
PROJET MIRO

RAPPORT FINAL

20 SEPTEMBRE 2015

*convention de subvention 13-MT-GO6-8-CVS-038
2013 – n°CHORUS 2101205155*

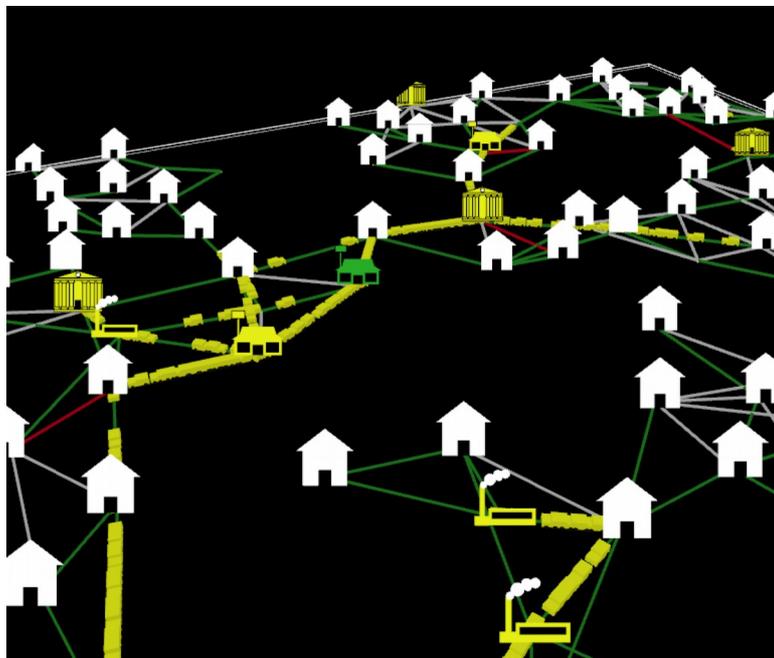


TABLE DES MATIÈRES

<u>Cadre et objectifs.....</u>	<u>4</u>
<u>SMartAccess</u>	<u>5</u>
<u>SM²A².....</u>	<u>7</u>
<u>Le modèle GaMiroD.....</u>	<u>8</u>
<u>Développement de SmartAccess.....</u>	<u>9</u>
<u>Retours des utilisateurs et réflexion autour de l'évolution du modèle-jeu.....</u>	<u>9</u>
<u>Premiers correctifs identifiés.....</u>	<u>9</u>
<u>Autocritique du modèle.....</u>	<u>9</u>
<u>Résultat des correctifs et axes de développement retenus.....</u>	<u>10</u>
<u>L'ajout de chaînes d'activités spécifiques.....</u>	<u>12</u>
<u>Multi-modalité et plus court chemin.....</u>	<u>14</u>
<u>Multi-modalité.....</u>	<u>14</u>
<u>Calcul du plus court itinéraire.....</u>	<u>16</u>
<u>Retour utilisateurs sur le jeu.....</u>	<u>20</u>
<u>Organisation d'une session de jeu.....</u>	<u>20</u>
<u>Retours des élèves et exemples de rapport.....</u>	<u>21</u>
<u>Développement du modèle de simulation GaMiroD.....</u>	<u>26</u>
<u>Rappel du modèle et état de l'art.....</u>	<u>26</u>
<u>Élaboration de la ville virtuelle.....</u>	<u>28</u>
<u>Données d'environnement.....</u>	<u>28</u>
<u>Population de référence.....</u>	<u>29</u>
<u>Génération de la population et de ses caractéristiques.....</u>	<u>30</u>
<u>Validation des données.....</u>	<u>33</u>
<u>Gestion de la localisation des agents.....</u>	<u>36</u>
<u>Création et affectation des emplois du temps.....</u>	<u>37</u>
<u>La fonction d'utilité et le choix d'un EDT.....</u>	<u>38</u>
<u>Le modèle descriptif.....</u>	<u>40</u>

Domaine de définition.....	40
Conception des interactions.....	41
Dynamique du modèle.....	42
Le modèle de trafic.....	43
Optimisation.....	44
Exemple d'application.....	45
Lien de téléchargement des modèles.....	49
Références.....	49

Cadre et objectifs

PORTEUR DU PROJET

Banos Arnaud

Organisme : Géographie-cités (CNRS / Université Paris 1 / Université Paris 7)

Autres organismes partenaires : LIFC ; PACTE ; THEMA ; UMMISCO (IRD, UPMC)

ELEMENTS FINANCIERS GLOBAUX

- *coût total du projet : 137 616 euros TTC*
- *Total financement : 44 516 euros TTC*

DESCRIPTION DU PROJET

Ce projet est une extension du projet MIRO² financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) entre janvier 2009 et juin 2013, dans le cadre de l'appel d'offres Villes Durables (édition 2008).

MIRO² visait à explorer, par simulation informatique, les impacts possibles de politiques urbaines sur l'accessibilité spatio-temporelle des citoyens à la ville et leurs conséquences sur leur mobilité quotidienne. Il visait également à établir des diagnostics territoriaux (pertes et gains d'accessibilité localisés) et sociaux (populations avantagées et désavantagées par les différentes politiques testées).

Dans cette perspective, trois plateformes de simulation ont été développées.

*La première, **SMArtAccess**, est un jeu sérieux individuel, permettant à l'utilisateur de construire une ville virtuelle, d'y localiser des services commerciaux et universels, ainsi que des lieux de travail et de résidence, puis de le peupler d'agents autonomes réalisant des chaînes d'activité au moyen de différents modes de transport (marche à pieds, transport public, voiture). L'objectif est alors pour l'utilisateur de tester des modèles urbains (ville compacte, villages urbains,...) mais également de définir, de manière itérative et interactive et en s'appuyant sur un grand nombre d'indicateurs macroscopiques et microscopiques, des configurations urbaines satisfaisant certains critères de durabilité.*

Une deuxième plateforme multi-joueurs - **SM2A2** (Système Multi-Agents Multi-Acteurs) – a également été développée et permet à cinq personnes de jouer de manière collaborative sur **SMArtAccess**, chacun assumant un rôle et ne pouvant intervenir sur le modèle et l'environnement créé que dans le cadre de ce rôle.

Enfin, le prototype **GaMiroD** est un modèle réaliste et à l'échelle, capable de simuler la mobilité quotidienne d'une agglomération entière (Dijon et Grenoble ont été retenus comme cas d'étude), sur une base individus-centrée.

L'objectif de ce nouveau projet financé par le MEEDDM-DRI était de finaliser ces trois plateformes en les amenant à un niveau de développement autorisant leur diffusion.

Depuis son recrutement (1^{er} septembre 2014), Pierre Fosset a principalement travaillé sur la plateforme **SMArtAccess** ainsi que sur le prototype **GaMiroD**. Ce rapport rend compte des développements réalisés pendant cette période.

Publications liées au projet :

Un article collectif a été publié dans la revue « Systems », dans le cadre du numéro spécial : **"Agent-Based Modelling of City Systems"** :

Pierre Fosset, al., *Exploring Intra-Urban Accessibility and Pollution Policies Impacts with an Agent-Based Simulation Tool: GamiroD*, *Systems*, *Systems* 2016, 4(1), 5; doi:10.3390/systems4010005 (<http://www.mdpi.com/2079-8954/4/1/5>)

Par ailleurs, le projet MIRO3 a été présenté lors de la conférence ThéoQuant, à Besançon :

Pierre Fosset, Nicolas Marilleau, A.Banos et al. MIRO3, 2015 : Des modèles orientés experts et données pour comprendre et simuler les dynamiques intra-urbaines quotidienne, présentation lors 12èmes Rencontres ThéoQuant, Besançon

SMArtAccess

SMArtAccess est une plateforme de jeu sérieux (serious game) individuel, dans lequel l'utilisateur construit une ville virtuelle en localisant sur un réseau routier différents services, lieux d'activités et de résidence. Une population d'agents autonomes est ensuite générée

dans cette ville et y réalise, sur un cycle d'une journée, une chaîne d'activités. Les déplacements sont réalisés selon différents modes de transports (pédestre, voiture et transport en commun). L'objectif, pour l'utilisateur, est de construire de manière interactive et itérative une ville « durable », en se basant sur de nombreux indicateurs macroscopiques et microscopiques.

Ce jeu a pour but d'amener les joueurs à prendre conscience d'une part de la complexité d'un système urbain et de la difficulté qu'il y a à piloter un tel système et d'autre part de la difficulté de tout exercice de définition et de mise en œuvre opérationnelle du concept de « durabilité urbaine ».

L'interface de visualisation de la ville se présente de manière volontairement simple et figurative.

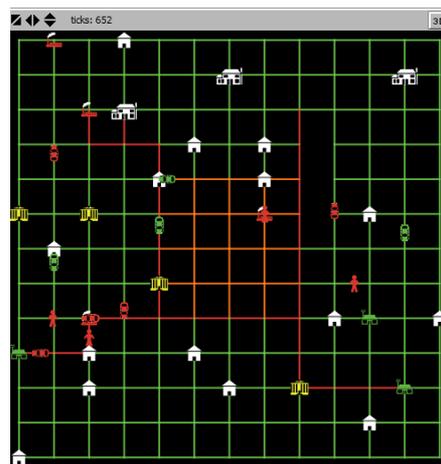


Figure 1 Fenêtre de visualisation SMARTAccess

Dans ce jeu sérieux, de nombreux paramètres et indicateurs de sortie sont accessibles et modifiables par l'utilisateur via l'interface.

Le modèle GaMiroD

Le modèle GaMiroD développé sur la plateforme de simulation multi-agents GAMA, est un modèle plus réaliste de simulation de l'environnement urbain et de ses rythmes quotidiens. Il est alimenté par des données cartographiques et géographiques précises des environnements urbains étudiés.

L'objectif intègre la création d'une population synthétique de plusieurs centaines de milliers d'individus dont les caractéristiques se basent sur des données sociodémographiques d'enquêtes ménages-déplacements auprès d'un grand nombre de foyers.

Un premier prototype de GaMiroD a vu le jour dans le cadre du projet MIRO 2 avec une génération de population aléatoire à laquelle est associée une base de données d'emplois du temps issue des enquêtes ménages et déplacements sur deux sites (Grenoble et Dijon).

Développement de SmartAccess

Retours des utilisateurs et réflexion autour de l'évolution du modèle-jeu

Premiers correctifs identifiés

Le jeu sérieux SMArtAccess et sa plateforme multi-joueurs SM²A² ont bénéficié en juin 2013 d'une diffusion auprès de professionnels, en particulier dans le domaine du transport et de la recherche, mais aussi auprès des collectivités territoriales. En parallèle, le modèle est utilisé en formation initiale pour amener des étudiants en Master de géographie et d'aménagement du territoire à appréhender les problématiques de la ville durable à travers des projets en binômes ou lors de séances de Travaux dirigés.

Les retours d'expérience ont principalement pointé des aspects pratiques du modèle et des correctifs à appliquer à l'existant :

- Les réseaux de transport en commun n'étaient plus visualisables une fois la simulation terminée.
- Certaines fonctionnalités manquaient d'ergonomie ou provoquaient quelques bogues : il n'était pas possible de tester de créer une population dont les habitants ont tous des véhicules polluants (désignés par « non Eco » dans le jeu) ou tous des véhicules à faible émission de gaz à effet de serre (désignés par « Eco » dans le jeu).
- Le nombre d'information affiché était trop important pour un joueur seul, l'interface devait être allégée, et une notice d'utilisation claire devait être fournie.

Autocritique du modèle

- Lors de la ré-initialisation des agents (génération de la même population que lors de la simulation précédente, conservant domicile et lieu de travail), les agents ne modifiaient par leur itinéraire si de nouveaux services avaient été ajoutés (nouveau centre commercial par exemple).
- Le taux de mécontentement n'était pas correctement calculé et affiché
- La « rupture de charge » n'était pas prise en compte dans le choix d'itinéraire effectué par les agents, notamment pour le transport en commun : le calcul d'itinéraire et la fonction de choix modal devaient être améliorés

Résultat des correctifs et axes de développement retenus

Avant d'apporter des modifications structurelles au modèle SMArtAccess, nous avons effectué dans un premier temps les correctifs répondant aux retours utilisateurs et aux autocritiques :

- Afin de faciliter la visualisation des réseaux de transport en commun dans le jeu, nous avons ajouté la possibilité d'afficher les réseaux dans le menu déroulant des cartographies :

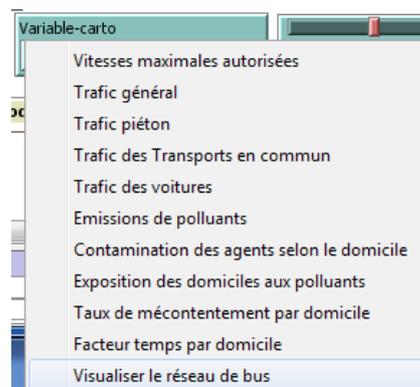


Figure 3 Menu déroulant de cartographie

La cartographie « Visualiser le réseau de bus » permet désormais d'afficher le réseau en rouge, comme sur la **figure 3**.

- L'utilisateur peut maintenant créer une population composée uniquement d'agents « Eco » (écologiques) ou « non Eco » (non écologiques). L'affichage sur les graphes se fait en conséquence, et permet de visualiser par exemple l'absorption de polluant pour la population dite « Eco », comme sur la **figure 4** :

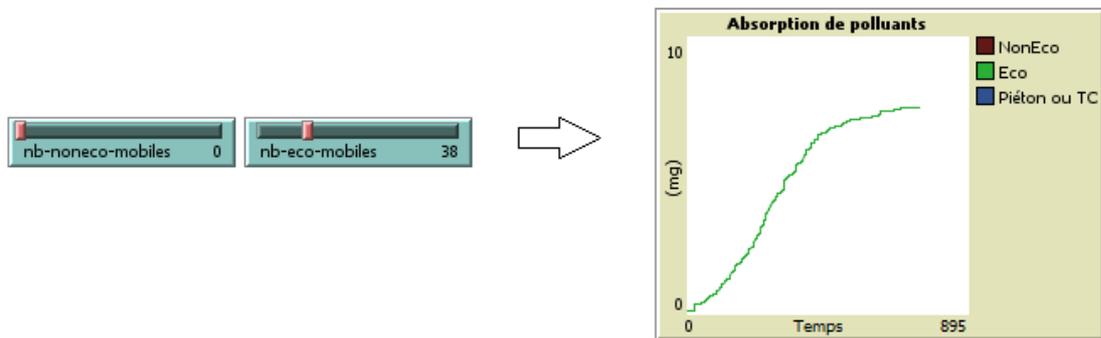


Figure 4 Population uniquement composée d'agents "Ecologiques"

- Le « taux de mécontentement par domicile » est affiché en nombre d'habitants mécontents sur le nombre d'habitants par foyer.

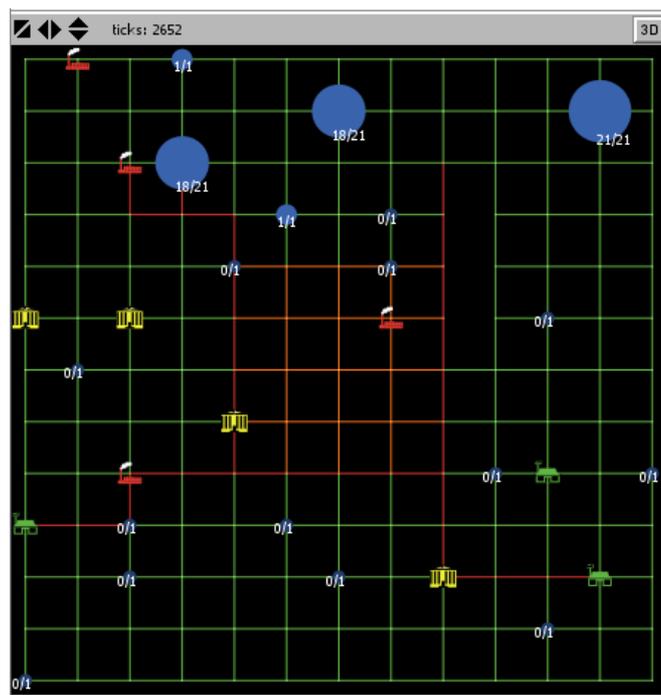


Figure 5 Taux de mécontentement. Exemple d'affichage.

Remarque :

Ce taux correspond dans le modèle au nombre d'habitants par foyer vérifiant l'inégalité :

$$\frac{\text{temps de trajet réalisé}}{\text{temps de trajet théorique}} > \text{seuil (de mécontentement)}$$

Une fois ces correctifs simples appliqués, nous avons reconsidéré l'évolution du modèle en termes de jouabilité et de cohérence d'ensemble à travers les améliorations suivantes : l'ajout de chaînes d'activités hétérogènes, la révision du calcul du plus court itinéraire et du choix du mode de transport.

L'ajout de chaînes d'activités spécifiques

Une modification importante de la jouabilité a été formulée pour MIRO 3 en ce sens qu'il serait un plus de pouvoir créer des chaînes d'activités hétérogènes, différentes de l'unique chaîne d'activité considérée jusqu'à maintenant :

Domicile > Travail > Service Administratif > Service Commercial > Domicile

Afin de se rapprocher d'une dynamique urbaine plus réaliste, cet ajout donne la possibilité à l'utilisateur d'affecter à un certain pourcentage de la population qu'il détermine, un itinéraire qu'il aura choisi, selon le principe suivant :

Domicile > Activité 1 > ... > Activité n > Domicile

Ainsi on retrouve désormais dans l'interface un générateur de chaînes d'activités, basé sur les différentes activités disponibles dans le jeu :

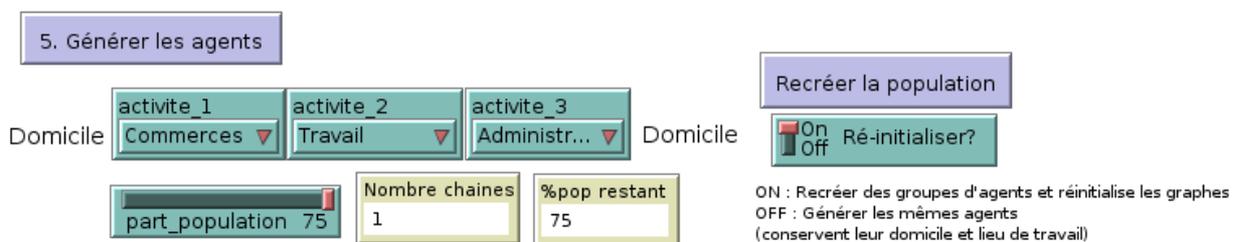


Figure 6 Définition de chaînes d'activités hétérogènes

Cette fonction s'insère une fois les autres paramètres d'environnement établis, soit le réseau routier, la création de la ZAPA, le calcul des vitesses, et l'activation des services.

Il est alors demandé d'« initialiser les agents » en créant des groupes d'agents différenciés par leur emploi du temps. Pour ne pas ajouter trop de complexité au modèle, il a été choisi de limiter le nombre de points de passage à trois au maximum, au même titre que la chaîne d'activités utilisée dans les versions précédentes.

Le choix est laissé à l'utilisateur entre les activités suivantes :

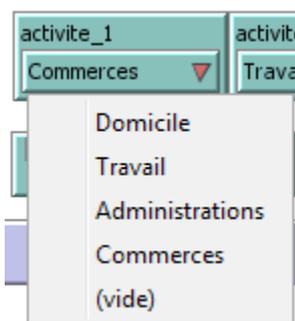


Figure 7 Choix d'activités

Les chaînes de moins de 3 activités sont également permises, avec l'option « vide ». Des emplois du temps de type « Domicile > Travail > Domicile » peuvent donc figurer dans la population.

Le raisonnement suivi pour l'affectation des chaînes d'activité à la population est de considérer un pourcentage de la population totale (bouton « part_population » sur la **figure 6**). La répartition entre les agents « Eco » et « non Eco » se fait ensuite aléatoirement, selon le nombre maximum d'individus choisi pour chaque catégorie. Une fonction d'égalisation se charge de compléter la population en se basant sur la dernière chaîne créée si le nombre d'agents est insuffisant.

Pour garder en mémoire la particularité de la population créée, nous avons ajouté un tableau d'affichage des chaînes créées, accompagnées des pourcentages associés :

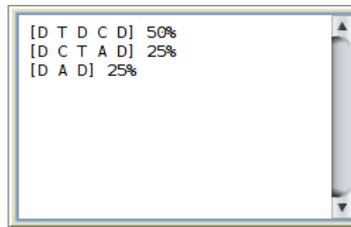


Figure 8 Affichage des chaînes créées

Une fois la simulation terminée, la fonction de réinitialisation des agents présente dans MIRO 2 est toujours disponible. Les agents conservent pour la simulation suivante leur domicile, leur lieu de travail, et désormais leur chaîne d'activités, dont nous pouvons conserver la trace sur l'affichage.

Multi-modalité et plus court chemin

Multi-modalité

Le terme de multi-modalité correspond dans le domaine du transport à la combinaison possible pour une seule et même personne de plusieurs modes de transport pour l'accomplissement de son itinéraire.

La prise en compte de la multi-modalité dans MIRO² était déjà implémentée dans le code, mais de manière restreinte, car elle n'incluait pas directement les transports publics dans le calcul d'itinéraire. Les lignes de bus étaient utilisées de manière opportune si un agent en trouvait une sur son passage et qu'elle lui garantissait un déplacement plus rapide qu'à pied ou en voiture. Ainsi, certains agents « non Eco » en voiture pouvaient prendre le bus pour un tronçon court pour traverser la ZAPA, puis reprendre leur véhicule au tronçon suivant en dehors de la ZAPA, ce qui correspondait à des choix modaux peu plausibles.

De plus les agents « Eco » ne pouvaient pas prendre les transports en commun, même si il s'avérait plus avantageux pour eux et étaient de fait considérés comme captifs de l'automobile.

Dans MIRO 3, l'agent dispose de trois possibilités : la voiture, les transports en commun et le trajet à pied. Compte tenu du nombre de services potentiels auxquels l'agent peut avoir

accès, il lui faut déterminer quel mode de transport est le plus adapté au niveau du temps de trajet. Un agent « Eco » peut circuler sur toute la zone aux vitesses maximales autorisées, tandis qu'un agent « non Eco » ne peut pas circuler en voiture dans une ZAPA car son véhicule est polluant et devra donc être piéton ou utiliser les transports en commun à l'intérieur de cette ZAPA. Il va devoir prendre cela en compte dans le choix de son itinéraire. Enfin, tous les agents pour lesquels la longueur totale de l'itinéraire complet à pied est inférieure à un certain seuil fixé par l'utilisateur, vont faire le choix de rester piéton.

Ainsi, tel que pensé et simplifié pour SMArtAccess, les agents évaluent la situation en comparant les temps estimés pour parcourir leur itinéraire selon trois graphes sur lesquels les axes de circulation sont pondérés différemment.

Nous pouvons illustrer la décomposition des trois réseaux comme ci-dessous, en mettant en valeur les choix modaux possibles pour un agent dans l'environnement de SMArtAccess. Les couleurs des flèches indiquent une pondération différente selon le mode de transport disponible sur le tronçon routier.

Sur le schéma en **figure 9**, l'agent partant du point bleu possède deux choix passant par un point rouge pour se rendre au point vert, puis un choix de retour au point bleu à la fin de son itinéraire.

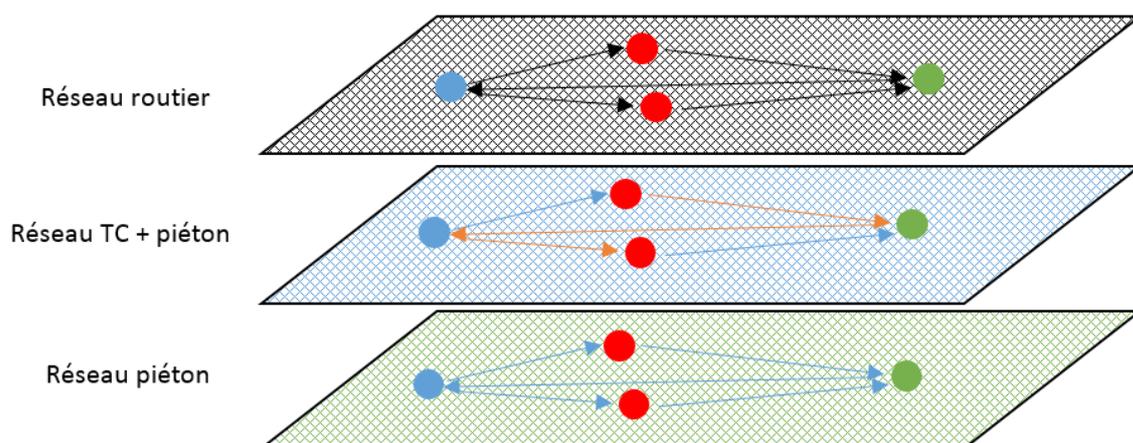


Figure 9 Calcul d'itinéraire multimodal

Chaque agent compare les estimations temporelles et la distance totale des trajets selon les 3 réseaux, et effectue son choix parmi les trois. Il en résulte que les agents réalisent un choix modal adapté en début de simulation, basé sur le temps estimé pour effectuer l'itinéraire voulu.

Calcul du plus court itinéraire

Le problème se posant pour les agents dans SMArtAccess est celui du calcul du plus court itinéraire selon l'emploi du temps qu'ils doivent réaliser.

Prenons l'exemple d'un agent devant réaliser la chaîne d'activité :

« Domicile > Travail > Service Administratif > Service Commercial > Domicile »

Un agent se voit affecter un domicile et un lieu de travail, qui sont fixes. Le choix lui est ensuite possible entre plusieurs services administratifs et commerciaux, répartis à différents points de la ville pour effectuer son itinéraire. Il doit enfin retourner à son point de départ, le domicile, sans s'être trop éloigné en fonction de ses choix.

La chaîne peut prendre en compte un retour au domicile ou tout autre service, soit par exemple les chaînes:

- *« Domicile > Service administratif > Travail > Service Administratif > Domicile »*
- *« Domicile > Travail > Domicile > Commerce > Domicile »*

Dans ces deux cas de figure, un algorithme de plus court chemin calculant uniquement la distance au prochain objectif ne suffit pas, car le chemin du retour doit être pris en compte.

Dans SMArtAccess, chaque agent se base sur une durée théorique de trajet à effectuer pour estimer sa satisfaction et cherche à optimiser son temps de trajet en fonction du mode de transport.

Nous avons opté pour une approche par l'algorithme de plus court chemin Dijkstra en séparant la chaîne d'activités de l'agent en deux chaînes distinctes. L'algorithme est appliqué aux deux sous-chaînes, qui sont ainsi séparées en deux problèmes de plus court chemins entre 2 points prenant en compte le coût total du sous-trajet. L'algorithme de Dijkstra fait la

somme des temps associés à chaque trajet entre deux points et choisit celui dont le total est le plus petit. Avec cette approche, des trajets cohérents sont choisis par les agents, bien qu'ils ne correspondent pas toujours à la solution la plus optimale.

Il convient de séparer les chaînes d'activité en particulier pour les cas où un même objectif vient à se répéter dans une chaîne, comme dans celles données à la page précédente. La raison est que l'algorithme de Dijkstra se base sur une liste de nœuds sélectionnés pour leur distance au point de départ, qu'il actualise pour trouver le meilleur chemin. Notre modèle utilise cette liste une fois terminée pour créer la liste des points de passage des agents. Si un même objectif intervient plusieurs fois dans une chaîne d'activités, alors le modèle saute une étape de l'itinéraire.

Pour le calcul d'un itinéraire, le modèle procède selon plusieurs étapes :

1 – Comme dans la version antérieure de SMArtAccess, les plus courts chemins entre les nœuds sont calculés deux à deux et pondérées selon les vitesses affectées à chaque mode de transport. Le plus court chemin entre deux nœuds de la grille de déplacement est donc connu sur chaque réseau. Cette étape est préalable à toute initialisation des services ou des agents.

L'extension spécifique NW **[3]** de Netlogo est notamment utilisée dans le calcul de ces plus courts chemins de la première étape.

2 – A la création des agents, l'algorithme de plus court chemin de Dijkstra est ensuite appliqué par deux fois si la chaîne d'activités est de longueur supérieure à 3 et une seule fois sinon.

Pour une chaîne de longueur 3 de type « Domicile > Activité > Domicile », une application simple de l'algorithme est possible car l'agent n'a qu'un aller-retour à calculer.

Une chaîne de longueur 4 [ABCD] est séparée en [ABC] et [BCD]. Les chemins des deux sous-chaînes sont ensuite calculés et fusionnés pour donner l'itinéraire final de l'agent.

Une chaîne de longueur 5 [ABCDE] est séparée en [ABC] et [CDE], et suit le même procédé.

3- Enfin, les temps de trajet des différents modes de transport sont calculés et comparés afin que les agents puissent choisir la meilleure alternative.

Comparaison avec MIRO² et limites :

Nous donnons les deux exemples ci-dessous pour illustrer le calcul du plus court itinéraire et le comparer en même temps à la version précédente de SMARtAccess. Ces exemples sont simples pour des raisons de compréhension rapide et dans un souci de reproductibilité plus aisée.

Les bâtiments de couleur rouge représentent les lieux de travail, en blanc les domiciles, en jaune les services administratifs et en vert les commerces.

Sur l'exemple de la **figure 10** se trouve une ligne de bus qui est indiquée en rouge, par opposition aux tronçons routiers en blanc et la ZAPA en orange (où les agents « non Eco » ne peuvent rouler en voiture). En considérant la chaîne «*Domicile > Travail > Service Commercial > Service Administratif > Domicile*», nous pouvons observer sur l'ancienne version que l'agent « non Eco » en rouge dans le coin supérieur gauche de l'écran de visualisation n'emprunte jamais la voie de bus même si la vitesse des transports en commun est fixée comme supérieure à celle des voitures. Le calcul n'étant pas multimodal, l'agent prend la voiture et descend verticalement pour atteindre les différents services.

Dans la nouvelle version présentée dans ce rapport, l'agent calcule les deux options et choisit de prendre le transport en commun. Il le choisit également si l'on retire un tronçon de ligne de bus, car le trajet total reste plus court en parcourant le tronçon supprimé à pieds.

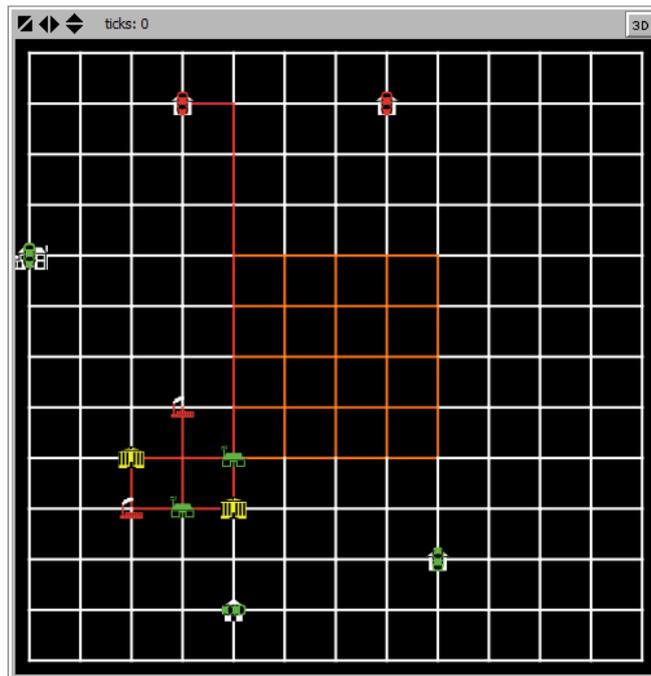


Figure 10 Exemple de test de plus court chemin multimodal

Sur l'exemple de la **figure 11**, en considérant la chaîne «*Domicile > Travail > Service Commercial > Service Administratif > Domicile*», le meilleur trajet devrait en principe être un simple aller-retour du domicile à gauche, vers le travail à droite puis un retour en ligne droite passant par les différents services dans le bon ordre.

Le modèle utilisé dans SMARTAccess ne permet pas de déterminer ce plus court itinéraire avec la méthode utilisée dans MIRO² ou dans MIRO³. Dans MIRO², l'agent va s'éloigner de plus en plus pour enfin revenir au domicile, car le calcul de l'itinéraire se fait au plus proche voisin.

Dans MIRO³, l'approche est différente, et du fait de la séparation de la chaîne d'activité en 2, l'agent va se diriger après le travail vers le commerce au sud, puis revenir vers le domicile et choisir plutôt le service administratif le plus proche du domicile. Ce choix est un peu plus satisfaisant, bien que non optimal.

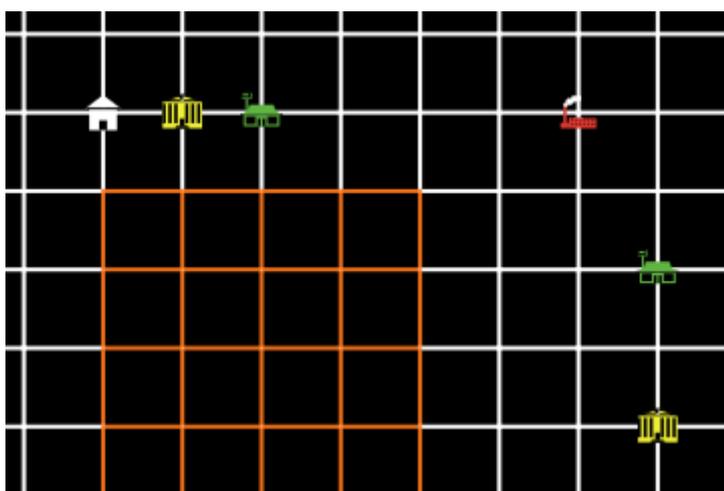


Figure 11 Exemple test de plus court itinéraire

Pour le moment, la multi-modalité reste simplifiée : les agents ne peuvent pas déposer leur voiture pour ensuite prendre les transports en commun. Ceci est potentiellement envisageable, en se basant par exemple sur les travaux de Aurelie Bousquet et al. Et P. Parent et al. cités en référence [1] et [2], en ajoutant des parkings à des points choisis par l'utilisateur.

Retour utilisateurs sur le jeu

Organisation d'une session de jeu

Dans le cadre de l'IP [MGM](#) Intensive Program Erasmus « Master in Geographical Modelling » à Besançon (du 3 au 14 février 2014) et Luxembourg (01-12 février 2016), nous avons eu l'occasion de mettre à l'essai le modèle Smart Access auprès d'étudiants de Master 1 et 2 issus de différentes universités.

Après une introduction à l'approche MIRO et au modèle SMARTAccess, nous avons axé la session journalière sur l'exploration du modèle-jouet. L'objectif de la séance était de formuler individuellement puis en petit groupe une problématique simple sur les variables et paramètres proposés, puis de l'expérimenter sur une ville théorique.

De manière plus générale, il s'agissait également de questionner l'utilité du système multi-agent comme outil de compréhension, voire de décision.

Retours des élèves et exemples de rapport

Nous exposons ici deux exemples commentés, afin d'illustrer le genre d'approche pédagogique permise par l'application SMArtAccess.

Exemple 1 : Scénario test sur la « Ville Radieuse » de Le Corbusier

Dans cet exemple, l'étudiant a reconstruit schématiquement le modèle de ville utopiste du début du 20ème siècle imaginé par Le Corbusier :

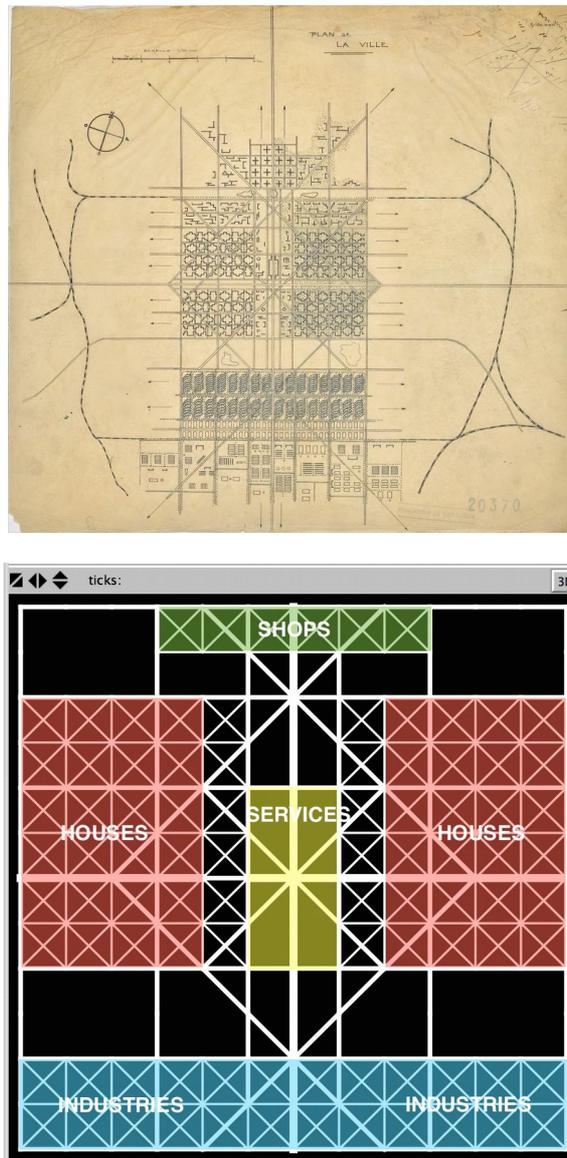


Figure 12 Représentation de la « Ville radieuse » dans Smart Access

Les hypothèses retenues étaient :

- que le réseau était alors pensé pour les voitures, et que les agents allaient donc naturellement choisir la voiture comme moyen de transport
- que l'aspect très fonctionnel de la ville était un atout fort pour contenir les méfaits de la pollution et de la congestion
- que l'augmentation de la population et des voitures sont les facteurs limitants de ce type de réseau
- que la tertiarisation de l'activité change les habitudes en terme de déplacement et que ce type de ville ne convient plus à des configurations plus contemporaines

Afin de tester l'ensemble des hypothèses, un plan d'expérience a été mis en place, à partir d'une configuration précise de chaînes d'activités :

- 10 % des chaînes ⇒ Domicile – Travail – Domicile – Travail – Domicile
- 20 % des chaînes ⇒ Domicile – Administratif – Domicile – Commerce – Domicile
- 70 % des chaînes ⇒ Domicile – Travail – Commerce – Domicile

L'objectif de l'étudiant était d'illustrer la diversité d'une population dans ses différentes composantes, en intégrant notamment le fait que 20 % de la population environ ne travaille pas et se déplace afin de réaliser des activités non directement liées au travail.

Résultats et discussions :

Pour une population d'agents faible (50), cette ville utopique fonctionne remarquablement bien. Toutefois, le plan d'expérience réalisé montre que l'augmentation linéaire de la population entraîne une augmentation exponentielle des temps de parcours (et du taux de mécontentement) ainsi que de l'exposition à la pollution automobile.

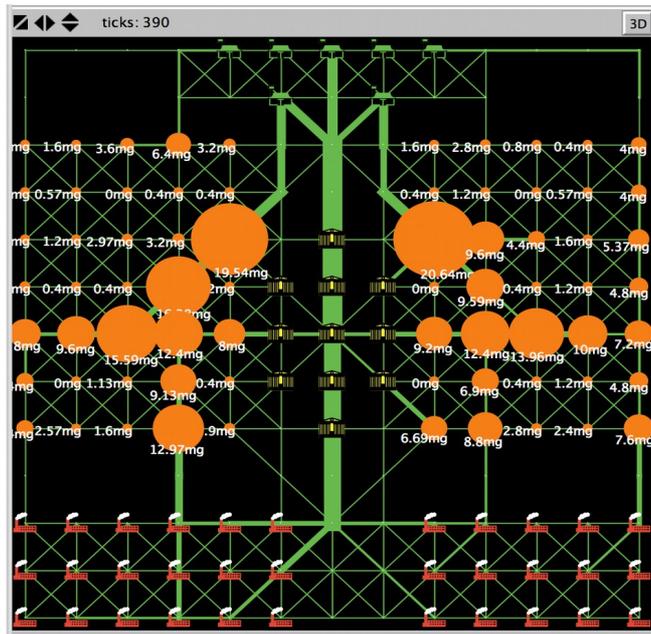


Figure 13 Exemple de résultats de simulations pour la « Ville radieuse » (pollution automobile au domicile)

Exemple 2 : La dispersion du bâti et l'accès au centre-ville – quelle est l'influence d'une restriction d'accès ?

La rapport étudie une ville au maillage dense sous forme d'une grille classique, dans un esprit de reproductibilité :

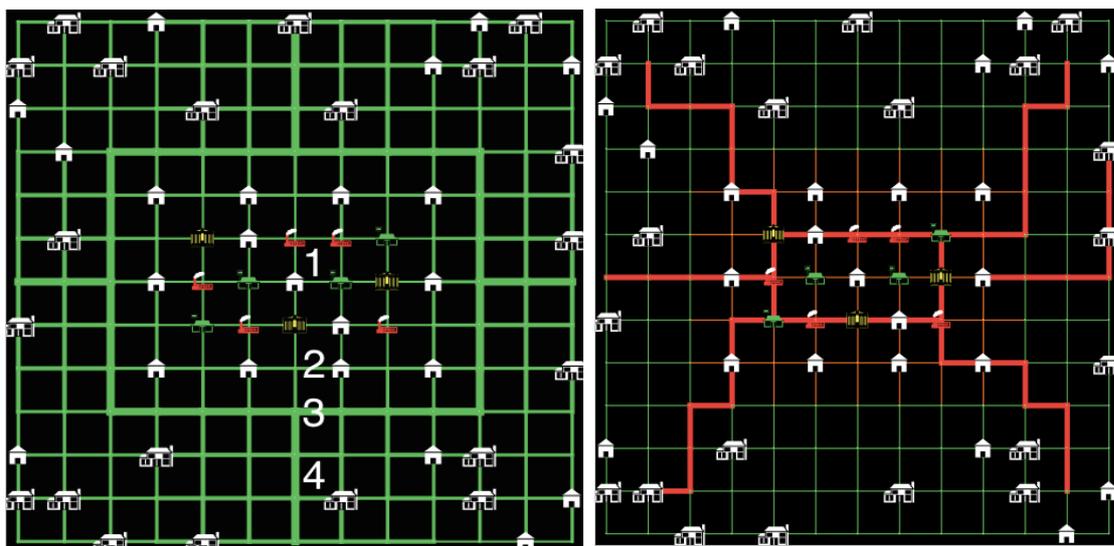


Figure 14 Ville en damier et son réseau de transports en commun (rouge)

Les hypothèses retenues étaient :

- qu'il est possible de changer les pratiques de mobilité vers un objectif plus écologique
- que ce changement peut se faire sans modifier le réseau de transport, mais en restreignant l'accès à certaines parties de la ville
- qu'il n'est pas nécessaire de chercher à satisfaire la population en rendant les aménités plus accessibles

Les variables du modèle retenues sont donc uniquement le nombre de voitures dites « éco » et « non-éco », et la présence d'une ZAPA au centre-ville pour en limiter l'accès.

La fonction permettant l'attribution de chaînes d'activité différentes a une fois de plus été utilisée pour induire des déplacements différenciés :

- 35 % des chaînes ⇒ Domicile – Travail – Administration – Domicile
- 65 % des chaînes ⇒ Domicile – Travail – Commerce – Domicile

Résultats et discussions :

Le report modal engendré par la ZAPA et l'augmentation du nombre d'agents « non-éco » est bien démontré dans ce plan d'expérience simple, sans ZAPA dans un premier temps, puis avec ZAPA et en passant de 50 à 100% de « non-éco » (population directement impactée par la ZAPA).

Sans la ZAPA, la congestion est importante. Une fois la ZAPA mise en place, les transports en commun concernent entre 50 et 75 % des habitants, et le taux de mécontentement chute.

Retours sur le modèle :

Ces deux exemples de travaux d'étudiants dans le temps court d'une journée nous permettent d'illustrer les points à améliorer et les points forts du modèle dans sa dernière version.

Nous remarquons ainsi que la majorité des étudiants ont établi des profils de population variés, en utilisant la fonction de création de chaîne d'activité. La volonté de recréer une dynamique de déplacement plus fidèle à la réalité va de pair avec cette diversité. Cependant, il reste un travail à mener en terme d'analyse comparée des sorties issues de la variation de

ces paramètres. Aucun étudiant n'a pu réellement analyser en détail un tel impact, faute d'outils d'analyse, via des boutons de filtrage par exemple.

Ce test a également révélé que le modèle SMArtAccess permet à des étudiants avancés de se poser de nombreuses questions et de tester un grand nombre de configurations, au prix toutefois d'un temps d'adaptation un peu long sur une seule journée de travail. Il serait sans doute intéressant de ne présenter qu'une partie des paramètres afin de limiter le champ des possibles et de permettre la prise en main plus rapidement.

Point déjà évoqué dans le précédent rapport, une possibilité d'amélioration de la pertinence du modèle serait l'ajout de parkings en entrée de ZAPA, afin de refléter un comportement plausible des agents possédant une voiture et souhaitant accéder au centre-ville.

La plateforme multi-joueurs PAMS a été mise à jour avec la dernière version de SMArtAccess. Elle n'a toutefois pas pu être testée en séance et souffre encore de problèmes techniques (fluidité et réactivité notamment) qui pénalisent la jouabilité et par conséquent l'immersion des joueurs dans le jeu. Atteindre le niveau de fluidité et de réactivité de SmartAccess est un enjeu pour l'instant techniquement hors de notre portée.

Développement du modèle de simulation GaMiroD

Le développement du modèle GaMiroD a connu depuis novembre 2014 un certain nombre d'avancées, en accord avec les perspectives mentionnées dans le rapport intermédiaire. D'autres adaptations ont également été réalisées en lien avec le traitement amont et aval des données ainsi qu'avec la définition de scénario-tests.

Rappel du modèle et état de l'art

Le projet de modèle descriptif GaMiroD a connu plusieurs versions depuis les projet MIRO et MIRO². L'approche qui a été retenue au travers des différents modèles est celle d'un simulateur multi-agent dont le comportement des agents est régi par leurs activités quotidiennes, dans la continuité des travaux du sociologue F.S. Chapin et du géographe T. Hägerstrand dans les années 70.

GaMiroD repose donc, en opposition avec les approches plus traditionnelles, sur les principes suivants :

1. La séquence d'activités est au coeur du processus de choix et de déplacement de l'individu ;
2. Les mouvements des individus sont modélisés dans leur dimension spatio-temporelle, et les agents interagissent entre eux ;
3. Le comportement et les décisions prises par l'agent sont gérées par des fonctions dépendant de son environnement et de ses caractéristiques individuelles ;
4. La multi-modalité, même simplifiée, est possible pour les agents, et les plannings personnels contraignent l'individu de façon temporelle (par les horaires d'ouverture par exemple).

D'après [4] l'étape suivante des modèles de simulation individu-centrés est d'atteindre un niveau d'avantage opérationnel et intégrateur des acteurs du domaine.

L'approche Miro va dans ce sens en proposant la construction d'un modèle autour des 3 axes Agent-Activité-Acteur :

- L'agent pour son comportement individuel ;
- L'activité comme brique élémentaire de la construction d'un emploi du temps et des trajets ;
- L'acteur, comme initiateur du scénario-test à appliquer à un cas réel.

Le modèle Miro repose principalement sur des agents informatiques et leur comportements autonomes , évoluant en fonction de l'environnement.

Les individus incarnés dans les agents sont confrontés à la fois aux opportunités et contraintes liées à leur position géographique, mais sont également limités dans le temps pour effectuer leurs emplois du temps.

Cette approche confère à notre approche sa spécificité dans la mesure où les modèles classiques (**eg. [5]**) ne contraignent pas la dimension temporelle, alors même qu'elle exerce pour nous un élément décisionnel important, en tant que ressource pour l'individu.

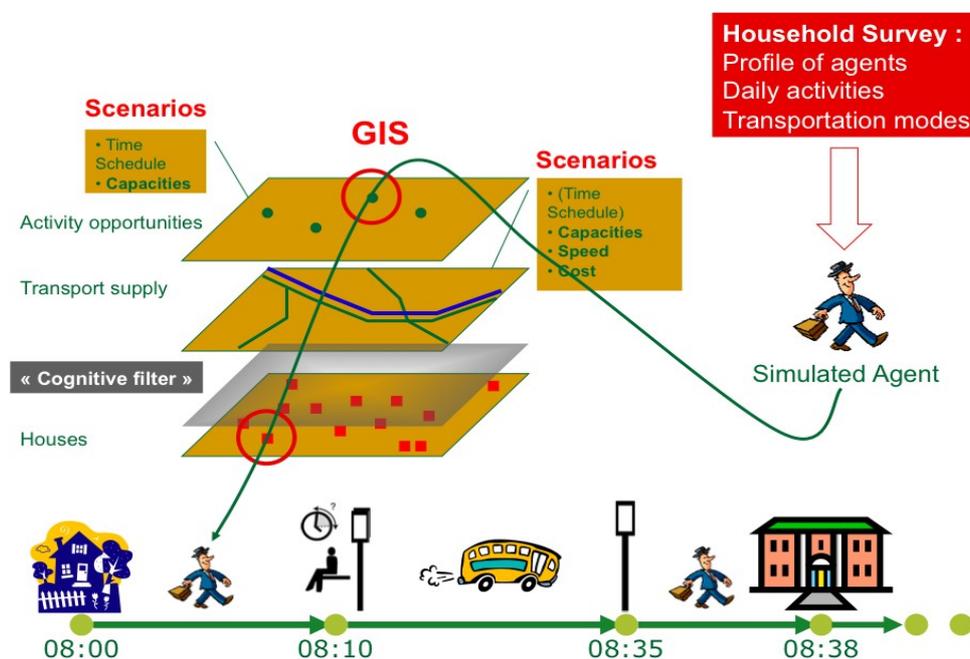


Figure 15 L'approche globale de Miro

L'objectif des agents est d'organiser dans l'espace et dans le temps leurs activités, en prenant en compte les contraintes environnantes, y compris celles provenant du comportement des autres agents (par exemple le trafic routier).

L'ensemble de ces comportements induits pose la question de l'adaptabilité des agents faisant face aux modifications de leur environnement urbain. Les agents se doivent en effet d'être réactifs à leur environnement et de conserver en mémoire leurs adaptations précédentes, afin d'effectuer leurs prochains choix.

Cependant, bien que ce mode de fonctionnement paraisse fondé, le modèle en subit une augmentation conséquente de sa complexité. Les agents peuvent fortement diverger et engendrer une hétérogénéité importante. Nous avons expérimenté dans MIRO² ce genre de difficulté et avons choisi, pour MIRO³, de conserver un maximum de contrôle sur les données d'entrée, les variables observables et les règles comportementales.

Élaboration de la ville virtuelle

Dans un souci de réalisme, les agents et leur environnement sont générés à partir de données empiriques. Ce premier travail prend en compte aussi bien les données spatiales (SIG), temporelles (heures d'ouverture des bâtiments, heures de passage des bus), que les caractéristiques propres aux habitants, et enfin leurs emplois du temps possibles.

Données d'environnement

Les données des bâtiments et des routes sont identiques à celles produites lors de la version précédente du modèle, car cette base de données est déjà une importante source d'information spatio-temporelle que nous avons pu encore enrichir pendant ce projet. Les tronçons routiers ont ainsi été mis à jour, afin de créer des graphes de déplacements dépendant du mode de transport.

Les horaires de plus de 14500 ressources urbaines (services, commerces, administrations...) ont été renseignées (sur les 68000 bâtiments impliqués), et les limitations de vitesses et types de routes ont été complétés.

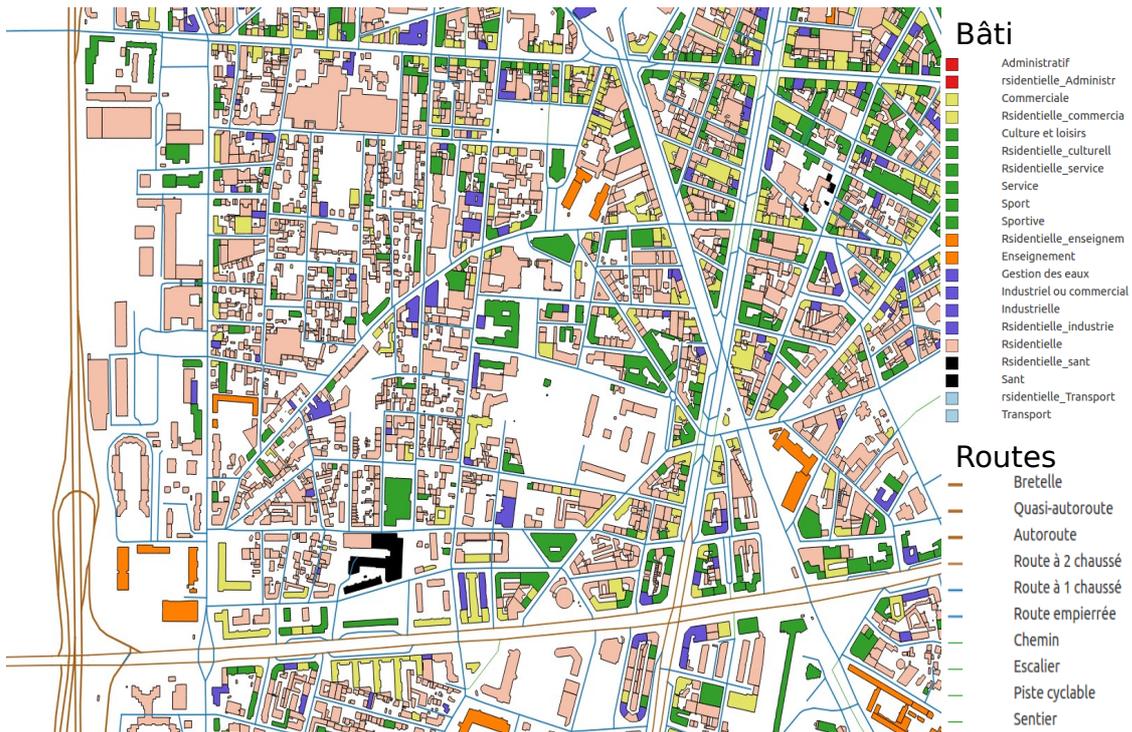


Figure 16 Zoom sur une partie des données géographiques

Population de référence

La source d'information principale servant à la construction de notre modèle de mobilité basé sur les activités est l'EMD (Enquête Ménages-Déplacements), qui fournit un grand nombre de données sur les déplacements quotidiens au sein de notre zone d'étude.

Ces données sont produites à partir de questionnaires soumis à des foyers sélectionnés aléatoirement dans des zones spécifiques, et sont statistiquement représentatives de l'aire urbaine de Grenoble.

Il est important de préciser que les informations collectées concernent le jour précédent de l'administration de l'enquête, sur une période de 24h, et donnent le détail de tous les trajets effectués durant cette période.

De ce fait, l'ensemble des données constitue un jour « moyen » inexistant, qui a pour but de traduire une dynamique quotidienne générale, plutôt que celle d'un jour de la semaine en

particulier. Par extension, la simulation, bien que répétant plusieurs périodes de 24h, n'a pas pour prétention de se situer à l'échelle temporelle de la semaine.

Les horaires d'ouverture des bâtiments qui ont été pris comme référence sont ceux du jeudi, jour pour lequel les horaires fournis sont les plus nombreux.

L'EMD de 2010 sur l'aire urbaine de Grenoble couvre 7600 foyers sur 97 zones de tirage, soit environ 16000 personnes de plus de 5 ans. Cette dernière catégorie est exclue de l'étude, car « transparente », ou induisant un déplacement d'accompagnement chez une autre personne. De fait, cette catégorie est également retirée de notre modèle.

A partir des données d'enquête, le projet MIRO² a permis d'établir une typologie des individus en fonction de leur comportement de mobilité ainsi que de leurs caractéristiques socio-économiques et démographiques.

Cette typologie s'aligne par ailleurs sur les grandes catégories suivantes, réutilisées tout au long de la construction du modèle.

Catégorie	Effectif
1 : actifs	3914
2 : Femmes seuls / Travailleurs à temps partiel	1313
3 : Sans emploi	577
4 : Actifs et sans emplois de 50-64 ans	2706
5 : Etudiants	1283
6 : Retraités	2131
7 : Scolaires	2897

Tableau 1: Typologie des agents du modèle

Génération de la population et de ses caractéristiques

A partir de cette typologie basée sur la mobilité des individus, l'objectif est de créer une population d'agents informatiques cohérente pour l'aire urbaine étudiée.

Dans cette perspective, nous avons donc extrapolé les données des individus de l'EMD à un échantillon beaucoup plus grand, qui conserve pour autant la même distribution statistique des caractéristiques choisies. Les grandes étapes de cette phase de génération de la population synthétique sont les suivantes :

- Nous définissons d'abord les attributs qui seront assignés aux agents, et qui seront pertinents pour l'analyse thématique des résultats de simulation.
- Nous générons un fichier contenant les attributs de chaque agent, sous la contrainte des données des EMD. Le prototype GenStar (Gen* : <http://www.irit.fr/genstar>) a été sélectionné après avoir essayé de nombreuses techniques de génération de population. Le projet Miro s'inscrit ainsi dans le développement de Gen* comme utilisateur et contributeur.
- Les données obtenues en sortie sont validées statistiquement.

Le tableau suivant récapitule les attributs assignés aux agents, ainsi que les dépendances statistiques entre variables sous-jacentes.

Attribut	Dépendance	Niveaux
Catégorie	âge	[1-7]
Age	catégorie	5:17, 18:24, 25:34, 35:49, 50:64, 65:100
Genre	catégorie	Homme, femme
Zone d'habitation	catégorie	97 zones
Activité principale	catégorie	Travail , études, achats... 8 possibilités
Type de véhicule	Âge, zone	Pas de véhicule Véhicule autorisé en ZAPA Véhicule non-autorisé en ZAPA

Tableau 2: Attributs donnés aux agents du modèles

L'attribut « activité principale » résulte du besoin d'organiser l'emploi du temps d'un individu en fonction d'une activité en particulier qui doit être réalisée, et autour de laquelle vont s'organiser les autres, à l'image du travail pour la majorité des actifs.

Afin de reproduire les comportements des différentes catégories, nous avons donc compté pour chacune d'entre elles les occurrences des types d'activités dans les emplois du temps de l'EMD, puis assigné des probabilités à chacune en fonction de leur occurrence.

Les activités sous-représentées (inférieures à 10%) ont été écartées, pour plus d'homogénéité au sein des catégories.

Les agents ont également un « type de véhicule » associé. Il s'agit de leur attribuer ou non une voiture, et si oui le groupe de véhicule correspondant (Euro 1 ou Euro 5 : voir la partie suivante portant sur l'établissement des scénarios). Ces données sont issues d'une synthèse sur l'ensemble des déplacements des personnes enquêtées.

Gen* prend en données d'entrée la fréquence de chacun des attributs ainsi que leur dépendance aux autres. Un traitement des données est nécessaire pour extraire ces effectifs conditionnels dans un premier temps.

Nous avons utilisé le logiciel R afin d'automatiser la démarche et la valider statistiquement. A titre d'exemple, le modèle Gen* génère une loi de probabilité conditionnelle pour créer un individu masculin (Gender = 1) selon sa catégorie, en suivant le tableau de fréquence dont un extrait est fourni ci-dessous.

Entrée : Catégorie	Sortie : Genre	Fréquence
0 : Actif	1 : homme	2221
1 : Femmes seules et travailleurs temps partiel	1 : homme	203
2 : Sans emploi	1 : homme	301
...
Total des individus de genre masculin		7357

*Tableau 3: Extrait d'un tableau de fréquence en entrée de Gen**

Validation des données

Nous avons procédé à une validation croisée de nos échantillons afin de nous assurer de la cohérence des données de cette population de synthèse (source : <http://www.di.ens.fr/~arlot/papers/div/0804lmu.htm>).

De manière classique, l'échantillon EMD initial est découpé en deux sous-échantillons aléatoires, l'un servant d'échantillon d'apprentissage et l'autre de validation.

L'échantillon d'entraînement permet de générer une population de grande taille avec Gen*, que nous comparons ensuite à l'échantillon de validation, qui est indépendant. La proximité entre les données permet d'évaluer la fiabilité de la méthode.

Afin de palier au problème de la taille de l'échantillon d'entraînement, qui est de fait moins performant que si l'on prenait l'échantillon total pour générer la population, nous répétons 10 fois la comparaison entraînement/validation, puis synthèse/validation pour tous les attributs basés sur des effectifs directs.

Nous avons comparé les proportions des différents caractéristiques au sein des échantillons (ci dessous l'exemple des catégories).

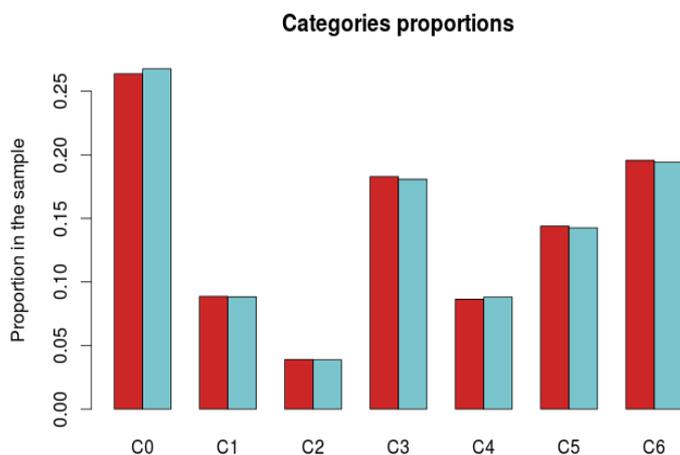


Figure 17 Différence entre des sous-échantillons de 90 % et 10 %

Cette première comparaison révèle une forte similarité entre des sous-échantillons indépendants, et une bonne homogénéité de la population que nous cherchons à reproduire.

Attribute	Value	relative error
Category	0	0,007
	1	0,012
	2	0,008
	3	0,006
	4	0,016
	5	0,002
	6	0,001
Gender	Man	0,001
	Woman	0,001
Age groups	[5;17]	0,001
	[18;24]	0,011
	[25;34]	0,001
	[35;49]	0,011
	[50;64]	0,006
	[65+]	0,002
Area	[100:199]	0,002
	[200:299]	0,011
	[300:399]	0,004
	[400:499]	0,008
	[500:599]	0,005
	[600:699]	0,019
	[700:799]	0,036
	[800:899]	0,013
	[900:999]	0,006

Tableau 4: Comparaison des échantillons de populations synthétique et de validation

Si l'on compare les données de la population synthétique et de l'échantillon de validation, nous obtenons ensuite le tableau ci dessous, indiquant les valeurs relatives sur les

proportions de chaque attribut dans les échantillons respectifs, moyennés sur les 10 répétitions.

Nous observons une erreur relative globalement inférieure à 2 %. Les effectifs dans les zones d'enquête entre 700 et 799 sont plus faibles, il est donc normal d'observer des écarts plus grands sur les effectifs, d'un découpage à un autre.

La méthode utilisée a l'avantage de ne pas produire d'incohérence, tant que l'effectif est à zéro pour les combinaisons d'attributs qui ne sont pas souhaitées.

Les valeurs résultant d'agréments ou de traitements statistiques préalables, telles que les activités principales ou les types de véhicules, peuvent être utilement comparées sous une forme matricielle (**figure 18**).

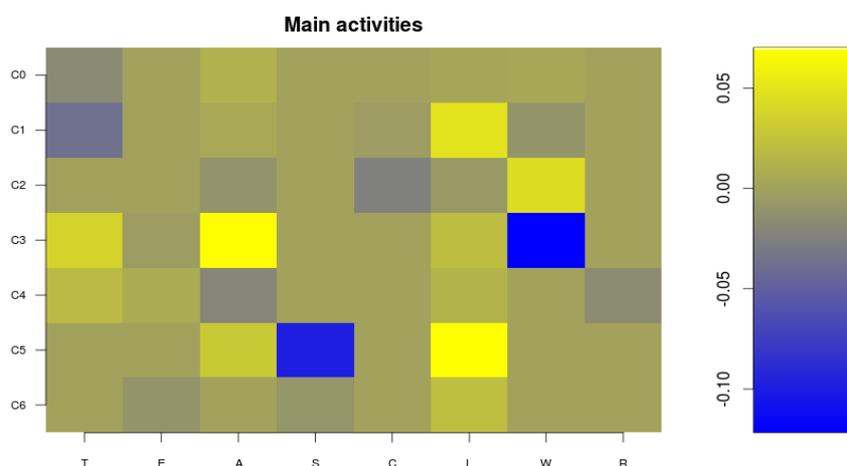


Figure 18 Différence des proportions d'un attribut entre l'échantillon synthétique et de validation

Cette matrice indique de nouveau une faible erreur relative, avec une erreur plus importante sur deux valeurs. Ceci est explicable par le fait que nous supprimons les valeurs représentées entre 0 et 10 % dans la génération de population synthétique, et non dans l'échantillon brut de la population, qui présente une plus grande variabilité sur cette valeur arbitraire.

Gestion de la localisation des agents

Une fois les agents générés dans Gen*, ceux-ci sont aléatoirement distribués dans des bâtiments situés dans leur zone d'habitation propre (zone de tirage de l'enquête).

En première approximation, nous n'avons pas pris en compte les distances des individus à leur lieu d'activité principal, de manière à introduire une variabilité suffisante. Certains seront privilégiés, et d'autres non.

Toujours pour simplifier le modèle dans cette première version, nous n'affectons pas les agents à un foyer. Cela signifie que les agents sont placés ensemble dans un bâtiment sans égard pour leurs caractéristiques socio-démographiques.

Enfin, compte tenu de la non-disponibilité des données géographiques du bâti et des routes sur l'ensemble des zones de tirage des enquêtes, nous avons rassemblé les zones pour lesquelles les données manquaient en plusieurs points fictifs. Tous les habitants de ces zones entrent par un même point d'entrée dans la ville, par un grand axe routier, pour représenter les flux d'entrée et de sortie.

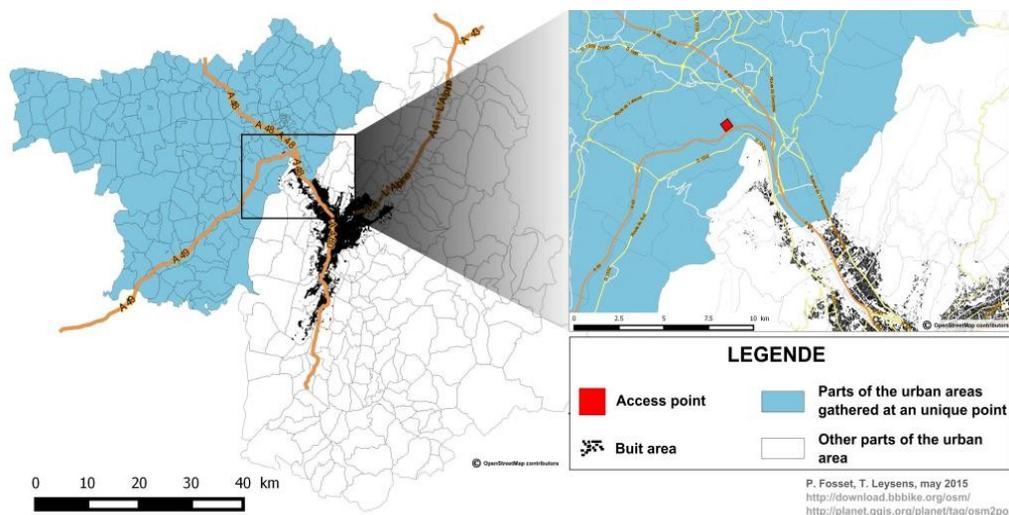


Figure 19 Concentration des zones externes à l'enquête en points uniques d'accès (« access point »)

Par ce biais nous gardons donc les données collectées sur l'ensemble des zones et en particulier la distribution spécifique des attributs.

Néanmoins le temps de transport de ces agents en est modifié et constitue une donnée de sortie sensible.

Création et affectation des emplois du temps

Une fois créé avec Gen*, l'agent sélectionne un emploi du temps dans une « bibliothèque d'emplois du temps » (BEDT). La base de donnée des combinaisons d'activité a été préalablement créée à partir des enquêtes, en fonction des occurrences de chaque activité, selon les catégories.

L'organisation du temps autour des activités implique différentes étapes.

Tout d'abord, un lieu d'habitation et un lieu d'activité principale (un lieu de travail, par exemple) sont affectés de manière aléatoire à chaque agent parmi les bâtiments de type correspondant.

Ensuite, la BEDT est parcourue afin que chaque agent dispose d'un choix parmi un nombre limité d'emplois du temps possibles, ceci afin de rester proche des contraintes expérimentées par les individus [6].

Ce panel d'EDT possibles est alors contraint par la présence de l'activité principale de l'agent, qui doit être réalisée dans la journée.

Enfin, les activités sont organisées sous forme d'une séquence journalière, à partir de l'exemple des données de l'EMD, afin que l'agent puisse comparer les différents emplois du temps qui lui sont proposés. La construction de cette séquence journalière repose sur l'activité principale. Cette activité est associée à une durée moyenne pour chaque catégorie. Un intervalle de temps possible pour cette activité est déterminé en fonction des horaires d'ouverture du bâtiment et de la durée espérée. L'heure de début de l'activité est alors choisie aléatoirement dans cet intervalle.

A partir de ce repère clé, les horaires de début et fin des autres activités de la séquence sont définis. Les durées moyennes de transport (par catégorie) sont retranchées entre chaque activité.

des préférences révélées n'est pas, à proprement parler, construite selon cet objectif. L'enjeu est donc à déterminer les durées d'activités et de transport (disponibles dans l'EMD) qui interviennent dans le choix des EDT. La principale difficulté réside dans la définition de l'ensemble de choix qui détermine les alternatives supposément prises en compte par les individus enquêtés. Cet ensemble de choix doit reposer sur une énumération restrictive et réaliste des options potentielles. Or, ce qui est aisé à mettre en œuvre pour le choix modal par exemple (nombre fini d'alternatives), l'est moins pour les EDT, à la combinatoire par nature beaucoup plus large.

La première hypothèse, rapidement abandonnée, consistait à prendre en compte les EDT moyens des autres catégories d'individus. Mais cela s'est révélé non pertinent : ainsi, l'EDT d'un actif ne peut en aucun cas constituer une option de choix potentielle pour un individu appartenant à la catégorie « scolaire ». Il convient d'ailleurs de rappeler le risque inhérent à la prise en compte d'alternatives non pertinentes qui conduisent à l'estimation de modèles biaisés. Finalement, l'option retenue a consisté à sélectionner, pour l'ensemble des choix, des EDT restrictifs (faibles temps d'activités, temps de déplacements élevés) pour mettre en évidence la "stratégie d'optimisation" des individus mobiles. Les EDT réels relevés dans l'enquête (et donc choisis) ont été confrontés à cet ensemble de choix, ce qui a permis de retenir les variables et coefficients significatifs. Ainsi, les fonctions d'utilité retenues montrent dans quelle mesure l'EDT réel se distingue des EDT restrictifs. Cela permet de mettre en évidence la manière dont chacune des 7 catégories d'individus cherche à maximiser le temps de certaines activités et à minimiser les temps de déplacement induits. Ces fonctions, certes très simples, ont pour avantage de répondre aux objectifs de la simulation GaMiroD, les fonctions d'utilité permettant aux agents de sélectionner les options qui leur procureront, en théorie, une satisfaction maximale.

Concrètement, une fonction d'utilité globale gère le processus de choix des agents confrontés à différents emplois du temps (EDT) possibles, dans une logique discrète [7] (K. Train, 2009).

L'utilité d'un EDT est estimée de la manière suivante :

$$V_i = \sum_k \beta_k X_{ik}$$

Avec :

V_i : l'utilité de l'EDT i

B_k : un coefficient affecté à la durée de l'activité ou du transport X_{ik}

Dans ce modèle additif, les coefficients traduisent la préférence d'un agent pour les types d'activités à réaliser dans une journée, en fonction du temps passé à réaliser l'activité et du temps passé pour s'y rendre (transport).

Une composante stochastique est ajoutée dans ce moteur sur la base du calcul probabiliste suivant :

$$P_i = \frac{e^{V_i/V_{max}}}{\sum_j e^{V_j}}$$

avec :

P_i : la probabilité de choisir l'EDT i

V_{max} : l'utilité maximale dans le panel de choix de l'individu

Les résultats du calcul des coefficient de cette fonction montrent une stratégie de maximisation du temps passé dans les activités et une minimisation du temps passé dans les transports.

	Utility functions						
	Actifs	Femmes temps partiel	Chômeurs	Inactifs	Etudiants	Retraités	Scolaires
Tps domicile							
Dép domicile							
Tps Travail	0.584***	0.358***		0.312***	0.152***		
Dép Travail							
Tps Etudes					0.118***		0.135***
Dép Etudes					-0.124***		-0.166***
Tps Achats	1.36***		5.12***	2.18***	0.236***	2.26**	
Dép Achats	-0.242***			-0.257***	-0.286***	-0.127***	
Tps Santé				0.811***		0.5***	
Dép Santé				-0.167***		-0.268***	
Tps Démarches			0.307***				
Dép Démarches			-0.313***				
Tps Loisirs	1.77***	2.0***	3.16***	6.18***	0.313***	2.13***	0.39***
Dép Loisirs							
Tps Accompagnement	2.58***	4.99***		4.48***			0.25*
Dép Accompagnement	-0.107***	-0.15***		-0.138***			-0.442***
Tps Restauration				0.191***	0.231***		
Dép Restauration				-0.078***	-0.087***		

*p < 0.05 **p < 0.01 ***p < 0.001

Figure 21 Coefficients de la fonction d'utilité

On notera que les coefficients sont d'avantage significatifs pour les temps passés à réaliser les activités que pour ceux passés à se déplacer. Néanmoins, dans la mesure où les durées sont liées, les deux dimensions entrent en jeu dans le modèle et dans le choix des emplois du temps.

A partir de la fonction d'utilité, un premier emploi du temps est sélectionné par un agent en fonction de la probabilité P_i . En fin de journée, et afin de planifier le jour suivant, un agent a toujours potentiellement le choix entre ses différents emplois du temps.

Nous introduisons une variable de « satisfaction » afin de gérer le changement d'EDT ou non en fin de journée. Nous basons cette variable sur le rapport entre l'utilité « réelle » à l'issue de la simulation et l'utilité théorique calculée à partir des durées espérées. Si ce rapport se trouve en dessous d'un certain seuil, alors l'agent changera d'EDT pour le jour suivant. Les valeurs d'utilité et de probabilité sont mises à jour à partir des données issues de la simulation, donnant de ce fait une « mémoire » des EDT déjà essayés.

Le modèle descriptif

Domaine de définition

A l'issue de ces différentes opérations, nous disposons d'un ensemble d'informations sur les habitants (agents), les bâtiments, les routes, le trafic et les systèmes de transport collectif. Ces informations sont traduites à l'échelle de chaque entité du modèle, lui conférant ainsi ses caractéristiques et son comportement propre. Entre 500 000 et un million d'agents sont de fait gérés au cours d'une simulation.

GaMiroD est organisé en quatre sous modules : habitants (agents), bâtiments, système de transport en commun et routes. Cette organisation permet un meilleur échange entre experts dans la construction et l'interprétation du modèle.

Le modèle en lui-même contient d'avantage d'agents, mais les agents principaux nous intéressent sont ainsi définis :

- **Les habitants** : ces agents se déplacent tout au long de la journée afin d'exécuter leur EDT en suivant les activités à réaliser dans l'ordre et selon leurs horaires. La population des habitants est issue du générateur de population Gen* (voir partie *Génération de la*

population et de ses caractéristiques). L'ordre de grandeur de la population est basée sur la population totale de la zone enquêtée, soit 10^5 .

- **Les bâtiments** : ils représentent les services de la ville, dans lesquels sont réalisées les activités. Ces agents sont générés à partir d'un fichier shapefile, donnant la localisation, la forme, le type d'activité et les horaires d'ouverture. Nous disposons des informations pour les bâtiments de la zone de la commune de Grenoble et proche périphérie, soit environ 70 000 entités.

- **Le système de transport en commun** : Les stations de bus sont localisées et s'actualisent en fonction de l'heure de passage des bus (données publiques) et du nombre d'agent en attente en ce point. Les bus ou tramways ne sont pas représentés physiquement dans le modèle, ce qui évite la création d'agents supplémentaires. Plus de 750 stations sont réparties sur l'ensemble de la zone.

- **Les routes** : chaque agent-route a une capacité propre limitant le trafic, une vitesse limite de circulation, un nombre de voies et un type (voie piétonne par exemple). Ces agents sont organisés en graphe sur lequel les plus courts chemins entre les points d'intérêt (bâtiments) sont calculés au moyen d'un algorithme de type Dijkstra. 25 000 agents sont générés à partir des données du fichier shapefile.

Conception des interactions

La figure ci-dessous montre la conception du modèle sous la forme d'un diagramme UML (Unified Modeling Language) , résumant ainsi les interactions entre les différents agents.

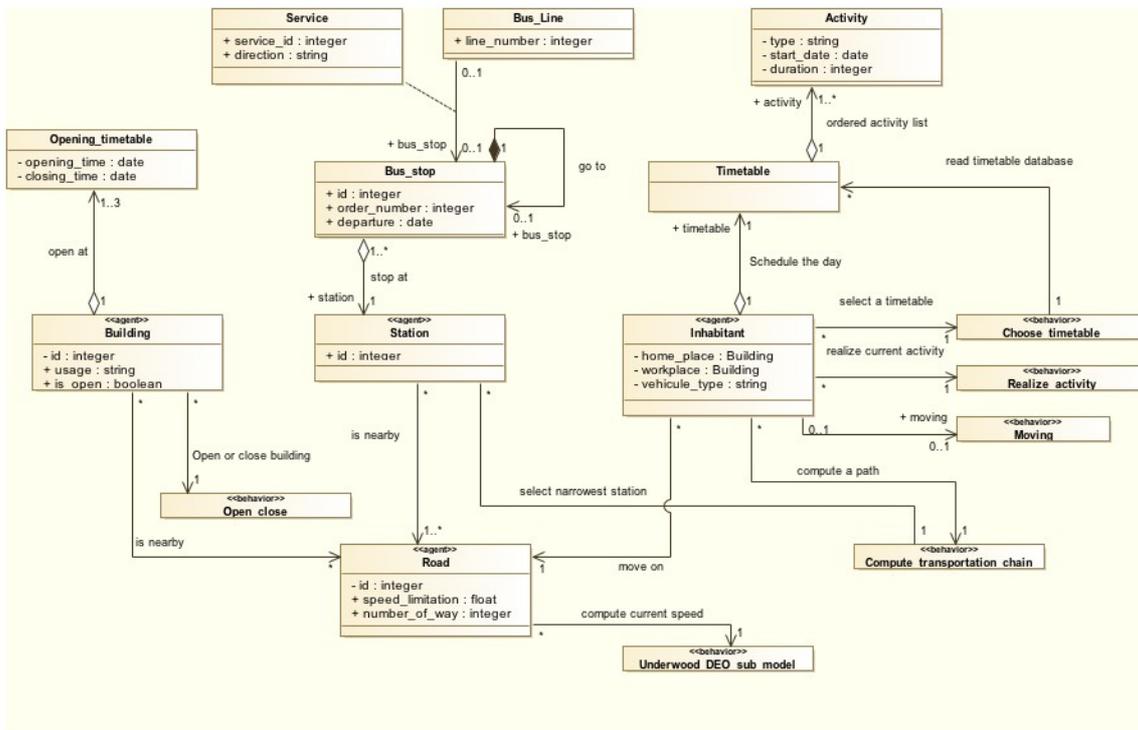


Figure 22 Diagramme UML de GaMiroD

Dynamique du modèle

Les agents qui composent l'environnement - autrement dit les bâtiments, les stations et les routes - sont immobiles mais changent d'état. Les agents habitants sont, quant à eux, mobiles mais dépendent de l'état de l'environnement.

Le comportement des bâtiments et des stations est déterministe, car il se base sur les horaires recueillis par enquête. Les bâtiments modifient leur état « Ouvert/Fermé » selon l'heure de la journée. Les stations calculent quant à elles le plus court chemin pour chaque agent se présentant avec une destination : sont pris en compte les horaires des bus, le temps de transfert entre les correspondances et la congestion liée au trafic routier.

Le comportement des routes dépend essentiellement des agents mobiles et est décrit dans la partie suivante.

Le cycle de chaque agent-habitant est représenté ci dessous :

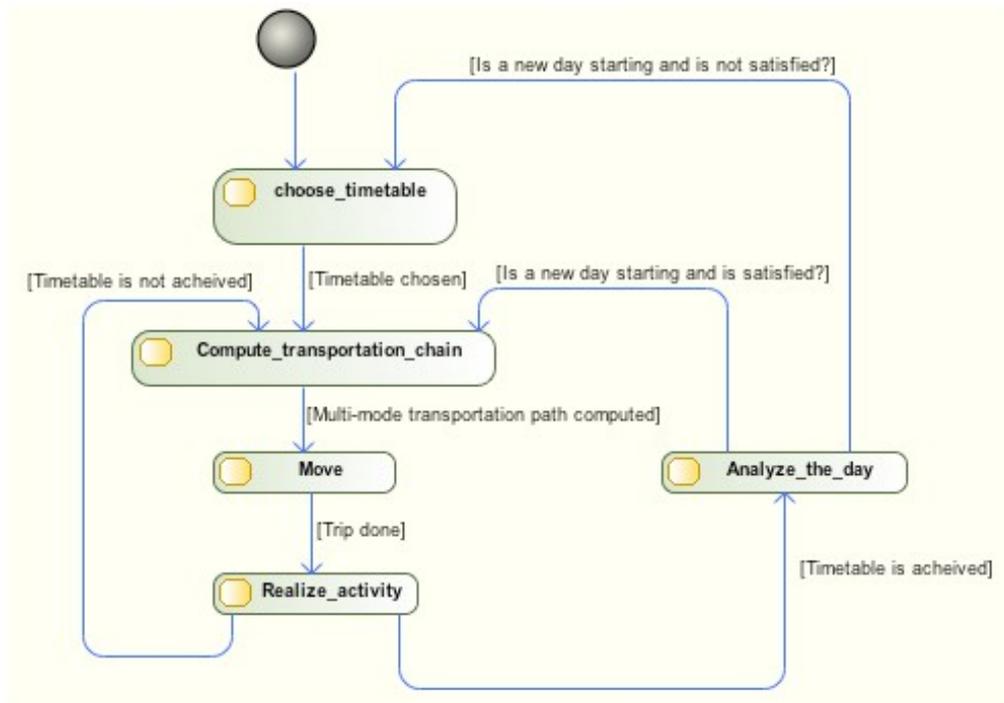


Figure 23 Cycle de l'agent-habitant

Les agents se déplacent en fonction de leur EDT et selon le mode de transport qui leur est attribué (à pied, en bus ou en voiture).

Ils évaluent ensuite leur programme du jour et changent d'EDT si besoin est :

- **choose_timetable** : le panel de choix d'EDT est assigné aux agents pendant la phase de génération de population. Un EDT est choisi au démarrage de la simulation en fonction de la fonction d'utilité.
- **compute_transportation_chain** : l'agent calcule son itinéraire avant de se déplacer. L'agent sélectionne l'itinéraire le plus court et son mode de transport en fonction du type de véhicule à sa disposition.
- **move** : déplacement entre l'activité terminée et la prochaine activité. La vitesse est actualisée en temps réel en fonction du trafic pour les bus et les voitures.
- **realize_activity** : l'agent reste statique sur le lieu de l'activité en cours jusqu'à la fin de celle-ci.

- **analyze_the_day** : l'EDT terminé, l'agent calcule sa satisfaction en reprenant le calcul d'utilité avec les temps passés dans les transports et activités lors de la simulation. L'EDT est ensuite conservé ou remplacé.

Le modèle de trafic

Le modèle de trafic utilisé dans GaMiroD n'a pas été modifié depuis la précédente version et reprend donc l'approche multi-échelle retenue. D'un point de vue macroscopique, la fonction d'Underwood (Single-Regime speed-Density) confère aux routes leur vitesse maximale en fonction de leur nombre de voies, de leur longueur et du nombre de voitures présentes sur le tronçon.

A un niveau microscopique, la vitesse de chaque agent dépend de son mode de transport (fixe pour les piétons à 5 km/h) et est contrainte par le trafic pour les voitures et les bus, sur la base de la fonction d'Underwood :

$$V_i = V_{fi} e^{-\alpha \frac{n_i}{K_i}}$$

Avec :

V_i : la vitesse des véhicules circulant sur le tronçon i , provenant de la loi macroscopique d'Underwood

V_{fi} : la vitesse limite du tronçon i ,

K_i : la capacité maximale du tronçon i , fonction du nombre de voie et de sa longueur,

n_i : le nombre de véhicule sur le tronçon i

α : un facteur de congestion

Les vitesses de déplacement sont associées à une loi¹ d'émission de particules en suspensions de diamètre inférieur à 10 micromètres (PM10). Aucun autre type d'émission n'a été ajouté, par souci de simplification, et cette valeur de PM10 est essentiellement indicative de l'état de la qualité de l'air.

¹https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/4258/viewer.xls

La loi polynomiale utilisée est fonction de la vitesse du véhicule. Nous nous basons sur les coefficients fournis pour les véhicules de type « Euro 1 » (immatriculés avant 1993) et « Euro 5 » (immatriculés avant 2011) de façon à marquer de façon nette les changements pouvant survenir dans notre scénario test.

Optimisation

Chaque agent calcule un plus court chemin sur un graphe qui est constitué des routes. Ce calcul a lieu avant chaque nouveau trajet entre deux activités.

Le fichier du réseau de routes et chemins utilisé lors de la simulation contient 25 222 nœuds au total (en incluant les routes uniquement empruntées par les piétons, et les routes sur lesquelles la vitesse maximale est faible).

Le calcul d'un plus court chemin dans ces conditions représente une forte contrainte en terme de calcul. Notre choix s'est porté sur l'algorithme de Dijkstra, très largement utilisé pour les calculs de plus court chemin [8]. Nous avons toutefois procédé à une réduction du graphe routier en fonction de la situation de chaque agent mobile.

Nous affectons ainsi à l'agent partant d'un point d'origine O pour se rendre à une destination D un sous graphe construit de la manière suivante :

« L'ensemble des routes pour véhicule situées dans la zone à 5 minutes de trajet autour de l'agent + l'ensemble des routes pour véhicule de la zone de destination + les routes principales (grands axes) pour les zones se situant entre ces deux zones »

Nous supposons donc qu'un agent va nécessairement passer par les grands axes pour rejoindre deux zones éloignées l'une de l'autre. Ce faisant, le temps de calcul est fortement réduit car le nombre de sommets à tester par l'algorithme de Dijkstra est beaucoup plus faible. Si aucun chemin n'est trouvé, le graphe complet est utilisé.

Les piétons se déplacent quant à eux sur un graphe ne comprenant pas les autoroutes pour rejoindre les stations de bus.

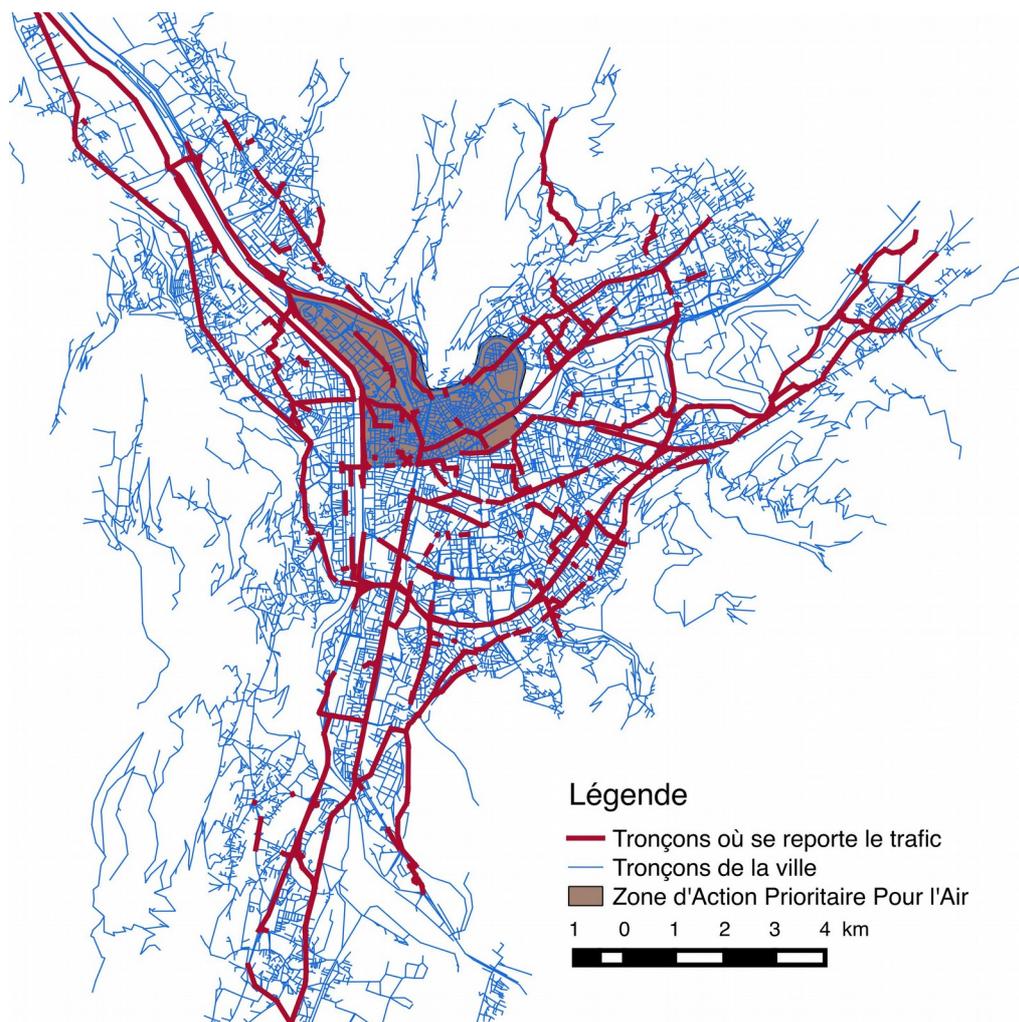
Cette heuristique a été retenue afin de réduire le temps de développement au sein de la plateforme GAMA. Dans le futur, une approche plus systématique, inspirée des « tas de Fibonacci » [8] sera vraisemblablement développée au sein de GAMA.

Exemple d'application

Depuis les recommandations de l'Union Européenne pour l'amélioration de la qualité de l'air et pour la protection de la santé des citoyens, plusieurs centaines de villes européennes ont mis en place des LEZ (Low Emission Zone), avec des règles de limitation de la circulation automobile variables.

En France, après l'exploration de la mise en place de ZAPA (Zone d'Actions Prioritaires pour l'Air) interdisant la circulation de certaines classes d'automobiles (à partir de la nomenclature européenne EURO), des dispositifs allégés de Zones de restriction de circulation sont inscrits dans le cadre de la loi de la transition énergétique pour la croissance verte.

Si le gouvernement français a officiellement renoncé à la mise en place des ZAPA (première formule) en 2013, c'est en grande partie pour ne pas être à l'origine de situations d'injustices socio-spatiales. Pour autant, réutiliser ce scénario dans le cadre du modèle GaMiro présente l'avantage de fournir une nouvelle approche de la question.



**Figure 24 Simulation de l'impact d'une ZAPA sur le trafic automobile à Grenoble
(50000 agents)**

La figure 24 montre ainsi l'impact simulé, sur le trafic automobile, de l'introduction d'une ZAPA dans le centre ville de Grenoble. Les reports attendus de trafic s'expriment sur les grands axes de contournement mais pas seulement. La cartographie des émissions de particules liées à l'introduction de la ZAPA (figure 25) montre ainsi qu'une amélioration significative de la qualité de l'air au sein de la ZAPA est contrebalancée par une dégradation non moins significative de la qualité de l'air en différents endroits de l'agglomération, en raison des report de trafic et/ou d'activités engendrés par l'introduction de la ZAPA.

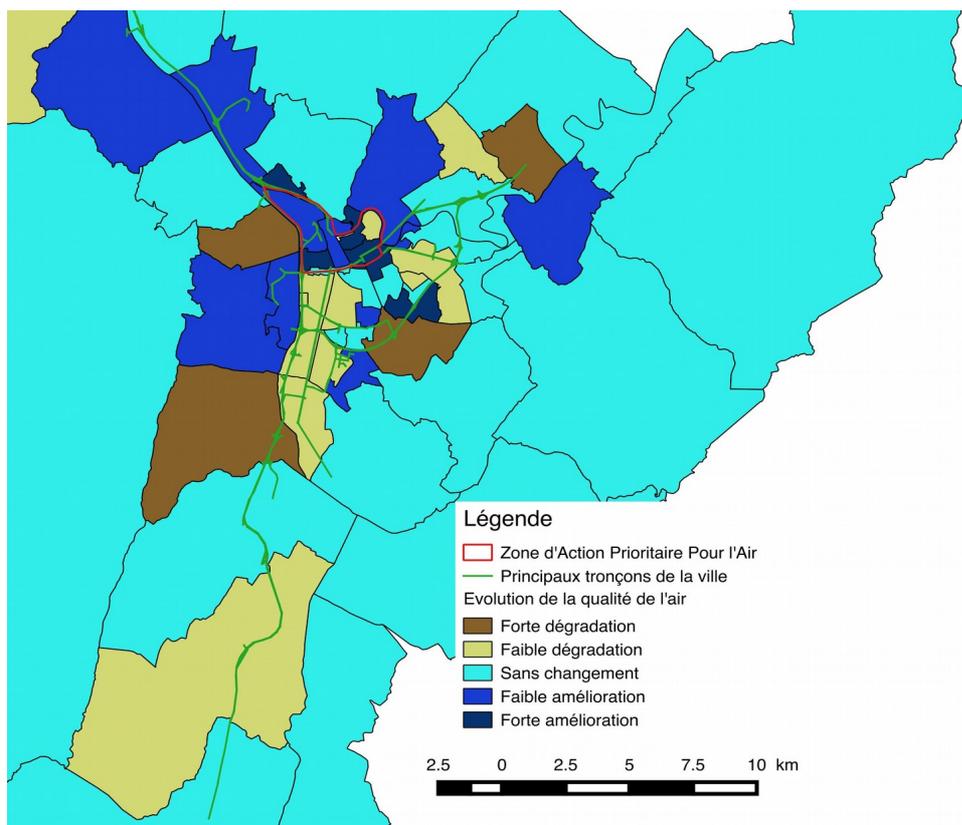
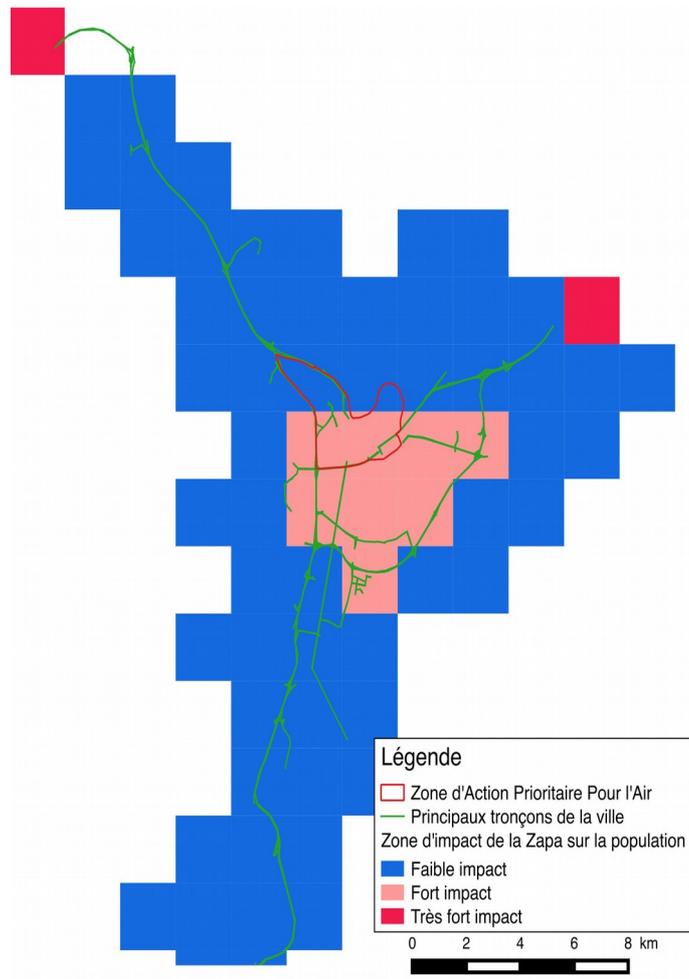


Figure 25 Simulation de l'impact d'une ZAPA sur la qualité de l'air - PM10 (50000 agents)

Le calcul des pertes et des gains sur l'ensemble de la zone montre quant à lui que l'impact de la ZAPA sur la quantité d'émission de PM10 est globalement négatif : la moyenne des taux d'évolution entre les situations sans et avec ZAPA, pondérée par la population résidente par zone est ainsi de -8,3%, révélant une augmentation globale de l'exposition des populations résidentes aux particules fines. La faible taille de la ZAPA et sa localisation très centrale sont sans doute en cause et l'intérêt de cette approche est de pouvoir explorer d'autres scénarios alternatifs, ne présentant pas ces possibles effets pervers.

Un autre avantage de l'approche individu-centrée adoptée dans MIRO est de pouvoir raisonner à ce même niveau de détail. Il est ainsi possible de recenser tous les agents dont l'emploi du temps est affecté par l'introduction de la ZAPA. La carte 26 montre la localisation de ces agents, au lieu de résidence. On notera qu'une très large zone autour de la ZAPA est concernée (les points d'entrée de la ville étant pénalisés de manière considérable) et que l'impact sur les chaînes d'activités est systématiquement négatif, la ZAPA pénalisant de

manière générale l'accès à la ville et ses ressources. Sa localisation, au coeur du dispositif monocentrique Grenoblois amplifie là encore structurellement ce phénomène.



**Figure 26 Simulation de l'impact d'une ZAPA sur les emplois du temps des agents
(50000 agents)**

Lien de téléchargement des modèles

https://drive.google.com/folderview?id=0B3s8UVR_Pybkd kpPUUtGVkUyWVE&usp=sharing

Références

- [1] Aurélie Bousquet, Sophie Constans, and El Faouzi Nour-Eddin.
On the adaptation of a label-setting shortest path algorithm for one-way and two-way routing in multimodal urban transport networks. In *International Network Optimisation Conference*, 2009.
- [2] Pierre Parent, Dominik Kirchler, Marie-José Huguet, Roberto Wolfler Calvo.
Plus court-chemin multimodal aller-retour.
http://uma.enstaparistech.fr/work/labo_work/files/diam/docro/roadef_2013/papier/61.pdf
- [3] <https://github.com/NetLogo/NW-Extension> (en ligne le 19/11/2014)
- [4] *Mc Nally et al. The Activity-Based Approach. In Handbook of Transport Modelling, 2nd edition. 2008.*
- [5] Chu et al. Efficient scheduling method of complex batch processes with general network structure via agent-based modeling. In *AIChE Journal Volume 59, Issue 8, p. 2884–2906. 2013.*
- [6] Tversky et al. Availability: A heuristic for judging frequency and probability. In *Cognitive psychology. 1973 - Elsevier*
- [7] Train K. , *Discrete Choice Methods with Simulation. 2nd edition, 2009 - Cambridge University Press*
- [8] Fredman M. L. , Tarjan R. E., « Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms », *Journal of the ACM* 34(3), 1987, p. 596-615.