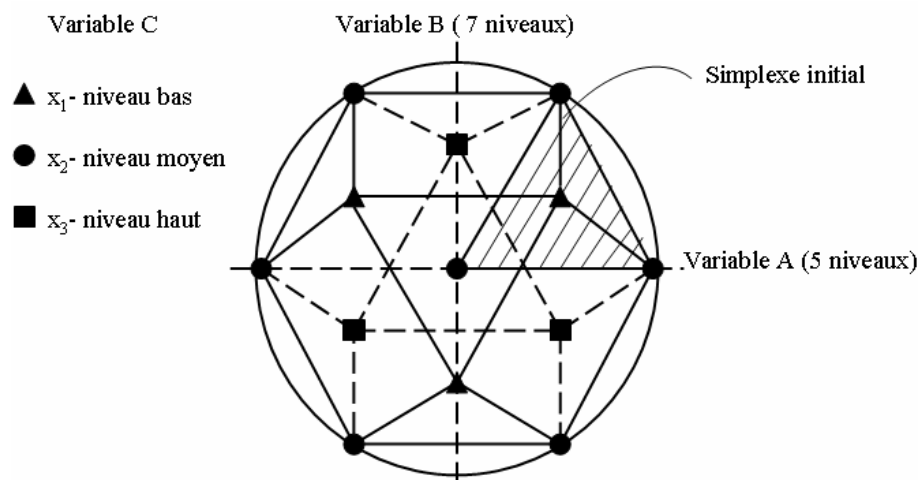


Figure-Anx25. Domaine d'étude [Doehlert1970]

ANNEXE F - Etude de cas : ville de La Rochelle

Anx. F-1. Modélisation de l'accessibilité d'un site à La Rochelle

Nous présentons, à titre d'exemple, le modèle d'accessibilité établi pour les agents conducteurs "étudiants" pour le choix préliminaire (première simulation).

- **ETAPE 1 : PHASE DE SPECIFICATION**
- **Définition des catégories** : La catégorie sociodémographique est définie par le statut social (ici, étudiant) et l'âge (entre 18 et 25 ans). Elle se divise dans les deux sous-catégories suivantes : hommes (160 réponses) et femmes (146 réponses).
- **Choix des variables d'entrée** : Le choix des variables à tester a été préalablement établi par un groupe d'étudiants sensibilisés au but de cette étude et aux contraintes d'utilisation

de cette méthode. Les cinq variables retenues sont toutes avec deux niveaux et les valeurs "seuil" concernant les variables quantitatives sont en accord avec les spécificités de notre étude (ville de La Rochelle). Nous avons :

- **N** : Nombre de routes (peu / nombreuses) $N_1 < 3$ routes , $N_2 \geq 3$ routes
- **E** : Écoulement du trafic (rapide / avec limitations) $E_1 < 3$ stops , $E_2 \geq 3$ stops
- **D** : Dimension de la route (large / étroite) $D_1 > 1$ voie , $D_2 = 1$ voie
- **P** : Possibilité de stationnement (facile / difficile) $P_1 \geq 3$ parkings , $P_2 < 3$ parkings
- **S** : Signalisation (bonne / mauvaise) S_1 – indiqué , S_2 - non-indiqué
- **Choix des variables de sortie** : Parce qu’il s’agit d’alternatives homogènes, les réponses des personnes interrogées sont sous forme de notes (entre 0 et 3 correspondant à une échelle linguistique allant de l’accessibilité « très mauvaise » à « très bonne »).
La liste est constituée d’un nombre restreint de réponses afin d’éviter la dispersion des réponses qui est plutôt due à l’embarras de distinguer deux notes proches qu’à la différence des préférences en soi.

• **ETAPE 2 : PHASE D’ELABORATION DES ENQUETES**

Le groupe d’étudiants ont pressenti des interactions entre des variables d’entrée ; le nombre de coefficients du modèle à estimer et le respect des conditions d’orthogonalité (ppcm des couples des actions disjointes) impose une table $L_8(2)^7$ (voir Figure-Anx -26).

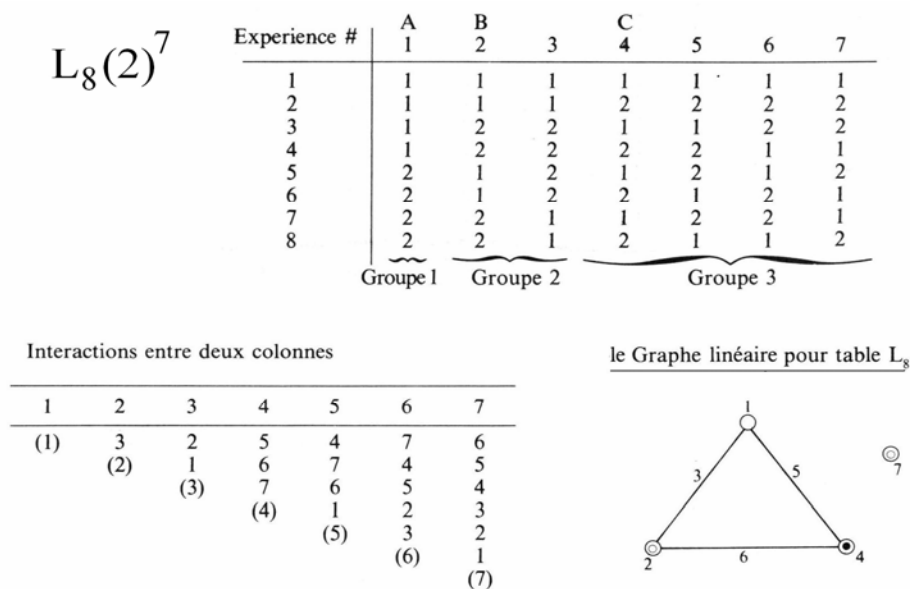


Figure-Anx -26. Table $L_8(2)^7$ avec ses interactions et le graphe linéaire retenu

Le choix s'est porté sur les interactions ED (écoulement - dimension de la route) et ES (écoulement - signalisation). Dans ce cas, la fonction score Y pour le choix préliminaire de l'accessibilité est :

$$Y = M + N + E + D + P + S + ED + ES$$

Une partie du plan orthogonal est présentée dans *Tableau-Anx6*.

Tableau-Anx6. Table orthogonale de l'accessibilité avec ses variables d'entrée et niveaux

question	Nombre de routes	Écoulement du trafic	Dimension de la route	Possibilité de stationnement	Signalisation	Réponse
1	Peu	Rapide	Large	Facile	Bonne	2
2	Nombreuses	Rapide	Large	Difficile	Mauvaise	3
3	Peu	Rapide	Étroite	Facile	Mauvaise	...
4	Nombreuses	Rapide	Étroite	Difficile	Bonne	...
5	Nombreuses	Avec limitations	Large	Facile	Mauvaise	...
6	Peu	Avec limitations	Large	Difficile	Bonne	...
7	Nombreuses	Avec limitations	Étroite	Facile	Bonne	...
8	Peu	Avec limitations	Étroite	Difficile	Mauvaise	...

• ETAPE 3 : PHASE D'ELABORATION DU MODELE

Les coefficients des modèles sont obtenus à l'aide des formules présentées dans le paragraphe §3.6.4 :

- pour les hommes ayant en moyenne 23 ans :

$$Y = 1,244 + (0,006 \quad -0,006)N + (0,544 \quad -0,544)E + (0,119 \quad -0,119)D + (0,406 \quad -0,406)P + (0,281 \quad -0,281)S + \begin{pmatrix} 0,094 & -0,094 \\ -0,094 & 0,094 \end{pmatrix}ED + \begin{pmatrix} 0,056 & -0,056 \\ -0,056 & 0,056 \end{pmatrix}ES$$

- pour les femmes d'un âge proche :

$$Y = 1,175 + (0,045 \quad -0,045)N + (0,275 \quad -0,275)E + (0,350 \quad -0,350)D + (0,525 \quad -0,525)P + (0,014 \quad -0,014)S + \begin{pmatrix} 0,125 & -0,125 \\ -0,125 & 0,125 \end{pmatrix}ES + \begin{pmatrix} 0,03 & -0,03 \\ -0,03 & 0,03 \end{pmatrix}ES$$

• ETAPE 4 : PHASE D'IDENTIFICATION DES VARIABLES PERTINENTES

Suite à l'analyse de la variance, la part déterministe du modèle réduit illustrant la perception de l'accessibilité pour les agents "étudiants" s'écrit comme suit :

- pour les hommes ayant en moyenne 23 ans :

$$Y = 1,244 + (0,544 \quad -0,544)E + (0,406 \quad -0,406)P + (0,281 \quad -0,281)S$$

- pour les femmes ayant un âge proche :

$$Y = 1,175 + (0,275 \quad -0,275)E + (0,350 \quad -0,350)D + (0,525 \quad -0,525)P + \begin{pmatrix} 0,125 & 0,125 \\ -0,125 & 0,125 \end{pmatrix} ED$$

On peut constater qu'il s'agit de deux modèles différents, à la fois par les valeurs des coefficients de variables significatives communes, et par les variables proprement-dites qui affectent la perception de l'accessibilité en fonction du sexe des personnes.

Anx. F-2. Modélisation de l'attractivité d'un site à La Rochelle

• ETAPE 1 : PHASE DE SPECIFICATION

- **Définition des catégories** : La catégorie sociodémographique est définie par le statut social (ici, étudiant) et l'âge (entre 18 et 25 ans) avec une moyenne d'âge de 22,8 ans. (82 réponses). Le nombre réduit de réponses n'a pas permis de faire une discrétisation par genre.
- **Choix des variables d'entrée** : Le choix des variables à tester a été préalablement établi par un groupe d'étudiants pour trois modes de transport : le bus, le vélo, la voiture. Les cinq variables retenues sont toutes avec deux niveaux.
 - **S** : possibilité de stationnement par rapport à la destination (près / loin)
 - pour le bus** : distance entre arrêt bus et point d'attraction
 $d_1 < 100 \text{ m}$, $d_2 \geq 100 \text{ m}$
 - pour la voiture** : parking réservé au point d'attraction
 $p_1 - \text{oui}$, $p_2 - \text{non}$
 - pour le vélo** : parking réservé au point d'attraction
 $p_1 - \text{oui}$, $p_2 - \text{non}$
 - **P** : prix des produits ou service (onéreux / abordable) : selon l'activité flexible à mener (exemple prix abonnement piscine, comparé à la moyenne des prix pour toutes les piscines)

$$P_1 \geq P_{\text{moyenne}} , P_2 < P_{\text{moyenne}}$$

- **V** : variété des services (faible, élevée) : nombre de points d'attraction dans le site (rayon de la zone 300 m)
 $V_1 = 1, V_2 > 1$
- **A** : accès au site (facile / difficile) : nombre de routes amenant au site
 $A_1 = 1, A_2 > 1$
- **M** : mobilité dans le site (aisé / pas-aisé) :
 - pour le bus** : voie aménagée pour bus
 $M_1 - \text{oui}, M_2 - \text{non}$
 - pour la voiture** : vitesse moyenne de 30 km/h
 $M_1 > 30 \text{ km/h}, M_2 \leq 30 \text{ km/h}$
 - pour le vélo** : voie aménagée
 $M_1 - \text{oui}, M_2 - \text{non}$
- **Choix des variables de sortie** : Pour chaque scénario hypothétique, les personnes interrogées ont donné une des réponses parmi celles de *Tableau-Anx7*. Elle peut être de type quantitative (score) aussi bien que qualitative (estimation linguistique).

Tableau-Anx7. Scénarios hypothétiques à évaluer

Réponse qualitative	Réponse quantitative
très mauvaise	0
mauvaise	1
bonne	2
très bonne	3

• **ETAPE 2 : PHASE D'ELABORATION DES ENQUETES**

La procédure informatique pour le choix de la table orthogonale fractionnaire et du modèle est similaire à celle pour l'accessibilité (paragraphe §4.3.3). La table proposée par l'agent "pexavvi" est la $L_8(2)^7$ avec le graphe linéaire (*Figure-Anx -26*). Une partie du plan orthogonal soumis à un usager est présentée dans *Tableau-Anx8*.

Tableau-Anx8. Table orthogonale de l'attractivité avec ses variables d'entrée et niveaux

	Possibilité de stationnement par rapport à la destination	Prix des produits ou services	Variété des services	Accès au site	Mobilité dans le site
1	proche	onéreux	faible	facile	aisée
2	proche	onéreux	faible	difficile	difficile
3	proche	abordable	élevée	facile	difficile
4	proche	abordable	élevée	difficile	aisée
5	loin	onéreux	élevée	facile	difficile
6	loin	onéreux	élevée	difficile	aisée
7	loin	abordable	faible	facile	aisée
8	loin	abordable	faible	difficile	difficile

- **ETAPE 3 : PHASE D'ELABORATION DU MODELE**

Pour les trois modes de transport, le modèle élaboré est du type :

$$Y = Y_{\text{moyen}} + S + P + V + A + M$$

Il s'agit d'alternatives "homogènes", donc la fusion de données se réduit à des moyennes de scores.

- **ETAPE 4 : PHASE D'IDENTIFICATION DES VARIABLES PERTINENTES**

Suite à l'analyse de la variance, la part déterministe des modèles réduits illustrant la perception de l'attractivité pour les agents "étudiants" est :

- **Pour le bus :** $Y_{\text{bus}} = 1.27 + (0.18 \quad -0.18)S + (0.31 \quad -0.31)P + (-0.24 \quad 0.24)V$

- **Pour le vélo :** $Y_{\text{vélo}} = 0.95 + (0.36 \quad -0.36)S + (0.26 \quad -0.26)P + (-0.23 \quad 0.23)V$

- **Pour la voiture :** $Y_{\text{voiture}} = 1.18 + (0.46 \quad -0.46)P + (0.29 \quad -0.29)A$

Anx. F-3. Affinité d'un site à La Rochelle

L'affinité d'un site est évaluée à l'aide de trois variables d'entrée avec trois niveaux pour chacune d'entre elles (*Tableau-Anx9*) :

Tableau-Anx9. Variables d'entrée et niveaux pour déterminer l'affinité d'un site

	niveaux		
Attractivité	faible	moyenne	forte
Accessibilité	facile	moyenne	difficile
Distance	proche	médian	loin

- **FUZZIFICATION**

La représentation de variables est du type trapézoïdal ; à l'aide des modèles d'accessibilité et d'attractivité, nous déterminons la plage dans laquelle se trouvent les valeurs d'attractivité et d'accessibilité.

$$Y_{\text{aces}} = 1.244 + (0.544 \quad -0.544)E + (0.406 \quad -0.406)P + (0.281 \quad -0.281)S$$

$$Y_{\text{attrac}} = 1.18 + (0.46 \quad -0.46)P + (0.29 \quad -0.29)A$$

Un exemple est présenté dans *Tableau-Anx10*.

Tableau-Anx10. Liste des valeurs des variables d'entrée pour la détermination de l'affinité

	Attractivité	Accessibilité	Distance
Valeur	0,8	1,8	5
<i>Valeur minimale</i>	0,43	0,013	0
<i>Valeur maximale</i>	1,93	2,475	16
<i>Limite minimale</i>	- 0,32	- 1,218	- 8
<i>Limite maximale</i>	2,68	3,706	24
<i>Niveau bas</i>	50,95 %	0,00 %	32,14 %
<i>Niveau moyen</i>	49,05 %	56,90 %	67,86 %
<i>Niveau élevé</i>	0,00 %	43,10 %	0,00 %

Concernant la distance, c'est une plage à renseigner par le régulateur dont la valeur maximale équivaut au plus long trajet entre deux points extrêmes de la ville.

Les variables sont segmentées en cinq modalités floues, mais pour éviter que les valeurs ne soient affectées à la première et à la dernière modalité, les plages sont doublées.

Les valeurs en gris sont les seules à renseigner pour cet algorithme. Pour un scénario donnée, l'agent "individu" détermine les valeurs d'attractivité et d'accessibilité issues des modèles réduits et la distance entre le domicile et le site (le chemin le plus court) pour lequel on veut déterminer l'affinité est fournie par le module infrastructure.

- **INFERENCE**

Nous utiliserons la table de vérité (présentée dans *Tableau-Anx11*) que celle de *Figure 4-8* du paragraphe §4.3.2.

Tableau-Anx11. Table de Vérité des règles pour déterminer le niveau d'affinité d'un site

		ACCESSIBILITE			DISTANCE			AFFINITE			
		facile			moyenne			difficile			
ATTRACTIVITE	DISTANCE	près	milieu	loin	près	milieu	loin	près	milieu	loin	
	faible										
	moyenne										
	forte										

AFFINITE : très forte moyenne faible

Les règles obtenues permettent, à l'aide des opérateurs ET et OU, de rassembler toutes les règles IF-THEN permettant d'obtenir le même niveau d'affinité. Les fonctions « n » (pour normal) et « c » (pour contraire) sont employées pour simplifier l'algorithme de calcul. Un exemple de calcul pour le cas « affinité très forte » est présenté dans *Tableau-Anx12*.

Tableau-Anx12. Détermination de la valeur correspondant au niveau "très forte" pour l'affinité

<i>Cas :</i>		AFFINITE très forte					
Règle If-Then		Accessibilité	Attractivité	Distance	Op.	Fnc	Résultat règle
Accessibilité facile ET Attractivité forte	Niveau	facile	forte	-	ET	n	0,00 %
	Valeur	43,10 %	0,00 %	-			
	Fonction	n	n	-			
	Résultat	43,10 %	0,00 %	-			
Accessib. facile ET Attractivité moyenne ET Distance "non loin"	Niveau	facile	moyenne	loin	ET	n	43,10 %
	Valeur	43,10 %	49,05 %	0,00 %			
	Fonction	n	n	c			
	Résultat	43,10 %	49,05 %	100,0 %			
Accessibilité moyenne ET Attractivité forte ET Distance "non loin"	Niveau	moyenne	forte	loin	ET	n	0,00 %
	Valeur	56,90 %	0,00 %	0,00 %			
	Fonction	n	n	c			
	Résultat	56,90 %	0,00 %	100,0 %			
Accessibilité difficile ET Attractivité forte ET Distance proche	Niveau	difficile	forte	proche	ET	n	0,00 %
	Valeur	0,00 %	0,00 %	32,14 %			
	Fonction	n	n	n			
	Résultat	0,00 %	0,00 %	32,14 %			
Résultat de l'ensemble des règles IF-THEN (opération OU)							43,10 %

- **DEFUZZIFICATION**

Un exemple est présenté ci-dessous :

Tableau-Anx13. Détermination des valeurs des 3 niveaux d'affinité

Affinité	Valeur d'entrée	Fonction	Résultat après fonction	Poids	Résultat
faible	0,51	n	0,51	10	5,10
moyenne	0,49	n	0,49	20	9,81
forte	0,43	n	0,43	30	12,43
Total	1,43	-	-	-	27,83
Affinité pondérée (= total résultat / total valeur d'entrée) :					19,46

Lorsque toutes les modalités relatives à la variable floue "Affinité" sont calculées, il faut retranscrire ces données sous forme d'un nombre. Le choix retenu est le calcul d'une

moyenne pondérée (le poids étant 30 pour affinité forte, 20 pour affinité moyenne et 10 pour affinité faible).

La valeur obtenue est un score qui sera comparé avec ceux des autres destinations à activités similaires.

- **EXEMPLE NUMERIQUE POUR LE CALCUL DE L’AFFINITE**

Les plages des variables à fuzzifier s’étalent dans ce cas entre les valeurs minimales et maximales obtenues à l’aide des modèles réduits (par exemple mini.= 0,013 et maxi.= 2,475 pour l’accessibilité perçue par les hommes). Cela permet d’attribuer des représentations trapézoïdales et de trouver les degrés d’appartenance des deux variables (accessibilité et attractivité). Le résultat obtenu après inférence est converti en une variable numérique (crisp value). Un exemple d’application est présenté ci-après dans *Tableau-Anx14*. L’algorithme utilisé pour la modélisation de l’affinité d’un site par un agent "individu" est développé dans l’annexe Anx. F-3 (pour l’instant, il s’agit d’une simple procédure EXCEL).

Tableau-Anx14. Exemple de calcul de l’"affinité" avec ses variables d’entrée floues

	Valeur d’entrée	Degré d’appartenance	Règles	Affinité	
Coût (distance)	8 km	26,2% raisonnable 73,8% élevé	SI le coût est élevé ET l’accessibilité est facile ET ...	36% importante 64% moyenne	63,34
Accessibilité	1,4	35,7% moyenne 64,3% aisée	SI ...		
Attractivité	0,8	7,1% modérée 92,9% grande	SI le coût est faible ET l’accessibilité est ...		

Le résultat obtenu après défuzzification est une valeur relative qui a valeur de score. L’agent "étudiant-conducteur" va comparer les affinités correspondantes à tous les sites où l’activité flexible prévue peut être effectuée et se rendra au site à plus forte affinité.

Anx. F-4. Modèle décisionnel pour le choix modal à La Rochelle

Ce cas est un exemple détaillé afin de montrer l’application concrète de notre cadre méthodique.

- **ETAPE 1 : PHASE DE SPECIFICATION**

- **Choix d’une catégorie sociale :**

Nous présentons une étude de cas qui est basée sur une collecte d'informations, menée par des étudiants en cycle Master Génie des Matériaux (promotion 2006), auprès des étudiants de l'université de La Rochelle. La catégorie sociodémographique pour laquelle le modèle comportemental a été élaboré est : *étudiants, moyenne d'âge égale à 22,3 ans*. Le nombre de réponses (=488) nous a semblé insuffisant pour établir des modèles par sexe.

- **Choix de variables d'entrée et des niveaux :**

Pour s'assurer de l'aspect réaliste des modèles décisionnels, le choix des variables du plan et les niveaux des variables, présentés dans *Tableau-Anx15*, ont été laissés au choix du groupe d'étudiants conduisant la collecte d'information.

Tableau-Anx15. Variables d'entrée avec leurs niveaux respectifs

	Variables d'entrée	Niveau 1	Niveau 2
externes	Météo	favorable	mauvaise
	Risques d'incidents	faible	élevé
	Distance	proche	lointain
	Encombrement	avec bagages	sans bagages
internes	Congestion	non	oui
	sécurité	bonne	mauvaise
	Info. en temps réel	oui	non

Les enquêtes soumises contiennent une explication détaillée de la signification des variables et des niveaux afin d'éviter au maximum une interprétation subjective. Voici des explications sommaires sur la signification possible des niveaux des variables : *météo* = mauvaise \Rightarrow pluie / *risques d'incidents* = élevé \Rightarrow pour voie non-aménagée pour vélo et piétons, passages piétons pour voiture, incivilité pour bus / *distance* = élevée \Rightarrow > 5 km / *temps disponible* = pressé \Rightarrow activité fixe

- **Choix de variables sortie et de modalités de réponses :**

Il s'agit bien dans ce cas d'**alternatives hétérogènes** (prendre le bus, ou le vélo, ...). Le type de réponse choisi est donc la fréquence de choix d'une alternative (voir tableau ci-après).

Dans un travail publié en 2005, l'équipe de Timmermans a mené une enquête auprès de chauffeurs de camions de plusieurs pays d'Europe. Aucun modèle n'a pu être établi du fait de l'hétérogénéité des réponses. A notre avis, les onze possibilités de réponses allant de la note 0

à 10 n'ont pas mieux aidé l'interprétation des résultats [Marchau2001]. Du point de vue algorithmique, un choix présente ses avantages et inconvénients ; le cadre de discernement étant formé de quatre alternatives, la fusion des réponses se fait à faible coût calculatoire, mais le degré de conflit entre les réponses peut être important.

Tableau-Anx16. Liste des réponses possibles au questionnaire

Réponse qualitative	Réponse quantitative
très rarement	1
parfois	2
fréquemment	3
très souvent	4

Pour chaque question et chaque alternative proposée (Bus, à Pied, Vélo, Auto), les personnes interrogées ont répondu par une fréquence de choix dont les modalités sont (au choix) soit sous forme de réponse qualitative, soit sous forme d'évaluation quantitative. Cette dernière est fidèle au principe d'une fonction "utilité" linéaire, typique en classement à base d'enquêtes, et qui sera utilisée également pour les alternatives homogènes (classements accessibilité, attractivité, parkings).

Nous faisons remarquer que nous avons uniquement retenu quatre réponses possibles, ce qui nous semble réaliste par rapport au nombre d'alternatives à étudier aussi bien que par rapport aux préférences que pourrait exprimer une personne interrogée. Nous évitons ainsi le choix "au milieu" de la plage qui ne sert finalement pas à affiner la réponse, mais surtout à semer le doute dans l'esprit de la personne interrogée.

Par exemple, pour un scénario du type : « *la météo est mauvaise, la distance est courte, le risque d'accident faible, avec des bagages, je suis pressé* », alors dans ce cas je prends le bus "souvent" ». La consigne donnée aux personnes interrogées est qu'il ne faut avoir à l'esprit aucun classement des alternatives pour un même scénario. On peut donner la même réponse pour plusieurs alternatives. Une personne peut également répondre : « *je prends le vélo "souvent" et je prends le bus "souvent"* ».

Une fois l'enquête menée, la fréquence d'apparition d'une réponse pour chaque alternative a été étudiée afin de s'assurer que l'avis émergent soit représentatif de la catégorie étudiée. Nous avons constaté qu'il y a jusqu'à 94,5% de réponses identiques pour les alternatives étudiées pour certains scénarios. Pour d'autres, nous avons 60 à 70% de réponses identiques, 20% avec un score au voisinage et le reste (environ 10%) avec des réponses distribuées sur les deux autres possibilités. En général, nos conclusions portent sur un comportement représentatif d'une catégorie sociale d'individus.

- **ETAPE 2 : PHASE D'ELABORATION DES ENQUETES**

Le modèle proposé contient 5 variables d'entrée à deux modalités (ou niveaux) chacune et initialement aucune interaction entre les variables d'entrée n'est pressentie.

$$S_k = S_{k_{moy}} + \underbrace{A + B + C + D + G}_{\text{matrices des effets moyens des variables d'entrée}}$$

Quatre variables sont du type qualitative et une est quantitative (distance avec un seuil à renseigner par le régulateur ; dans notre cas, le niveau "proche" correspond à une distance inférieure à 5 km).

- Etape 2 : Calcul de la taille de la table (nombre de questions à soumettre)

Cela se fait en deux étapes :

- **évaluation du nombre des coefficients du modèle à estimer (N)**

Il s'agit d'évaluer le nombre d'inconnues (qui sera ainsi la taille minimale du questionnaire)

$$N = 1 + \sum_i ddl_i = 6$$

où ddl_i est le degré de liberté associé à la variable i et 1 correspond au fait que la moyenne des scores est également une inconnue.

Du fait que la somme des effets moyens d'une variable est nulle, pour chaque variable on décompte une seule inconnue.

$$ddl_i = n_i - 1, \text{ avec } n_i \text{ qui est le nombre de niveaux de la variable.}$$

- **respect de l'orthogonalité de la table**

Chaque couple $A_i B_j$ apparaît autant de fois. Pour ce faire, on calcule le plus petit commun multiple (ppcm) des produits des couples des actions disjointes (A-B, A-C, A-D, A-G, B-C, B-D, B-G, C-D, C-G, D-G). Le produit des niveaux est 4 pour chaque couple, donc le ppcm est 4.

Le nombre d'inconnues étant de 6, la taille retenue est un multiple du ppcm (de préférence le plus petit, pour réduire le nombre de questions) : $T = m * \text{ppcm} = 2 * 4 = 8$

- Etape 2 : Table et affectation des colonnes

Il s'agit donc de la table L_8 (si elle existe), sinon il faudrait se reporter sur la L_{12} , L_{16}, \dots

Tableau-Anx17. Table $L_8(2)^7$ pour plans d'expériences

Expérience #	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Les colonnes sont affectées selon les graphes linéaires (les nœuds pour les variables et les traits pour les interactions envisagées). Par exemple, l'évaluation de l'interaction A-G serait caduque. Dans la mesure où l'interaction A-B n'est pas pressentie, la colonne B est affectée à la variable C. Si le régulateur avait pressenti des interactions, la table serait unique. Sinon il peut choisir celle qui lui semble la plus appropriée (en pratique, il existe des outils permettant de proposer ces "versions"). Dans notre cas, par défaut, deux interactions ont été validées : B-D et A-D. L'affectation des interactions peut se faire également à l'aide du triangle des interactions (la colonne 6 serait affectée aux variables se trouvant en colonne 2 et 4).

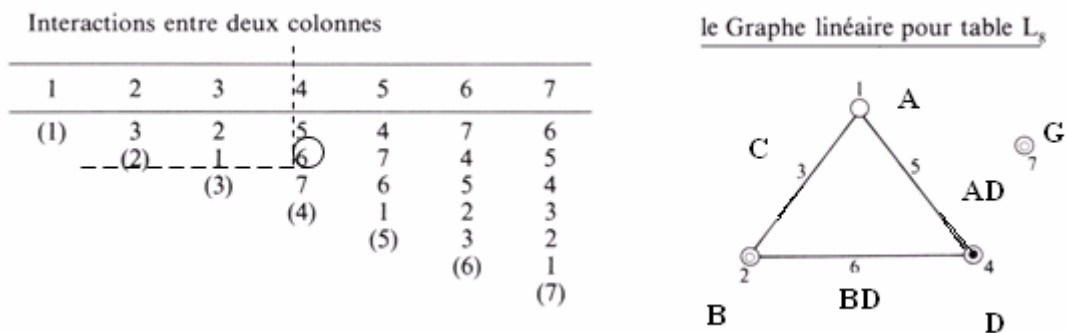


Figure-Anx27. Affectation des colonnes au moyen du graphe linéaire

A ce stade du développement du simulateur, cette partie de l'agent "pexavvi" est implémentée en Visual Basic. Il permet d'affecter des tables à deux niveaux sans interaction.

La table de questions adressée aux étudiants est la suivante :

Tableau-Anx18. Table $L_8(2)^7$ pour plans d'expériences

	météo	risque d'incidents	distance	conditions trajet	temps disponible
1	il ne pleut pas	faible	<5 km	avec bagage	pressé
2	il ne pleut pas	faible	<5 km	sans bagage	pas pressé
3	il ne pleut pas	élevé	>5 km	avec bagage	pas pressé
4	il ne pleut pas	élevé	>5 km	sans bagage	pressé
5	il pleut	faible	>5 km	avec bagage	pas pressé
6	il pleut	faible	>5 km	sans bagage	pressé
7	il pleut	élevé	<5 km	avec bagage	pressé
8	il pleut	élevé	<5 km	sans bagage	pas pressé

Sachant que le nombre de variables est assez important (donc de questions pour chaque alternative), nous avons d'abord élaboré un modèle réduit (grâce à l'ANOVA) à partir du plan principal puis établi le modèle avec le plan croisé (comme spécifié dans le paragraphe §3.6.5). Cette étape n'affecte pas le réalisme du modèle dans la mesure où les effets moyens des variables externes sont censés être de l'ordre de grandeur des bruits de fond.

Pour illustrer la démarche employée, une partie du plan orthogonal est présentée dans *Tableau-Anx19*, selon une procédure d'affectation similaire à celle présentée pour l'accessibilité d'un site (table L₈ pour le plan principal et table L₄ pour le plan secondaire).

Tableau-Anx19. Variables d'entrée avec réponses pour deux alternatives (vélo et automobile)

scénario (n°test)	<i>Variables d'entrée</i>					<i>Réponses d'une personne</i>	
	Météo (A)	Risque d'incidents (B)	Distance (C)	Conditions de trajet (D)	Temps disponible (G)	Vélo (= Ve)	Auto (= Au)
1	favorable	faible	proche	avec bagage(s)	pressé	parfois	parfois
...
6	pas favorable	faible	loin	sans bagage	pressé	très rarement	fréquemm ^{nt}
...

- **ETAPE 3 : PHASE D'ELABORATION DU MODELE DU PLAN PRINCIPAL**

Avec l'introduction (par défaut des 2 interactions, la part déterministe du modèle est :

$$S_k = S_{kmoy} + \underbrace{A + B + C + D + G + AD + BD}_{\text{matrices des effets moyens}}$$

Dans la mesure où aucune interaction n'a été initialement pressentie, les interactions sont affectées d'office. Du point de vue informatique, c'est l'agent "pexavvi" qui effectue cette tâche. Le régulateur fournit le cadre de discernement qui est constitué de la liste des alternatives de transport :

$$\Theta = \{ \text{à Pied, Vélo, Bus, Automobile} \} = \{ P_i, V_e, B_u, A_u \}$$

L'ensemble D^\ominus (défini selon Dezert-Smarandache) est formé de singletons aussi bien que de disjonctions envisageables :

$$D^\ominus = \{ A / A \subseteq \Theta \} = \{ P_i, \dots, B_u, \dots, V_e \cup A_u, \dots, B_u \cap A_u, \dots, P_i \cup B_u \cup A_u, \dots \}$$

Dans le cas du choix d'un mode de transport, il n'y a pas d'ambiguïté dans le choix des alternatives, donc les conjonctions $V_e \cap A_u$, $B_u \cap A_u \cap P_i$, ... sont des hypothèses nulles. Le modèle hybride DSmT produira le jeu de masses grâce à l'algorithme développé sous Matlab.

Nous avons testé plusieurs manières d'affectation des jeux de masses, comme par exemple la fréquence d'apparition d'une réponse [Denoeux2005]. Cette méthode est très facile à mettre en œuvre dans un cadre statique dans la mesure où il n'y a pas de fusion proprement dite car la masse totale est estimée par une fréquence d'apparition. Cependant, cette approche très adaptée aux procédures de classement ne permet pas de prendre en compte l'apparition ou la disparition d'une alternative.

Le jeu de masses affecté à une personne sera : (très rarement =0,1 - parfois =0,2 - fréquemment =0,3 - très souvent =0,4). Ce qui, dans la question 6, peut se traduire comme suit : « il y a 10% de chances que je prenne le vélo, 30% de chances que je prenne la voiture »

Remarque : Le choix des valeurs n'est pas arbitraire. Les valeurs sont proches afin de nous assurer que le modèle reflète l'effet engendré par la modification des variables. Pour un autre jeu de masses, à différence plus drastiques et non linéaires (par exemple, très rarement =0,05 - parfois =0,15 - fréquemment =0,3 - très souvent =0,5), les coefficients du modèle (ou effets moyens) changent sensiblement, mais cela n'affecte ni le degré d'importance d'une action (donc les résultats de l'ANOVA) et ni le classement des alternatives. Cette étude a également été effectuée pour le choix du parking avec des jeux de scores différents (par exemple, valeurs 1,2, 3, 4, 5, 6). Du fait du caractère additif du modèle, cela n'engendre aucune modification sur le degré d'importance d'une variable ou d'une interaction, de même pour le classement si la fonction "utilité" est linéaire. Dans certains travaux, on peut trouver des fonctions utilité en exponentiel ou logarithme., faut-il une telle finesse pour le raisonnement ? C'est une question qui reste posée et pour laquelle notre proposition de "contournement" est que les réponses seront à des niveaux flous ; après application des opérateurs, le modèle pourra être obtenu après defuzzification.

Pour fusionner les informations, l'algorithme proposé par une équipe canadienne a été utilisé (avec de mineures adaptations) afin d'obtenir un jeu de masses pour chaque réponse et chaque alternative. Le résultat obtenu est sous forme de probabilités du type singletons, réunions de deux, trois ou quatre hypothèses. La transformation pignistique distribue les probabilités uniquement sur les singletons. Il est également envisageable d'utiliser d'autres algorithmes, comme ceux développés par Denoeux [Denoeux2005] ou Smets [Smets1994].

Remarque : L'algorithme n'est pas présenté (qqz centaines de lignes), mais il est disponible sur [Dezert-Smarandache2006]. Il faudrait à l'avenir une procédure d'import de données sous Excel et une d'affaiblissement pour les personnes indéscises (réponses identiques) selon le coefficient α que nous avons proposé (qui, généralement, dans la littérature de spécialité, est pris arbitrairement).

Nous avons finalement proposé l'approche suivante qui nous semble plus représentative pour la distribution des réponses qualitatives envisageables. Nous estimons que la réponse donnée est à l'image de la motivation de la personne pour faire un certain choix. Ainsi l'affectation des masses peut se faire comme suit :

- Exemple sans redondance :

à Pied = très rarement , Vélo = parfois , Automobile = fréquemment , Bus = très souvent

$$m(Pi) = 0,1 \ ; \ m(Ve) = 0,2 \ ; \ m(Au) = 0,3 \ ; \ m(Bu) = 0,4$$

- Exemple avec redondance (après re-normalisation)

à Pied = parfois , Vélo = parfois , Automobile = fréquemment , Bus = très souvent

$$m(Ve \cup Pi) = 0,36 \ ; \ m(Au) = 0,27 \ ; \ m(Bu) = 0,36$$

Avant d'appliquer la règle de combinaison pour la fusion d'informations, nous avons procédé à l'affaiblissement des informations issues des personnes qui sont considérées comme indéscises (c'est à dire qui donnent la même réponse pour plusieurs modes) comme suit :

$$\forall A \neq \Theta, \ m'(A) = \alpha \cdot m(A) \ ;$$

$$m'(\Theta) = (1 - \alpha) + \alpha \cdot m(\Theta) \quad \text{avec} \quad \alpha = \left(1 - \frac{n-1}{N}\right)$$

où n est le nombre d'alternatives notées d'une façon identique (ayant eu la même réponse). N est le nombre total d'alternatives. Pour le cas étudié avec les 4 alternatives, nous avons 2 réponses identiques pour le premier scénario (voir *Tableau-Anx19*), ainsi $\alpha = 0,75$.

L'affectation des masses après fusion et l'application de la transformation pignistique permettent de trouver, pour chaque scénario appartenant au plan principal, les scores correspondant à chaque alternative.

Les résultats présentés dans *Tableau-Anx20* sont un exemple correspondant au premier scénario (celui décrit par la première ligne du plan orthogonal).

Tableau-Anx20. Exemple d'affectation (exprimée en pourcent) de masses et de probabilités pignistiques pour le choix entre les modes de transport (alternatives)

<i>Résultats d'enquête</i>					
<i>hypothèses seules</i>	Pi	Ve	Bu	Au	
	17	11,1	12,4	3,9	
<i>sous-ensembles des hypothèses couplées</i>	PiUVe	PiUAu	VeUAu	PiUVeUBu	PiUBuUAu
	14,8	0	0	14,8	0
	PiUBu	VeUBu	BuUAu	PiUVeUAu	VeUBuUAu
	7,5	14,8	0	0	0
<i>ignorance</i>	PiUVeUBuUAu			3,7	
	<div style="border: 1px dotted black; padding: 5px; display: inline-block;"> Pi =Piéton ; Ve =Vélo Bu =Bus ; Au =Auto </div>				
<i>Transformée pignistique</i>					
<i>hypothèses seules</i>	Pi	Ve	Bu	Au	
	33	34,3	28,4	4,8	

Pour ce premier scénario (voir page précédente), ceci signifie que les scores attribués aux alternatives, à une constante près (arbitrairement 10 dans notre cas), sont :

(Pi) à pied = 3,3 - (Ve) en vélo = 3,43 - (Bu) en bus = 2,84 - (Au) en auto = 0,48

Pour le scénario ci-dessus, le choix modal porterait sur le mode "vélo". En comparant les scores, on peut se demander si départager ainsi le mode "Vélo" et "marche à pied" est vraiment "raisonnable", à scores quasi-égaux. Dans ce cas, nous utilisons ce que Taguchi a défini, à partir de la fonction perte de qualité, « l'indicateur de robustesse s/n » signifiant « signal/noise » (voir paragraphe §3.6.6 et annexe Anx. E-3 pour détails de calcul).

A l'aide des scores obtenus pour les 8 scénarios et pour les 4 modes de transport, il est possible d'aller plus loin en élaborant un modèle prévisionnel pour chaque mode de transport. Ci-après, est donné un exemple concernant le modèle de scores attribué au bus [Boussier2006] :

Les scores moyens obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau-Anx21. Scores moyens du mode "Bus" pour le questionnaire sur le choix modal

Questions	météo	risque d'incidents	distance	conditions trajet	temps disponible	Score
1	il ne pleut pas	faible	<5 km	avec bagage	pressé	2,95
2	il ne pleut pas	faible	<5 km	sans bagage	pas pressé	3,45
3	il ne pleut pas	élevé	>5 km	avec bagage	pas pressé	0,87
4	il ne pleut pas	élevé	>5 km	sans bagage	pressé	4,01
5	il pleut	faible	>5 km	avec bagage	pas pressé	1,06
6	il pleut	faible	>5 km	sans bagage	pressé	3,68
7	il pleut	élevé	<5 km	avec bagage	pressé	2,76
8	il pleut	élevé	<5 km	sans bagage	pas pressé	3,22
moyenne						2,75

Le modèle s'écrit symboliquement comme suit :

$$S_{Bu} = 2,75 + (0,071 - 0,071) \text{ météo} + (0,032 - 0,032) \text{ risque} + (0,345 - 0,345) \text{ dis tan ce} + \\ + (-0,84 \quad 0,84) \text{ conditions_trajet} + (0,6 - 0,6) \text{ temps_disponible} + \\ + \begin{pmatrix} -0,07 & 0,07 \\ 0,07 & -0,07 \end{pmatrix} \text{ météo / conditions_trajet} + \begin{pmatrix} 0,06 & -0,06 \\ -0,06 & 0,06 \end{pmatrix} \text{ risque / conditions_trajet}$$

Le tableau ci-dessous recense les coefficients et les formules de calcul.

éléments matrices	effets moyens
a1	0,071
a2	-0,071
b1	0,032
b2	-0,032
c1	0,345
c2	-0,345
d1	-0,840
d2	0,840
g1	0,600
g2	-0,600
a1d1	-0,070
a1d2	0,070
a2d1	0,070
a2d2	-0,070
b1d1	0,060
b1d2	-0,060
b2d1	-0,060
b2d2	0,060

exemple calculs des effets moyens:

variable:

$$a_i = Y_{moy} (A_i) - M$$

$$c1: \quad (2,95+3,45+2,76+3,22)/4-2,75$$

interaction:

$$a_i b_j = Y_{moy} (A_i B_j) - M - a_i - b_j$$

$$b2d1 \quad (0,87+2,76)/2-2,75-(-0,032)-(-0,84)$$

Figure-Anx28. Effets moyens des variables et interactions issus de l'évaluation des scores

A ce stade du développement du simulateur, cette partie de l'agent "pexavvi" est implémentée dans un programme annexe. Il nous permet de déterminer les effets moyens de variables d'entrée sur les préférences des agents et de calculer le score correspondant pour les scénarios non testés.

• **ETAPE 4 : PHASE D'IDENTIFICATION DES VARIABLES PERTINENTES**

Lorsqu'on regarde la dispersion des scores autour de la valeur moyenne, on s'aperçoit que la dispersion des scores autour de la valeur moyenne illustre bien qu'il y a des actions (variables ou interactions) significatives. On en peut pas, d'un simple "coup d'œil" sur les valeurs des coefficients, déceler le degré d'importance de ces actions. L'analyse de la variance, associée au test de Fisher Snedecor, permet de répondre à cette problématique.

Seules les variables C,D et G ont un effet (proprement dit) sur la préférences des usagers du réseau de transport pour l'emploi du bus.

Tableau-Anx22. Tableau de l'analyse de la variance (ANOVA)

Action	Variance	Ratio
Paramètre A	$V_A = \frac{N}{n_A (n_A - 1)} \sum_i a_i^2$	$\frac{V_A}{V_r}$
Interaction AB	$V_{AB} = \frac{N}{n_A n_B (n_A - 1)(n_B - 1)} \sum_i \sum_j a_i b_j^2$	$\frac{V_{AB}}{V_r}$
Résidu	$V_r = \frac{1}{\gamma_r} \sum_i \sum_j (Y_{ij \text{ exp}} - Y_{ij \text{ th}})^2$	

Nous verrons dans le tableau suivant que seules les variables C, D, G ont un effet proprement dit sur la préférence des usagers du réseau de transport pour l'emploi du bus.

Tableau-Anx23. Détermination des variables à retenir pour un modèle réduit

Action	Variance	Fexp	F(0,05)	F(0,01)	Signification
A	19,7	3,2	3,8	6,6	NS
B	4,0	0,7	3,8	6,6	NS
C	464,7	75,6	3,8	6,6	TS
D	2754,7	448,1	3,8	6,6	TS
G	1405,4	228,6	3,8	6,6	TS
AD	19,1	3,1	3,8	6,6	NS
BD	14,1	2,3	3,8	6,6	NS
Résidus	6,1				
Répétitions	5,5				

$V_{\text{résidus}}/V_{\text{répétitions}}=1,1$
donc NS

Par exemple, la variance pour la variable d'entrée A et celle pour l'interaction AD sont :

$$V_A = \frac{N}{n * ddl} \sum_i a_i^2 = \frac{488}{2 * 1} [(0,071)^2 + (-0,071)^2] = 19,7$$

$$V_{AD} = \frac{N}{n_A * n_D * ddl_{AB}} \sum_i \sum_j a_i d_j^2 = \frac{488}{2 * 2 * 1 * 1} [(-0,07)^2 + (0,07)^2 + (0,07)^2 + (-0,07)^2] = 19,1$$

$$\text{Et pour la variance du résidu : } V_{résidus} = \frac{1}{\gamma_r} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (S_{ij \text{ exp}} - S_{ith})^2 = 6,1$$

où γ_r - degré de liberté du résidu se calcule comme suit $\gamma_r = N - 1 - \sum ddl_i$ avec N- nombre total de réponses, $S_{ij \text{ exp}}$ - valeur individuelle j de la question i, S_{ith} - valeur par la question i

Le modèle réduit obtenu (pour la catégorie étudiant) est, en l'absence de la phase d'apprentissage :

$$S_{Bu} = 2,75 + (0,345 - 0,345) \text{distance} + (-0,84 \quad 0,84) \text{conditions} + (0,6 - 0,6) \text{temps_dispo}$$

Les modèles de scores sont différents pour les autres modes de transport. Le modèle réduit dont se servira l'agent "étudiant" pour prendre sa décision (mode vélo) est :

$$S_{Ve} = 2,8 + (1,52 - 1,52) \text{météo} + (0,71 - 0,71) \text{risque} + (-0,55 \quad 0,55) \text{dis tan ce} \\ + (-0,5 \quad 0,5) \text{conditions trajet} + \begin{pmatrix} -0,61 & 0,61 \\ 0,61 & -0,61 \end{pmatrix} \text{risque/ conditions}$$

• **ETAPE 5 : PHASE D'ELABORATION DU MODELE DECISIONNEL INCLUANT LA PHASE D' APPRENTISSAGE**

Pour illustrer la démarche employée, une partie du plan orthogonal est présentée dans *Figure-Anx -26*, selon une procédure d'affectation similaire à celle présentée pour l'accessibilité d'un site (table L₈ pour le plan principal et table L₄ pour le plan secondaire).

L'exemple (*Figure-Anx29*) fait apparaître dans le plan principal uniquement les variables significatives (3 pour le bus) et dans le plan secondaire les 3 variables externes qui pourraient affecter la perception de la qualité du déplacement (le choix est arbitraire : informations en temps réel, incidents, degré de congestion).

$L_4(2)^3$

Mode de transport : **BUS**

Scénario	Variables d'entrée			Score	Conditions externes			
	Distance (C)	Conditions pour le trajet (D)	Temps disponible (G)		Information (J)	Sécurité (route) (I)	Congestion (H)	Score
1	courte	avec bagage	pressé		2,8	2,4	2,2	2,7
:
4	longue	sans bagage	pressé		3,8	3,4	3,7	3,4

(*good = bonne / *bad = mauvaise)

Figure-Anx29. Plan produit pour l'apprentissage mode de transport "bus" [Boussier2006]

Le modèle décisionnel incluant la phase d'apprentissage individuel est :

$$S_{Bu} = 2,6 + (0,35 - 0,35) \text{ distance} + (-0,8 - 0,8) \text{ conditions} + (0,5 - 0,5) \text{ temps disponible} + (0,05 - 0,05) \text{ congestion} + (0,1 - 0,1) \text{ sécurité} + (0,03 - 0,03) \text{ information}$$

Prenons dans le tableau "questionnaire avec les résultats de l'enquête" ci-dessous, comme exemple, les variables "conditions-trajet" au niveau 1 et "congestion" au niveau 2 :

				information	oui	non	non	oui
				sécurité	bonne	mauvaise	bonne	mauvaise
				congestion	non	non	oui	oui
Questions	distance	conditions trajet	temps disponible					
1	<5km	avec bagage	pressé		2,7	2,6	2,5	2,7
2	<5km	sans bagage	pas pressé		3,3	3,3	3,2	3,2
3	>5km	avec bagage	pas pressé		1,2	0,9	1,1	0,7
4	>5km	sans bagage	pressé		3,8	3,4	3,7	3,4

2,6

Figure-Anx30. Plan produit appliqué à notre modèle réduit

Le calcul des coefficients donne :

$$a_1 = \frac{2,7 + 2,6 + 2,5 + 2,7 + 1,2 + 0,9 + 1,1 + 0,7}{8} - 2,6 = -0,8$$

$$a_2' = \frac{2,5 + 3,2 + 1,1 + 3,7 + 2,7 + 3,2 + 0,7 + 3,4}{8} - 2,6 = -0,05$$

L'analyse de la variance (pratiquée de la même façon que dans l'exemple précédent) confirme comme variables significatives, la distance, les conditions de trajet, le temps disponible ainsi que le degré de sécurité ressenti par l'utilisateur. Au prochain trajet (même scénario avec les variables d'entrée), l'agent va réévaluer (ou pas) son score selon le degré de sécurité du trajet précédent (variables d'entrée ayant les mêmes valeurs).

Ce plan produit peut être utilisé pour distinguer deux scénarios à valeurs proches et en choisir le plus robuste (peu sensible au bruit de fond, c'est-à-dire aux conditions trafic). À l'aide des scores obtenus, le rapport s/n se calcule comme suit :

$$\left(\frac{s}{n}\right)_j^k = 20 \log \left(\frac{S_j^k}{\sigma_j^k} \right)$$

Les valeurs sont inscrites dans le tableau ci-dessous :

Questions	distance	conditions trajet	temps disponible					écart-type	s/n
				oui	non	non	oui		
				bonne	mauvaise	bonne	mauvaise		
				non	non	oui	oui		
1	<5km	avec bagage	pressé	2,7	2,6	2,5	2,7	0,09	29,03
2	<5km	sans bagage	pas pressé	3,3	3,3	3,2	3,2	0,07	33,58
3	>5km	avec bagage	pas pressé	1,2	0,9	1,1	0,7	0,18	14,54
4	>5km	sans bagage	pressé	3,8	3,4	3,7	3,4	0,19	25,47
								2,6	25,66

Figure-Anx31. Ecart type et rapport s/n pour chaque question du plan produit

Maintenant, prenons un exemple fictif et supposons que l'agent doit effectuer une activité à une distance > 5 km, il pleut, il a des bagages, le risque d'incidents est élevé et il est pressé (certaines de ces variables seront non significatives selon le mode de transport). En utilisant les modèles réduits pour les bus et la voiture, l'agent trouve des scores proches, respectivement, $S_{\text{Bus}} = 1,93$ et $S_{\text{Auto}} = 1,98$. Si le scénario n'est pas dans le plan (c'est le cas pour le bus), le rapport s/n se calcule selon le modèle :

$$s/n = M_{s/n} + (a_1 - a_2)s/n_A + (b_1 - b_2)s/n_B + \dots$$

Pour le bus, s/n correspondant à ce scénario est égal à 25 ; supposons que pour la voiture on obtienne 34. Entre les deux alternatives, l'agent choisira la voiture (à scores quasi-égaux, c'est celui qui est le moins affecté par les conditions trafic et qui, en pratique, acquiert donc la fidélité de l'utilisateur).

Anx. F-5. Modèle décisionnel pour le choix d'un parking à La Rochelle

- **ETAPE 1 : PHASE DE SPECIFICATION**

- **Choix des catégories sociodémographiques :**

Nous nous sommes adressés à deux types de conducteurs (deux groupes sociodémographiques) : **étudiants** de l'Université de La Rochelle (1.728 réponses pour le plan) et **travailleurs** (personnel employé - 608 réponses pour le plan).

- **Choix des variables d'entrée (internes) et de sortie :**

Nous avons mené cette étude en voulant tester un nombre important de variables d'entrée. Pour pallier la séquentialité de l'analyse de l'offre de stationnement, nous avons fait intervenir non seulement des variables liées strictement au parking, mais aussi les priorités de l'usager selon le type d'activité, le scénario de covoiturage et les conditions trafic.

Les variables internes à tester par le régulateur et leurs niveaux respectifs sont présentées dans *Tableau-Anx24*.

Tableau-Anx24. Variables d'entrée utilisées pour le questionnaire

Variables d'entrée	Colonne	Niveau 1	Niveau 2
prix du parking	A	Faible (<0.5 euros)	Elevé (>0.5 euros)
distance jusqu'à la destination	B	Proche (<200 m)	Loin (>200 m)
vitesse de marche à pied	C	Rapide (>3km/h)	Lent (<3km/h)
durée de stationnement	D	Courte (<30 min)	Longue (> 30 min)
nombre de personnes	E	1	> 1
type de l'activité	F	Urgent (fixe)	non urgent (flexible)
qualité de l'infrastructure pour accès au parking	G	Facile (>3 routes)	Difficile (< 3 routes)

Contrairement au choix modal, il s'agit de classer des **alternatives homogènes**, auquel cas des évaluations par valeurs numériques (notes) sont suffisantes pour faire un classement à partir d'un score maximal. Les réponses envisageables sont présentées dans *Tableau-Anx25*.

Tableau-Anx25. Degrés des réponses pour le questionnaire

Evaluation linguistique	Score
jamais	0
exceptionnellement	20
occasionnellement	40

Evaluation linguistique	Score
fréquemment	60
très fréquemment	80
certainement	100



Remarque : Parce que nous avons souhaité disposer de modèles affinés, nous allons volontairement imposer l'étude de quelques interactions entre les effets des variables. Cela alourdira l'algorithme d'initialisation, occasion pour nous de nous placer dans la situation la plus défavorable pour la phase d'apprentissage.

• **ETAPE 2 : PHASE D'ELABORATION DES ENQUETES**

A l'aide de cette table (*Figure-Anx_32*) et du modèle de Vigier, il est possible d'évaluer 128 scénarios.

$L_{16}(2)^{15}$		Graphe linéaire						
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	G
2	1	1	1	2	2	2	2	D
3	1	1	2	1	1	2	2	F
4	1	1	2	2	2	1	1	E
5	1	2	1	1	2	1	2	B
6	1	2	1	2	1	2	1	C
7	1	2	2	1	2	2	1	
8	1	2	2	2	1	1	2	
9	2	1	1	1	1	1	2	
10	2	1	1	2	2	2	1	
11	2	1	2	1	1	2	1	
12	2	1	2	2	2	1	2	
13	2	2	1	1	2	1	1	
14	2	2	1	2	1	2	2	
15	2	2	2	1	2	2	2	
16	2	2	2	2	1	1	1	

Légende :

-  paramètre
-  interaction

Scénario	A	B	C	D	E	F	G
1	pas cher	proche	rapide	courte	1	urgent	facile
2	pas cher	proche	rapide	longue	> 1	Non urgent	difficile
...
15	cher	loin	lente	courte	> 1	Non urgent	difficile
16	cher	loin	lente	longue	1	urgent	facile

Figure-Anx_32. Questionnaire issu de la table $L_{16}(2)^{15}$ ([Taguchi1987])

L'agent "pexavvi" calcule la taille de la table orthogonale. Il s'agit d'une table $L_{16}(2)^{15}$ (c.-à-d. 16 questions) qui permet également d'inclure l'étude des interactions suivantes : AB (prix - distance), AC (prix - vitesse de marche à pied), AD (prix - durée du stationnement), AE (prix - nombre de personnes), AF (prix - activité), AG (prix - accessibilité), BC (distance - vitesse de marche à pied), DG (durée du stationnement - accessibilité)

• **ETAPE 3 : PHASE D'ELABORATION DES MODELES DECISIONNELS**

- Pour les étudiants : L'analyse de la variance désigne comme actions significatives, le prix (A), la distance entre le parking et le point d'attraction (B), l'accessibilité (G), la vitesse de marche à pied (C) et l'interaction AG (prix - accessibilité) :

Équation 5-11 :

$$S = 39,98 + (12,7 - 12,7)A + (7,64 - 7,64)B + (4,5 - 4,5)C + (6,77 - 6,77)G + \begin{pmatrix} 4,36 & -4,36 \\ -4,36 & 4,36 \end{pmatrix} AG$$

- Pour les travailleurs : Le modèle réduit fait apparaître le type d'activité (F) à la place de la vitesse de marche à pied (C) :

Équation 5-12 :

$$S = 39,85 + (12,6 - 12,6)A + (11,75 - 11,75)B + (3,47 - 3,47)F + (6,5 - 6,5)G + \begin{pmatrix} 4,04 & -4,04 \\ -4,04 & 4,04 \end{pmatrix} AG$$

Anx. F-6. Modèle décisionnel pour le comportement à La Rochelle lors de l'absence d'une place de stationnement

• **ETAPE 1 : PHASE DE SPECIFICATION**

- *Choix des catégories sociodémographiques :*

Le questionnaire a été adressé à 86 étudiants. Du fait du nombre réduit de réponses recueillies, une discrétisation par sexe n'a pas pu être envisagée.

- *Choix des variables d'entrée (internes) et de sortie :*

S'agissant de classer des **alternatives hétérogènes** qui sont évaluées par une fréquence de choix, la contrainte imposée par l'élaboration des scénarios de ce type d'alternative est que toutes les variables d'entrée soient communes (sinon toute comparaison de scores est caduque). Aussi, avant de construire les plans à préférences déclarées, un échantillon réduit de

personnes concernées (étudiants master LEMMA-ULR) a été réuni pour former un groupe de discussion. Par souci de simplification, le but était de cerner si les variables sélectionnées pour modéliser le choix d'un parking (paragraphe §□) pouvaient être testées pour le choix d'une alternative plutôt qu'à une autre, en l'absence d'une place de stationnement. Ainsi la variable « facilité offerte par l'infrastructure pour un accès au parking » n'a, par exemple, rien à voir avec le souhait de reporter son activité (dernière alternative). Pour l'alternative 4 (différer l'activité), les variables distance de marche à pied et prix concernent le parking qui était classé en première position. Au départ, aucune interaction entre variables n'a été pressentie.

Pour les variables de sortie, il s'agit de faire le choix entre quatre alternatives hétérogènes. La réponse apparaît sous la forme d'une fréquence de choix. Nous nous trouvons dans le cas qui nécessite l'emploi des plans orthogonaux couplé à la fusion d'informations par la théorie de Dezert-Smarandache et le modèle de Vigier.

Finalement, les variables d'entrée retenues et les réponses potentielles sont présentées dans le tableau ci-dessous (*Tableau-Anx26*). Pour faciliter le choix, nous avons fixé arbitrairement (comme peut le faire le régulateur) les niveaux suivants pour 4 variables d'entrée. On se place dans le contexte de devoir effectuer une activité "fixe".

Tableau-Anx26. Définition des variables d'entrée et des évaluations

Variables d'entrée	Niveau 1	Niveau 2	Réponse linguistique
Météo	favorable	défavorable	très rarement
Nb personnes	= 1	> 1	parfois
Durée de l'activité	courte	longue	souvent
Distance	courte	longue	très souvent
Prix parking	faible	élevé	
Importance activité	faible	haute	

• **ETAPE 2 : PHASE D'ELABORATION DES ENQUETES**

La table transmise par l'agent "pexavvi" au régulateur est la $L_8(2)^7$. La démarche d'élaboration du modèle décisionnel et celle du mécanisme d'apprentissage peuvent être contenues dans une même enquête, du fait du nombre réduit de variables à tester.

Nous présentons dans *Figure-Anx_33* un exemple de plans croisés soumis pour l'alternative A1 (faire des tours autour du parking en espérant qu'une place se libère). Avec la table utilisée et le graphe linéaire associé (*Figure-Anx -26*), l'effet moyen de l'interaction "temps / distance parking-destination" est également évalué.

Scénario	$L_q(2)^A$						$L_q(2)^B$							
	Météo	Nbre de personnes	Durée	Distance	Prix du parking/heure	Importance	Conditions externes							
			Activité	Activité			Information	Sécurité	Accessibilité	Score				
1	favorable	= 1	longue	courte	cheap	faible	yes	good	good	1	2,9	1,8	2,3	2,4
:	...	...	...	...	...	...	no	bad	good	2	...	...	...	...
5	pas favorable	= 1	courte	courte	cheap	haute	no	good	bad	3	0,5	0,4	0,4	0,45
:	...	...	...	...	...	...	yes	bad	bad	4	...	...	...	...
8	pas favorable	> 1	longue	longue	cheap	haute					1,2	1,2	1,3	1,4

Figure-Anx_33. Plans croisés pour la modélisation du comportement des agents "étudiants"

• ETAPE 3 : PHASE D'ELABORATION DES MODELES DECISIONNELS

Après collecte d'informations, le régulateur transmet la base de données à l'agent "pexavvi". Chaque personne interrogée est une source d'informations. Selon la démarche détaillée dans le chapitre 3 (paragraphe §3.6.3.B), l'approche de Dezert-Smarandache permet de convertir les évaluations linguistiques en jeux de masses, affaiblies éventuellement, et de les fusionner en prenant en compte le caractère indécis de certains choix et le conflit entre les répondants. Après l'application de la transformation pignistique, pour chaque alternative, l'agent "pexavvi" dispose de scores qui sont à l'image de la fréquence d'un choix de l'alternative pour une catégorie sociodémographique donnée.

Les modèles associés au plan produit et correspondant aux quatre alternatives présentent la forme analytique décrite par :

$$\begin{aligned}
 S(A_i) = & M + (m_1 \ m_2) \text{ météo} + (n_1 \ n_2) \text{ nombre} + (d_1 \ d_2) \text{ durée} + (D_1 \ D_2) \text{ distance} \\
 & + (p_1 \ p_2) \text{ prix} + (ia_1 \ ia_2) \text{ importance} + \underbrace{\begin{pmatrix} d_1 D_1 & d_1 D_2 \\ d_2 D_1 & d_2 D_2 \end{pmatrix}}_{\text{durée-distance}} \\
 & \underbrace{+ (c_1 \ c_2) \text{ congestion} + (s_1 \ s_2) \text{ sécurité} + (i_1 \ i_2) \text{ information}}_{\text{variables externes (c.-à-d. pendant le déplacement)}} \\
 & \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{variables d'entrée internes (c.-à-d. avant le déplacement)}}
 \end{aligned}$$

L'application de la méthode de Vigier permet d'élaborer quatre modèles pour les alternatives correspondant aux variables qui justifient le choix de l'alternative (en amont) et l'effet des conditions trafic (en aval). Après l'analyse de la variance (ANOVA), sont retenues uniquement les variables et les interactions significatives.

ANNEXE G - Tests et validation d'un modèle

Lorsqu'il s'agit de valider nos modèles, nous avons en vue deux choses distinctes :

- d'abord, cette approche est-elle fiable en termes de description d'un comportement "moyen" ? Comment la valider ? Certaines de ces études ont été effectuées pour tous les modèles élaborés, d'autres partiellement. Nous le préciserons.
- quelles procédures implémenter au niveau du simulateur et quelles informations, faciles à interpréter, seront transmises au régulateur ? Nous les mentionnerons.

- **Les modèles sont ils représentatifs d'une catégorie sociodémographique ? :**

Dans un premier temps, on peut se demander si les réponses sont significatives de préférences de la catégorie "étudiants" (488 réponses). Une analyse statistique (sans prétention) a été menée pour connaître la fréquence d'apparition d'une réponse pour chaque question. Pour le mode Bus, les résultats obtenus sont présentés dans la première figure page suivante.

On peut remarquer qu'il y a des réponses pour lesquelles la fréquence d'apparition d'un choix est généralement entre 85% et 95%, alors que d'autres sont à 65%. Une ACP (Analyse en Composantes Principales – logiciel S-Plus) a permis de mettre en évidence deux aspects :

- d'abord, des réponses aberrantes sont identifiées (pour faciliter la présentation, dans la 2^{ème} figure page suivante, un exemple de 27 personnes prises au hasard) ; à l'analyse, l'individu 8 devrait être exclu.

- par ailleurs, les résultats montrent que ce sont les questions 3, 4, 7, 8 à réponses dispersées ; à l'analyse, elles ont en commun la variable "risque d'incidents" qui se trouve sur la modalité "élevé". Or, environ un tiers des réponses proviennent d'étudiantes, ce qui montre qu'une discrétisation supplémentaire par genre aurait pu (ou dû) être pratiquée. Le nombre de réponses des étudiants nous a semblé insuffisant.

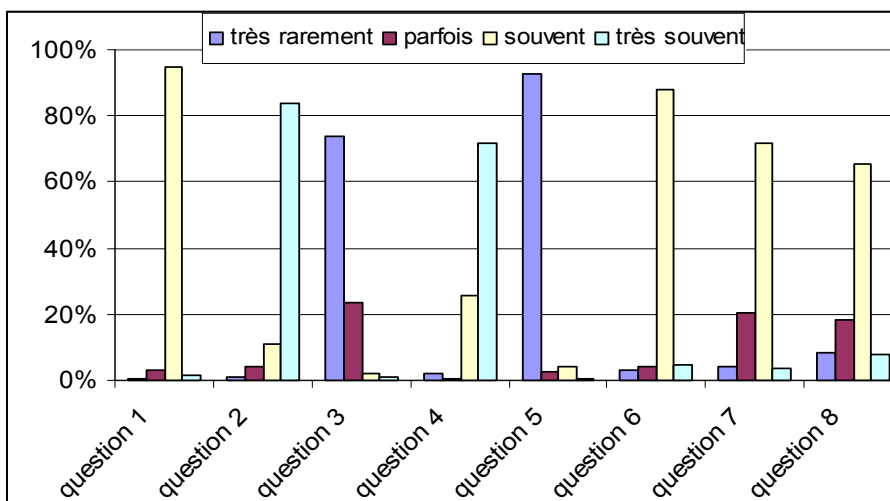


Figure-Anx34. Fréquence d'apparition des réponses par question pour mode Bus

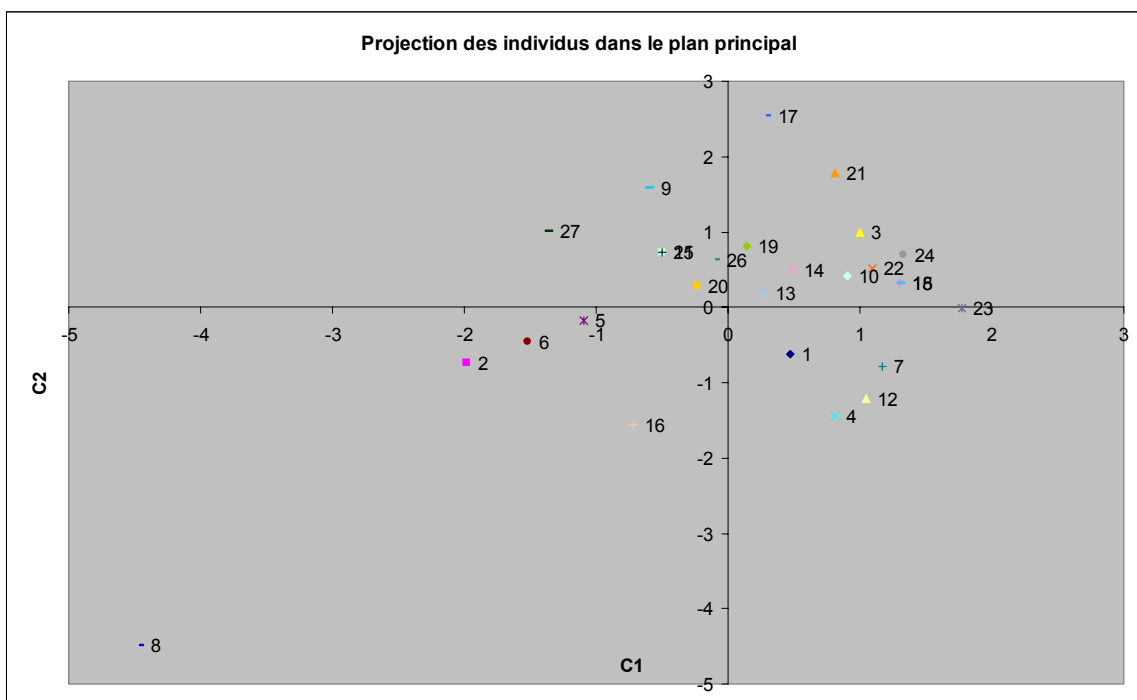


Figure-Anx35. ACP – projection des réponses dans le plan principal

Remarque : Le premier type d'analyse a été pratiqué pour toutes les études faites dans ces travaux (modes de transport, accessibilité, attractivité, parking, choix d'itinéraire autour du parking) afin de vérifier que le comportement des usagers est représentatif pour une certaine catégorie (généralement, la fréquence d'apparition d'une réponse dépasse 80% des réponses). D'ailleurs, ceci sera une information transmise par l'agent "pexavvi" au régulateur, ce dernier devant valider ainsi la simulation (non-implémenté pour l'instant). En revanche, l'ACP ne sera pas implémentée au risque d'être mal interprétée par le régulateur pour la troncature de l'échantillon (nous avons été confrontés à cette question). En effet, si les

données sont réactualisées par de nouvelles enquêtes, les réponses "aberrantes" risquent d'être le résultat de changements endogènes. Si pour des alternatives hétérogènes on peut admettre avoir des scores de type 3,5 (avec une fréquence d'apparition des réponses de l'ordre de 80%) car affaiblissement, redistribution de probabilités, l'explication n'est pas la même pour les alternatives homogènes (accessibilité, attractivité, parkings). Les scores étant des entiers, ce genre de valeurs a une toute autre explication ; les résultats exploités sont le cumul de deux séries d'enquêtes pratiquées à une année d'intervalle (le sens de circulation dans le centre ville ayant changé entre temps). C'est une réactualisation, nous la reconnaissons simpliste, des préférences mais qui deviendrait caduque si une procédure de troncature était appliquée.

- **Comment valider le modèle ?**

Il existe plusieurs façons de vérifier la validité d'un modèle issu d'un plan d'expériences.

Premièrement, à l'aide de l'ANOVA. Rappelons que ce qu'on a obtenu est la part déterministe du modèle et que le résidu est composé de tout ce qui n'est pas pris en compte. Cela signifie que si une variable importante n'a pas été prise en compte, le résidu sera grand et l'analyse de la variance indiquera que le modèle n'est pas valable.

Deuxième, la variance de répétabilité peut être également estimée :

$$V_{répétitions} = \frac{1}{N - n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (S_{ij \text{ exp}} - \bar{S}_i)^2$$

avec n - nombre de questions et \bar{S}_i - la moyenne de la question i

Le rapport $V_{résidus}/V_{répétitions}$ permet de vérifier (à travers le test Fisher-Snedecor) que le résidu n'est pas significativement différent de la variance de répétabilité et ainsi de valider le modèle.

- **Comment évaluer et communiquer le degré d'incertitude sur les effets moyens ?**

Lors de la phase d'implémentation, il est prévu qu'au niveau de l'interface, le régulateur soit informé de deux manières par l'agent "pexavi" sur la validité du modèle :

- par une simple confirmation (valide ou non valide), à partir de la signification du rapport $V_{résidus}/V_{répétitions}$
- au niveau d'une représentation graphique, dans l'optique d'une représentation séquentielle des résultats (voir paragraphe...). L'incertitude de la valeur moyenne pour chaque niveau est calculable en utilisant la variance de répétabilité. L'intervalle de confiance sur la réponse moyenne, pour chaque niveau d'une variable A, est :

$$I = t_{(v; 1-\alpha/2)} \sigma \sqrt{\frac{n_A}{N}}$$

avec n_A - niveaux a pour demi largeur ; $\sigma = \sqrt{V_{\text{répétitions}}}$; $t_{(\nu; 1-\alpha/2)}$ - valeur du coefficient de Student pour ν degrés de liberté au niveau de confiance $1-\alpha$ (on prend généralement $1-\alpha/2 = 0,975$, correspondant au risque de 5%) ; ν - nombre de ddl de la variance

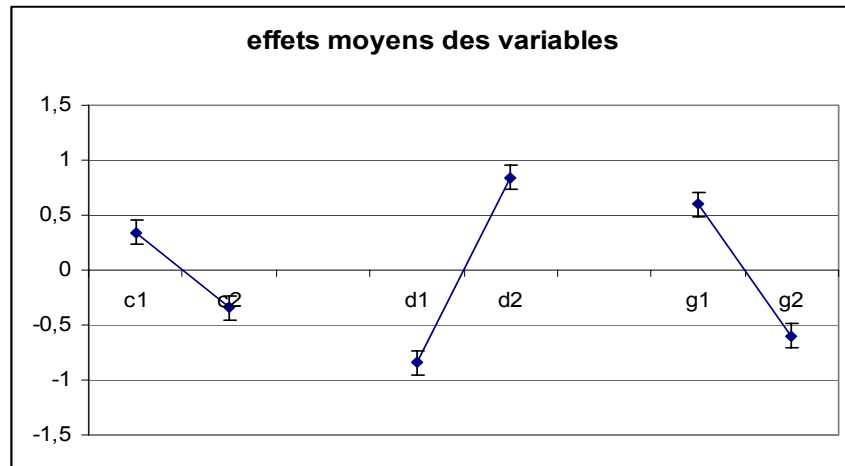


Figure-Anx36. Graphe (pour IHM du régulateur) des effets moyens des variables

- Comment vérifier le caractère prévisionnel du modèle ?

En pratique, l'idéal serait l'analyse des résultats issus des surveillances ou d'enquêtes à préférences observées (pour 1 ou 2 scénarios du plan), c'est-à-dire la distribution des choix parmi les quatre alternatives. Cela n'a pas pu être réalisé et c'est un manque évident dans notre approche de validation.

Pour pallier cet aspect, nous avons inséré une question supplémentaire hors plan (A2, B2, C2, D2, G2) dans le questionnaire. Cela a été fait uniquement pour les modes de transport et le choix des parkings. Les scores obtenus pour cette 9^{ème} question (cas du bus) n'ont pas été utilisés pour le calcul du modèle précédent.

Le score obtenu doit correspondre, à la variance près, au score donné par le modèle (on peut se résumer au modèle réduit) :

$$S_{th}(A2, B2, C2, D2, G2) = 2,53$$

Le résultat obtenu par fusion d'informations est $\bar{S} = 2,42$. Alors, y-a-t-il une différence significative ? Pour y répondre, nous avons utilisé un test de validité permettant d'évaluer si le score moyen \bar{S} est différent de S_{th} , ce qui revient à vérifier si $|\bar{S} - S_{th}|$ est significativement différent de zéro. Pour ce faire, on part de l'hypothèse que la variable étudiée ($S - S_{th}$) suit une loi normale.

La variable du type $|\bar{S} - S_{th}|$ a une moyenne : $S_{moy} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (S_i - S_{th}) = 0,11$ et un écart-

$$\text{type } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N'} [(S_i - S_{th}) - S_{moy}]^2}{N' - 1}} = 0,02 \text{ où } N' = 24 \text{ (nombre de réponses collectées)}$$

Le rapport $\frac{N'(S_{moy} - \mu)}{\sigma}$ suit une loi de Student à $N' - 1$ degrés de liberté ν où μ est l'espérance d'une loi normale $\Phi(\mu, \sigma)$. La probabilité P donne les limites pour μ , au niveau de confiance $(1 - \alpha)$:

$$P\left(S_{moy} - \frac{\sigma}{\sqrt{N'}} t_{(\nu, 1 - \alpha/2)} \leq \mu \leq S_{moy} + \frac{\sigma}{\sqrt{N'}} t_{(\nu, 1 - \alpha/2)}\right) = 1 - \alpha$$

Avec $t_{(\nu, 1 - \alpha/2)}$ coefficient de Student pour ν degrés de liberté, au niveau de confiance unilatéral $1 - \alpha/2$

Pour un risque de 5%, $t_{(\nu, 1 - \alpha/2)} = 2,4$ donc $0,055 \leq \mu \leq 0,17$ donc il n'y a pas de différence significative au risque 5% entre le score obtenu par le modèle et celui obtenu par fusion d'informations.

Des tests similaires ont été pratiqués pour le choix des parkings. Malgré le nombre important de réponses pour cette question supplémentaire (104), nous avons utilisé comme procédure généralisée la loi de Student car elle tend vers la loi normale pour N' grand, mais pas l'inverse. Cette procédure ne sera pas implémentée, elle sert à valider sur le plan conceptuel la validité du caractère prévisionnel du modèle.

Remarque : Comme les plans sont uniquement à 2 niveaux (pour réduire le nombre de questions dans le questionnaire), l'idéal était l'application d'un test de validité de l'hypothèse d'évolutions linéaires. Cela aurait nécessité une question supplémentaire avec des variables quantitatives uniquement au niveau moyen entre les niveaux 1 et 2 (par exemple, = 15 km si niveau1 = 10 km et niveau2 = 20 km) Dans l'hypothèse d'effets linéaires, les effets moyens seraient nuls, le score moyen fourni par les réponses des étudiants à cette question devrait correspondre (à la variance près) à la moyenne de tous les scores du plan (les 8 questions posées). Cela permettrait d'envisager des "ajustements" par extrapolation ou interpolation (pour l'optimisation par exemple). La procédure n'est pas implémentée car elle nécessite uniquement des variables quantitatives qui peuvent varier continuellement.

ANNEXE H - Quelques pistes pour aborder les phases préliminaires au déplacement

• CHAÎNE DE DEPLACEMENT - CHOIX D'UNE HEURE DE DEPART

Nous livrons quelques réflexions concernant des phases préliminaires d'organisation des déplacements qui n'ont pas été abordées que tangentiellement : génération de population, génération des activités, élaboration d'un agenda (avec choix d'activités, hiérarchisation, destinations pour les activités fixes, heure de départ, itinéraire).

- **Génération de la population :** La plupart des études s'intéressent uniquement au déroulement des activités et considèrent que la génération des déplacements est une donnée exogène. Jusqu'au développement du module génération de population (aucun simulateur trafic basé sur les activités, en particulier ne l'a encore développé d'une façon opérationnelle), on peut considérer dans un premier temps que les groupes d'agents d'individus sont uniformément distribués dans toutes les zones qui sont à densité démographique constante.

Les usagers du réseau routier sont classés en S groupes basés sur les caractéristiques socio-économiques des zones. Ensuite chaque individu est considéré ayant le même niveau de revenu, même âge, etc.

- **Génération des activités :** Pour une représentation réaliste de la distribution des flux sur le réseau, nous pensons qu'il faut prendre en compte non seulement la demande d'activités, mais aussi l'offre avec ses contraintes (utiliser le taux de fréquentation des points d'attraction par créneaux horaire, jour et saison et leur durée moyenne). Cela permet une distribution statistique réaliste des activités et des flux. Comme résultat, les agendas des agents sont remplis en accord avec une limite supérieure de fréquentation par créneau horaire.

Dans ce cas, un agent distributeur pour l'attribution centralisée des activités s'informe auprès des agents "Points d'attraction" sur le taux de fréquentation de chaque point d'attraction. La durée moyenne d'une activité, renseignée par chaque agent "Points d'attraction", permet de gérer le flux entrant et sortant d'un bâtiment.

- **Espace des activités fixes :** A cet égard on peut adapter la définition de l'espace d'action proposée par Dijkstra et al (1997) qui considère que l'espace dans lequel se déroulent les activités est une ellipse :

$$\frac{(x - \frac{l}{2})^2}{(\frac{\tau TV}{2} + \frac{L}{2}(1 - \tau))^2} + \frac{y^2}{(\frac{\tau TV}{2} + \frac{L}{2}(1 - \tau))^2 - (\frac{L}{2})^2} \leq 1$$

avec x, y – coordonnées des points appartenant à l'espace-action

T - temps équivalent argent (appelée souvent VOT – value of time)

- V - vitesse de déplacement
- τ - rapport entre le VOT et le temps proprement dit
- L - distance entre deux arrêts (quand il n y a pas d'arrêt $\tau=1$, l'ellipse devient une droite et VOT est investi dans le trajet travail-maison)

- **Génération des agendas :** Nous proposons un agenda sur la semaine (5 jours ouvrés et 2 WE). Un des scénarios, dont les données sont issues en partie de travaux d'analyse statistique [Cirillo2002], peut être :
 - pour les travailleurs, 40 h d'activités obligatoires, 6 h activités flexibles dont 4 non-unique
 - pour les non-travailleurs, 5 h d'activités obligatoires, 14 h flexibles dont 10 non-unique
 - pour les touristes, 40 h d'activités flexibles dont la moitié non-flexibles

L'intérêt d'établir son agenda pour une semaine est de pouvoir reporter à un autre jour certaines activités flexibles en cas de manque de temps pour les effectuer, impossibilité de trouver une place de stationnement. Pour cette raison, nous utilisons des agendas "type" (ou un patron) prenant en compte l'âge, le sexe des personnes, la catégorie sociale, le statut en ville (local ou touriste).

- **Hiérarchisation des activités :** Nous considérons que les activités obligatoires sont celles prioritaires et se déroulent en premier. La probabilité qu'un déplacement pour une activité flexible soit le premier de la journée sera calculée, selon [Bhat2003b] :

$$P_q(G=1) = \frac{1}{1 + e^{-\left[\left(\sum_{i,t} \gamma_{it} \omega_{qti}\right) + \beta' \left(\sum_z \delta_{qz} x_z\right)\right]}}$$

avec G - terme qui peut prendre la valeur 1 si le voyage est le premier de la journée, 0 sinon ;

- t - indice de l'intervalle de temps de la journée ;
- i - indice d'une activité établie préalablement ;
- ω_{qti} - variable prenant la valeur 1 si le trajet q pour faire l'activité i a lieu dans l'intervalle t, 0 sinon ;
- δ_{qz} - variable prenant la valeur 0 si le trajet q a son origine dans la zone z, 0 sinon ;
- x_z - vecteur des caractéristiques spatiale de la zone z ;
- γ_{it} - constantes à calibrer ;
- β' - vecteur indiquant l'effet des caractéristiques zonales sur la probabilité d'un premier déplacement.

- **L'enchaînement de ces phases** qu'on peut proposer dans un premier temps peut être schématisé comme dans *Figure-Anx37*.

- **Choix de l'heure de départ et des itinéraires :**

Si on peut toujours admettre, comme dans la plupart des travaux, que pour des destinations fixes (emploi, école), le choix de l'heure de départ est fixé par les contraintes horaires (choix d'un temps minimal de trajet associé à une distance minimale), il n'en est pas de même pour les activités flexibles : les usagers, qui ne sont pas soumis à des contraintes d'horaires strictes, sont sensibles aussi bien au temps de trajet, à la distance, à la sécurité du trajet ou encore à la facilité de stationner selon le créneau horaire.

La théorie de Dezert-Smarandache pour les variables floues [Dezert-Smarandache2006] trouve ici tout son intérêt. Couplée à la méthode des plans orthogonaux, le modèle élaboré par la méthode de Vigier peut répondre à deux réponses à la fois : choix de l'heure de départ et de l'itinéraire. Pour notre exemple fictif (*Tableau-Anx27*), le régulateur peut utiliser les quatre variables afin d'établir un plan orthogonal.

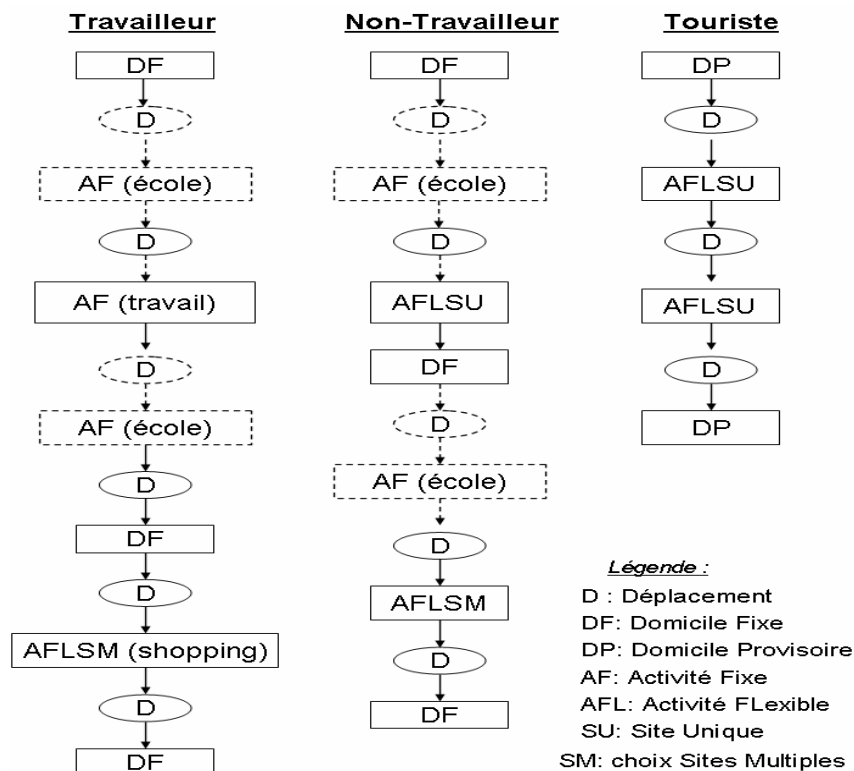


Figure-Anx37. Exemple de chaînes de déplacements entre activités

Tableau-Anx27. Questionnaire pour le choix du moment de départ vers une destination

question	<u>Variables d'entrée</u>				<u>Choix</u>		
	Temps	Distance	Sécurité	Stationnement	matin	midi	soir
1	court	longue	bonne	mauvais	rarement	souvent	fréquemment
...
3	long	courte	bonne	mauvais	souvent	rarement	fréquemment
...

Il s'agit de classer des alternatives hétérogènes, donc la fusion de données par catégorie sociodémographique doit se faire par la méthode de Dezert-Smarandache. Prenons le cadre de discernement suivant :

$$\Theta = \{ \Theta_1 = \text{matin}; \Theta_2 = \text{midi}; \Theta_3 = \text{soir} \}$$

Supposons que les jeux de masses obtenus pour deux personnes appartenant à la même catégorie soient respectivement :

$$m_1(\Theta_1) = 0,1 ; \quad m_1(\Theta_2) = 0,4 ; \quad m_1(\Theta_3) = 0,2 ; \quad m_1(\Theta_1 \cup \Theta_2) = 0,3$$

$$m_2(\Theta_1) = 0,5 ; \quad m_2(\Theta_2) = 0,1 ; \quad m_2(\Theta_3) = 0,3 ; \quad m_2(\Theta_1 \cup \Theta_2) = 0,1$$

La matrice des masses peut être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.3 \\ 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}$$

En appliquant le modèle classique (libre) de DSMT pour fusionner les informations, nous avons :

$$m_c(\Theta_1) = 0,1 * 0,5 + 0,1 * 0,1 + 0,5 * 0,3 = 0,21$$

$$m_c(\Theta_2) = 0,11 ; \quad m_c(\Theta_3) = 0,06$$

$$m_c(\Theta_1 \cup \Theta_2) = 0,3 * 0,1 = 0,03$$

$$m_c(\Theta_1 \cap \Theta_2) = 0,1 * 0,1 + 0,4 * 0,5 = 0,21$$

$$m_c(\Theta_1 \cap \Theta_3) = 0,13 ; \quad m_c(\Theta_2 \cap \Theta_3) = 0,14$$

$$m_c(\Theta_3 \cap (\Theta_1 \cup \Theta_2)) = 0,3 * 0,3 + 0,2 * 0,1 = 0,11$$

Bien sûr la masse $m_c(\Theta_1 \cup \Theta_2)$ illustre la probabilité de faire son activité le matin ou le midi, tandis que $m_c(\Theta_1 \cap \Theta_2)$ permet de quantifier l'ambiguïté de la définition d'une période (une activité qui peut commencer le matin ET continuer le midi. En revanche, $\Theta_1 \cap \Theta_3$ est une contrainte nulle car il n'y a pas d'ambiguïté entre les deux possibilités. Le modèle hybride permet de redistribuer cette masse.

Deux modules sont censés de fournir des informations sur la distribution locale des activités et de leurs effets :

- *le module aménagement du territoire, à travers son sous-module "points d'attractions" :* Comme chaque bâtiment doit disposer d'un taux de fréquentation prédéfini par créneau horaire, il est possible d'évaluer la concentration potentielle des usagers dans une zone donnée. Cette information, chiffrée, sera corrigée en temps réel par la fréquentation des points d'attractions qui peut être différente de celle escomptée par des interactions entre agents "individus" lors du déplacement (incidents, bouchons,...) ou par le manque de disponibilité de places de stationnement (activités reportées).
- *le module trafic, qui, pour des tronçons de routes, peut fournir des informations chiffrées concernant la vitesse moyenne, le débit, le nombre de bouchons, etc.*

- **au niveau de la ville**

La méthode que nous proposons d'employer est inspirée des travaux de [Bailey1995]. Elle réside dans la visualisation surfacique d'une information ponctuelle discrète avec lissage par la méthode des noyaux.

On estime en tout lieu de l'espace, l'intensité d'un phénomène (par exemple le taux de fréquentation des points d'attraction, le nombre de voitures en mouvement ou de voitures stationnées) en balayant de façon systématique la zone d'étude par des fenêtres mobiles circulaires dont le nombre total et le rayon sont définis au préalable par l'utilisateur (régulateur). Le nombre de points d'attractivité ou de voitures dénombrés dans une fenêtre est pondéré en fonction de leur distance euclidienne au centre de cette fenêtre circulaire car tous les points recensés au sein d'une fenêtre ne participent pas de manière équivalente à l'intensité locale, estimée au centre de la fenêtre mobile. L'ajout d'une fonction de pondération décroissante permet de prendre en compte cette variabilité.

La formule finale qui donne la distribution des points d'attraction (un indicateur de densité initiale global) est la somme des distances pondérées de tous les points au centre de la fenêtre sur la surface de cette fenêtre :

$$\lambda(X) = \frac{1}{r^2(X)} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{|X - X_i|}{r(X)}\right)$$

où :

$\lambda(X)$ est le nombre de points d'attraction ou de voitures en un lieu X ,

X étant centre de la fenêtre mobile

$r(X)$ le rayon adaptatif

k la fonction de pondération par la distance

X_i la coordonnée du point d'attraction ou de la voiture

Des incidents trafic (bouchons, congestion autour des parkings, etc.) peuvent être pris en compte à travers une autocorrélation spatiale basée sur l'hypothèse que ce qui se passe en un lieu géographique donné dépend de ce qui se passe dans les lieux voisins. Ces autocorrélations prennent en compte la position relative des lieux les uns par rapport aux autres. Ce type d'analyse trouve l'utilité notamment pour la recherche de zones encombrées,

en individualisant des configurations particulières (des lieux se comportant très différemment de leurs voisins), en identifiant des agrégats de lieux proches géographiquement et structurellement.

Par exemple, dans notre cas, en interrogeant les agents "points d'Attractions", il est possible de connaître la distribution spatiale des points d'attractivité dans la ville à chaque instant donné, selon les horaires d'ouverture, le jour (ouvré ou weekend) et la période (saison ou hors saison). Dans l'hypothèse où les déplacements sont générés par l'attractivité des zones, une recherche de concentrations spatiales permet de déceler des activités trafic et parking impossibles à déceler par simple lecture visuelle du semis de points.

Une représentation cartographique 3D permettrait de visualiser facilement les pics d'intensité d'un phénomène, leurs évolutions en termes d'intensité ou de positionnement au niveau de la ville.

Liste des figures de l' Annexe

<i>Figure-Anx1.</i> Schéma des interactions du système urbanisation-transports [DePalma2004]	267
<i>Figure-Anx2.</i> Cycle d'interaction transport-urbanisation [Wegener1996]	268
<i>Figure-Anx3.</i> Réseau à 52 polygones [Steiner2003].....	269
<i>Figure-Anx4.</i> Image provenant de TycoonCity (Atari) et CityLife (Monte Cristo)	269
<i>Figure-Anx5.</i> Schéma de comparaison Objet-Agent [Harrouet2000].....	280
<i>Figure-Anx6.</i> Schéma d'agents logiciels [Sabas2001].....	281
<i>Figure-Anx7.</i> Structure classique d'un agent logiciel [Chicoisne2002]	282
<i>Figure-Anx8.</i> Comparaison entre les approches IA et IAD / SMA [Charton2003].....	283
<i>Figure-Anx9.</i> Les vues selon UML	285
<i>Figure-Anx10.</i> Les diagrammes UML, une vue particulière du système.....	286
<i>Figure-Anx11.</i> Approche SMA – UML dans un environnement de modélisation et simulation [Galland2001].....	286
<i>Figure-Anx12.</i> Communication synchrones et asynchrones [Kriaa2000]	287
<i>Figure-Anx13.</i> Activité représentée par une place dans un réseaux de Petri [Adam2000]..	289
<i>Figure-Anx14.</i> Exemple d'automate à états modélisant une interaction [Charton2003]	289
<i>Figure-Anx15.</i> Exemple de réseau de Petri modélisant la même interaction [Charton2003]	290
<i>Figure-Anx16.</i> Acte de langage représenté par un réseau de Petri [Bourdon2002].....	290

<i>Figure-Anx17.</i> Nommages des places et transitions des réseaux de Petri colorés.....	292
<i>Figure-Anx18.</i> Réseaux de Petri colorés du processus de négociation pour le convoiturage.	294
<i>Figure-Anx19.</i> Détail des places principales "négociation pour le convoiturage"	294
<i>Figure-Anx20.</i> Schéma des modules de simulation de TRANSIMS [Nagel2004].....	295
<i>Figure-Anx21.</i> Modules du simulateur ALBATROSS	297
<i>Figure-Anx22.</i> Architecture d'un agent pour l'apprentissage [Paquet2004]	300
<i>Figure-Anx23.</i> Représentation de la règle classique de DSMT pour $M_f^{(6)}$ [Dezert-Smarandache2004].....	305
<i>Figure-Anx24.</i> Processus de décision avec l'approche de Dezert-Smarandache hybride [Dezert-Smarandache2004].....	307
<i>Figure-Anx25.</i> Domaine d'étude [Doehlert1970].....	310
<i>Figure-Anx -26.</i> Table $L_8(2)^7$ avec ses interactions et le graphe linéaire retenu.....	311
<i>Figure-Anx27.</i> Affectation des colonnes au moyen du graphe linéaire	323
<i>Figure-Anx28.</i> Effets moyens des variables et interactions issus de l'évaluation des scores	328
<i>Figure-Anx29.</i> Plan produit pour l'apprentissage mode de transport "bus" [Boussier2006]	331
<i>Figure-Anx30.</i> Plan produit appliqué à notre modèle réduit.....	331
<i>Figure-Anx31.</i> Ecart type et rapport s/n pour chaque question du plan produit	332
<i>Figure-Anx_32.</i> Questionnaire issu de la table $L_{16}(2)^{15}$ ([Taguchi1987])	334
<i>Figure-Anx_33.</i> Plans croisés pour la modélisation du comportement des agents "étudiants"	337
<i>Figure-Anx34.</i> Fréquence d'apparition des réponses par question pour mode Bus.....	339
<i>Figure-Anx35.</i> ACP – projection des réponses dans le plan principal.....	339
<i>Figure-Anx36.</i> Graphe (pour IHM du régulateur) des effets moyens des variables	341
<i>Figure-Anx37.</i> Exemple de chaînes de déplacements entre activités.....	345
<i>Figure-Anx38.</i> Variables linguistiques selon le formalisme de la logique floue	347

Liste des tableaux de l' Annexe

<i>Tableau-Anx1.</i> Modèles de déplacement urbain intégrés.....	266
<i>Tableau-Anx2.</i> Modélisation de déplacement urbain "purement" trafic	273
<i>Tableau-Anx3.</i> Liste des libellés des places et transitions	293

<i>Tableau-Anx4.</i> Eléments de l'hyperensemble D^{\odot} de la DSMT [Dezert-Smarandache2004]	307
<i>Tableau-Anx5.</i> Estimation de la taille mémoire requise pour mémoriser les éléments de D^{\odot}	308
<i>Tableau-Anx6.</i> Table orthogonale de l'accessibilité avec ses variables d'entrée et niveaux	312
<i>Tableau-Anx7.</i> Scénarios hypothétiques à évaluer.....	314
<i>Tableau-Anx8.</i> Table orthogonale de l'attractivité avec ses variables d'entrée et niveaux ..	314
<i>Tableau-Anx9.</i> Variables d'entrée et niveaux pour déterminer l'affinité d'un site.....	316
<i>Tableau-Anx10.</i> Liste des valeurs des variables d'entrée pour la détermination de l'affinité	316
<i>Tableau-Anx11.</i> Table de Vérité des règles pour déterminer le niveau d'affinité d'un site .	317
<i>Tableau-Anx12.</i> Détermination de la valeur correspondant au niveau "très forte" pour l'affinité.....	317
<i>Tableau-Anx13.</i> Détermination des valeurs des 3 niveaux d'affinité	318
<i>Tableau-Anx14.</i> Exemple de calcul de l'"affinité" avec ses variables d'entrée floues	319
<i>Tableau-Anx15.</i> Variables d'entrée avec leurs niveaux respectifs.....	320
<i>Tableau-Anx16.</i> Liste des réponses possibles au questionnaire	321
<i>Tableau-Anx17.</i> Table $L_8(2)^7$ pour plans d'expériences	322
<i>Tableau-Anx18.</i> Table $L_8(2)^7$ pour plans d'expériences	323
<i>Tableau-Anx19.</i> Variables d'entrée avec réponses pour deux alternatives (vélo et automobile)	324
<i>Tableau-Anx20.</i> Exemple d'affectation (exprimée en pourcent) de masses et de probabilités pignistiques pour le choix entre les modes de transport (alternatives)	327
<i>Tableau-Anx21.</i> Scores moyens du mode "Bus" pour le questionnaire sur le choix modal .	327
<i>Tableau-Anx22.</i> Tableau de l'analyse de la variance (ANOVA).....	329
<i>Tableau-Anx23.</i> Détermination des variables à retenir pour un modèle réduit.....	329
<i>Tableau-Anx24.</i> Variables d'entrée utilisées pour le questionnaire	333
<i>Tableau-Anx25.</i> Degrés des réponses pour le questionnaire.....	333
<i>Tableau-Anx26.</i> Définition des variables d'entrée et des évaluations	336
<i>Tableau-Anx27.</i> Questionnaire pour le choix du moment de départ vers une destination....	345

Fin...