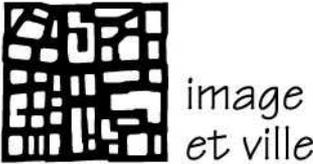




PREDIT
Groupe opérationnel n°1
Mobilité, territoires et
développement durable



Rapport Final
Septembre 2007

	<p>PARTENAIRES SCIENTIFIQUES</p>
	<p>Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche-Comté EA 4157 LIFC - 16, Route de Gray - 25030 BESANCON Cedex - FRANCE Tel : +33 (0)3 81 66 64 55 - Fax : +33 (0)3 81 66 64 50 Contact : Christophe LANG</p>
	<p>Laboratoire Image et Ville UMR 7011 Université Louis Pasteur – CNRS Faculté de Géographie et d'Aménagement 3 rue de l'Argonne F-67000 STRASBOURG Téléphone : 33 (0)3 90 24 09 51 - Télécopie : 33 (0)3 90 24 09 50 Contact : Arnaud banos</p>
	<p>Théoriser et Modéliser pour Aménager CNRS UMR 6049 Besançon, site d'accueil UFR Lettres SHS, 32 rue Mégevand - 25030 Besançon cedex Téléphone : 33- (0)3 81 66 54 06 - Télécopie : 33- (0)3 81 66 53 65 Dijon Univ. De Bourgogne - Bd Gabriel - 21 000 Dijon Contact : Thomas THEVENIN</p>
	<p>TERRITOIRES CNRS UMR PACTE 5194 Institut de Géographie Alpine - 14 bis, avenue Marie Reynoard - 38100 GRENOBLE tel : 33 (0)4 76 82 20 20 - fax : 33 (0)4 76 82 20 21 Contact : Sonia CHARDONNEL</p>

	<p>UR 079 GEODES</p> <p>Centre IRD Ile de France 32, avenue Henri Varagnat 93143 Bondy cedex Téléphone : (33) 01 48 02 55 24 (secrétariat) Fax : (33) 01 48 47 30 88</p> <p>Contact : Nicolas Marilleau</p>
	<p>Laboratoire CEDETE EA 1210</p> <p>UFR Lettres, Langues et Sciences Humaines 10 rue de tours, BP 46527 45065 ORLEANS CEDEX 2 Tel : 02 38 49 48 44</p> <p>Contact : Annabelle Boffet-Mas</p>

Table des matières

1. Remarques préalables	5
2. Objectifs initiaux du projet MIRO	5
3. Etat de l'art et positionnement méthodologique	6
3.1 Une évolution constante des modèles de transport	6
3.1.1 Les modèles de l'économie néoclassique	7
3.1.2 Les modèles basés sur les programmes d'activités (BPA)	7
3.1.3 Le modèle de micro-simulation Transims	10
3.2 Choix théoriques et méthodologiques	11
3.2.1 Un socle conceptuel fondé sur la <i>time-geography</i>	12
3.2.2 Une formalisation fondée sur les principes de l'intelligence artificielle distribuée	12
3.2.3 Des choix méthodologiques basés sur l'expérience de Transims	14
3.2.4 Le cadre opérationnel de MIRO	14
4. Le modèle de simulation MIRO	15
4.1 Architecture générale	15
4.1.1 Architecture logicielle	16
4.1.2 Formalisation multi-agents	17
4.2 Générer une population et un environnement virtuels	21
4.2.1 Construction de profils d'agents	21
4.2.2 L'affectation des agents aux lieux de résidence et de travail	30
4.3 Simuler les journées de la population et la ville en mouvement	36
4.3.1 Générer des emplois du temps de la population synthétique	36
4.3.2 Validation de la génération de planning	40
4.3.3 Simuler la ville en mouvement	41
4.4 La validation des sorties de simulation	42
4.4.1 La création d'une plate-forme d'intégration visuelle	42
4.4.2 Les premières validations/conclusions	53
5. Conclusion	61

1. Remarques préalables

Ce rapport fait état de l'ensemble de la démarche adoptée durant ces quatre années par l'équipe pluridisciplinaire du projet MIRO. Les différentes étapes de la construction du modèle de simulation des mobilités intra-urbaines et des rythmes quotidiens sont exposées ici. Elles ont également fait l'objet d'une part de rapports intermédiaires détaillant à mi-parcours l'état d'avancement du projet, d'autre part de plusieurs articles et communications ciblant en détail les différents modules du processus de modélisation (la liste des publications est disponible à la fin de ce document).

2. Objectifs initiaux du projet MIRO

Mieux connaître la mobilité quotidienne à l'échelle d'une ville est un enjeu de taille. Nulle politique d'aménagement urbain ne saurait en effet aujourd'hui faire l'impasse sur ce sujet brûlant qui, au-delà de sa dimension « transport », renvoie à la fonction essentielle et fondamentale de la ville : permettre et favoriser les interactions sociales entre ses habitants. Mais c'est également un défi, scientifique et technique. Comment en effet appréhender une telle diversité, une telle richesse ? Comment prétendre embrasser du même regard cette multitude de comportements individuels si différents ? Le parti pris traditionnel est de réduire cette complexité de manière systématique :

- En réduisant l'objet même d'étude et en le ramenant à des dimensions maîtrisables. La mobilité est ainsi souvent simplifiée, réduite à ses composantes de base (une série de déplacements, parfois considérés comme indépendants, entre deux activités) ;
- L'espace géographique est souvent simplifié par une opération de zonage spatial, permettant de raisonner sur des sous-ensembles spatiaux moins nombreux et plus homogènes, donc plus facilement maîtrisables ;
- Les données d'enquêtes, recueillies auprès d'échantillons d'individus, sont le plus souvent simplifiées au moyen d'opérations d'agrégation, permettant de raisonner non plus sur des individus mais sur des groupes sociaux ou spatiaux, au moyen d'indicateurs statistiques généraux ;
- La diversité des comportements individuels est souvent réduite à un comportement moyen, plus simple à modéliser, mais qu'on ne retrouve évidemment jamais dans la rue. « L'homme moyen » de Quételet, qui fut décrié dès le départ comme ne pouvant être qu'un monstre, perdure toujours dans les sciences humaines et sociales, sous la forme d'un « individu moyen », abstrait, aux caractéristiques parfois peu crédibles, mais aptes à être formalisées et modélisées ;
- Enfin, la mobilité est très rarement appréhendée dans sa composante dynamique, alors même que le mouvement est au cœur du phénomène.

Cette approche réductionniste nous incite ainsi à déconstruire la mobilité quotidienne, en décomposant le tout en sous-ensembles plus simples (les parties), jusqu'à ce que le cœur même du ou des phénomènes étudiés apparaisse, tel un diamant débarrassé de sa gangue. Une intuition aujourd'hui largement répandue, plus connue sous le credo systémique « le tout est plus que la somme des parties », suggère toutefois que cette course à la décomposition analytique est par essence vouée à l'échec : même si nous connaissions l'ensemble des

facteurs intervenant dans les actions individuelles, nous ne serions pas pour autant capables de prédire le comportement d'un groupe d'individus, compte tenu des multiples interactions à l'œuvre. Cette limite fondamentale nous a alors poussé, dans le cadre du projet MIRO, à nous inscrire dans une famille théorique que nous qualifierons de large, regroupant des travaux variés autour des systèmes complexes, de la simulation de sociétés artificielles et de la simulation à base d'agents et visant à mieux comprendre les phénomènes complexes non plus en les déconstruisant, mais en les reconstruisant.

L'objectif de ce projet était de replacer la problématique de la mobilité quotidienne au sein d'une problématique plus vaste, relative au fonctionnement même des systèmes urbains, dans l'objectif d'assister les aménageurs dans la définition de nouvelles politiques urbaines temporelles et/ou de transport. Son originalité tenait à sa volonté de simuler, dans le temps court de la journée, les modalités d'émergence, à partir d'une multitude de comportements individuels, de configurations territoriales variables. C'est dans cette perspective que l'équipe de MIRO a proposé un protocole de simulation, centré sur les individus en mouvement, qui permette d'explorer ce système complexe et en grande partie auto-organisé qu'est la ville [BEN 04] [POR 00]. Ce projet impliquait donc une transition fondamentale de l'échelle des individus à celle du territoire, de manière à pouvoir raisonner in fine sur la ville « en mouvement ». Dans cette perspective, et parce qu'elle se focalise sur l'individu en mouvement et le contexte spatio-temporel dans lequel il évolue, la Time-Geography offrait un cadre conceptuel pertinent, que l'intelligence artificielle distribuée, et notamment la simulation multi-agent permettait de formaliser et d'opérationnaliser.

3. Etat de l'art et positionnement méthodologique

La recherche bibliographique réalisée pour le projet MIRO montre une remise en question récurrente des modèles de transport depuis cinquante ans. Initiées en premier lieu par les économistes, les outils de modélisation ont fortement évolué avec les réflexions menées par les psychologues sur les comportements de déplacement ou les géographes sur les territoires de la mobilité. Ensuite, les avancées technologiques développées par les informaticiens ont ouvert de larges perspectives dans le traitement des bases de données mais également dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée. Un rapide historique des modèles permettra de comprendre les contributions apportées par les différentes disciplines concernées par l'étude des systèmes de transport. Nous décrirons ici les principales évolutions des modèles de transport en montrant l'apport des différentes disciplines oeuvrant dans l'étude des systèmes de transport et de la mobilité.

3.1 Une évolution constante des modèles de transport

Les premiers développements des modèles de transport sont apparus aux Etats-Unis au début des années 1960 [DUP 99]. L'objectif recherché était de prévoir les investissements nécessaires à la construction des infrastructures de transport dans un contexte économique particulièrement favorable à l'urbanisation et à la motorisation des ménages [MAS 98]. Fondée essentiellement sur les principes de l'économie néoclassique, cette approche semble progressivement remplacée par les modèles de micro-simulation.

3.1.1 Les modèles de l'économie néoclassique

Développée dès les années 60, la première génération de modèle, dite à quatre étapes, fut conçue pour compter les déplacements effectués dans un périmètre donné. Ce type de modélisation requiert :

- d'une part des données socio-économiques rapportées à des unités territoriales de type aréales pour évaluer la demande de déplacements
- d'autre part des données spatiales structurées sous la forme d'un graphe pour qualifier l'offre de transport.

Le modèle à quatre étapes se déroule suivant un processus séquentiel linéaire qui établit, dans un premier temps, les volumes de déplacements en émission et en réception pour chaque zone : la phase de génération. Dans un deuxième temps, la distribution consiste à estimer les flux émis entre une origine et une destination. Dans une troisième étape, cette matrice de flux se répartit selon le mode de transport. Ces flux modaux sont enfin reportés sur le réseau, c'est la phase d'affectation. Les quatre étapes correspondent ainsi à une combinaison de modèles spécifiques.

Les années 1970 marquent une véritable rupture dans les méthodes de prévision de la demande de transport avec l'apparition des modèles désagrégés. Dans un contexte de crise économique, les pouvoirs publics s'orientent davantage vers une planification sur le court terme et souhaitent intégrer des données comportementales dans leur démarche pour pallier les défauts des modèles classiques [MAS 98]. 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. Dans ces modèles, l'individu est amené à faire un choix parmi plusieurs possibilités. Il s'agit le plus souvent de déterminer le mode de transport optimal pour une personne et un déplacement donné. Ce processus de décision est reconstitué à partir de modèles probabilistes bien connus, les modèles de choix discret.

Les modèles désagrégés impliquent que des enquêtes soient effectuées auprès des usagers des transports, ce qui élève les coûts d'étude. Malgré ses avantages, cette méthodologie reste peu appliquée en France. Elle a toutefois permis d'améliorer les modèles classiques, grâce à la création *de modèle à quatre étapes hybrides* [ORT 97]. Ces modèles de seconde génération ont largement été repris par les différents logiciels disponibles dans le commerce, EMME2, MINUTP et TRIPS étant les plus diffusés [QUI 98] [BON 04].

3.1.2 Les modèles basés sur les programmes d'activités (BPA)

L'étude des comportements de mobilité est également abordée par les disciplines des sciences humaines également dans les années 1970 et notamment à travers l'approche « activités-centrées » (activity-based-approach). Ce paradigme trouve ses origines dans les travaux précurseurs du sociologue américain Chapin [CHA 74] et du géographe suédois Hägerstrand [HAG 70] sur les programmes d'activités quotidiens. Pour ces chercheurs, les comportements de mobilité reposent sur des composantes sociales (le mode de vie) et des contraintes spatio-temporelles (budgets-temps, réseau d'offre, services). La combinaison des trois éléments « espace » « temps » et « activités » permet d'insister sur les ressorts de la mobilité plutôt que sur les volumes de trafic.

D'un point de vue méthodologique, l'approche « activité centrée » remet en cause les principes dominants de la structure des modèles de trafic les plus répandus : les modèles à 4

étapes. Exposés dans la section précédente, ces outils de modélisation préfigurent les indicateurs d'observation de la mobilité. En effet, de nombreux auteurs montrent à quel point cette approche classique tend à réduire la mobilité à son expression la plus élémentaire, le déplacement, évacuant d'emblée la complexité du phénomène de mobilité. Ainsi, le Tableau 1 résume les principales différences entre les deux approches.

	Modèle à 4 étapes	Modèle activité centrés
Objectif du modèle	Prévisions de trafic pour planifier les investissements	Comprendre les comportements de déplacement
Unité d'observation géographique	Approche agrégée : groupement d'îlots ou communes	Approche désagrégée à l'échelle de l'individu ou du ménage
Unité d'observation du déplacement	L'origine et la destination sont prises en compte	Décomposition en séquences d'activités
Sources de données	Les données socio-économiques proviennent d'enquêtes variées : recensement (RGP), enquête transport (ETC), enquêtes ménages déplacements, enquêtes cordon.	Nécessite des données sur les activités individuelles à partir d'enquêtes réalisées localement (Enquête Ménage)
Interaction données socio-économiques et déplacements	Relation indirecte entre les données de population et de trafic	Relation directement issue de l'enquête
Résultats des analyses	Le nombre de déplacements est consigné dans une matrice zone à zone	Les déplacements sont analysés dans l'espace et le temps
Portée du modèle	Masque les différences intra-zonales en termes de caractéristiques des ménages et stratégie de déplacement	Permet d'étudier les relations entre les caractéristiques du ménage, les déplacements et les activités
Utilisation du modèle	Disponible sur le marché et utilisé en aménagement	Relève principalement du domaine de la recherche

Tableau 1 : Modèles à 4 étapes VS modèles basés sur les programmes d'activités

Cette confrontation des deux approches met en évidence le niveau de précision des données d'entrées. Les modèles classiques privilégient en effet l'agrégation des données, tandis que l'approche activité centrée mobilise des données à l'échelle de l'individu et/ou du ménage. Ce degré de précision amène les partisans de l'approche activité-centrée à effectuer des investigations sur des secteurs restreints et principalement en milieu urbain.

Basé sur les travaux de Greaves et Stopher [GRE 98], le Tableau 2 propose un historique des principaux modèles basés sur les programmes d'activités.

	Objectifs	Spatial	Application
PESAPS [LEN 76]	Mesurer l'influence des contraintes d'activités dans l'espace et le temps pour déterminer des choix d'itinéraires	Oui	Tester les niveaux d'accessibilité aux services apportés par les Transports en Commun de la ville de Karlstad.
CARLA [JON 80] [CLA 86]	Reconstruire des programmes d'activités en fonction de nouvelles contraintes comme le changement de l'offre de transport	Non	Tester les services de bus en milieu rural au Pays-Bas
STARCHILD [REC 86]	Simuler les déplacements et les activités en fonction des contraintes des membres des ménages	Non	Non communiqué
EUROTOPP [AXH 91]	Simulation dynamique de choix d'itinéraire en fonction des programmes d'activités et des interactions entre les membres des ménages	Non	Non communiqué
AMOS [KIT 97]	Simulation des changements d'activités et des déplacements dans le système de transport	Non	Utilisation du modèle sur la ville de Washington
SMART [STO 96]	Simuler les activités, les ressources et les déplacements en fonction des données d'une enquête ménage et de l'occupation des sols	Oui	Non communiqué
ALBATROSS [ARE 02]	Modélisation des comportements de déplacement et des activités à l'échelle du ménage	Non	Application sur Eindhoven
MATSIMS [NAG 03]	Simulation de la demande de transport et génération d'itinéraire par système multi-agents	Oui	Application sur la région de Zurich
TRANSIMS [BAR 04]	Construction d'un simulateur pour analyser le système de transport	Oui	Application sur la ville de Portland

Tableau 2 : Historique des modèles basés sur les programmes d'activités

La première expérience, menée par l'école suédoise de la Time Geography, montre à quel point l'intégration du temps mais également de l'espace est importante pour appréhender la mobilité au travers des programmes d'activités des individus. L'intégration de ces deux dimensions dans les modèles pose des difficultés méthodologiques majeurs si l'on reste sur des modes de formalisation « classique ». C'est pourquoi l'utilisation des modèles issus de l'Intelligence Artificielle (Systèmes multi-agents et automates cellulaires) semble être une voie méthodologique appropriée. La plupart des applications citées dans le Tableau 2 ont été développées sur une aire d'étude spécifique. Seul le modèle TRANSIMS, référence dans le domaine des programmes d'activités, présente les caractéristiques d'un modèle générique.

C'est pourquoi nous avons choisi de construire le modèle MIRO sur les principes de TRANSIMS.

3.1.3 Le modèle de micro-simulation Transims

TRANSIMS est sans doute le modèle de micro-simulation le plus abouti à ce jour pour analyser les transports urbains [BAL 04]. Développé aux Etats-Unis dans le laboratoire de Los Alamos, ce modèle est plus particulièrement utilisé pour simuler les déplacements sur la ville de Portland. L'architecture de TRANSIMS repose sur la mise en relation de 6 modules.

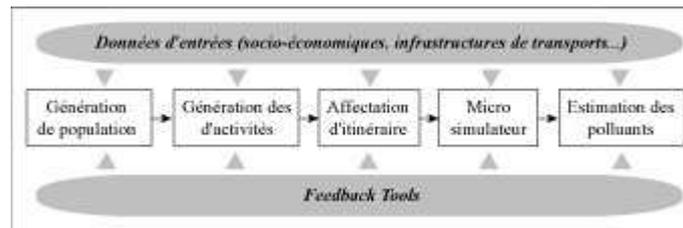


Figure 1 : architecture du modèle TRANSIMS

Tout d'abord, le module de génération de population reconstitue la population et les ménages d'une agglomération en fonction des caractéristiques démographiques du recensement de la population et des prévisions. Ces ménages « artificiels » sont répartis sur le territoire en fonction des données du recensement. La seconde étape, le module de génération d'activités, permet d'assigner à chaque voyageur un emploi du temps avec des tâches précises à réaliser. Cette population artificielle de voyageurs est créée à partir d'une enquête spécifique sur les déplacements des individus de l'agglomération étudiée. L'enchaînement des activités peut être reproduit dans ce module.

En résultat, chaque individu de chaque ménage reçoit une liste d'activités associées à un mode de transport : « déposer les enfants à l'école à pied », « aller au travail en voiture », « rentrer au domicile en voiture », « faire du sport à vélo » etc... Dans la troisième étape, l'affectation de l'itinéraire détermine le chemin le plus rapide pour se rendre d'un lieu d'activité à un autre pour chaque individu. Au quatrième stade, le micro-simulateur reproduit les mouvements des véhicules sur le réseau de transport, seconde par seconde, pour une période donnée. Le comportement des voyageurs est reproduit par des paramètres intégrés dans un automate cellulaire afin de reproduire une image la plus réaliste possible du trafic dans l'agglomération. Les véhicules, les sections d'autoroute ainsi que les intersections sont autant d'éléments reproduits dans ce micro-simulateur. Dans une cinquième phase, un module d'estimation de polluants retranscrit les flux de véhicules en émissions de dioxyde de carbone, monoxyde...

Un dernier module, baptisé feedback tool, permet d'effectuer des boucles de rétroaction afin de calibrer l'ensemble du modèle. L'utilisateur peut ainsi recueillir les informations sur des catégories de déplacements et d'individus et contrôler la qualité de l'affectation des itinéraires.

Les deux premiers modules de Transims ont retenu toute notre attention pour définir les grands principes du modèle MIRO. Les premières étapes de modélisation de Transims reposent sur constitution d'une « population synthétique ». Cette expression contient une double idée :

- D'une part, il est possible de créer une population d'individus artificiels.
- D'autre part ce groupe d'individus doit pouvoir être considéré comme une image synthétique de la population initiale, pour un nombre réduit mais néanmoins pertinent de caractéristiques.

La Figure 2 permet de décomposer les étapes de Transims. Un premier module, dénommé « Synthétiseur de population » permet de générer cette population synthétique en utilisant des données de recensement, tandis qu'un second module « Générateur d'activités » permet d'affecter des activités aux individus ainsi créés, à partir de données d'enquête de mobilité.

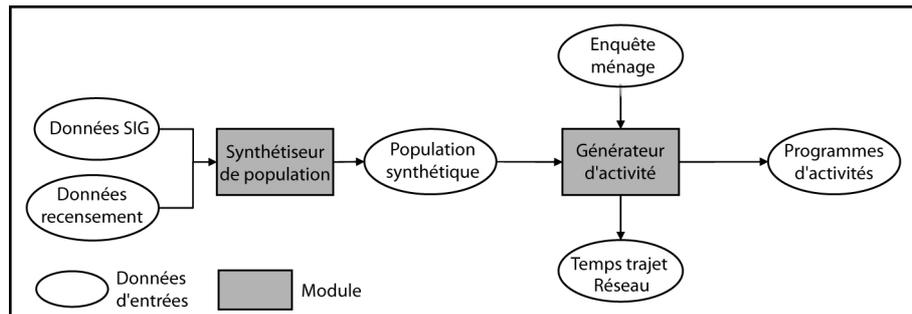


Figure 2 : construction d'une population synthétique dans Transims

Le lien entre les deux modules s'effectue par la mise en concordance des caractéristiques socio-démographiques des individus artificiels créés avec ceux de l'enquête de mobilité. Un système de boucles de rétroaction permet, par ailleurs, d'ajuster au fur et à mesure les combinaisons produites, par comparaison avec des estimateurs globaux. Nous nous sommes inspirés de cette démarche dans MIRO, tout en proposant un certain nombre de modifications.

3.2 Choix théoriques et méthodologiques

L'état de l'art précédemment exposé montre à quel point l'imbrication entre les modèles basés sur les programmes d'activités et les modèles dynamiques constitue une approche pertinente pour reproduire la mobilité quotidienne au sein d'une agglomération. C'est dans cette perspective que le travail du projet MIRO a été conçu, en associant notamment dans l'équipe les compétences de géographes, de géomaticiens et d'informaticiens.

L'objectif général de MIRO est de proposer un processus de modélisation permettant de simuler, dans le temps court de la journée, les modalités d'émergence, à partir d'une multitude de comportements individuels, de configurations territoriales variables. Nous proposons un protocole de simulation, centré sur les individus en mouvement, qui permette d'explorer ce système complexe et en grande partie auto-organisé qu'est la ville [BEN 04] [POR 00]. Ce projet implique donc une transition fondamentale de l'échelle des individus à celle du territoire, de manière à pouvoir raisonner *in fine* sur la ville « en mouvement ». Dans cette perspective, et parce qu'elle se focalise sur l'individu en mouvement et le contexte spatio-temporel dans lequel il évolue, la Time Geography offre un cadre conceptuel pertinent, formalisé et opérationnalisé à travers la simulation multi-agent.

3.2.1 Un socle conceptuel fondé sur la *time-geography*

La *Time Geography* définie par Torsten Hägerstrand [HAG 70] [CHA 01] dès les années 1970 a souvent servi de point de départ pour les travaux de modélisation de la mobilité basés sur les programmes d'activités. Ce cadre théorique a apporté à l'étude des mobilités quotidiennes un regard centré sur les individus et sur le contexte environnemental dans lequel ils évoluent. Il en découle que:

- L'espace-temps est considéré comme une *ressource* ou une *contrainte* pour l'action. Cela signifie que la liberté d'action n'est pas totale, dans la mesure où il existe des contraintes d'occupation d'espace et de temps qui interviennent dans les actions des individus
- Les êtres humains ont des objectifs. Pour les atteindre, ils élaborent des *projets* qu'ils réalisent en enchaînant des tâches individuelles, et pour lesquels il faut mobiliser des personnes, des ressources, du temps et de l'espace.
- Les projets sont conditionnés par des faisceaux de contraintes de trois ordres qui orientent les choix des individus :
 - Les contraintes de capacité (*capability constraints*) limitent notre « univers des possibles » pour des raisons physiologiques (nécessité de lieux de replis où manger, dormir), techniques (vitesse de déplacement) et topologiques (chaque possibilité de déplacement est circonscrite par une localisation donnée et à venir).
 - Les contraintes de conjonction (*coupling constraints*) recouvrent la nécessité de regrouper dans un même espace-temps (*bundle*) individus, outils et matériaux, dans un objectif de production, de consommation et d'interaction sociale.
 - Enfin, les contraintes de pouvoir (*authority constraints*) proviennent de l'organisation de l'espace en domaines (*domains*) hiérarchiquement emboîtés, qui trouve son origine dans la nécessité d'éviter que l'accumulation et la coexistence d'individus en un même lieu n'engendrent des conflits de partage des ressources.

Ainsi, nous retenons de ce cadre conceptuel que les individus réalisent leur projet en ordonnant dans le temps les activités en fonction des plages horaires disponibles et en fonction de l'accessibilité aux lieux des activités. Dans la suite de la démarche de MIRO, nous considérerons que les projets peuvent être rapportés à des *programmes d'activités* qui correspondent à des listes d'activités que veulent/doivent réaliser les individus ; chaque activité du programme sera définie selon sa nature, selon le temps qu'elle pourra prendre pour être réalisée et selon son niveau de flexibilité. Le résultat de l'ordonnement dans le temps et dans l'espace de tâches nécessaires à la réalisation du programme d'activités se traduira par un *emploi du temps spatialisé*, c'est à dire un *planning* d'activités ordonnées dans le temps (horaires sur 24 heures) et localisées sur des lieux identifiés dans l'environnement urbain.

3.2.2 Une formalisation fondée sur les principes de l'intelligence artificielle distribuée

L'un des principaux enjeux scientifiques de MIRO réside dans la traduction méthodologique opérationnelle de ce prisme théorique déjà ancien. L'approche privilégiée peut être qualifiée à la fois de [EPS 99] [EPS 96] :

- ascendante (bottom-up), puisqu'elle vise, à partir de la spécification de comportements individuels de mobilité, à explorer l'émergence de propriétés globales (les rythmes urbains), grâce à une stratégie de simulation non centralisée adéquate ;
- générative, dans la mesure où elle vise à identifier les micro-spécifications suffisantes pour générer ce macro-phénomène ;
- interactionniste, enfin, puisqu'elle considère la ville comme un système complexe adaptatif auto-organisé, constitué d'un grand nombre d'agents en interaction et situés dans un environnement en évolution permanente.

Privilégiant une double approche, individus-centrée et lieux-centrée, de la ville en mouvement, ce cadre général a pour objectif de tester, par des simulations de type multi-agent, les impacts macroscopiques de scénarios d'aménagement urbain en agissant directement sur les contraintes à l'œuvre.

Au cœur de MIRO réside en effet l'idée que l'environnement urbain et les autres agents offrent à chaque agent des opportunités pour la réalisation de son programme d'activités quotidien, mais lui imposent également des contraintes. Ces opportunités et contraintes, pour la plupart exogènes à l'agent, constituent les conditions d'application des règles de comportement de chaque agent. Ces règles, construites selon des heuristiques spécifiques, sont centrées sur la génération et la réalisation de programmes d'activités quotidiens par chaque agent.

L'association « contraintes-opportunités / règles de comportement » constitue ainsi ce que nous appelons le comportement de l'agent. Cette approche offre un avantage réel du point de vue de la simulation et notamment de la construction de scénarios : il s'agit de modifier les conditions d'application des règles de comportement, invariables par construction pour une catégorie d'agents donnée, pour obtenir des comportements d'agent différents. La localisation, la nature, la fréquence et les horaires d'ouverture des services ou des transports urbains constituent ainsi autant de leviers d'action dont il devient possible de tester les effets par simulation Figure 3

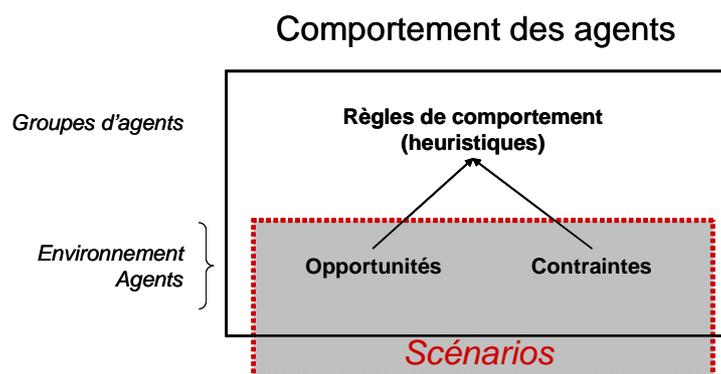


Figure 3 : le comportement des agents dans MIRO

3.2.3 Des choix méthodologiques basés sur l'expérience de Transims

L'expérience de Transims a permis de préciser le déroulement méthodologique de MIRO. La spécificité du modèle MIRO réside dans l'importance accordée, au-delà des caractéristiques d'ordre socio-démographique, aux activités quotidiennes individuelles. L'objectif est en effet de générer une population synthétique d'agents virtuels auxquels sera affectée une liste d'activités à assurer au cours d'une journée-type, et de laisser ces agents organiser et réaliser eux-mêmes leur emploi du temps, en fonction des opportunités offertes et des contraintes imposées par l'environnement urbain. Nous avons ainsi privilégié une approche guidée par les données disponibles, à savoir celles de l'Enquête Ménages Déplacements, sur un terrain d'étude précis : la Communauté d'Agglomération de Dijon. Nous formulons l'hypothèse que l'enquête Ménages Déplacements, supposée être représentative par construction de la population locale, peut être exploitée dès la phase de génération de la population synthétique d'agents Figure 4.

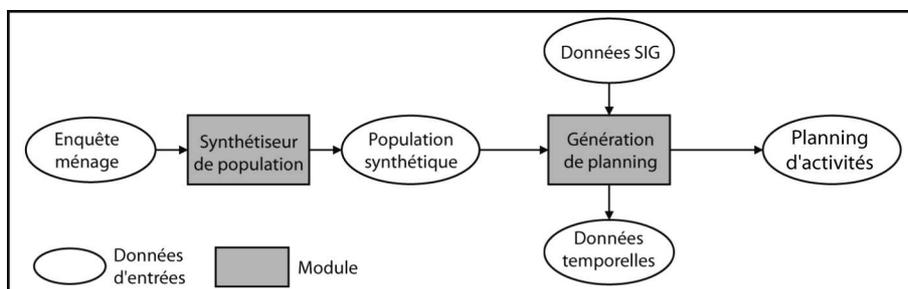


Figure 4 : l'approche retenue dans MIRO

La place accordée à cette enquête repose sur une idée simple : l'obtention d'une population d'agents clairement différenciés du point de vue de leurs programmes d'activités (c'est-à-dire de leur liste d'activités quotidiennes hiérarchisées en fonction de priorités définies) devrait être facilitée par l'intégration de ce critère à l'intérieur même du module de génération de population synthétique.

3.2.4 Le cadre opérationnel de MIRO

Les objectifs opérationnels de MIRO ont conduit notre équipe de recherche à choisir un terrain d'étude. Outre l'existence de contacts avec les acteurs des transports, l'intérêt manifesté localement pour l'élaboration de politiques temporelles inspirées par le modèle italien [BON 97], ainsi que la disponibilité d'un certain nombre de données nous ont conduit à choisir Dijon. Cette agglomération rassemble près de 250 000 habitants répartis sur 21 communes. Un accord avec l'agence d'urbanisme de l'agglomération dijonnaise a permis d'obtenir une mise à disposition des données SIG sur de nombreux thèmes, ainsi que des résultats de la dernière enquête ménages-déplacements (1998). Ces informations ont été complétées par l'opérateur de transport public Divia mais également par des données socio-économiques du recensement 1999 de l'INSEE.

4. Le modèle de simulation MIRO

4.1 Architecture générale

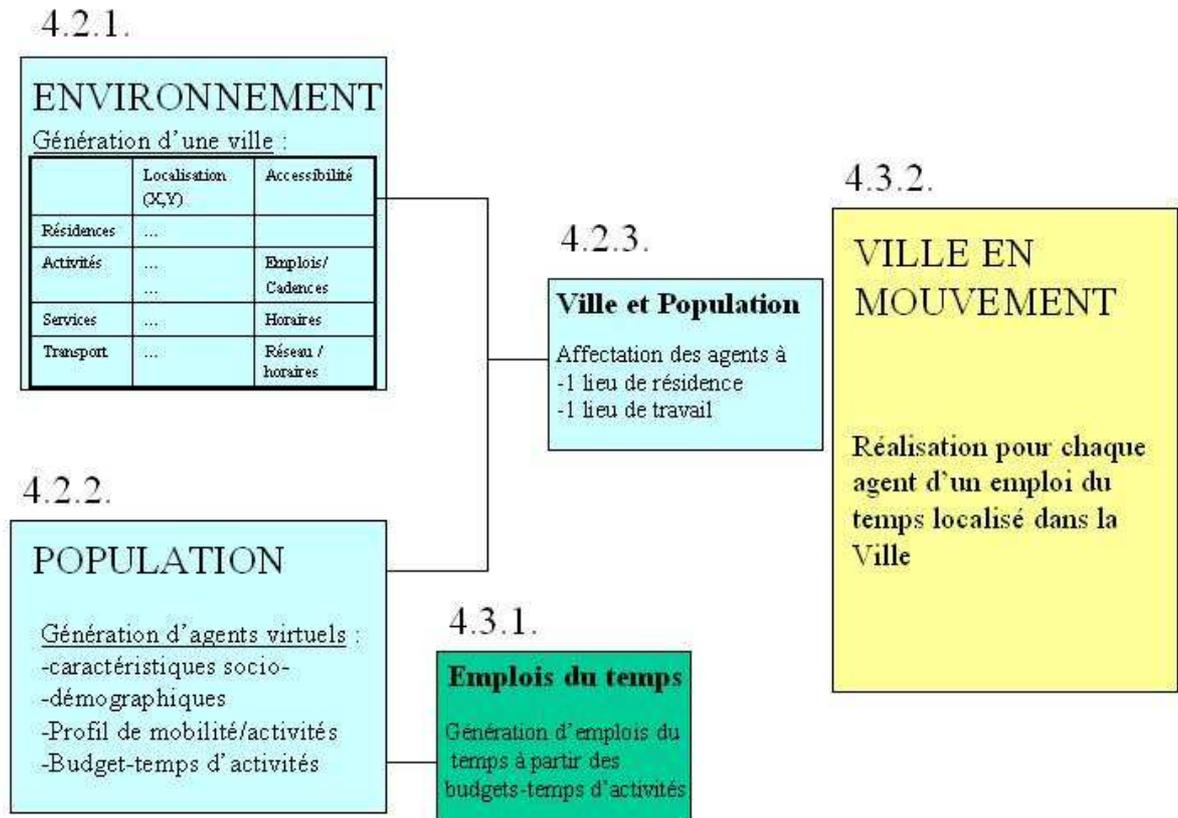


Figure 5 : architecture générale de MIRO

La structure générale du simulateur MIRO peut être décomposée en quatre grandes étapes :

- La première concerne la création d'une ville virtuelle, à partir de données SIG existantes ou créées pour l'occasion sur Dijon. L'idée est ici de décrire le plus finement possible les localisations résidentielles, l'offre de transport et l'offre d'activité, y compris en terme d'horaires d'ouverture et de capacité d'accueil.
- La deuxième étape concerne la création (4.2.2) et l'affectation spatiale (4.2.3.) d'une population d'agents « synthétiques » virtuels, à partir de données d'enquête disponibles, et notamment de la dernière enquête ménages-déplacements disponible à Dijon.

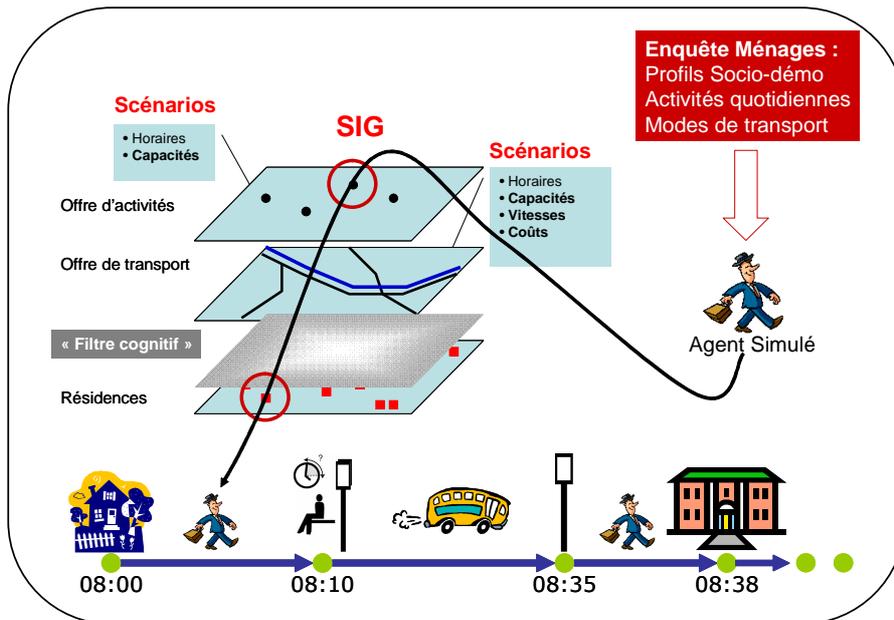


Figure 6 : le cœur du projet MIRO

Ces deux premières étapes, illustrées par les figures 5 et 6, constituent le socle du modèle qui définit l'environnement d'une part et la population localisée d'autre part.

- La troisième étape consiste en la génération par chaque agent de son emploi du temps, à partir d'une liste individualisée d'activités à accomplir et la prise en compte des contraintes spécifiques des lieux d'activité concernés.
- La quatrième et dernière étape consiste à simuler pour chaque agent son emploi du temps en respectant les composants définis dans les étapes précédentes et en explorant et parcourant l'espace urbain, avec les modes de transport à sa disposition.

4.1.1 Architecture logicielle

Nous avons proposé la constitution d'un méta-modèle à même de faciliter la génération de modèles de mobilité pour une catégorie de problèmes donnée. Cet outil nous permet de traduire des phénomènes quotidiens de mobilité de manière incrémentale et guidée, notamment par l'intermédiaire de sa structure. Cette reconstitution de la ville en mouvement repose sur une architecture logicielle associant un Système Multi-Agents (SMA) et un Système d'Information Géographique (SIG). Les bases de données géographiques ainsi que les informations sur la mobilité sont exportées dans les trois modules du SMA (Figure 7).

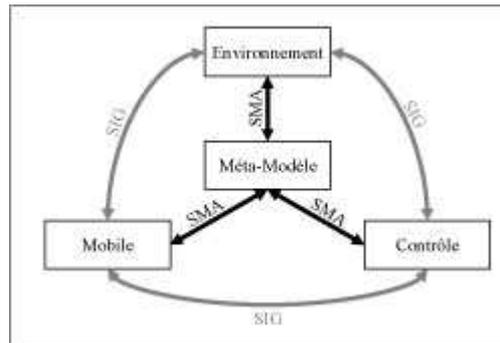


Figure 7 : la plateforme méthodologique de MIRO

« L'environnement », dans un premier temps, décrit une véritable ville virtuelle composée de lieux d'activités (les stations de la tme geography) reliés par les réseaux de transports. Puis, le module appelé « mobile » permet de caractériser le comportement de mobilité des agents. Ces deux premiers éléments participent enfin au fonctionnement du module de « contrôle », qui est destiné à visualiser le résultat des simulations, notamment les mouvements des mobiles dans la ville. Au cœur de cette plateforme, le méta-modèle permet de reproduire les interactions entre chaque module.

4.1.2 Formalisation multi-agents

Les individus étudiés sont représentés par des entités autonomes, des agents humanisés, qui évoluent dans une ville virtuelle faisant office d'environnement. La description d'un tel Système Multi-Agent (SMA) nécessite la représentation des individus mais aussi la description du milieu d'évolution.

Chaque individu s'inscrit dans des groupes sociaux d'appartenance, au sein desquels s'opèrent certaines des interactions fondamentales qui façonnent son quotidien. Une représentation fine de tels mobiles doit donc s'effectuer au niveau de l'individu, mais également à l'échelle du ou des groupes retenus comme pertinents. En l'occurrence, la description des mobiles et des groupes s'opère de façon progressive selon une méthode, appelée RAFALE-SP, définie dans [MAR 05]. Dans un premier temps, la structure générale des individus et l'environnement est représentée au moyen d'un diagramme UML. Ensuite les règles de comportement des mobiles sont définies algorithmiquement par l'utilisation d'un langage de spécification : PLOOM-UNITY. Cette méthode s'achève par l'implémentation d'un simulateur.

4.1.2.1 L'environnement

La description de l'environnement constitue une étape cruciale lors de l'élaboration d'un simulateur de mobilité. En effet, cette étape conditionne fortement l'observation des déplacements simulés qui pourra être faite ultérieurement, par la définition d'un référentiel approprié. L'environnement joue, dans notre système, un double rôle, statique et dynamique. En effet, il est à la fois espace d'opportunités et de contraintes physiques pour les individus que nous représentons, mais également générateur de trafic et de services qui sont proposés aux agents.

Le modèle de l'environnement dans le projet MIRO est une abstraction de la ville, de sa voirie, de son bâti et de ses dynamiques internes. Ce modèle est support Pour sa conception,

notre réflexion a été inspirée par les données cartographiques que nous avons à notre disposition.

Les cartes vectorielles du bâti et de la voirie de la ville de Dijon nous ont permis de structurer le territoire sous la forme d'un graphe (il s'agit d'une approche conventionnelle dans le domaine de la géomatique). Nous l'avons formalisé au moyen d'un diagramme de classes UML, présenté par la Figure 8.

Les tronçons de route sont modélisés par une classe appelée Tronçon qui définit, pour chacun d'eux, un identifiant, une longueur en mètres et l'ensemble de ses précédents et suivants. Ainsi nous construisons un graphe orienté (structure conventionnelle en géomatique) qui détermine l'espace virtuel d'évolution, autrement dit la ville virtuelle.

A partir de cette architecture, un système de référence a été établi pour localiser les objets situés (bâti, mobile, ...) dans la ville virtuelle. Ainsi, ces derniers sont localisés selon un numéro de tronçon, une distance le séparant du début du tronçon et une direction.

Trois types d'objets sont représentés sur l'environnement :

- les mobiles (ActiveCitadin) dont chacun d'eux correspond à un individu de la population synthétique ;
- les services (Services) qui associent au bâti une fonction (ex. la restauration ou le travail) accessible par les mobiles à différentes heures de la journée.
- la signalisation (DebutTronçon et FinTronçon) qui s'apparente à un panneau signalétique donnant aux mobiles des informations sur la fluidité du trafic (vitesse maximale de circulation) et la réglementation routière en vigueur dans la ville (interdiction de tourner, sens interdit, vitesse maximale autorisée,...).

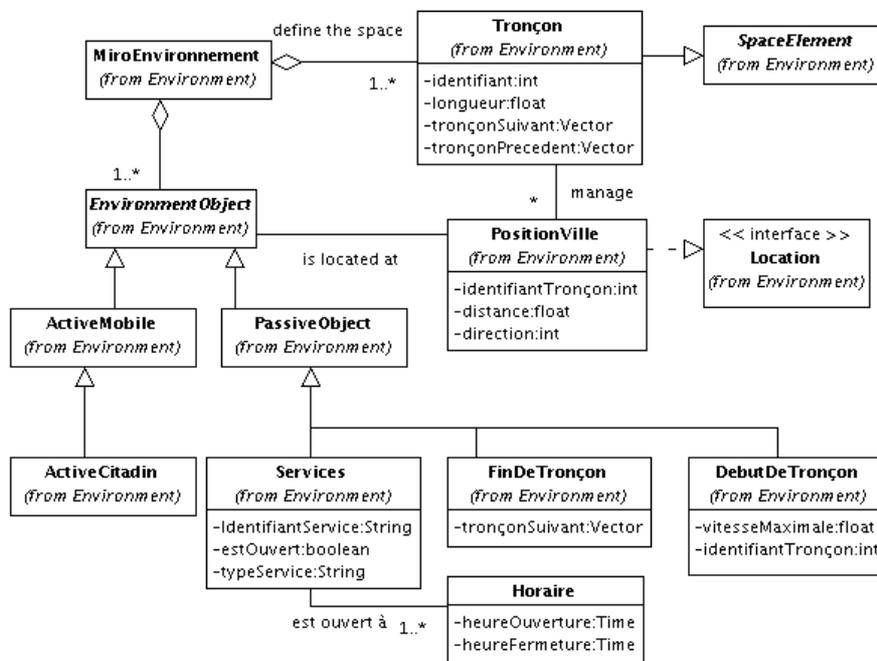


Figure 8: diagramme structurel de l'environnement.

D'autre part, les services sont des générateurs / récepteurs de mobiles urbains : lieux de résidence, de travail, commerces, espaces de loisir, etc... Nous associons plusieurs états, évoluant au fil du temps selon un cycle de vie, à chacun de ces lieux. Ainsi, les agents ont une perception dynamique de chaque générateur / attracteur, les conduisant à adapter leur comportement en fonction des contraintes horaires. Prenons l'exemple d'un restaurant dont le cycle de vie est présenté par la Figure 9. Chaque agent entrant en contact avec ce restaurant sera capable de savoir si cet endroit est ouvert, momentanément saturé ou complètement fermé. Si le restaurant est ouvert et que des places y sont disponibles, le mobile sera peut-être tenté d'y entrer.

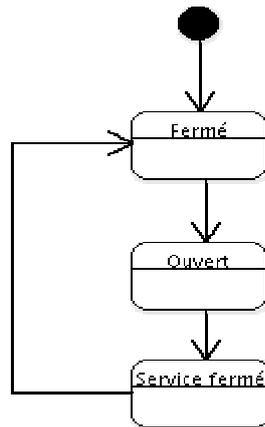


Figure 9 : cycle de vie d'un bâtiment

Ces différents éléments de l'environnement permettent également la génération d'un trafic ambiant diffus sur l'ensemble du territoire modélisé. Le rôle d'un tel trafic est de perturber l'évolution des agents simulés, afin d'obtenir une simulation réaliste tout en limitant le nombre d'agents. Ce trafic ambiant est constitué d'un ensemble de particules qui se déplacent sur la base de modèles statistiques sous-jacents, tels que les chaînes de Markov. Ces particules perturbent l'évolution des mobiles simulés dans la mesure où elles encombrant le réseau routier, notamment à travers les files d'attente, augmentant ainsi le temps de transport global de chaque agent.

4.1.2.2 Les mobiles

Un mobile (un individu de la population synthétique) est représenté d'une part d'un objet actif qui traduit le physique du mobile dans son environnement, et d'autre part d'un agent qui commande les déplacements. Par conséquent, pour chaque objet de type ActiveCitadin (représentation du mobile dans la ville virtuelle), un agent est associé qui confère au mobile (i) des capacités cognitives, notamment d'apprentissage de la voirie et des services présent dans la ville virtuelle, et (ii) des aptitudes physiques à se déplacer. Cet agent, appelé Citadin dans la Figure 10, s'apparente donc à un cerveau qui commande le déplacement de son corps (ActiveCitadin) sur la carte de la ville.

Au même titre que l'environnement, l'agent est décrit par un diagramme UML déterminant l'ensemble de ses capacités physiques et mentales. Cette description se scinde en plusieurs parties et permet ainsi la définition de la quasi-totalité des paramètres des agents, à savoir (voir la Figure 10) :

- Une description de la représentation de la connaissance détermine la forme et la nature des informations stockées par l'agent. Une connaissance peut être considérée comme privilégiée (*value*) par l'agent, ce qui permet de prendre en considération, dans une certaine mesure, la notion d'habitude.
- Une description de la perception de l'environnement définit la manière dont l'agent appréhende son environnement urbain, dans le cadre d'une ville « virtuelle ». La capacité d'apprentissage de chaque agent est alors directement liée à cette perception.
- Une description des désirs vise à définir les différentes catégories de tâches personnelles que l'agent aura à accomplir durant le temps de la simulation.
- Une partie centrale, qui représente le cœur de l'agent, permet de définir la classe qui contient les règles de comportement. Ce noyau est constitué d'une classe portant le stéréotype « agent »

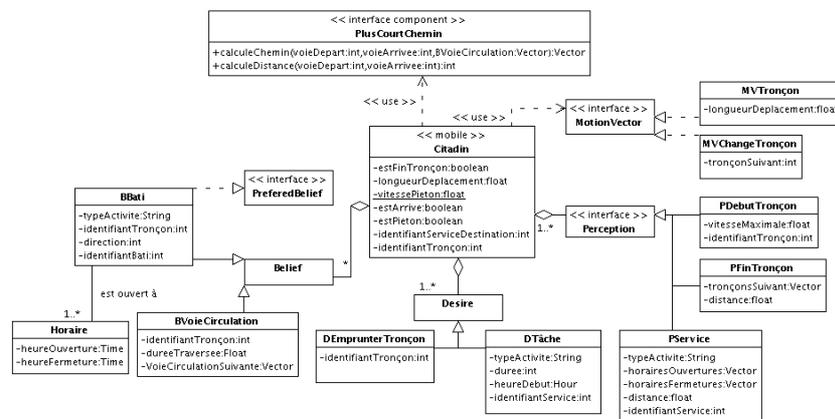


Figure 10: diagramme structurel du mobile

La nature des facultés de déplacement attribuées aux mobiles a été influencée par la structure de l'espace d'évolution que nous avons précédemment définie. Ainsi, nous avons déduit deux types de déplacements pour l'agent *Citadin* :

- **MVTronçon** pour effectuer un déplacement au sein d'un même tronçon ;
- **MVChangeTronçon** pour changer de tronçon, en d'autres termes pour traverser une intersection.

Par ailleurs, les agents disposent d'un ensemble de connaissances (ex. *BBati* : connaissance d'un immeuble détenant un service) et de désirs (ex. *DEmprunterTronçon* : désir d'emprunter un tronçon pour accomplir une tâche). Ces éléments sont aussi sujets à modification en fonction des différentes perceptions que l'agent est en mesure d'avoir au cours de ses évolutions.

Le comportement des mobiles s'appuie essentiellement sur des règles (i) d'apprentissage de l'environnement de ses tronçons et services, (ii) de calcul des trajets (génération des chemins les plus courts grâce à l'algorithme de Dijkstra) et (iii) d'élaboration programme d'activité (utilisation du moteur Sicstus Prolog).

Les agents peuvent être organisés aux seins de groupes dont la représentation générale suit la même philosophie que celle des mobiles tout en la complétant. Elle incorpore les notions de connaissances (privilégiées ou non) et de désirs qui sont déjà présents dans le diagramme UML de l'agent. Cependant, ces éléments sont partagés avec l'ensemble des membres d'un

groupe. La représentation des groupes traduit aussi de nouveaux concepts tels que la notion de ressource. Par exemple, le diagramme présenté par la Figure 11, montre que tous les membres d'une même famille peuvent avoir en commun un véhicule qui est une voiture. Ce schéma traduit également les catégories d'agents qui peuvent faire partie d'un groupe. Par exemple, le groupe social « famille » doit ici être constitué d'un père, d'une mère et d'un nombre indéfini d'enfants.

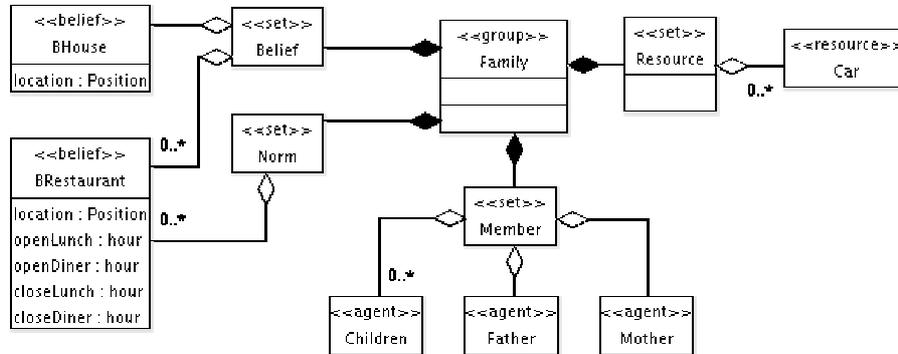


Figure 11: représentation du groupe famille

4.2 Générer une population et un environnement virtuels

4.2.1 Construction de profils d'agents

A partir de l'enquête ménages-déplacements de Dijon, un certain nombre de variables socio-démographiques et de mobilité ont été retenues, puis soumises à un traitement statistique multivarié (Analyse des Correspondances Multiples classification ascendante hiérarchique). Six groupes relativement homogènes ont alors pu être identifiés (Figure 12 et Figure 13).

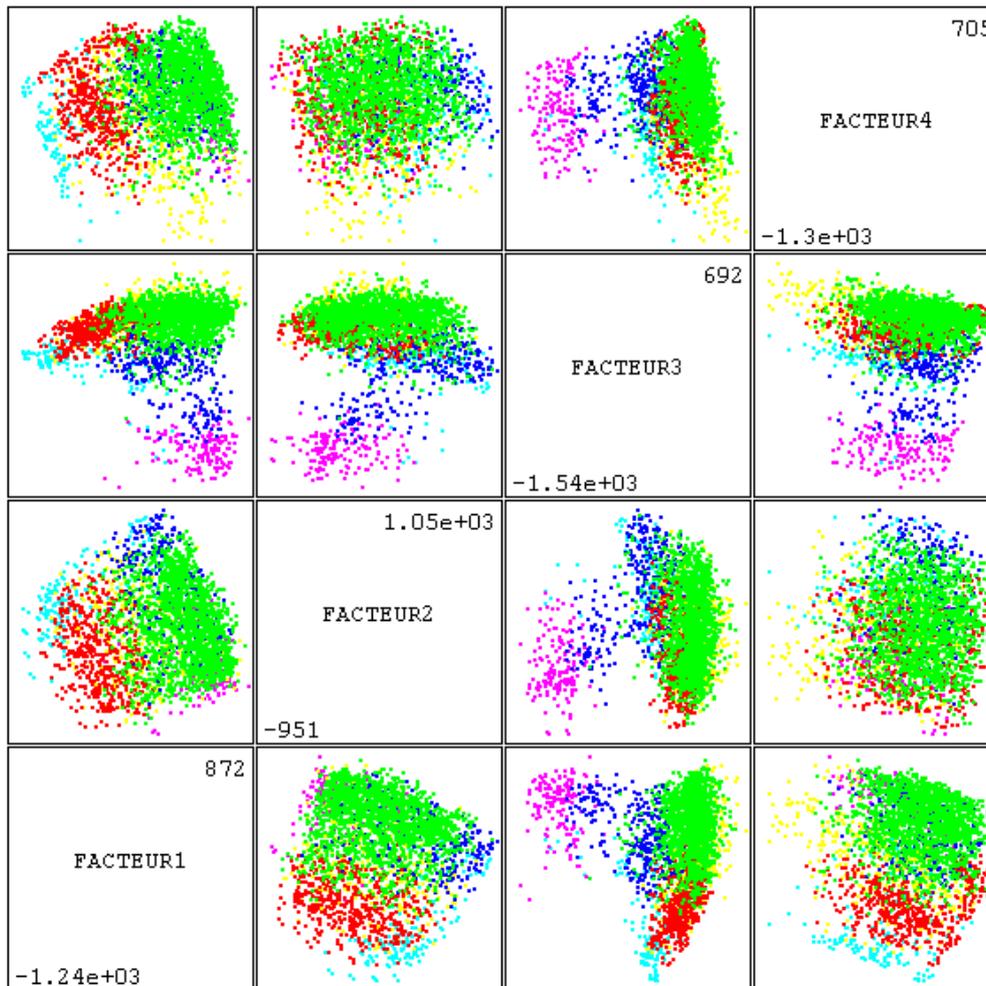


Figure 12 : identification des 6 groupes dans l'espace des premiers plans factoriels (les couleurs correspondent à celles de la Figure 13)

Les profils de classe (Figure 13) permettent par ailleurs de décrire de manière relativement détaillée ces différents groupes, en raisonnant en terme de sous- et sur-représentation statistique.

Les 6 classes identifiées par la CAH

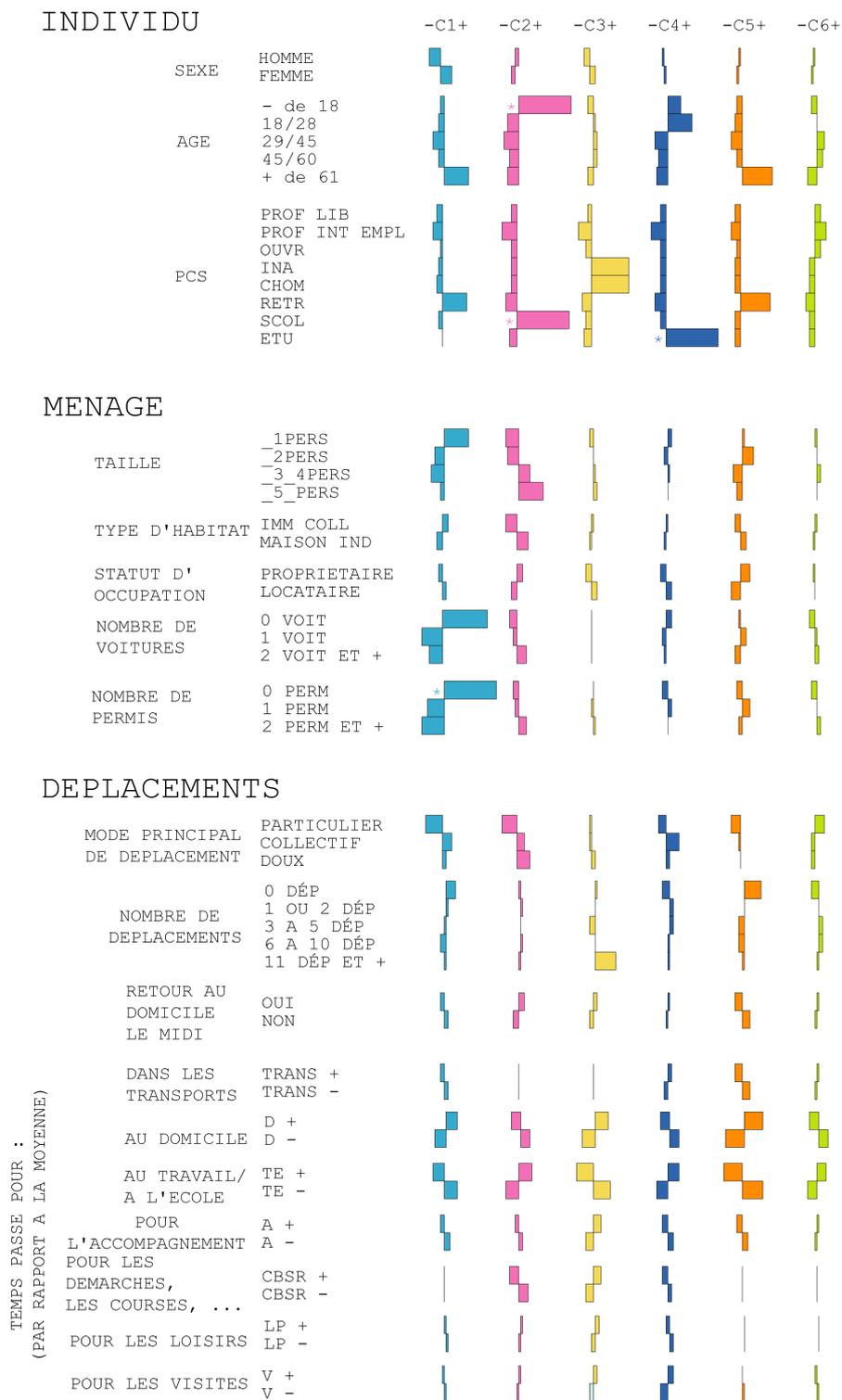


Figure 13 : profils de classes

- Groupe 1 : cette catégorie rassemble des femmes âgées et célibataires. Elles se déplacent peu et effectuent principalement leur trajet en transport collectif et

marche à pied. Le budget-temps est essentiellement consacré à des activités au domicile

- Groupe 2 : les scolaires de moins de 18 ans constituent le second groupe. Ces adolescents appartiennent à des familles propriétaires de leur logement et possédant plusieurs automobiles. Les modes de transports publics et doux (vélo, piéton) sont privilégiés et le budget-temps est affecté aux activités sur le lieu d'étude et à des activités sociales (notamment les visites).
- Groupe 3 : ce groupe est composé de chômeurs et d'inactifs de plus de 30 ans locataires d'un appartement. Les déplacements sont effectués en mode doux essentiellement (piéton et vélo) et le budget-temps est passé au domicile ainsi que dans les administrations pour les démarches.
- Groupe 4 : exclusivement concerné par les étudiants sans voiture et locataire de leur logement, cette catégorie est utilisatrice des transports collectifs et des modes doux. Peu de déplacements sont effectués, ainsi le budget-temps est consommé sur le lieu d'étude et en visite.
- Groupe 5 : cette catégorie rassemble les couples de retraités, propriétaires de leur logement et possédant une seule voiture. Peu de déplacements sont effectués, ainsi la majorité du budget-temps est passée au domicile.
- Groupe 6 : composé d'actifs possédant plusieurs véhicules, le nombre de déplacements de ce dernier groupe est proche de la moyenne. Le budget-temps est consacré principalement au travail et à l'accompagnement.

Chacune de ces grandes classes peut être décrite du point de vue des profils d'activités des individus qui la composent, à partir de l'enquête ménages-déplacements. La Figure 14 montre ainsi les durées affectées à diverses activités, pour chacune des 6 classes.

DONNEES D'ORIGINE

	Classes					
	1	2	3	4	5	6
Aucun	26,07	8,64	14,65	0,60	39,23	1,90
Moins de 30 min	20,09	20,99	20,05	15,32	19,13	18,02
31 à 65 min	21,79	32,72	25,45	36,64	19,29	36,35
66 min à 2 H	22,22	28,40	26,22	36,94	16,40	31,17
Plus de 2 H	9,83	9,26	13,62	10,51	5,95	12,55
Temps passé dans les transports	100	100	100	100	100	100
Moins de 6 H	0,00	0,00	0,26	0,30	0,00	0,18
6 à 12 H	3,85	1,85	2,06	10,81	0,16	12,43
12 à 18 H	20,51	74,07	18,51	62,46	6,91	59,67
Plus de 18 H	75,64	24,07	79,18	26,43	92,93	27,72
Temps passé au domicile	100	100	100	100	100	100
Aucun	77,78	14,81	88,95	12,01	97,75	24,99
Moins de 2 H	1,28	1,23	1,54	6,61	1,13	1,78
2 à 4 H	2,14	4,94	2,83	7,51	0,48	3,27
4 à 7 H	5,56	33,33	2,31	29,73	0,32	14,28
Plus de 7 H	13,25	45,68	4,37	44,14	0,32	55,68
Temps passé au lieu de travail ou d'études	100	100	100	100	100	100
Plus de 1 min	5,13	6,17	23,91	2,10	4,34	16,00
Aucun	94,87	93,83	76,09	97,90	95,66	84,00
Temps passé pour l'accompagnement	100	100	100	100	100	100
Aucun	52,99	85,19	38,82	72,07	54,66	57,76
Moins de 27 min	14,96	4,94	15,42	8,71	14,95	12,14
Plus de 28 min	32,05	9,88	45,76	19,22	30,39	30,10
Temps passé pour les démarches, les courses, ...	100	100	100	100	100	100
Aucun	88,46	83,95	80,98	93,99	86,17	87,33
Moins de 14 min	2,14	1,85	2,31	0,60	1,45	1,49
Plus de 15 min	9,40	14,20	16,71	5,41	12,38	11,30
Temps passe pour les promenades, les loisirs	100	100	100	100	100	100,1
Aucun	88,46	84,57	81,49	76,88	88,10	89,17
Moins de 20 min	2,14	1,85	0,51	1,20	0,48	0,95
Plus de 20 min	9,40	13,58	17,99	21,92	11,41	9,88
Temps passé pour les visites à des parents ou amis	100	100	100	100	100	100

Figure 14 : profils d'activités observés par classe (en % par classe)
(source : enquête ménages-déplacements de Dijon)

C'est ce tableau qui forme la base fondamentale à partir de laquelle les individus synthétiques (les agents) vont être générés, par tirage aléatoire.

4.2.1.1 Génération aléatoire d'agents

De manière très schématique, un agent se définit par un ensemble de caractéristiques (variables) et de comportements (règles) :

$$\text{Agent} = \{\text{Caractéristiques, Comportements}\}$$

Dans ce rapport, nous nous focalisons sur la première composante : comment obtenir des populations d'agents qui aient des caractéristiques proches d'une population de référence, observée ? La dimension socio-démographique de ces caractéristiques est gérée à travers l'affectation de chaque agent à l'un des 6 groupes (ou classes) définis à l'issue de la procédure multi-dimensionnelle présentée.

Chaque agent de la population synthétique est ainsi décrit par un ensemble de variables $V = \{V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_n\}$, dont les modalités $m_{V_i} = \{m_1, m_2, \dots, m_l, \dots, m_n\}$ constituent pour l'essentiel son profil d'activité (Figure 15).

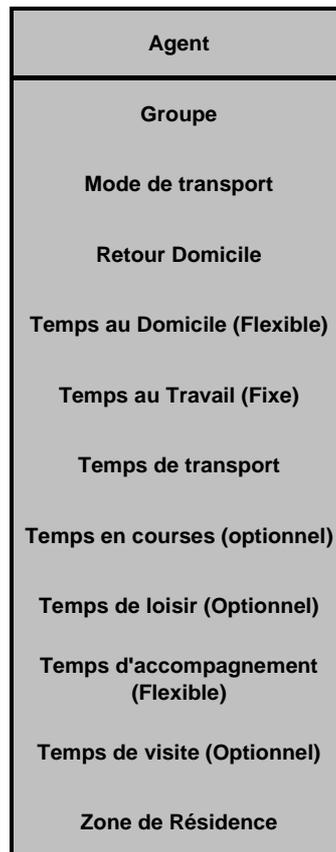


Figure 15 : définition du profil d'un agent de la population synthétique

L'objectif est de générer ces profils personnalisés, en fonction du groupe d'appartenance de l'agent et des profils d'activités par classes de la Figure 13. De manière plus formelle, chaque groupe peut donc être défini par un ensemble de variables, de modalités et d'effectifs :

$$G_j = \{V, M_V, N_{M_V}^j\}$$

L'objectif du synthétiseur de population est alors de générer n agents $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ décrits par un groupe d'appartenance et un ensemble d'attributs de mobilité :

$$A_i = \{g_j, m_{V_i}\},$$

et tels que, à l'issue de la procédure, $n_{g_j} \equiv N_{G_j}, \forall j \rightarrow 1 \text{ à } n$.

Sur cette base, chaque agent simulé se voit donc affecter à un groupe g_j , selon une probabilité :

$$P_{g_j} = \frac{n_{G_j}}{\sum_{j=1}^6 n_{G_j}},$$

avec n_{G_j} l'effectif observé du groupe G_j .

En fonction de ce groupe d'appartenance, chaque agent se voit alors affecter, pour chacune des variables $\{V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_l\}$, une modalité m_l selon une probabilité :

$$P(m_{v_k}) = \frac{N_{m_{v_k}}}{\sum_{l=1}^n N_{m_{v_k}}}, k \rightarrow 1 \text{ à } l$$

La Figure 16 montre un exemple de résultat obtenu pour 3 agents $\{A_1, A_2, A_{10000}\}$.

Agent	A 1	A 2	...	A 10000
Groupe	1	1	...	6
Mode de transport	TC	VP	...	TC
Retour Domicile	Non	Oui	...	Oui
Temps au Domicile (Flexible)	> 18h	> 18h	...	12 -18h
Temps au Travail (Fixe)	4-7h	0	...	4-7h
Temps de transport	1-2h	1-2h	...	0
Temps en courses (optionnel)	0	< 30 min	...	> 30 min
Temps de loisir (Optionnel)	0	0	...	0
Temps d'accompagnement (Flexible)	0	0	...	0
Temps de visite (Optionnel)	> 20 min	> 20 min	...	> 20 min
Zone de Résidence	1001	301	...	2401

Figure 16 : exemple de profils d'agents synthétiques générés par tirage aléatoire

On notera que cette procédure, fondée sur des tirages aléatoire mutuellement indépendants au sein d'un même groupe G_i donné, peut déboucher sur des incohérences. Ainsi, dans l'exemple affiché, l'agent A_{10000} se voit affecter un temps de transport nul et un mode de transport TC (Transport en commun). On notera également que, pour un agent donné, la somme des durées affectées aux différentes activités n'est pas contrainte (par exemple à 24h). La prise en compte de ces deux types d'incohérences aurait nécessité la mise en œuvre d'une procédure beaucoup plus lourde, qui n'aurait pas garanti pour autant la qualité des résultats lors de l'étape suivante de génération des plannings à partir de ces profils individuels d'activités. Aussi, nous avons préféré reporter cette quête de cohérence au sein de ce module final, qui nécessite une certaine flexibilité des données d'entrée afin d'élargir au besoin l'espace des solutions.

Toutefois, au-delà de ces incohérences possibles, la procédure retenue permet de reproduire une bonne image de la population initiale à partir des profils de groupes. La Figure 17 montre ainsi les profils d'activité par classe, tels que générés à partir des 10000 agents simulés.

DONNEES SIMULEES (10000 INDIVIDUS)

	Classes					
	1	2	3	4	5	6
Aucun	27,19	8,86	14,42	0,82	39,05	1,95
Moins de 30 min	19,59	20,04	21,11	15,52	20,08	18,78
31 à 65 min	20,76	34,18	24,63	37,20	19,80	36,14
66 min à 2 H	23,10	30,38	27,44	34,43	15,62	31,18
Plus de 2 H	9,36	6,54	12,40	12,02	5,45	11,95
Temps passé dans les transports	100	100	100	100	100	100
Moins de 6 H	0,73	0,00	0,53	0,62	0,06	0,12
6 à 12 H	3,80	2,32	2,02	10,79	0,11	12,11
12 à 18 H	16,96	72,78	18,65	63,31	6,77	59,26
Plus de 18 H	78,51	24,89	78,80	25,28	93,07	28,51
Temps passé au domicile	100	100	100	100	100	100
Aucun	76,75	18,35	89,36	11,10	97,91	24,81
Moins de 2 H	1,46	1,69	1,41	6,89	1,43	1,97
2 à 4 H	2,34	4,01	2,90	8,02	0,50	3,48
4 à 7 H	5,26	28,69	2,11	31,14	0,17	14,06
Plus de 7 H	14,18	47,26	4,22	42,86	0,00	55,68
Temps passé au lieu de travail ou d'études	100	100	100	100	100	100
Plus de 1 min	4,82	6,75	23,83	2,67	5,01	15,87
Aucun	95,18	93,25	76,17	97,33	94,99	84,13
Temps passé pour l'accompagnement	100	100	100	100	100	100
Aucun	52,92	86,92	40,99	74,20	54,84	57,06
Moins de 27 min	12,87	4,64	16,45	7,30	14,63	12,45
Plus de 28 min	34,21	8,44	42,57	18,50	30,53	30,48
Temps passé pour les démarches, les courses, ...	100	100	100	100	100	100
Aucun	88,30	83,33	80,47	95,79	86,30	87,46
Moins de 14 min	2,63	1,05	2,90	0,00	1,60	1,59
Plus de 15 min	9,06	15,61	16,62	4,21	12,10	10,95
Temps passé pour les promenades, les loisirs	100	100	100	100	100	100
Aucun	88,16	86,71	80,83	76,16	89,77	89,09
Moins de 20 min	3,22	1,05	0,09	1,54	0,33	0,88
Plus de 20 min	8,63	12,24	19,09	22,30	9,90	10,03
Temps passé pour les visites à des parents ou amis	100	100	100	100	100	100

Figure 17 : profils d'activités simulés par classe (en % par classe) (source : enquête ménages-déplacements de Dijon)

La comparaison systématique des effectifs relatifs des modalités pour chaque variable et chaque groupe révèle une proximité acceptable des profils par classe (Figure 18).

Ecart (Observés-Simulés), en %

		Groupes					
		1	2	3	4	5	6
Temps passé dans les transports	Aucun	-1,12	-0,22	0,23	-0,22	0,17	-0,05
	Moins de 30 min	0,49	0,95	-1,06	-0,20	-0,95	-0,76
	31 à 65 min	1,03	-1,46	0,82	-0,57	-0,51	0,21
	66 min à 2 H	-0,88	-1,98	-1,22	2,51	0,78	0,00
	Plus de 2 H	0,47	2,72	1,22	-1,51	0,50	0,61
	Somme des valeurs absolues des écarts	4,00	7,33	4,55	5,01	2,91	1,62
Temps passé au domicile	Moins de 6 H	-0,73	0,00	-0,27	-0,32	-0,06	0,06
	6 à 12 H	0,04	-0,47	0,03	0,02	0,05	0,32
	12 à 18 H	3,55	1,29	-0,14	-0,85	0,15	0,41
	Plus de 18 H	-2,87	-0,82	0,37	1,14	-0,14	-0,79
	Somme des valeurs absolues des écarts	7,20	2,58	0,81	2,33	0,40	1,58
Temps passé au lieu de travail ou d'études	Aucun	1,02	-3,54	-0,41	0,91	-0,16	0,18
	Moins de 2 H	-0,18	-0,45	0,14	-0,28	-0,30	-0,19
	2 à 4 H	-0,20	0,93	-0,07	-0,51	-0,01	-0,21
	4 à 7 H	0,29	4,64	0,20	-1,41	0,16	0,22
	Plus de 7 H	-0,93	-1,58	0,15	1,29	0,32	0,00
	Somme des valeurs absolues des écarts	2,63	11,14	0,97	4,40	0,96	0,79
Temps passé pour l'accompagnement	Plus de 1 min	0,30	-0,58	0,07	-0,57	-0,66	0,13
	Aucun	-0,30	0,58	-0,07	0,57	0,66	-0,13
	Somme des valeurs absolues des écarts	0,61	1,16	0,15	1,14	1,33	0,26
Temps passé pour les démarches, les courses, ...	Aucun	0,07	-1,73	-2,17	-2,13	-0,18	0,70
	Moins de 27 min	2,09	0,30	-1,02	1,41	0,32	-0,32
	Plus de 28 min	-2,16	1,44	3,19	0,72	-0,14	-0,38
	Somme des valeurs absolues des écarts	4,32	3,47	6,38	4,26	0,64	1,40
Temps passé pour les promenades, les loisirs	Aucun	0,16	0,62	0,50	-1,79	-0,13	-0,14
	Moins de 14 min	-0,49	0,80	-0,59	0,60	-0,15	-0,10
	Plus de 15 min	0,34	-1,41	0,09	1,19	0,28	0,35
	Somme des valeurs absolues des écarts	0,99	2,83	1,18	3,58	0,56	0,59
Temps passé pour les visites à des parents ou amis	Aucun	0,30	-2,14	0,66	0,72	-1,67	0,08
	Moins de 20 min	-1,08	0,80	0,43	-0,34	0,15	0,08
	Plus de 20 min	0,78	1,34	-1,09	-0,38	1,51	-0,16
	Somme des valeurs absolues des écarts	2,16	4,28	2,18	1,44	3,33	0,31

Figure 18 : comparaison des profils d'activités observés et simulés par classe

La forme et l'amplitude de l'histogramme de ces écarts obtenus entre les effectifs observés N_M et les effectifs simulés n_m confirment ce jugement.

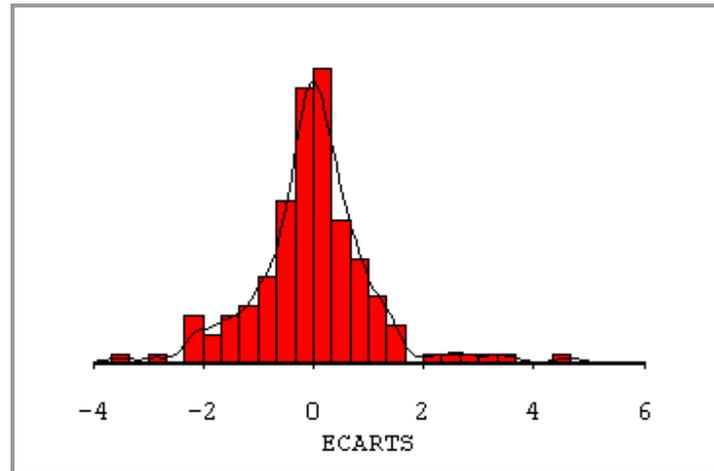


Figure 19 : distribution des écarts entre les profils de groupes issus de l'enquête et ceux générés par la procédure (en %)

Dans le même esprit, la confrontation des zones de résidence des agents simulés avec celles de l'enquête ménages-déplacements révèle une très bonne adéquation (Figure 20).

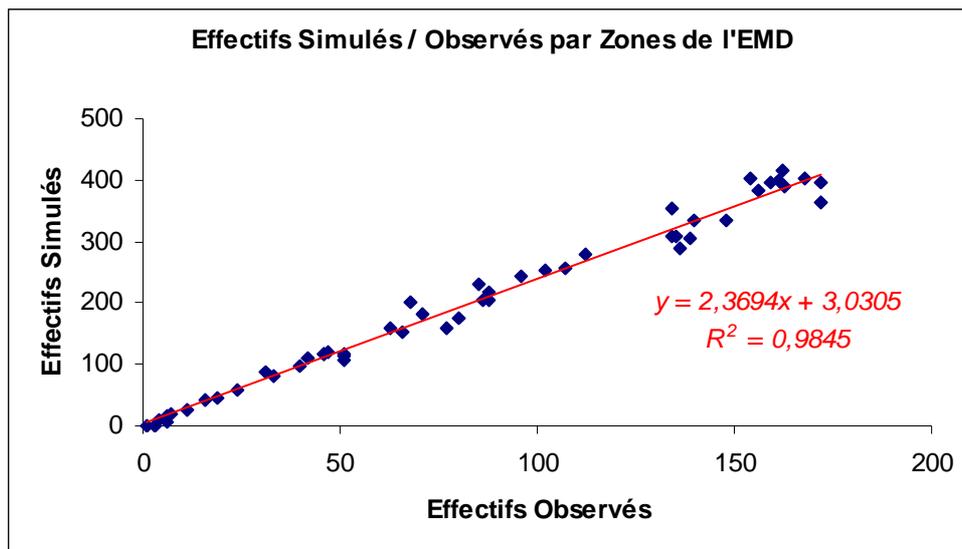


Figure 20 : comparaison des effectifs observés et simulés par zone de l'enquête ménages-déplacements

4.2.2 L'affectation des agents aux lieux de résidence et de travail

4.2.2.1 Affectation des agents à un lieu de résidence

Nous avons retenu une procédure en trois temps, fondée sur une structure spatiale emboîtée (Figure 21).

Soient :

- Z_l une zone de l'enquête ménages-déplacements
- I_k l'îlot k , $I_k \subset Z_l$

- B_j le bâti j , $|B_j \subset I_k$
- A_i l'agent i , $|A_i \subset B_j$

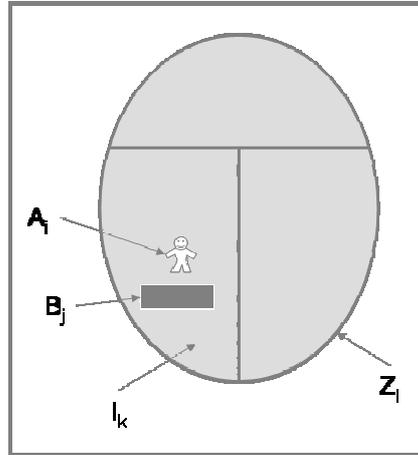


Figure 21 : les éléments retenus et leurs notations

La première étape consiste à affecter aléatoirement chaque agent à une zone de l'enquête ménages-déplacements, selon une probabilité :

$$P(Z_l) = \frac{n_{Z_l}}{\sum_{l=1}^n n_{Z_l}},$$

avec n_{Z_l} le nombre observé d'individus de l'enquête ménages par zone.

La deuxième étape consiste à affecter aléatoirement chaque agent à un îlot, au sein de la zone de l'enquête ménages précédemment définie. La procédure retenue ici exploite le groupe d'appartenance des agents, afin de différencier les îlots en fonction de leur « proximité » à ce groupe. La notion de proximité repose sur une comparaison systématique des profils socio-démographiques des îlots avec les profils des 6 groupes constitués (Figure 22).

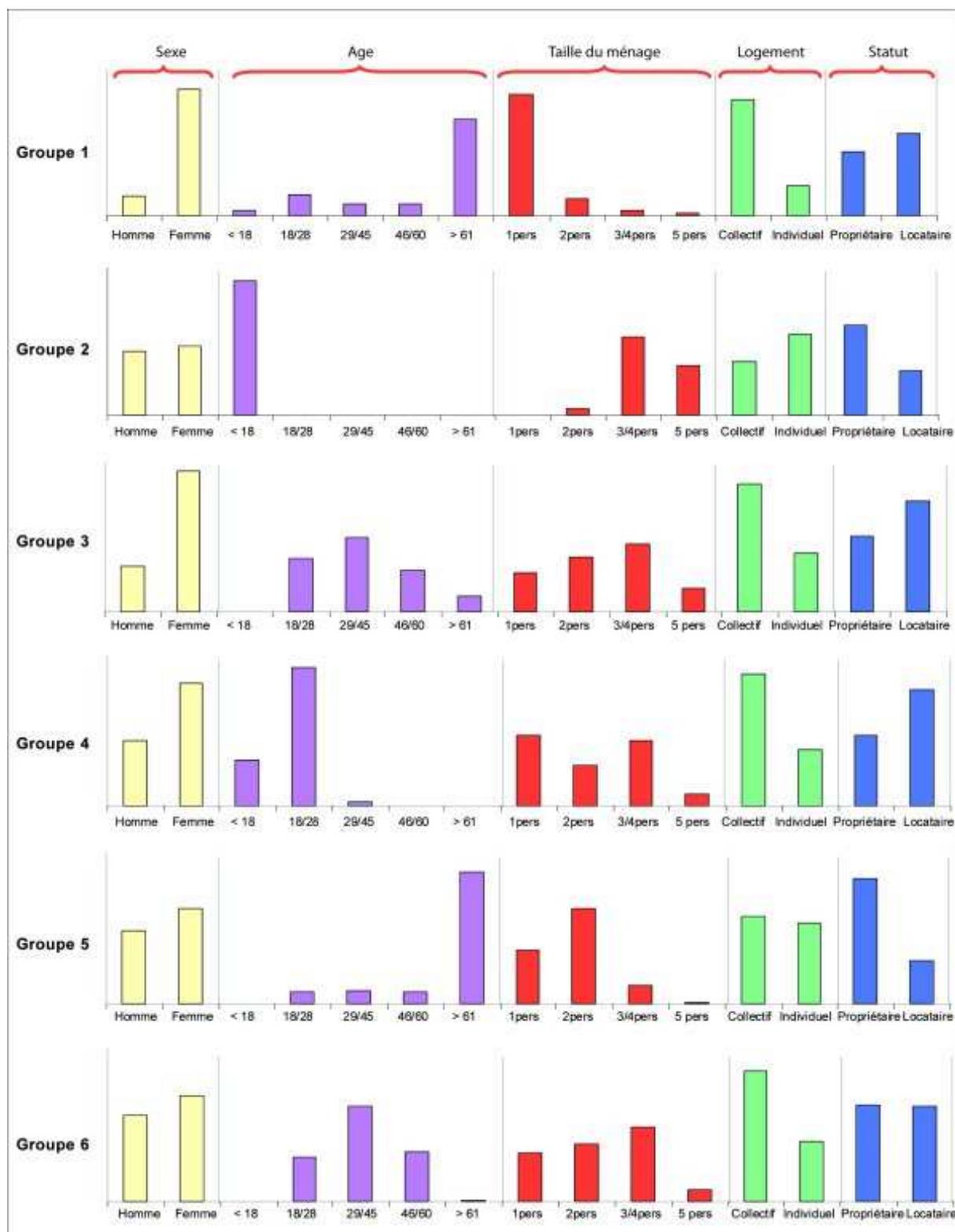


Figure 22 : profils socio-démographiques des six groupes définis

Cette comparaison îlot/groupe est réalisée par le calcul d'une distance euclidienne pour chaque couple de modalités et pour un degré de liberté n-1 :

$$d(I_k, g_{A_i}) = \sqrt{\sum_{m=1}^n (x_{I_{k,m}} - x_{g_{A_i,m}})^2}$$

La figure suivante montre les distributions statistiques de ces distances, obtenues pour les 6 groupes. On notera que les distances moyennes des groupes 3, 5 et 6 sont significativement moindres que celles des trois autres groupes, exprimant une plus grande proximité des îlots à ces trois groupes définis.

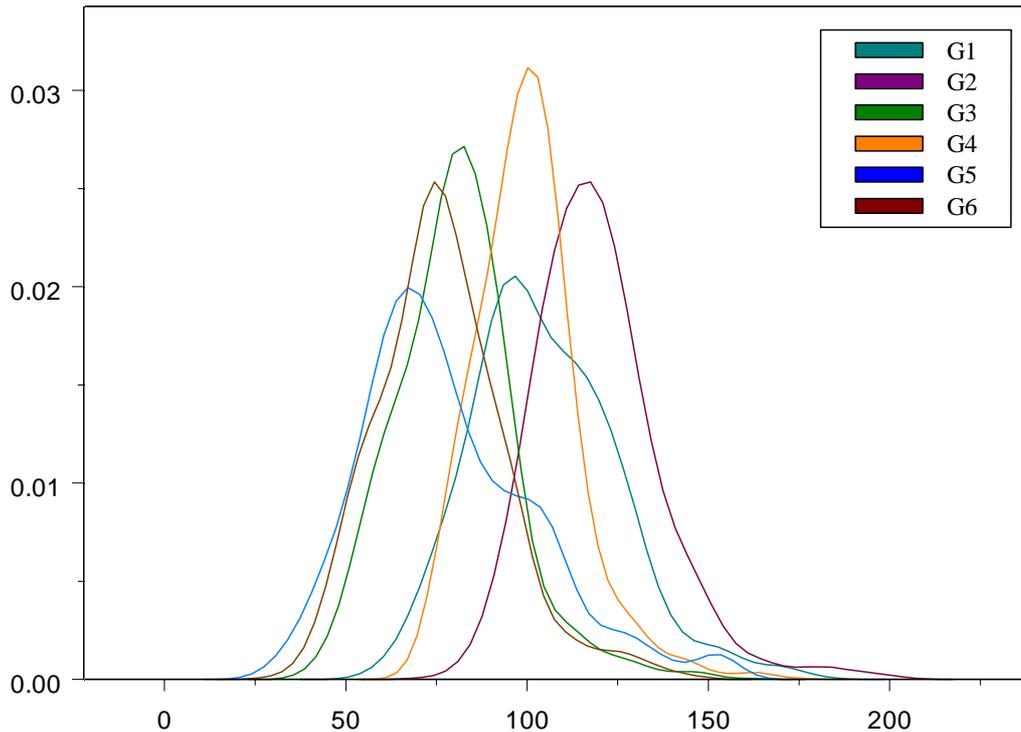


Figure 23 : distribution des distances des îlots aux 6 groupes d'agents

L'objectif est alors de ventiler les différents agents, affectés au préalable à chacune des zones Z_l , à l'un des îlots constituant cette zone, selon une probabilité :

$$P(I_k) = 1 - \frac{d(I_k, g_{A_i})}{\sum_{k=1}^n d(I_k, g_{A_i})}, \forall A_i \subset Z_l, I_k \subset Z_l$$

La dernière étape, enfin, consiste à affecter chaque agent à un élément du bâti, en fonction des zones et des îlots précédemment fixés. Cette affectation finale est réalisée au moyen d'un calcul de potentiel au bâti, explicité par la Figure 24.

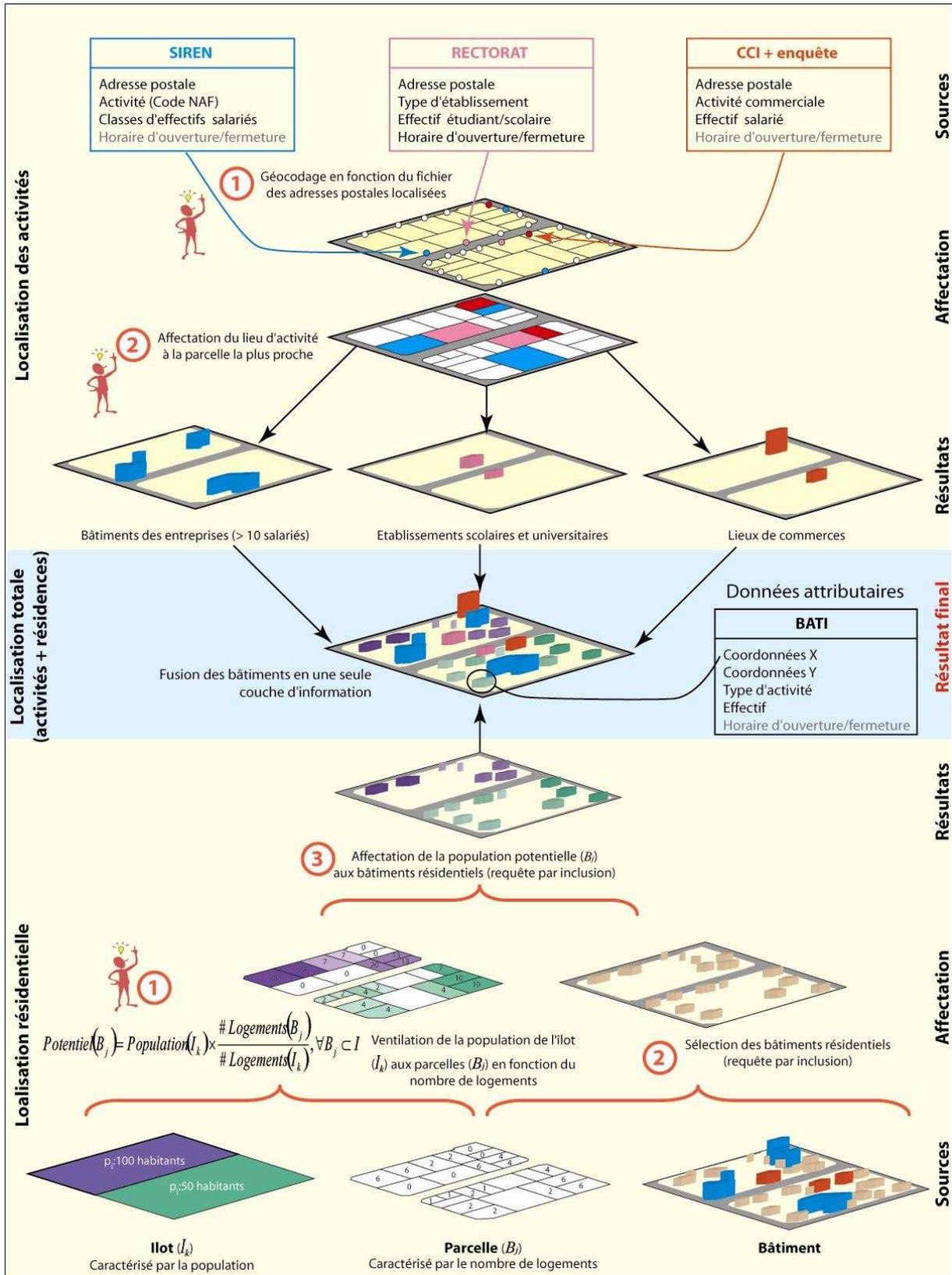


Figure 24 : création d'un champ de potentiel et affectation des agents au bâti

Le potentiel de chaque bâtiment B_j est estimé à partir de la population recensée à l'îlot et des informations sur le parc de logements résidentiels fournies par le cadastre :

$$Potentiel(B_j) = Population(I_k) \times \frac{\#Logements(B_j)}{\#Logements(I_k)}, \forall B_j \subset I_k$$

Cette affectation proportionnelle au nombre de logements permet ensuite d'affecter de manière aléatoire chaque agent à un bâtiment, selon une probabilité :

$$P(B_j) = \frac{Potentiel(B_j)}{\sum_{j=1}^n Potentiel(B_j)}, \forall B_j \subset I_k$$

4.2.2.2 Affectation des agents à un lieu de travail

L'objectif est ici d'exploiter toute information externe permettant de reproduire, au moins dans ses grandes tendances, la géographie locale des flux quotidiens. La première information clés est dans cette perspective une matrice origine-destination construite à partir de l'enquête ménages-déplacements. Cette matrice possède une structure classique, avec $n(Z_r; Z_t)$ le flux (en nombre de déplacements) entre la zone de résidence i et la zone j pour le motif « travail ».

Zone de résidence (Origine), Z_r	Zone de travail (Destination), Z_t					
	Z_{t_1}	...	Z_{t_j}	...	Z_{t_m}	ΣZ_r
Z_{r_1}						...
...						...
Z_{r_i}			$n(Z_{r_i}; Z_{t_j})$			ΣZ_{r_i}
...						...
Z_{r_n}						...
ΣZ_t	ΣZ_{t_j}	$\Sigma n(Z_{r_i}; Z_{t_j})$

Figure 25 : matrice O/D pour le motif « travail »

Soit Z_{r_i} la zone de résidence affectée à l'agent A_i à l'issue de l'étape 1. L'objectif de cette nouvelle étape est alors d'affecter à cet agent A_i une zone de travail Z_{t_j} , en fonction des flux recensés dans la matrice O/D entre Z_{r_i} et l'ensemble des zones de travail $Z_t(Z_{t_1}, \dots, Z_{t_j}, \dots, Z_{t_m})$.

Cet objectif revient à tirer au hasard une zone au sein de l'ensemble Z_t , en fonction d'une probabilité conditionnelle $P(Z_{t_j}/Z_{r_i})$ définie par :

$$P(Zt_j / Zr_i) = \frac{P(Zr_i \cap Zt_j)}{P(Zr_i)} = \frac{n(Zr_i Zt_j)}{\sum_{j=1}^m n(Zr_i Zt_j)} = \frac{n(Zr_i Zt_j)}{\sum Zr_i}.$$

L'introduction d'une contrainte de distance dans cette procédure permet enfin d'assurer une cohérence des résultats obtenus avec l'un des attributs des agents, le temps quotidien de transport. L'exploitation d'une seconde matrice, de distances cette fois-ci, permet de définir cette contrainte (Figure 26).

		Zone de travail (Destination), Zt				
		Zt ₁	...	Zt _j	...	Zt _m
Zone de résidence (Origine), Zr	Zr ₁					
	...					
	Zr _i			d(Zr _i ,Zt _j)		
	...					
	Zr _n					

Figure 26 : matrice de distances

L'idée est ici de ne travailler que sur un sous ensemble zt de Zt, tel que :

$$zt \in Zt \mid d_{A_i} - \varepsilon \leq d(Zr_i, Zt_j) \leq d_{A_i} + \varepsilon$$

avec :

- $d_{A_i} = f(t_{transport,A_i})$, c'est-à-dire la distance que l'agent A_i est susceptible de parcourir compte tenu de son temps et son mode de transport ;
- ε une distance seuil à fixer par l'utilisateur.

4.3 Simuler les journées de la population et la ville en mouvement

4.3.1 Générer des emplois du temps de la population synthétique

L'objectif de la génération des emplois du temps est d'ordonner dans le temps et dans l'espace les tâches qui sont attribuées à chacun des agents de la population synthétique. La création d'un emploi du temps s'effectue automatiquement en prenant en considération la durée de chaque activité, le temps de transport nécessaire pour se déplacer d'un lieu d'activité à un autre, et une typologie des tâches à effectuer par l'agent. Au cours de cette section nous abordons dans un premier temps la typologie des activités. Ensuite nous présentons le processus général de reproduction des programmes d'activités avant de nous focaliser plus en détail sur l'algorithme utilisé. La Figure 27 décrit la démarche complète de génération des plannings.

4.3.1.1 Classification des activités

Parmi l'ensemble des activités qu'un individu souhaite planifier au cours d'une journée, certaines apparaissent plus prioritaires que d'autres. Il est, par exemple, impératif d'aller travailler alors que les achats domestiques peuvent être reportés au lendemain. Cette hiérarchie entre les tâches a été établie selon trois niveaux [STO 96] :

- Les activités fixes (ex. travail) qui sont impérativement réalisées dans un lieu spécifique avec une durée précise.
- Les activités flexibles (ex. domicile et accompagnement) qui possèdent une marge de manœuvre sur la durée et/ou le lieu. Une telle tâche peut s'accomplir dans des lieux différents avec une durée variable.
- Les activités optionnelles qui outre leur flexibilité spatiale et temporelle ne doivent pas obligatoirement être réalisées (ex. loisirs).

Cette typologie se traduit par une flexibilité variable dans l'espace et dans le temps de l'exécution des activités. C'est pourquoi nous caractérisons les tâches manipulées dans le cadre du projet MIRO selon trois paramètres majeurs :

- L'obligation d'exécution : une activité peut être obligatoire ou non.
- La durée : une activité peut avoir une durée fixe, minimale, maximale ou encadrée entre deux bornes (une durée minimale et une maximale).
- La localisation : une activité, comme le travail, s'effectue dans un unique lieu (cad, le lieu professionnel principal) alors que d'autres sont réalisables dans divers lieux. La tâche « Achat » en est un exemple.

Ces propriétés constituent des contraintes clefs pour la génération des emplois du temps. Elles sont déterminées pour chaque type de tâche manipulée. En fonction des valeurs attribuées, le système de génération de l'emploi du temps est alors autorisé à supprimer ou non une tâche, à modifier sa durée, etc. Ainsi nous éliminons tous les problèmes liés à la concurrence des activités et nous rendons la génération d'un emploi du temps toujours possible.

Tâche	Caractère	Durée	Localisation	Obligation
Travail	Fixe	Déterminée	Déterminée	Obligatoire
Accompagnement	Flexible	Variable	Déterminée	Obligatoire
Domicile	Flexible	Variable	Déterminée	Obligatoire
Achat	Optionnel	Variable	Variable	Optionnelle
Repas	Flexible	Variable	Variable/	
Déterminée	Obligatoire			
Visite	Optionnel	Variable	Variable	Optionnelle
Loisir	Optionnel	Variable	Déterminée	Optionnelle

Tableau 3 : Typologie des tâches manipulées

4.3.1.2 Génération des emplois du temps

Le système de génération des emplois du temps est exécuté pour chaque individu de la population synthétique. Son but est de définir les horaires de début et de fin de chaque tranche d'activité. En effet, une même tâche se voit parfois découpée en plusieurs tranches panachées à différents moments de la journée. Par exemple, il est courant que l'activité « travail » soit décomposée en deux tranches, l'une s'accomplissant le matin et l'autre l'après midi. Les

emplois du temps créés doivent tenir compte de la durée de chaque activité définie lors de la génération de la population synthétique, des contraintes d'accessibilité au bâti (horaire d'ouverture et de fermeture des lieux de travail, des magasins, etc...) ainsi que des temps de transport.

Sur cette base, la génération des programmes d'activités se décompose en quatre étapes principales (Figure 27) :

- L'étape 1 permet de générer aléatoirement des agents à partir des groupes précédemment identifiés. Chaque agent possède alors une liste d'activités nommées A_i associées à des durées minimales et maximales d'exécution.
- L'étape 2 consiste à effectuer un tirage aléatoire pour déterminer la durée de chaque tâche. Deux cas se présentent : le premier cas concerne les tâches dont la durée maximale ne dépasse pas 7 heures. Nous utilisons une distribution basée sur une courbe gaussienne dont la moyenne est le centre de l'intervalle constitué par les bornes maximales de durée. Dans le deuxième cas, la moyenne est la borne minimale de durée. Nous obtenons ainsi une durée pour chaque activité de chaque agent. Une première vérification est alors effectuée pour ne pas que la somme des durées des activités d'un agent dépasse 24 heures.
- L'étape 3 réutilise les activités précédemment générées afin d'assigner à celles-ci une heure minimale de début. Cet objectif est atteint par tirage aléatoire au sein de distributions statistiques observées des heures de début d'activités, telles qu'issues de l'enquête ménages-déplacements.
- Enfin, l'étape 4 utilise un solveur Prolog qui, à partir de contraintes temporelles décrites dans la partie 4.3 et des données précédemment générées, va créer des emplois du temps valides, c'est-à-dire des listes d'activités couplées à une durée et une heure de début. Si le solveur n'obtient pas de solution, un retour à l'étape 2 est réalisé, afin de modifier tout ou partie des paramètres.

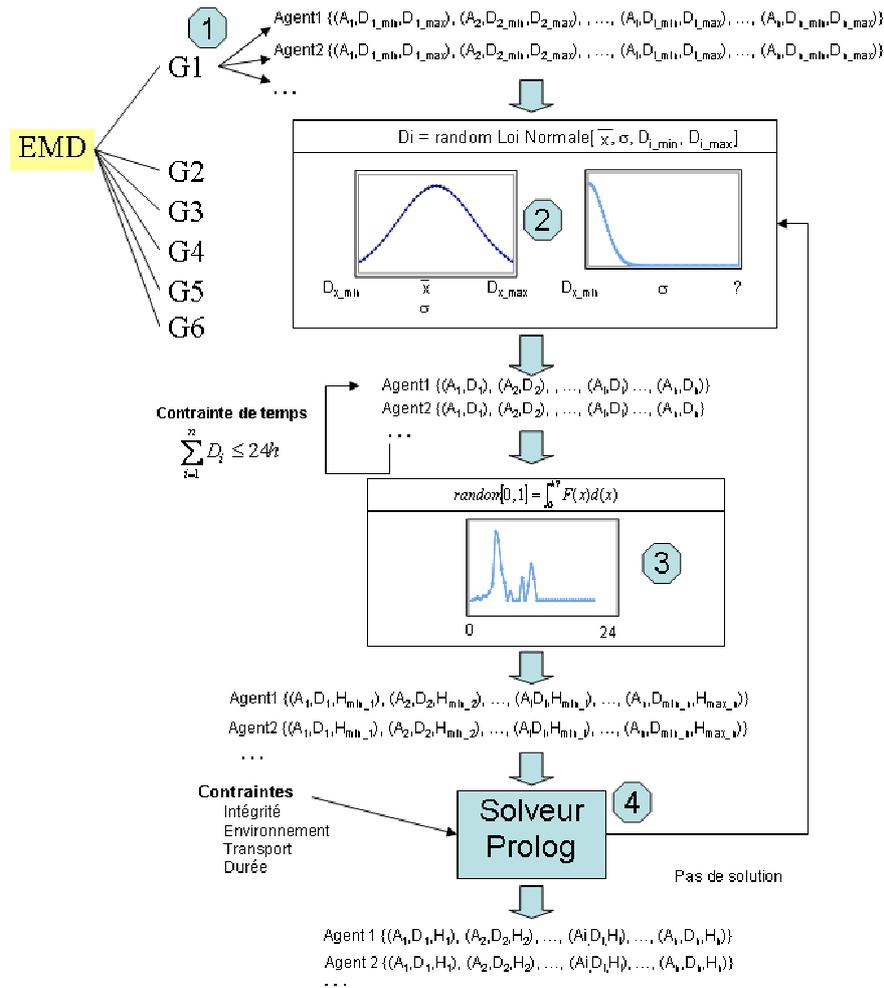


Figure 27 : un algorithme pour la génération des emplois du temps

De nombreux algorithmes de génération d’emplois du temps sont présentés dans la littérature. Certains se basent sur la théorie des graphes, d’autres sur des algorithmes génétiques [AIC 04]. Cependant, à notre connaissance, aucun d’entre eux ne propose une solution pour organiser des tâches pouvant se décomposer en plusieurs tranches et respectant des contraintes externes comme les horaires d’ouverture et de fermeture du bâti.

Les approches traditionnelles de programmation par un langage impératif tel que JAVA ne sont pas adaptées pour la création d’un algorithme tel que nous le souhaitons. Notre choix s’est donc porté sur l’utilisation d’un outil emprunté au domaine de l’intelligence artificielle : le solveur CLP(FD) de Sicstus prolog.

L’utilisation de CLP(FD) repose sur une démarche simple : (i) la création de variables (ex. x, y, z) ; (ii) la définition de contraintes sur ces variables (ex. $x > y$, $x < z$, $y = 10$, $z = 20$) ; (iii) et l’évaluation automatique de ces variables par l’exécution du solveur (ex. $x \in]10 ; 20[$). Le fonctionnement interne de Sicstus est détaillé notamment dans les travaux de Carlsson et Holzbaur [CAR 97] et [HOL 95].

Les variables de sortie, représentatives des emplois du temps, sont évaluées en fonction des paramètres d’entrées du solveur et de trois grands types de contraintes :

- Les contraintes d'intégrité vérifient la cohérence des emplois du temps. Elles contrôlent notamment qu'une tranche d'activité commence bien avant de se terminer et qu'elles ne se chevauchent pas.
- Les contraintes d'environnement assurent que les tranches d'activité s'accomplissent bien aux moments où cela est possible. Ainsi, l'activité de restauration s'effectue impérativement dans une fenêtre de temps [11h00, 15h00].
- Les contraintes de transport doivent être prises en compte, dans la mesure où un temps de transport est souvent nécessaire pour transiter d'un lieu d'activité à un autre. En première approximation, cette contrainte revient à découper le budget-temps de transport affecté à chaque individu et à l'intercaler entre tout couple d'activités.

Après l'ajout des différentes contraintes sur les variables, le solveur est en mesure de générer un emploi du temps. Lorsque le solveur ne trouve aucune solution, la phase de pré-traitement est à nouveau exécutée afin de réduire la complexité de l'emploi du temps.

Bien sûr, dans le cadre de la simulation, les agents seront amenés à remettre en cause ces premiers plannings.

4.3.2 Validation de la génération de planning

Afin de valider le moteur de génération de planning, les emplois du temps construits par le solveur sont comparés aux emplois du temps observés dans l'enquête ménage. Deux simulations portant sur la même population synthétique ont retenu plus particulièrement notre attention. (Figure 28).

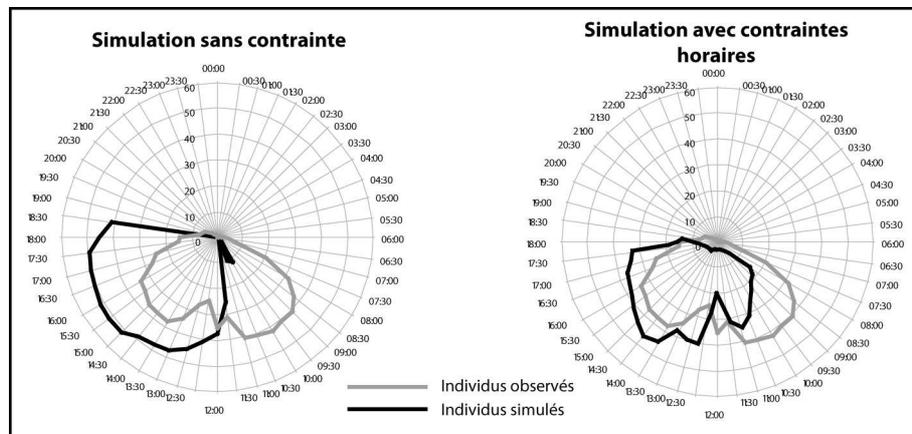


Figure 28 : distribution horaire des individus observés et simulés pour le motif travail

La différence majeure repose sur les contraintes horaires retenues. Dans la première simulation, les agents étaient libres d'accomplir toutes leurs tâches à n'importe quel moment de la journée. Des conditions plus réalistes ont été introduites dans la seconde expérimentation : les tâches ne pouvaient s'accomplir que dans une fenêtre de temps limitée pour un lieu donné, fenêtre définie à partir de distributions statistiques issues de l'enquête ménages-déplacements.

La lecture de la Figure 28 permet de mesurer les différences entre les deux scénarios. La première simulation génère des emplois du temps peu représentatifs de la population réelle. La majorité des individus simulés travaille en effet uniquement l'après-midi. Les résultats du

second test reflètent davantage la réalité, même si un décalage significatif persiste. Lors de nos simulations, ces différences peuvent être considérées comme mineures. Pour cette raison, nous avons validé le système de génération de planning et intégré ce système dans le système multi-agents.

Le simulateur permet aussi de confronter les emplois du temps générés avec les contraintes environnantes. Ainsi, les agents tentent d'exécuter leur planning sur une journée, s'ils échouent dans cette tâche, ils vont recalculer ce planning pour la journée suivante en éliminant éventuellement un certain nombre de tâches facultatives. Le nouveau planning tient compte des connaissances de l'agent acquises pendant la journée précédente.

4.3.3 Simuler la ville en mouvement

Le modèle présenté dans la section précédente a été implémenté dans un simulateur multi-agents. Ce dernier développé à partir de la bibliothèque de simulation RAFALE-SP [MAR 06], s'interface avec la plate-forme MadKit qui l'exécute.

Le simulateur MIRO extrait les informations nécessaires à l'exécution du modèle à partir d'une base de données My-SQL Open-GIS, et de fichiers textes (voir la Figure 29). La base de données géographique contient toutes les données cartographiques de la ville de Dijon (tronçon de route et bâti) qui sont essentielles à la création d'un environnement virtuel où se déplacent les agents. Les fichiers textes renferment, quant à eux, les informations importantes pour la création des agents représentatifs de la population synthétique.

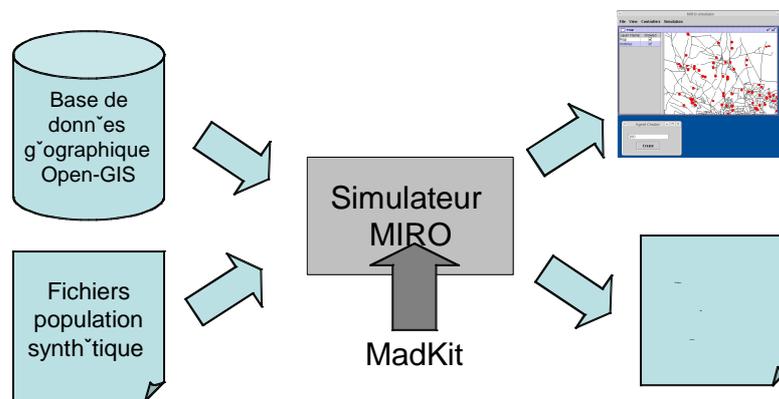


Figure 29 : paramètres et sorties du simulateur MIRO.

Une pléthore de données peuvent être extraites lors de l'exécution du modèle : la position des mobiles à chaque instant, l'activité de chaque mobile, le taux d'occupation d'un tronçon, pour chaque agent le planning qu'il génère et celui qu'il exécute réellement... Certaines de ces informations sont visualisables en « temps réel » grâce à une interface englobante. Mais pour la plupart, elles sont stockées dans des fichiers de trace permettant ainsi une analyse, à posteriori, par la plate-forme d'intégration visuelle.

Outre les fonctionnalités traditionnelles qu'un simulateur dispose, MIRO présente la faculté d'être parallélisable sur une grappe d'ordinateurs. Ainsi il est possible de réaliser des simulations à large échelle avec un temps de réponse plus réduit tout en augmentant la complexité du modèle (ex. le nombre d'agents, de tronçons,...). Actuellement, le simulateur présente, malgré tout, des faiblesses de performances causées par l'utilisation du module

Sicstus Prolog de génération de planning. Un effort doit être porté sur ce point car lorsque ce module n'est pas utilisé, il est alors possible de faire évoluer près de 80 000 agents sur la carte de Dijon en parallélisant le simulateur sur seulement 4 serveurs de calcul.

4.4 La validation des sorties de simulation

4.4.1 La création d'une plate-forme d'intégration visuelle

Afin de faciliter la communication des résultats de simulation, une réflexion sur la représentation dynamique et la visualisation interactive de données spatio-temporelles a été amorcée. Cette réflexion a abouti à la définition des caractéristiques d'une plate-forme interactive de visualisation (PIV) finale.

Concrètement, à partir de la plate-forme interactive de visualisation, l'utilisateur doit pouvoir, dans un premier temps, prendre appui sur l'outil pour connaître les états instantanés (statiques) de la ville virtuelle ainsi que des profils des agents, puis, dans un second temps, explorer les résultats dynamiques de la simulation des agents évoluant dans la ville. De plus, l'utilisateur doit pouvoir intervenir de manière interactive sur les données afin de bâtir des scénarios qui permettront aux experts d'évaluer des actions potentielles en matière de gestion de la mobilité.

Cette visualisation à référence temporelle (instant ou période dans la journée) doit permettre de rendre compte en temps réel:

- De l'espace d'étude : c'est-à-dire de la ville virtuelle et de ses fonctions (services, commerces, transports...). Il s'agit de proposer une représentation cartographique adaptée. Par exemple, lorsque le référent temporel est une période de la journée, il faut pouvoir rendre compte visuellement de l'évolution de la disponibilité des différents services urbains au cours de cette période.
- Des agents (les individus modélisés) : il s'agit de permettre la consultation d'informations sur la population simulée, principalement sur les catégories d'appartenance et les emplois du temps générés.
- Des déplacements : il s'agit de proposer un mode de représentation des trajectoires de l'ensemble des agents ou d'un seul agent. Ce mode de représentation doit être animé pour rendre compte des mouvements des individus dans le temps.
- Des résultats obtenus après simulation : c'est-à-dire accéder aux résultats et les visualiser par le biais de graphiques adaptés.

Il est important que l'interface de géovisualisation soit interactive. Outre des fonctions d'accès direct aux différents composants (ville virtuelle, agents), l'interface doit permettre de paramétrer un certain nombre de variables.

La réflexion sur le développement d'une PIV a abouti au développement de trois interfaces détaillées ci-dessous :

- Le premier environnement de suivi visuel animé a été développé sur la plate-forme MadKit, il est centré sur la visualisation des déplacements des agents sur le réseau routier.
- Le second a eu pour objectif de proposer un environnement plus large permettant l'intégration du suivi visuel animé précédent complété par un ensemble d'informations sur la méthode appliquée (partie didactique), sur les résultats via la consultation des données tabulaires produites et sur la

consultation de cartes thématiques. Cet environnement a été développé via une technologie opensource OpenLaszlo •<http://www.openlaszlo.org/>

- Enfin face aux difficultés rencontrées sur l’outil opensource, un dernier environnement a été développé en utilisant des langages plus répandus (HTML, Javascript, PHP, Flash 8). qui permettent la mise en ligne rapide et efficace des données stockées dans une base de données MySQL.

4.4.1.1 Suivi visuel animé – MadKit

Afin de suivre en « temps réel » l’évolution des simulations et de les paramétrer, une interface graphique a été développée. Elle permet, à la fois, une observation de l’évolution du modèle à l’échelle de la ville (suivi des déplacements des mobiles sur la carte de dijon), mais aussi un zoom au niveau de l’agent pour afficher, par exemple, l’activité de chacun d’eux.

Cette interface intègre la notion de calque permettant un affichage personnalisé en fonction des besoins de l’utilisateur. Elle intègre la notion de calque permettant un affichage personnalisé en fonction des besoins de l’utilisateur. Le thématicien est alors en mesure d’afficher ou non et de manière indépendante, la voirie, le bâti, les mobiles mais aussi de superposer ces différentes vues afin d’en obtenir une nouvelle plus synthétique, qui correspond mieux à ses attentes.

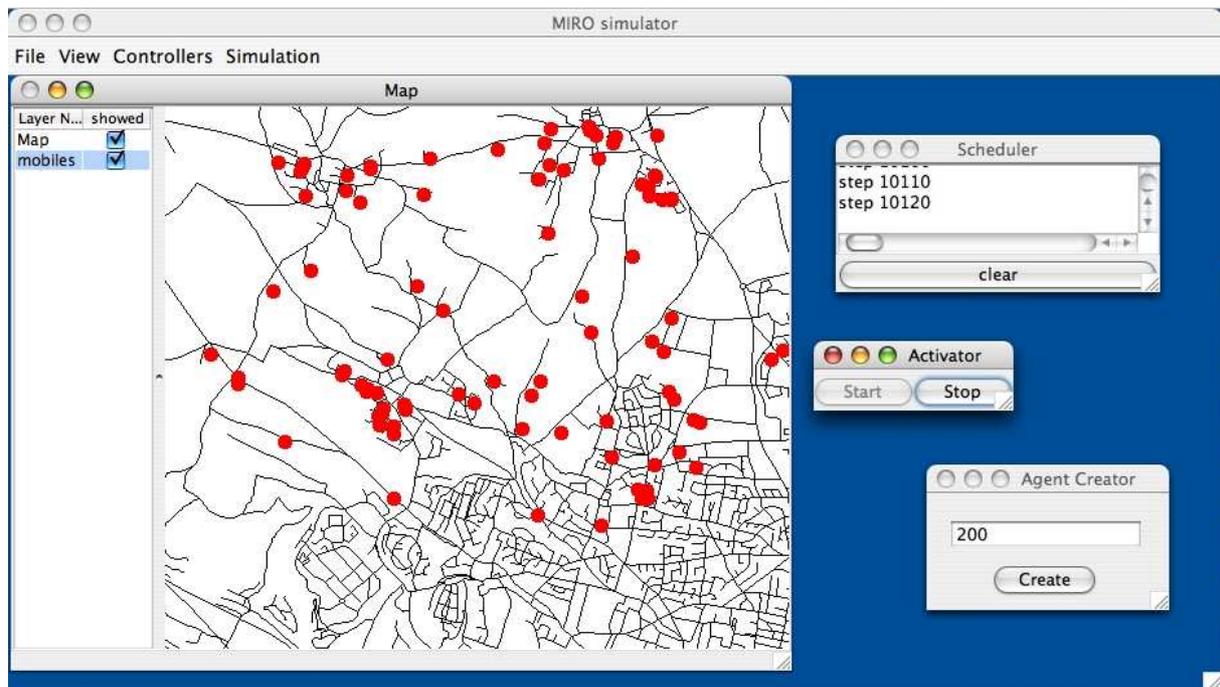


Figure 30 : capture d'écran du simulateur

D’autre part, cette interface dispose de multiples fonctionnalités pour suivre l’évolution du système au travers de fichiers de trace focalisés sur un certain nombre de paramètres : position des agents, activité de chacun d’eux, population d’agents présente sur un tronçon, ...

4.4.1.2 PIV - Openlaszlo

La plate-forme de visualisation développée via la technologie opensource OpenLaszlo propose un environnement multifenêtre repositionnable et redimensionnable proposant cinq

modules (chacun correspondant à une nouvelle fenêtre, facilitant ainsi la navigation entre chaque module) :



Figure 31 : plate-forme open laszlo

Les cinq modules :

- **Description** : une fenêtre didactique présente les principes du projets : objectifs, données manipulées, démarche, population simulées et profils d'activités.

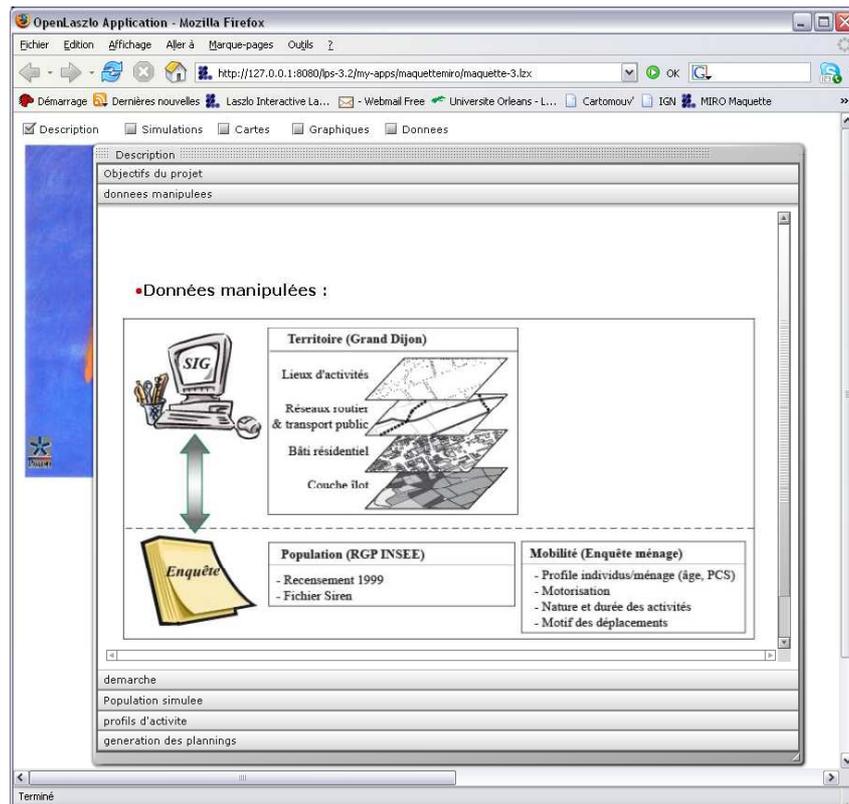


Figure 32 : fenêtre de description

- **Simulation** : cette fenêtre intègre un enregistrement vidéo du suivi visuel animé développé sur madkit (vu précédemment).

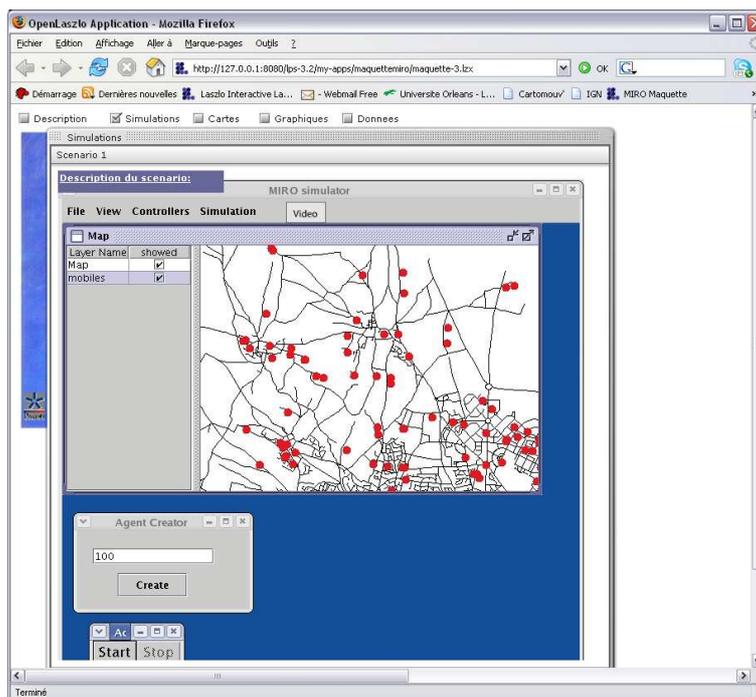


Figure 33 : fenêtre de simulation madkit

- **Cartes** : la publication d'un ensemble de cartes réalisées en parallèle sur SIG du réseau routier, des lieux d'activités, des flux générés ainsi que la publication des photographies aériennes de la zone d'étude.

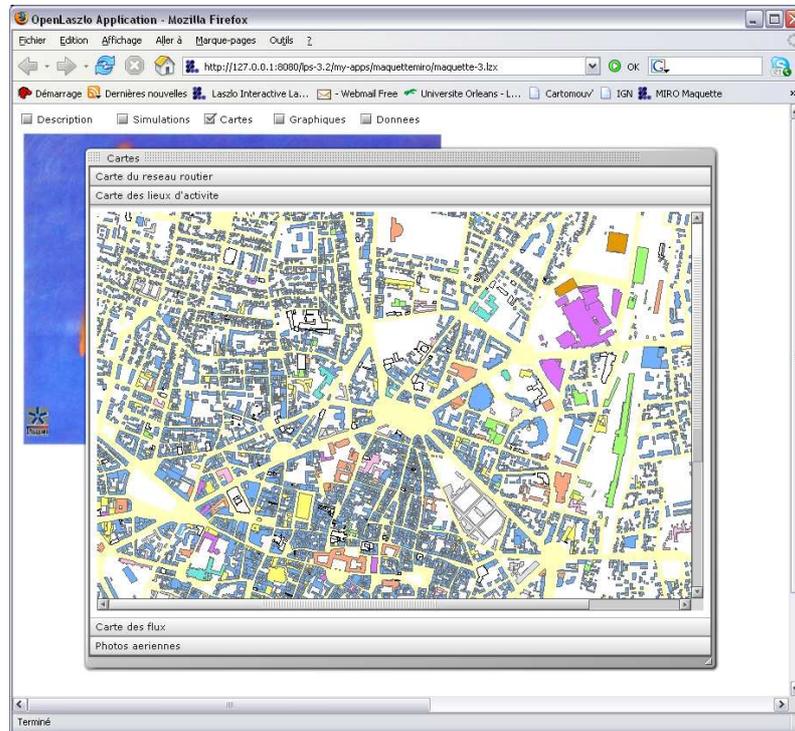


Figure 34 : fenêtre des cartes

- **Graphiques** : la publication d'un ensemble de graphiques réalisés sur des outils d'analyse, qui traitent les données obtenues par simulation (ex : du diagramme polaire de comparaison des valeurs observées et simulées),

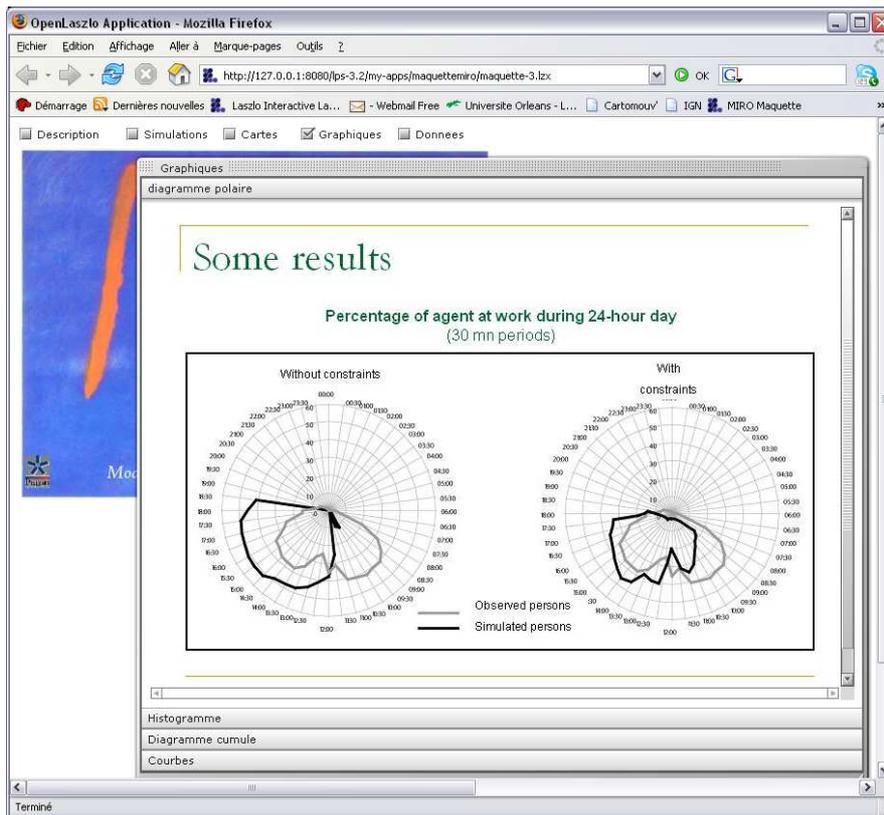


Figure 35 : fenêtre des graphiques

- **Données** : La consultation et manipulation des données générées par le simulateur. Une série d'onglets situés en haut du tableau permet d'accéder à différentes thématiques comme les différents types d'activité ou les caractéristiques des agents (nombre, catégorie ...). Pour chaque table de données on peut ajuster la largeur des colonnes afin d'avoir une meilleure visibilité.

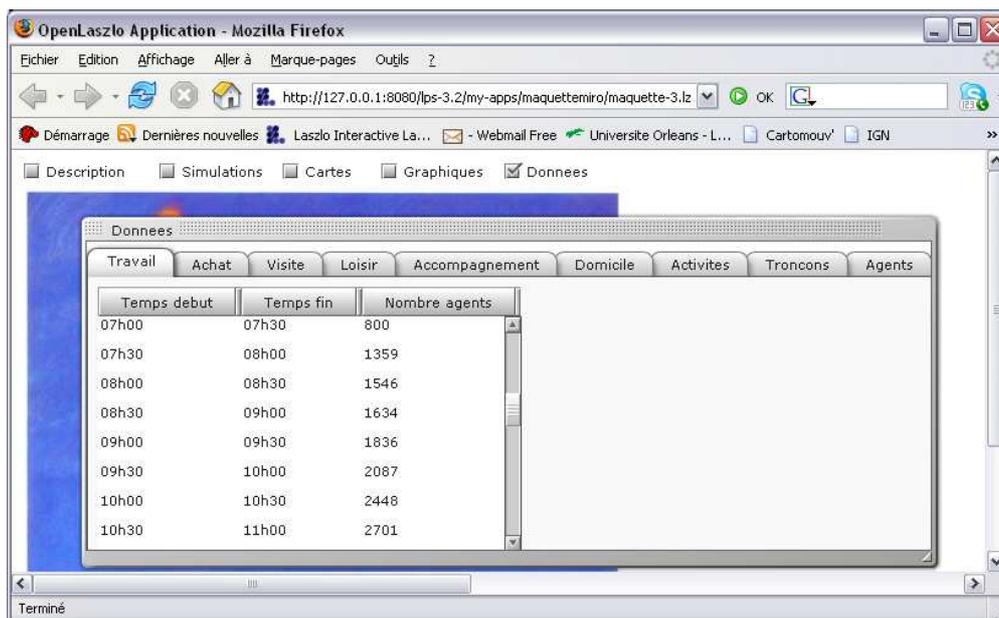


Figure 36 : fenêtre des données

4.4.1.3 PIV – HTML, Javascript, PHP, Flash 8,MySQL,

La dernière version de plate-forme de visualisation se présente comme un site web. Les pages sont générées en HTML. Une grande partie est aussi codée en PHP pour le traitement dynamique des données stockées dans une base de donnée MySQL. L'ensemble fonctionne en local avec un serveur Apache (permettant de gérer les scripts PHP) et peut être publié sur Internet. L'application est compatible tout navigateur (Internet Explorer, Firefox, Mozilla-Netscape).

La dernière version de plate-forme de visualisation a été conçu avec la même architecture fonctionnelle que précédemment. On accède aux différents modules en naviguant via une barre de menu horizontal, comportent des sous-menus. Chaque module s'ouvre dans une nouvelle fenêtre (popup). L'utilisateur peut ainsi conserver à l'écran plusieurs modules et les juxtaposer.



Figure 37 : plate-forme php

Les cinq modules :

- **Présentation** : une fenêtre didactique fonctionnant à la manière d'un diaporama dont le fond reste similaire à la version précédente.

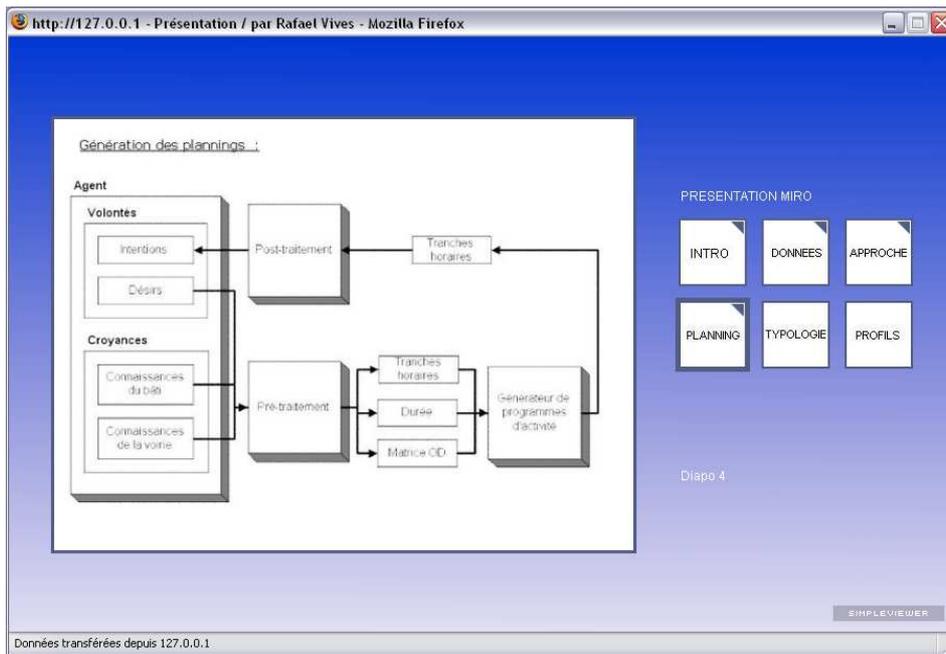


Figure 38 : fenêtre de présentation

- **Cartes** : la publication d'un ensemble de photographies aériennes et de cartes thématiques du centre ville et des bâtiments en activités. Les cartes concernant les lieux d'activités sont des cartes animées qui illustrent bien la disponibilité des services (ouverture et fermeture) ainsi que les capacités d'accueil.

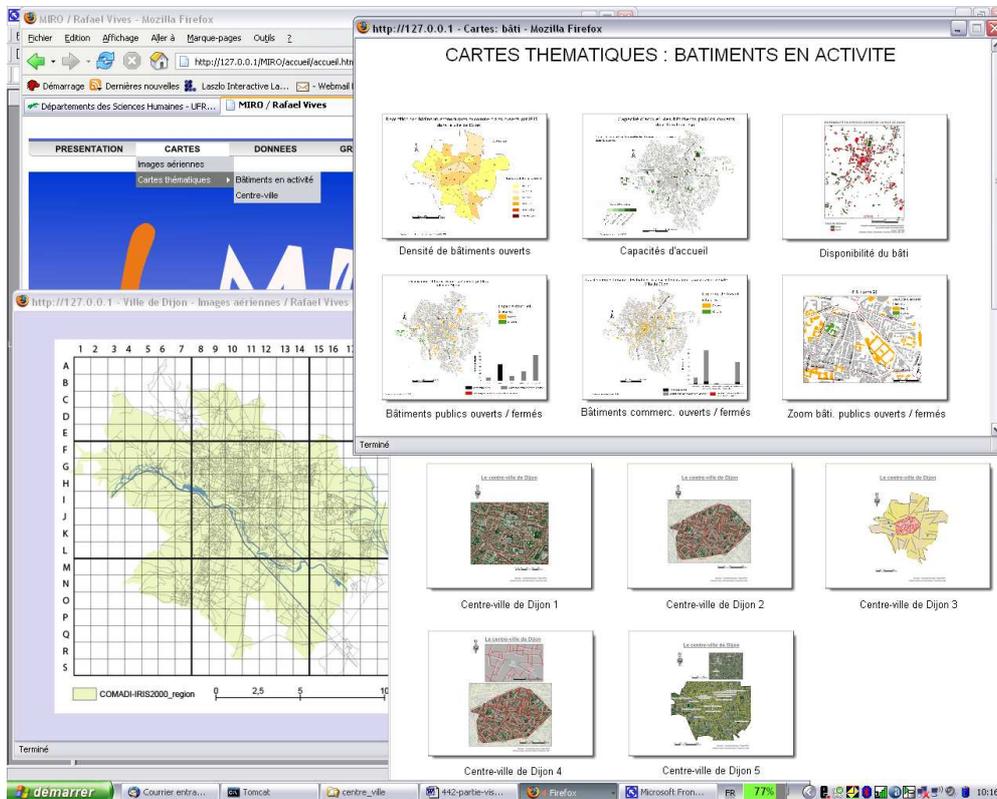


Figure 39 : fenêtre des cartes de la plate-forme php

- **Données** : ce menu reprend la solution offerte par openlaszlo pour la consultation et manipulation (de type tableur) des données générées par le simulateur.

The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying 'http://127.0.0.1 - Tableau des données / Rafael Vives - Mozilla Firefox'. The page contains a table with three columns: 'Debut', 'Fin', and 'Nbragent'. The data is as follows:

Debut	Fin	Nbragent
13h00	13h30	3006
13h30	14h00	2816
14h00	14h30	3430
14h30	15h00	3545
15h00	15h30	3338
15h30	16h00	3131
16h00	16h30	2947
16h30	17h00	2851
17h00	17h30	2795
17h30	18h00	2606
18h00	18h30	2544
18h30	19h00	1382

At the bottom of the window, a status bar indicates 'Transfert des données depuis 127.0.0.1...'.

Figure 40 : fenêtre des données de la plate-forme php

- **Graphiques** : la publication d'un ensemble de graphiques générés automatiquement à partir des données obtenues par simulation stockées dans une base MySQL (plus facile à structurer, gérer, et exploiter qu'une collection de fichiers). Trois catégories de graphiques sont proposés :
 - *Catégories d'agents* : illustre la répartition (par catégories) de la population simulée.



Figure 41 : fenêtre des graphiques sur les catégories d'agents

- *Pratique d'activités* : permet d'effectuer une analyse comparative des activités de l'ensemble de la population agent simulée sur toute la journée à des pas de temps présélectionnés (graphique de droite). Permet également de comparer, sur une activité sélectionnée, les pratiques d'un nombre d'agents définis (graphique de gauche)



Figure 42 : fenêtre des graphiques sur les activités

- *Emploi du temps des agents* : Ces graphiques permettent de comparer les emplois du temps (durée et succession de chaque activité) de plusieurs agents sur un ou plusieurs jours (cette dernière solution permet une analyse du processus itératif de génération des emplois du temps).



Figure 43 : fenêtre des programmes d'activités

- **Simulation** : Contrairement aux plateformes précédentes, ce module de visualisation des déplacements ne dépend pas de Madkit, mais de la technologie Flash. Le suivi visuel des déplacements a entièrement été réalisé sous Flash 8 Pro. Il s'agit d'une carte animée et interactive. Elle permet de visualiser le déplacement sur un plan de la ville de plusieurs agents. On peut voir heure par heure la position exacte de chaque agent. Des boutons de contrôle ont été intégrés à l'animation (pause, avance, recul). La présence d'info-bulles permet à l'utilisateur d'accéder aux informations d'un agent identifié.

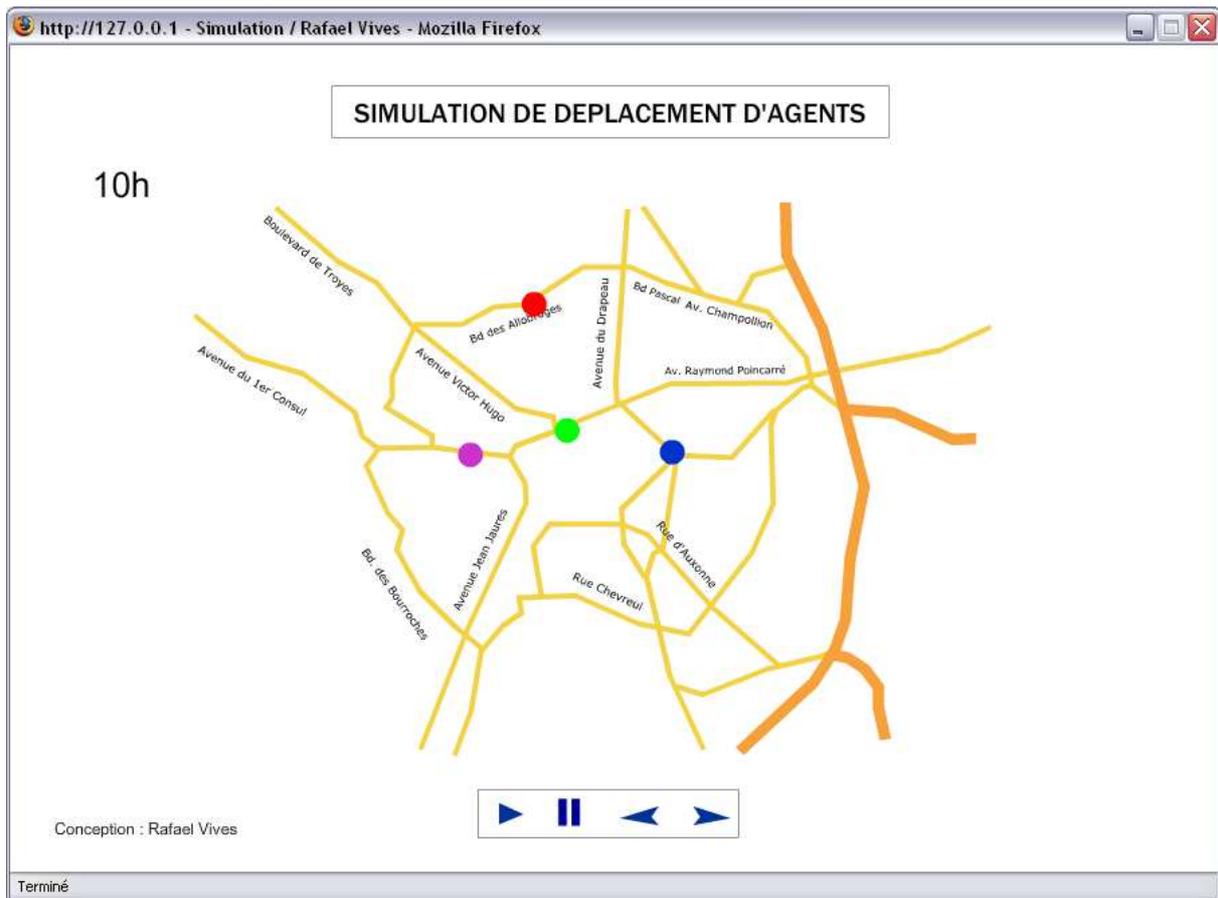


Figure 44 : fenêtre de simulation en flash

Idéalement, la PIV doit permettre d'élaboration des scénarios de fonctionnement de la ville qui pourront au besoin être sauvegardés, en vue d'une capitalisation ou de leur réutilisation. Cet objectif nécessite de faire cohabiter un moteur de simulation agent basé sur la plate-forme MadKit avec des outils de gestion, d'analyse et de visualisation de données géographiques intégrés dans un environnement interactif.

Si la dernière PIV propose une alternative au visualiseur madkit, celui-ci reste le moteur de simulation qui fournit les données du projet. L'intégration du moteur de simulation paramétrable dans la PIV n'est pas réalisée pour le moment. Les interfaces de visualisation qui ont été conçues sont des prototypes qui ont permis d'identifier les limites de certains choix technologiques.

Outre ce verrou technologique, des verrous méthodologiques existent également concernant la gestion et le traitement adapté de données accumulées à des échelles spatiales, des échelles temporelles et des niveaux d'agrégations variables.

4.4.2 Les premières validations/conclusions

L'ultime étape de la démarche MIRO concerne les processus de validation des résultats des simulations d'emplois du temps spatialisés. Avant de pouvoir effectivement établir des scénarios d'aménagement spatial et/ou temporel de l'environnement urbain en vue d'observer les adaptations des individus aux nouvelles contraintes et opportunités, notre effort a porté sur la mise au point de méthodes de traitements des données d'emplois du temps afin :

- d'une part de vérifier si l'ordonnancement des activités, et les temps alloués à chaque activité correspondent à des profils d'emplois du temps probables (c'est à dire raisonnablement proches des profils d'emplois du temps observés dans des enquêtes).
- d'autre part de rendre compte de l'ensemble des trajectoires au sein de la ville, afin de repérer si les individus se déplacent effectivement vers les lieux offrant des aménités. Il s'agit de trouver une cohérence dans l'ensemble des mouvements quotidiens au sein de l'agglomération, c'est à dire d'observer des rythmes probables correspondant à l'organisation spatio-temporelle de Dijon.

Les analyses que nous présenterons ici portent sur un échantillon de 40 individus dont on a simulé les emplois du temps de 4 journées consécutives.

Nous travaillons ici à partir des données décrivant les emplois du temps de chaque individu. Il s'agit de chroniques d'activités découpées, pour une journée, en 250 pas de temps de 5 minutes (soit environ 20 heures), chaque pas de temps étant renseigné par le type d'activité réalisé.

4.4.2.1 Analyse des Budgets-temps :

Nous proposons d'abord de produire des indicateurs synthétiques rendant compte des budgets-temps alloués aux différentes activités par les individus.

freq moy	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4
Repas	7,83	7,38	7,2	0
Travail	30,73	31,38	27,18	27,15
Achat	1,25	1,43	0	0
Loisir	0,17	1,32	0	0
Déplacement	23,88	21,15	20,18	16,7
Accompagner	0,2	0,42	0,15	0,28
Autres	0	0	0	0
Domicile	158,4	151,2	153,35	166,32
Inconnu	27,55	35,73	41,95	39,55

Tableau 4 : fréquence des activités

tpsquot moy	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4
Repas	0,65	0,61	0,60	0,00
Travail	2,56	2,61	2,26	2,26
Achat	0,10	0,12	0,00	0,00
Loisir	0,01	0,11	0,00	0,00
Déplacement	1,99	1,76	1,68	1,39
Accompagner	0,02	0,04	0,01	0,02
Autres	0,00	0,00	0,00	0,00
Domicile	13,20	12,60	12,78	13,86
Inconnu	2,30	2,98	3,50	3,30

Tableau 5 : temps moyen passé aux activités (en heure décimale)

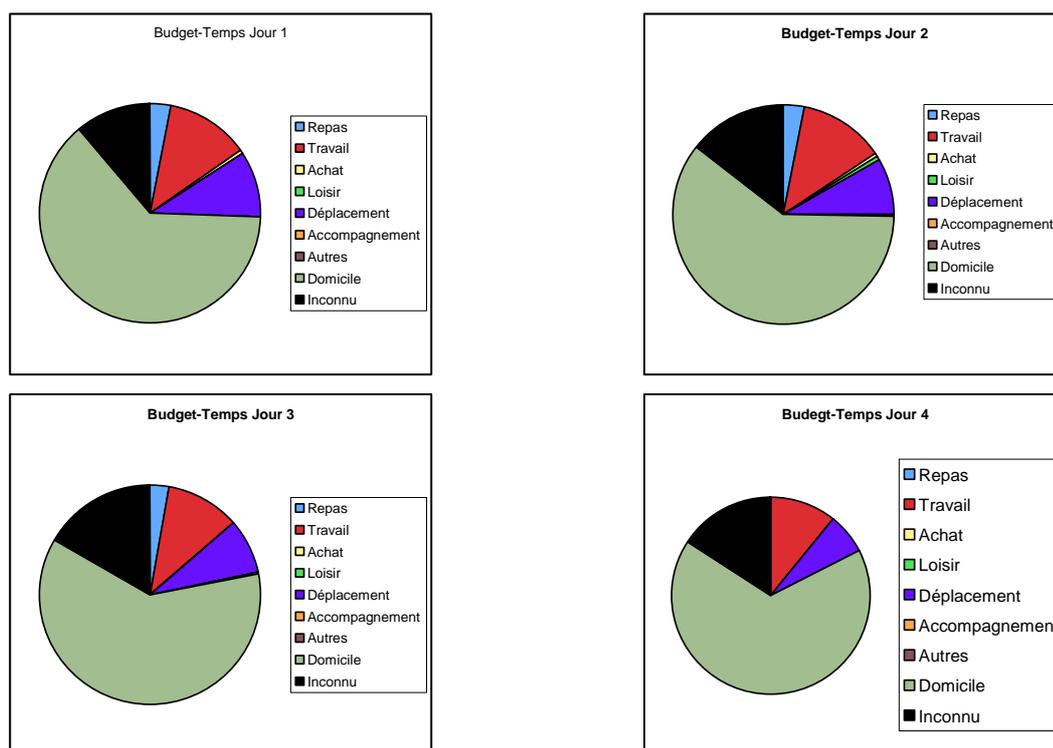


Figure 45 : les budgets-temps des 4 journées simulées

Ces premiers indicateurs synthétiques montrent en moyenne une stabilité dans les temps passés chaque jour aux différentes activités. Trois activités se dégagent nettement : le domicile, le travail et « inconnu ». Ce dernier critère correspond à des pas de temps où le simulateur ne peut donner d'information sur l'activité de l'agent. La part importante de cette activité dans le budget-temps des agents est une difficulté puisqu'elle est difficilement interprétable et semble pourtant peser dans les emplois du temps. On remarquera quelques autres difficultés, comme l'absence de l'activité « repas » lors de la 4^{ème} journée. La part des déplacements n'est pas négligeable et correspond, globalement en proportion, à la part habituelle trouvée dans des échantillons d'enquêtes ménages déplacements par exemple.

4.4.2.2 Analyse globale des rythmes quotidiens:

Afin de prendre en compte les rythmes des activités au cours des quatre journées simulées, nous montrons sur les figures suivantes, la part des agents réalisant chaque type d'activité. Ainsi, nous pouvons observer si les agents adoptent un cycle circadien, c'est à dire s'ils sont capables de répéter des structures d'emplois du temps semblables d'une journée à l'autre.

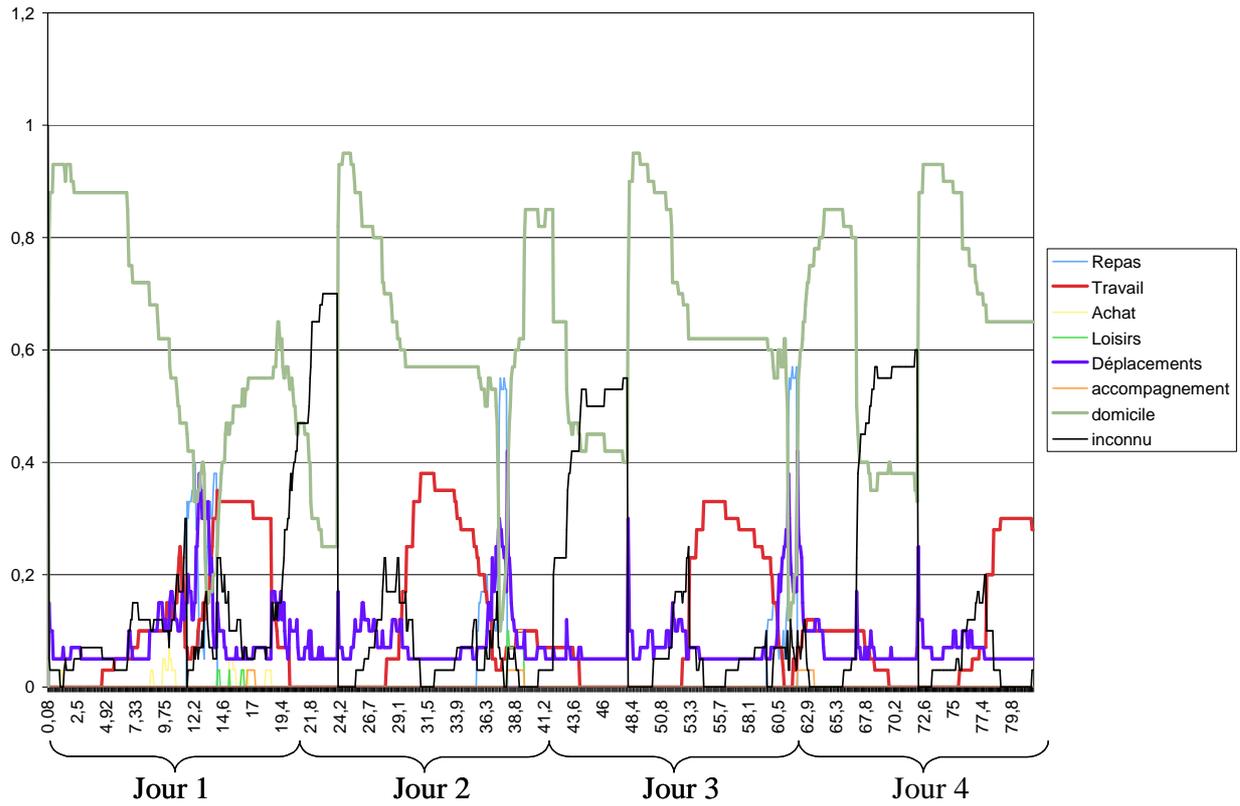


Figure 46 : part des agents en activité au cours des 4 journées simulées (toutes les activités)

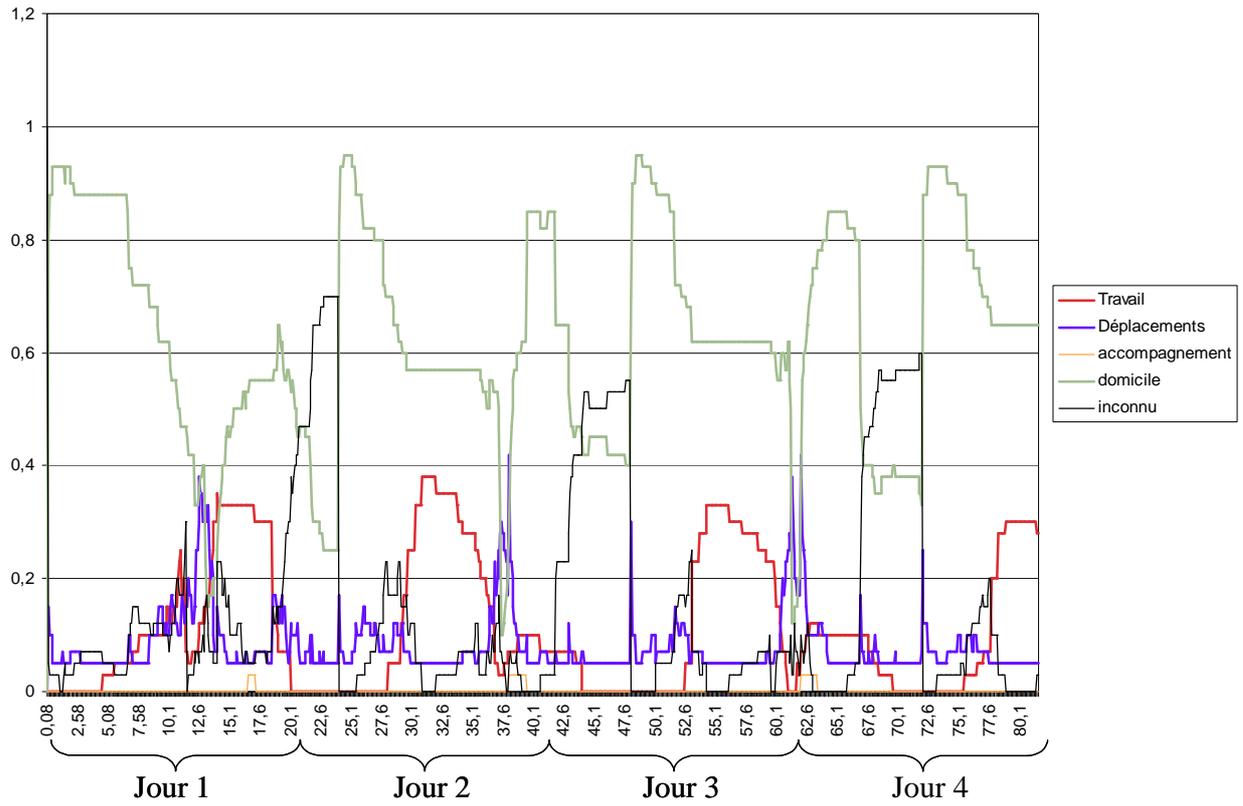


Figure 47 : part des agents en activité au cours des 4 journées simulées (Domicile-Travail-Déplacement/accompagnement)

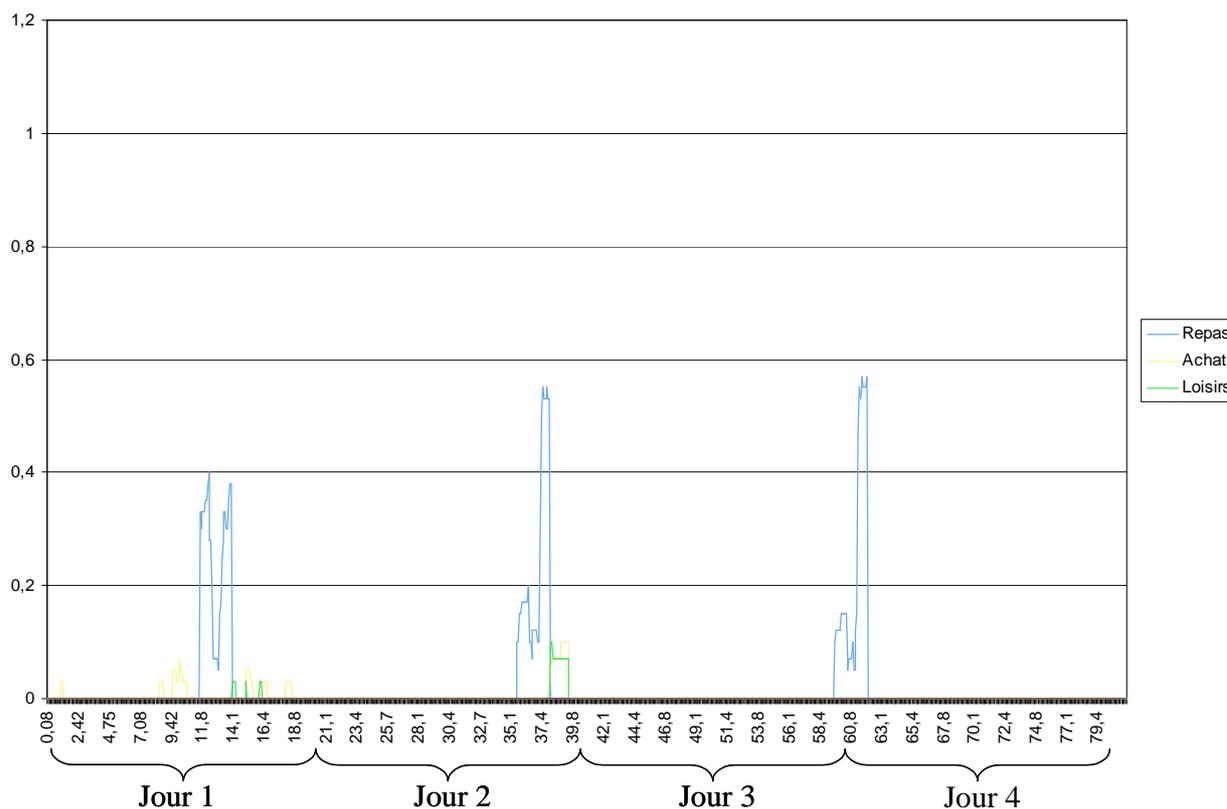


Figure 48 : part des agents en activité au cours des 4 journées simulées (Repas-Achat-Loisirs)

Ces différents graphiques suggèrent effectivement un rythme circadien des activités. L'interprétation de chacune des courbes permet de vérifier si les agents ordonnent leurs activités de manière cohérente : en effet, il semble qu'ils enchaînent le départ du domicile par un déplacement qui les mène le plus souvent à l'activité travail ; on note aussi une superposition des courbes déplacement et repas en milieu de journée qui indiquent peut-être la prise du déjeuner en dehors du lieu de travail. Si les activités, domicile et travail semblent se reproduire jour après jour aux mêmes moments, nous devons cependant noter le décalage progressif de l'activité repas du milieu de la journée au cours du jour 1, à la fin de la journée au jour 3.

Ces premières analyses permettent donc de valider pour partie les résultats des simulations, tout en montrant clairement certaines incohérences qui devront être corrigées dans le modèle.

4.4.2.3 Analyse des concordances des emplois du temps sur plusieurs jours :

L'un des objectifs du modèle MIRO est de pouvoir simuler des changements de comportements d'un même agent au cours du processus de simulation : alors que l'agent apprend à connaître son environnement, il doit pouvoir optimiser l'ordonnancement des activités dans le temps et dans l'espace pour effectivement réaliser son programme d'activités initialement prévu. Les analyses de validation doivent, par conséquent, pouvoir mesurer ce changement d'une journée à l'autre. C'est pourquoi, nous proposons ici d'adopter une démarche statistique permettant de mesurer les écarts entre plusieurs chroniques d'activités (correspondant aux 4 journées simulées pour chaque individu).

A titre d'illustration, reprenons la formalisation graphique des actogrammes qui décrivent les emplois du temps des individus suivants :

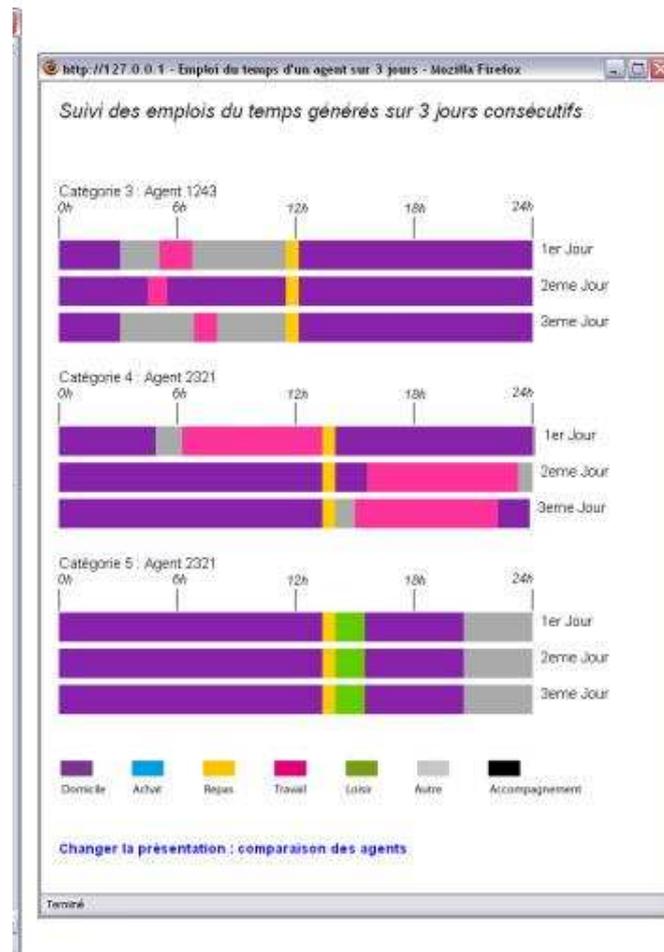


Figure 49 : actogrammes des individus

Cette présentation graphique suggère de manière évidente pour quelques individus que les durées et les fréquences des activités sont variables d'un individu à l'autre et d'une journée à l'autre pour certains individus. Cela indique donc qu'il n'y a pas « stationnarité » dans le comportement sur plusieurs jours.

Cette forme de présentation suggère une analogie possible avec des séquences de protéines codant l'ADN, avec ce qui se rapporterait à l'étude et à l'identification d'un patrimoine commun de séquences élémentaires définissant des catégories d'individus au cours du temps. Néanmoins, des différences notables existent, et l'analyse, bien que propice à l'utilisation d'outils mathématiques communs, doit être notablement améliorée. C'est ce que proposent Joh *et al.* par [JOH 02] par une approche multi-dimensionnelle de l'alignement des séquences, afin d'en faire ressortir des motifs communs, et un outil de mesure quantitatif de la « distance » minimale qui sépare une séquence d'activité d'une autre, sur des critères de différences tels que l'omission, l'inversion, la substitution, ... Si cette approche est séduisante par son caractère intuitif, il s'avère néanmoins difficile de la rendre opérationnelle sur un nombre réduit de données, en ne faisant pas intervenir de critère statistique sur la significativité des ressemblances, et ceci :

- afin de tenir compte de l'arbitraire des pas de temps dans la transcription des données
- afin de tenir compte de la probabilité de concordances d'activités qui dépend de manière directe de la fréquence d'apparition de chaque activité dans la série elle-même.

Pour ces raisons, nous retenons la méthode des concordances [HAS 00], développée dans le cadre des études sur la chronobiologie de petits animaux. Son avantage est d'être particulièrement adaptée à des séries obtenues sur des données limitées en nombre et peu propices à l'analyse de périodicités selon des méthodes alternatives (transformation de Fourier, méthodes spectrales, etc...).

4.4.2.4 Définitions de la concordance entre 2 séquences

Reprenant les notations introduites par [HAS 00], on définit par N le nombre de séquences d'activités sur la journée ($N=250$ pas de temps de 5 minutes) et par k le nombre d'activités répertoriées ($k=9$). Le fait de relever une séquence d'activités $S=(s_h)_{h=1\dots N}$ sur la journée d'un individu permet d'obtenir une succession de N codes, pris dans l'ensemble $A=\{a_1, \dots, a_k\}$ des k codes. De manière générique, deux séries $S=(s_h)_{h=1\dots N}$ et $T=(t_h)_{h=1\dots N}$ présentent un caractère de concordance, si elles possèdent des éléments h tels que

$$\gamma_h(S,T)=\beta_{ij} \neq 0 \text{ si } s_h=a_i \text{ et } t_h=a_j$$

Les termes β_{ij} représentent ainsi les valeurs de la matrice de concordance M entre activités, définie par

$$M = (\beta_{11} \dots \beta_{k1}, \dots, \beta_{ij} \dots, \beta_{1k} \dots \beta_{kk})$$

Ceci permet aux auteurs [HAS 00] de nuancer le caractère de concordance, entre une concordance stricte, pour laquelle la matrice M est la matrice identité I , et une concordance partielle, lorsque la matrice possède des éléments β_{ij} hors-diagonale non nuls. Ceci est par exemple le cas lorsque la décomposition de la journée sur les différentes activités présente un caractère d'arbitraire, avec des activités plus proches que d'autres.

On définit alors la concordance entre activités des deux séquences S et T selon la matrice M comme la moyenne

Erreur !

4.4.2.5 Application aux données simulées :

Les concordances observées dans l'échantillon des 40 individus simulés permettent de montrer d'une part la ressemblance moyenne des différentes journées des individus entre eux (Tableau 6) et d'autre part les moyennes des concordances individuelles (Tableau 7). L'interprétation de ces deux tableaux est rendue possible grâce à la comparaison d'analyses réalisées sur des données similaires dans leur structure issues d'enquêtes¹.

¹ La comparaison se base sur deux enquêtes de mobilité menées dans la Région Grenobloise : une enquête menée en 2004 auprès des membres du ménage de 30 familles au cours de quatre journées consécutives et l'enquête ménages et déplacements réalisée en 2002 par le Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'Agglomération de Grenoble.

Concordances Moyennes entre les individus :

Il s'agit d'observer si d'une manière générale, la population observe des routines ou au contraire des ruptures dans ses emplois du temps d'une journée à l'autre.

	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
Jour 1	0.51	0.41	0.39	0.43
Jour 2		0.52	0.42	0.42
Jour 3			0.51	0.44
Jour 4				0.57

Tableau 6 : concordances Moyennes entre les individus

Ce premier tableau montre qu'à l'intérieur d'une même journée les emplois du temps des agents se ressemblent plus qu'entre deux journées différentes. Ceci prouve que globalement les agents ont tendance à adopter des comportements assez similaires dans la ville au cours d'une même journée. Ceci se rapproche des résultats observés dans des échantillons d'enquête, sachant que la société urbaine « cadence » d'une certaine manière les emplois du temps individuels par les régimes horaires qu'elle impose. Cependant, nous notons sur les résultats d'enquête des particularités de certaines journées de la semaine qui ne se retrouvent pas ici. En effet, durant la journée du mercredi, les individus ont des emplois du temps qui varient beaucoup plus entre eux : l'effet de la journée libre pour les scolaires qui signifie des journées libérées pour une part des parents augmente la diversité des activités et des comportements. De même les journées de week-end comportent une plus grande variété de comportements.

Moyennes des Concordances des individus :

D'autre part, on peut aussi observer les moyennes des concordances individuelles. Ici la concordance entre deux mêmes journées est maximale (l'emploi du temps d'un individu le jour 1 étant strictement égal à lui-même).

	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
Jour 1	1.00	0.53	0.55	0.54
Jour 2		1.00	0.57	0.49
Jour 3			1.00	0.60
Jour 4				1.00

Tableau 7 : moyennes des Concordances des individus

On note une certaine stationnarité dans les comportements des agents d'une journée à l'autre, puisque les concordances ne varient que peu d'un couple de journée à l'autre.

5. Conclusion

En partant de la problématique du rapport de la Commission Nationale des Transports intitulé « Les nouveaux rythmes urbains » qui insiste sur l'importance de proposer de nouveaux

modes d'analyse et de représentation des dynamiques quotidiennes afin de sensibiliser les acteurs concernés aux enjeux des changements en cours, nous avons dégagé trois objectifs prioritaires dans ce programme de recherche :

- fournir des informations fiables sur ces dynamiques quotidiennes ;
- développer des outils d'analyse associés;
- mettre en place des dispositifs d'observation pour assurer un suivi des évolutions temporelles.

En se référant à la littérature existante, nous avons conçu une méthodologie originale basée sur une approche individu-centrée. Cette méthodologie se base sur les axes suivants :

- développer une stratégie d'acquisition d'une information individuelle finement datée et localisée concernant les comportements de mobilité des populations urbaines ;
- définir un protocole d'observation et d'analyse des modalités d'émergence et d'évolution, dans le temps court de la journée, des configurations territoriales générées par une multitude de trajectoires individuelles ;
- tester l'utilité que peuvent avoir des protocoles de simulations individus-centrées (système multi-agents) dans le cadre des nouvelles politiques urbaines temporelles (aménagement des horaires des services, implantation de services à la personne sur les lieux de travail etc...),
- assister les aménageurs dans la définition de nouvelles politiques urbaines temporelles, par la mise au point de protocoles de simulations individus-centrées (système multi-agents).

La première étape du projet a permis de dégager une méthodologie de construction de programmes d'activités à partir de données d'une enquête ménage-déplacements :

- Extraction de groupes de population
- Création d'une population synthétique à partir de ceux-ci
- Génération automatique des programmes d'activités de la journée
- Génération des lieux de vie des individus (lieu d'habitation, lieu de travail, ...)

Dans une seconde étape, les programmes d'activités ont été insérés dans un simulateur multi-agents :

- Les bâtiments et le réseau routier sont représentés sur le modèle de la ville de Dijon.
- Les individus représentés tentent de satisfaire leur programme sur la journée en tenant compte des heures d'ouverture des bâtiments (travail, loisirs) et du trafic ambiant.
- Ils modifient leur programme pour le lendemain en fonction de l'expérience de cette première journée.

Enfin, nous avons créé des interfaces de visualisation élaborées pour observer les résultats des simulations et ainsi décrire l'activité dans la ville :

- Informations statistiques sur le respect des programmes d'activité.
- Visualisation des trajectoires observées dans l'espace et le temps.
- Informations statistiques globales.

- Observation dynamique des déplacements en cours.

Au final, ce projet contribue à la problématique de l'observation de la ville en mouvement par ses aspects méthodologiques et ses aspects expérimentaux. Les logiciels développés, même s'ils peuvent être améliorés, sont opérationnels et réutilisables dans d'autres contextes : les interfaces et les bibliothèques de simulation ont été développées dans un esprit de généralité.

Références bibliographiques

- [AIC 04] AICKELIN U., DOWSLAND, K., « *An Indirect Genetic Algorithm for a Nurse Scheduling Problem* » *Journal of computers & Operations Research*, Vol 31, n°5, 2004, p. 761-778
- [AND 07] ANDRE-POYAUD I., CHARDONNEL S., CHARLEUX L., TABAKA K., « *La mobilité au Cœur des emplois du temps des citoyens* », 2^e rencontres internationales d'Urbanisme, Grenoble, Février 2006. Publication à paraître 2007.
- [ARE 02] ARENTZE T. ; HOFMAN F. ; VAN MOURIK H. ; TIMMERMANS H., « *Spatial transferability of the Albatross Model System: Empirical evidence from two case studies* », *Transportation research record*, no 1805, 2002, pp. 1-7.
- [AXH 91] AXHAUSEN K. W., « *Eurotopp – toward a dynamic and activity-based modelling framework* », in *Advanced Telematics in Road Transport*, Proceedings of DRIVE Conference, February 1991, Elsevier Scientific CO., 1991.
- [BAL 04] BALMER M., NAGEL K; RANEY B., « *Large scale multi-agent simulations for transportation applications* », EIRASS Conference 2004.
- [BAR 04] BARRETT C.L., BECKMAN R.J., BERKBIGLER K.P., BISSET K.R., BUSH B.W., EUBANK S., HENSON K.M., HURFORD J.M., KUBICEK D.A., MARATH M.V. E. , ROMERO P.R., SMITH J.P., SMITH L., SPECKMAN P.L., STRETZ P.E., THAYER G.L., VAN EECKHOUT E., WILLIAMS M.D., « *TRANSIMS* », Volume 1-4, Los Alamos Unclassified Report, 2004
- [BEN 04] BENENSON I., TORRENS P., « *Geosimulation : automata-based modelling of urban phenomena* », John Wiley and Sons, Chichester, 2004, 286 p.
- [BON 04] BONNEL P., « *Prévoir la demande de transport* ». Presse de l'ENPC. 2004. 415 p.
- [BON 97] BONFIGLIOLI S., « *Politiques sur les temps urbains : le panorama des villes italiennes* », in *Entreprendre la ville : Nouvelles temporalités – Nouveaux services* (dir. Obadia A.), Ed. de l'Aube, Coll. Territoire, La Tour d'Aigues, 1997, pp. 144-159.
- [CAR 97] CARLSSON M., OTTOSSON G., CARLSON B. « *An Open-Ended Finite Domain Constraint Solver*, Proc. Programming Languages: Implementations », Logics, and Programs, 1997.
- [CHA 01] CHARDONNEL S., « *La time-geography : les individus dans le temps et dans l'espace* », in *Modèles en Analyse Spatiale*, SANDERS L., Hermès Sciences Publications, pp.129-153.
- [CHA 74] CHAPIN F.S., « *Human activity patterns in the city : things people do in time and in space* », John Wiley & Sons, New York, 1974, 272 p.
- [CLA 86] CLARKE M., « *Activity modelling – A Research Tool or a Practical Planning Technique?* », in *Behavioral Research for Transport Policy*, VNU Science Press, Netherlands, 1986.
- [DUP 99] DUPUY G., « *La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic, traitements* », ed. Economica, coll. Villes, Paris, 1999, 160 p.
- [EPS 96] EPSTEIN J., AXTELL R. : « *Growing artificial societies : social science from the bottom up* », Brookings Institution Press, MIT Press, Washington DC, 1996, 210p.
- [EPS 99] EPSTEIN J., « *Agent-based computational models and generative social science* », *Complexity*, Vol. 4, N° 5, 1999, pp. 41-60
- [GRE 98] GREAVES S., STOPHER P. « *A synthesis of GIS and Activity-based travel-forecasting* », *Geographical Systems*, Vol. 5, 1998, pp. 59-89.
- [HAS 00] HASSNAOUI M., PUPIER R., REHAILIA M., "A concordance method for analyzing categorical time series. An application for the search of periodicities", *Biological Rhythm Research*, 2000, Vol. 31, No. 2, pp. 177-201
- [HAG 70] HAGERSTRAND T., « *What about people in regional science ?* », *Papers of the Regional Science Association*, N°24, 1970, pp. 7-21
- [HOL 95] HOLZBAUR C., OFAI clp(q,r) Manual, Edition 1.3.3, « *Austrian Research Institute for Artificial Intelligence* », Vienna, TR-95-09, 1995.
- [JOH 02] JOH C-H., ARENTZE T., HOFMAN F., TIMMERMANS H., « *Activity pattern similarity : a lultidimensional sequence alignment methos*, » *Transportation Research*, 2002, Vol. 36, Part B, pp. 385-403
- [JON 79] JONES P., « *New approaches to understanding travel behaviour : the human-activity approach* », *Behavioural travel modelling*, 1979, pp. 55-80.
- [KIT 97] KITAMURA R., FUJII S., « *Two computational process models of activity-travel behavior* », In T. Gärling, T. Laitila and K. Westin (eds.) *Theoretical Foundations of Travel Choice Modelling*, Pergamon Press, Oxford, 1997

- [LEN 76] LENNTORP B., « *Paths in space-time environments : a time-geographic study of movement possibilities of individuals* », Lund Studies in Geography, Serie B, n° 44, 1976, 150 p.
- [MAR 05] MARILLEAU N., LANG C., CHATONNAY P. ET PHILIPPE P., « Un méta-modèle à base d'agents pour modéliser la mobilité urbaine », *Troisième Conférence Internationale: Science Electronique, Technologies de l'Information et des Télécommunications* », SETIT 2005, Sousse, Tunisie, mars 2005.
- [MAR 06] MARILLEAU N., LANG C., CHATONNAY, P. AND PHILIPPE L. *An Agent-Based Framework for Urban Mobility Simulation*. In Procs of the 14th IEEE Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network based Processing (PDP 2006), Montbéliard, France, pages 355--361, February 2006.
- [MAS 98] MASSON S., « Interaction 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*, n°33, 1998, p. 79-108.
- [MCN 00] MC NALLY M.G., « The activity-based approach », in Handbook of transport modelling (dir. Hensher A. and Button J), 2000, Elsevier Science Ltd.
- [NAG 03] NAGEL, K., MARCHAL F., « *Computational methods for multi-agent simulations of travel behavior* », proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research 2003 (IATBR), Lucerne.
- [ORT 94] ORTUZAR J., WILLUMSEN.G., « *Modelling transport* », John Wiley & Sons, 1994, Chichester, 439 p.
- [POR 00] PORTUGALI J., « Self-organization and the city », Springer-Verlaag, NY, 2000, 352 p.
- [QUI 98] QUINET E., « Principes d'économie des Transports », Economica, Paris, 1998, 410 p.
- [REC 86] RECKER W., MC. NALLY M., ROOT G., « *A model of complex travel behavior – theory and operational model*, Transportation research A, n° 20, 1986, pp. 307-330.
- [STO 96] STOPHER PR., HARTGEN DT., YUANJUN L., « *SMART: simulation model for activities, resources and travel* », ed. Kluwer, Transportation, Vol. 23, 1996, pp. 293-312.

Publications scientifiques dans le cadre du projet

- BANOS A., (2005) : Geosimulating the swarming city : a bouquet of alternatives, in Geoinformatics, December, Vol 8, pp.58-60
- BANOS A., THEVENIN T. (2005) : Révéler les rythmes quotidiens par la carte animée in Revue internationale de géomatique, vol.15, n°1, pp.11-32.
- BANOS Arnaud, CHARDONNEL Sonia, LANG Christophe, MARILLEAU Nicolas et THÉVENIN Thomas, (2005) : Simulating the swarming city : a MAS approach, Proceedings of the 9th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, London, June 29-30, 15p.
- BANOS A., CHARDONNEL S., MARILLEAU N., MAS A., LANG C., THEVENIN T. (2006) : Génération d'emplois du temps individuels pour une simulation multi-agents des mobilités urbaines quotidiennes, in Actes du colloque SAGEO, Strasbourg, 17-19 septembre 2006
- BANOS A., THEVENIN T. (2007) : Création de champs de potentiel et simulation d'itinéraires à partir de l'enquête ménages-déplacements, in Information géographique et dynamiques urbaines dir. THERIAULT M. et DESROSIERS C., Traité IGAT, Hermès, à paraître fin 2007
- BANOS A., THEVENIN T. (dir., 2008) : Information géographique et systèmes de transports urbains, Coll. IGAT, Hermès, Volume à paraître début 2008.
- MARILLEAU. (2005) : An Agent Based Meta-Model for Urban Mobility Modeling., In procs. of the 1st IEEE Int. Conf. on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, DFMA'2005, Besançon, France, pages 168--175, February 2005.
- MARILLEAU, C. LANG, P. CHATONNAY, AND L. PHILIPPE (2006) : An Agent-Based Framework for Urban Mobility Simulation. In Procs of the 14th IEEE Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network based Processing (PDP 2006), Montbéliard, France, pages 355--361, February 2006.
- MARILLEAU, C. LANG, P. CHATONNAY, AND L. PHILIPPE (2006) : Modélisation du déplacement dans la méthode RAFALE-SP. In JFSMA'06, Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, Annecy, France, pages 45--48, October 2006.

MARILLEAU, C. LANG, P. CHATONNAY, AND L. PHILIPPE (2005) : A Meta-Model of Group for Urban Mobility Modeling. In procs. of The Third Int. Conf. on Active Media Technology, AMT 2005, Takamatsu, Japon, pages 397--400, May 2005.

MARILLEAU, C. LANG, P. CHATONNAY, AND L. PHILIPPE (2005) : Cognitive Perception in RAFALES-SP Methodology. In Int. Conf. on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, CIMCA'05, Vienna, Austria, pages 594--600, November 2005.

MARILLEAU, C. LANG, P. CHATONNAY, AND L. PHILIPPE (2005) : Un méta-modèle à base d'agents pour modéliser la mobilité urbaine. In SETIT 2005, 3rd IEEE Int. Conf. on Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Sousse, Tunisie, March 2005. Note: Actes sur CD. ISBN 9973-51-546-3.

MARILLEAU, C. LANG, P. CHATONNAY, AND L. PHILIPPE (2005) : Une bibliothèque multi-agents pour la simulation de la mobilité intra-urbaine. In procs. of the Int. Conf. on Spatial Analysis and GEomatic, SAGEO 2005, Avignon, France, June 2005.

MARILLEAU N., THEVENIN T., BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C. MAS A. (2005) : Une approche multi-agents de la ville en mouvement in SMAGET2005, Joint conference on Multi-Agent modelling for environmental management, Les Arcs, 21-25 march 2005

MARILLEAU N., THEVENIN T., BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C. (2005) : Modéliser et simuler la "fourmillère" urbaine par les systèmes multi-agents in Actes du colloque SAGEO, Edités par Didier Josselin et T. Libourel, sous forme de CD-ROM, Avignon, 21-23 juin 2005

THEVENIN T., CHARDONNEL S., COCHEY (2007) : Explorer les temporalités urbaines de l'agglomération de Dijon : Une approche activité-centrée de l'Enquête-Ménage-Déplacement, in Espace-Temps-Population, volume à paraître fin 2007

CHARDONNEL S., THEVENIN T., BANOS A., MARILLEAU N., LANG C. MAS A. (2006) : Exploring activities for simulating everyday rhythms and routines in French urban areas In Association of American Geographers conference, Chicago, 7-11 mars 2006.

MARILLEAU N., THEVENIN T., BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C. MAS A. (2005) : Modéliser les programmes d'activités par les systèmes multi-agents in colloque de l'ASRDLF, Université de Bourgogne et de Franche-Comté, 5-7 septembre 2005

THEVENIN T., CHARDONNEL S., BANOS A., MARILLEAU N., LANG C. MAS A. (2006) : From The Household Survey to an Individual Activity Program: A MAS approach In Association of American Geographers conference, Chicago, 7-11 mars 2006.

THEVENIN T., MAS A. (2006) : Représentation dynamique et visualisation interactive de données spatio temporelles dans le projet, Séminaire Groupe de travail Cartactive, GDR Sigma, Grenoble – IMAG, 2006.

Table des figures

Figure 1 : architecture du modèle TRANSIMS	10
Figure 2 : construction d'une population synthétique dans Transims	11
Figure 3 : le comportement des agents dans MIRO	13
Figure 4 : l'approche retenue dans MIRO	14
Figure 5 : architecture générale de MIRO	15
Figure 6 : le cœur du projet MIRO	16
Figure 7 : la plateforme méthodologique de MIRO	17
Figure 8: diagramme structurel de l'environnement.	18
Figure 9 : cycle de vie d'un bâtiment	19
Figure 10: diagramme structurel du mobile	20
Figure 11: représentation du groupe famille	21
Figure 12 : identification des 6 groupes dans l'espace des premiers plans factoriels (les couleurs correspondent à celles de la Figure 13)	22
Figure 13 : profils de classes	23
Figure 14 : profils d'activités observés par classe (en % par classe) (source : enquête ménages-déplacements de Dijon)	25
Figure 15 : définition du profil d'un agent de la population synthétique	26
Figure 16 : exemple de profils d'agents synthétiques générés par tirage aléatoire	27
Figure 17 : profils d'activités simulés par classe (en % par classe)	28
Figure 18 : comparaison des profils d'activités observés et simulés par classe	29
Figure 19 : distribution des écarts entre les profils de groupes issus de l'enquête et ceux générés par la procédure (en %)	30
Figure 20 : comparaison des effectifs observés et simulés par zone de l'enquête ménages-déplacements	30
Figure 21 : les éléments retenus et leurs notations	31
Figure 22 : profils socio-démographiques des six groupes définis	32
Figure 23 : distribution des distances des îlots aux 6 groupes d'agents	33
Figure 24 : création d'un champ de potentiel et affectation des agents au bâti	34
Figure 25 : matrice O/D pour le motif « travail »	35
Figure 26 : matrice de distances	36
Figure 27 : un algorithme pour la génération des emplois du temps	39
Figure 28 : distribution horaire des individus observés et simulés pour le motif travail	40
Figure 29 : paramètres et sorties du simulateur MIRO.	41
Figure 30 : capture d'écran du simulateur	43
Figure 31 : plate-forme open laszlo	44
Figure 32 : fenêtre de description	45
Figure 33 : fenêtre de simulation madkit	46
Figure 34 : fenêtre des cartes	46
Figure 35 : fenêtre des graphiques	47
Figure 36 : fenêtre des données	47
Figure 37 : plate-forme php	48
Figure 38 : fenêtre de présentation	49
Figure 39 : fenêtre des cartes de la plate-forme php	49
Figure 40 : fenêtre des données de la plate-forme php	50
Figure 41 : fenêtre des graphiques sur les catégories d'agents	50
Figure 42 : fenêtre des graphiques sur les activités	51
Figure 43 : fenêtre des programmes d'activités	52
Figure 44 : fenêtre de simulation en flash	53
Figure 45 : les budgets-temps des 4 journées simulées	55
Figure 46 : part des agents en activité au cours des 4 journées simulées (toutes les activités)	56
Figure 47 : part des agents en activité au cours des 4 journées simulées (Domicile-Travail-Déplacement/accompagnement)	57
Figure 48 : part des agents en activité au cours des 4 journées simulées (Repas-Achat-Loisirs)	58
Figure 49 : actogrammes des individus	59