



HAL
open science

Évolution "spatio-temporelle" d'une desserte de transport flexible simulée en sma

Adrien Lammoglia

► **To cite this version:**

Adrien Lammoglia. Évolution "spatio-temporelle" d'une desserte de transport flexible simulée en sma : Enjeux méthodologiques et perspectives. Modélisation des dynamiques spatiales, Dec 2010, Tours, France. pp.21. hal-00567076

HAL Id: hal-00567076

<https://hal.science/hal-00567076>

Submitted on 18 Feb 2011

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

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

ÉVOLUTION "SPATIO-TEMPORELLE" D'UNE DESSERTE DE TRANSPORT FLEXIBLE SIMULÉE EN SMA : ENJEUX MÉTHODOLOGIQUES ET PERSPECTIVES

Adrien Lammoglia

Doctorant en géographie
UMR ESPACE – Université d'Avignon
74, rue L. Pasteur – Case n°17 – 84029 Avignon Cedex 1 -France
Tél. +33 (0)4 90 16 26 75 – Fax +33 (0)4 90 16 26 99
e-mail : adrien.lammoglia@etd.univ-avignon.fr

Résumé :

Au sein de la thématique des transports, la modélisation et la simulation, permettent d'analyser et d'évaluer le fonctionnement d'un système de mobilité, sur un territoire donné. Elles constituent une étape nécessaire pour développer et améliorer des services de transport innovants tels que les Transports A la Demande (TAD). Parmi les différentes approches de modélisation, les Systèmes Multi-Agent (SMA) sont de plus en plus prisés par les géographes. Ils permettent, d'une part, de suivre statistiquement et très précisément l'évolution d'un système ; d'autre part, d'observer intuitivement l'évolution "spatio-temporelle" des formes engendrées.

Cet article présente un exemple de transport flexible théorique, modélisé et simulé, avec le SMA Netlogo. En suivant le protocole ODD (Overview, Design concepts, and Details), nous expliquons les principes de fonctionnement du modèle simulé, ainsi que les résultats obtenus en terme de structuration de flux et d'optimisation des dessertes. Les enjeux du paradigme multi-agent pour la recherche en service de transport y sont discutés ; et un ensemble de perspectives, qui seront abordées tout au long de la thèse, y est présenté.

Mots clés : transport flexible ; simulation ; SMA ; forme ; évolution spatio-temporelle

Abstract :

Within the transport research, modelling and simulation enable to analyse and evaluate the functioning of a mobility system which depends on the context. It is a necessary stage in order to develop and improve innovative transport service such as Demand Responsive Transport (DRT). Among various modelling approaches, Agent Based Models (ABM) are frequently used by geographers. ABMs allow to follow statistically and precisely the system advancement and we can observe intuitively spatio-temporal development of forms.

This paper presents an example of theoretical flexible transport simulated with Netlogo ABM tool. Using the ODD (Overview, Design concepts, and Details) protocol we explain the model operation, and results obtained relating to flows structuring and service optimization. Multi-agent paradigm's issues in transport research are discussed and we present some perspectives that will be treated during the doctoral thesis.

Key words : flexible transport ; simulation ; ABM ; form ; spatio-temporal development

1. Introduction

Avant de rentrer au cœur de la modélisation, il convient de préciser en introduction le contexte de la recherche, ainsi que les objectifs attendus. Nous présentons le paradigme dans lequel nous nous situons et les outils de modélisation et de simulation utilisés.

1.1. Contexte

En géographie, comme dans les sciences sociales en générale, il est difficile d'expérimenter l'objet d'étude, car des personnes morales sont nécessairement impliquées. Au sein de la thématique des transports, il est souvent difficile de mettre en place des expérimentations en grandeur nature. Pour tester un nouveau service de transport, il est nécessaire de disposer d'un territoire d'accueil adapté, et de déployer de nombreux moyens financiers et humains. D'où le recours aux simulations qui permettent, dans un premier temps, d'analyser virtuellement le fonctionnement d'un service, c'est-à-dire de tester l'adéquation entre l'offre et la demande de mobilité, et d'analyser l'influence du service sur le territoire simulé. Travaillant depuis deux ans sur les Transports A la Demande (TAD), nous proposons d'aborder ici la question de la simulation appliquée au transport flexible, en utilisant les Systèmes Multi-Agents.

1.2. Problème posé

De nombreux travaux montrent que la simulation à base d'agent se prête bien à l'étude des systèmes de mobilités, à l'image de ACCESSIM (DELAGÉ ET AL. 2008), qui est un outil permettant de simuler l'accessibilité d'individus à différents services. Comme nous l'avons montré dans un précédent travail (LAMMOGLIA ET AL. 2009), il est possible d'optimiser un service de transport théorique, en programmant des comportements d'agent relativement simples. Le présent article propose de s'interroger sur les apports et les limites de la modélisation multi-agent pour l'étude et la recherche en service de transport flexible. L'objectif est de présenter de manière synthétique le modèle développé ; de proposer différentes méthodes pour analyser les simulations ; et finalement de discuter de la pertinence d'une telle approche, tout en précisant ses champs d'application.

1.3 Paradigme

Le paradigme multi-agent est directement lié aux théories de la complexité. « La notion de complexité implique celle d'imprévisible possible, d'émergence plausible du nouveau et du sens au sein du phénomène que l'on tient pour complexe » (LE MOIGNE 1990 : 3). La complexité apparaît lorsqu'un grand nombre d'entités fonctionnent en inter-relation. Nous pouvons considérer trois grands types de relation :

- les interactions internes, c'est-à-dire entre les différentes entités du système ;
- les interactions entre les composantes d'un système et ses conditions initiales. Ses conditions peuvent être formalisées sous forme d'état, de quantité de ressources, etc. ;
- les interactions entre un système et son environnement. Dans l'environnement peuvent être inclus d'autres systèmes en interaction.

Un système complexe est donc « un ensemble d'éléments en interaction, une totalité organisée, plus ou moins ouverte sur l'environnement » (DAUPHINÉ 2003 : 83). L'approche individu centré est particulièrement intéressante pour étudier des systèmes complexes, puisqu'elle permet de simuler simplement les différents types d'interaction, et d'analyser de manière intuitive le fonctionnement global du système. Dans notre approche, les SMA ne sont pas utilisés pour étudier les phénomènes de manière exhaustive. L'enjeu est plutôt de cibler, en fonction de nos objectifs de recherche (optimisation du service, structuration spatiale d'une desserte, etc.), les éléments et les phénomènes les plus représentatifs de l'objet d'étude. Ceux-ci doivent être simples et facilement maîtrisables pour éviter l'effet de boîte noire, c'est-à-dire une impression de flou entre les paramètres initiaux et les résultats obtenus. Nous ne cherchons pas à représenter le réel de manière exacte, mais plutôt à modéliser différents phénomènes, en vue de les comprendre et de les expliquer.

1.4. Outils utilisés

Nous présentons ici les deux outils clés de notre approche. Il existe une grande variété de logiciels que ce soit pour la représentation UML ou la modélisation en SMA. Nous avons choisi respectivement ArgoUML et Netlogo pour leur accessibilité (logiciel libre), leur simplicité d'utilisation, et leur efficacité.

1.4.1. Formalisation UML

En premier lieu, nous utilisons le langage Unified Modeling Language (UML) pour formaliser les systèmes. UML est un langage de modélisation orienté-objet. Il propose une notation standard pour la modélisation des applications construites à base d'objets. Le langage est fondé sur une syntaxe, une sémantique et une notation graphique simple, précise et universelle, qui ont pour but de faciliter l'expression et la communication d'un modèle. Il puise sa force dans sa capacité à « modéliser de manière claire et précise la structure et le comportement d'un système indépendamment de toute méthode ou de tout langage de programmation » (MULLER, GAERTNER 2000 : 17).

1.4.2. Implémentation SMA

À partir des diagrammes UML, nous transcrivons les différents algorithmes en systèmes multi-agent. Le principe des SMA est d'étudier à un niveau global, le fonctionnement d'un (ou plusieurs) sous-système(s), connu à un niveau local (DAUDÉ 2006). Le logiciel permet de programmer des entités autonomes appelées les agents (les clients, les taxis, etc.), et de définir l'environnement dans lequel évoluent ces agents (réseau, stations, etc.) (FERBER 1995 : 13). Au cours de la simulation, il est ensuite possible d'observer leur fonctionnement, selon leur capacité, leur comportement individuel, la structure spatiale de l'environnement, etc. Pour notre cas, il s'agit d'analyser comment les deux sous-systèmes, à savoir le service de transport et la demande de mobilité, s'organisent ou plutôt s'auto-organisent., et donc de comprendre comment se met en place une desserte, en fonction des conditions initiales proposées.

2. Présentation du modèle

Il est relativement difficile de présenter un modèle à base d'agents de manière synthétique, tout en gardant un minimum de détails, indispensables pour la compréhension du modèle et de son objectif. Un enjeu relevé par Volker Grimm et d'autres collaborateurs, depuis 2005, a été de proposer une méthode standardisée de présentation et de communication de modèles à base d'agents. Le protocole est nommé ODD pour « Overview, Design concepts, and Details » (GRIMM *ET AL.* 2006). Nous utilisons ce protocole dans l'article, car il permet de faciliter la présentation et la compréhension d'un travail de modélisation, indépendamment du logiciel utilisé, de la discipline, et du thème de recherche abordé.

2.1 Vue d'ensemble

2.1.1. L'objectif

L'objectif du modèle est de tester et de comparer différents degrés d'optimisation pour un service de transport flexible théorique. Le service est constitué de trois taxis, qui définissent leurs tournées dynamiquement en fonction de la demande. Le système de transport opère dans un environnement rural virtuel, et le nombre important d'agents et d'interactions rendent le système simulé complexe. Nous nous focalisons sur l'organisation globale de la desserte par les taxis, en essayant d'évaluer l'adaptation du service à la demande de mobilité au cours du temps, et en fonction des différents degrés d'optimisation.

2.1.2. Structure du modèle et échelle

Nous modélisons les déplacements de deux catégories d'agents mobiles : des villageois qui se déplacent à destination des marchés les plus attractifs grâce à des taxis (Fig.1). Le territoire virtuel de la simulation est constitué de stations qui permettent de prendre en charge des clients à destination de marchés. Les stations se situent aux intersections des routes comme points de rencontre entre les taxis et les villageois. Elles sont les sommets d'un graphe non planaire sur lequel se déplacent les véhicules, avec ou sans client(s), dans un espace isotrope, mais non continu. Opérant sur un territoire purement théorique, l'échelle spatiale du modèle n'est pas précisée.

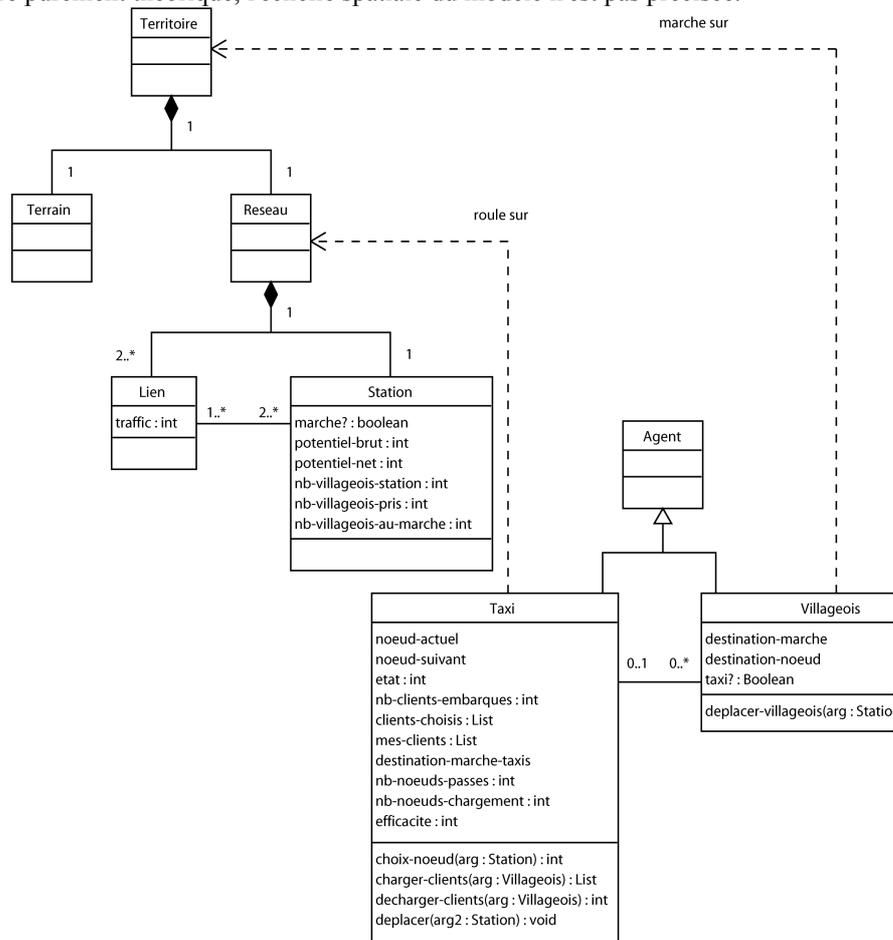


Figure 1 : Diagramme de classe UML.

2.1.3. Vue d'ensemble des processus et de leur ordonnancement

Les villageois apparaissent aléatoirement sur le territoire au début de la journée et en même quantité. Une journée correspond à 500 itérations logicielles. Les villageois choisissent leur marché de destination et si celui-ci est trop éloigné, ils se déplacent vers une station pour prendre un taxi qui les déposera au marché. Une fois arrivés à destination, les villageois disparaissent du modèle (Fig. 2). Les taxis se déplacent en continu sur le réseau, ils prennent en charge des clients sur les stations et les déchargent aux marchés. Le potentiel d'attractivité des stations et des marchés est calculé dynamiquement en fonction du nombre de clients captés et de véhicules passés.

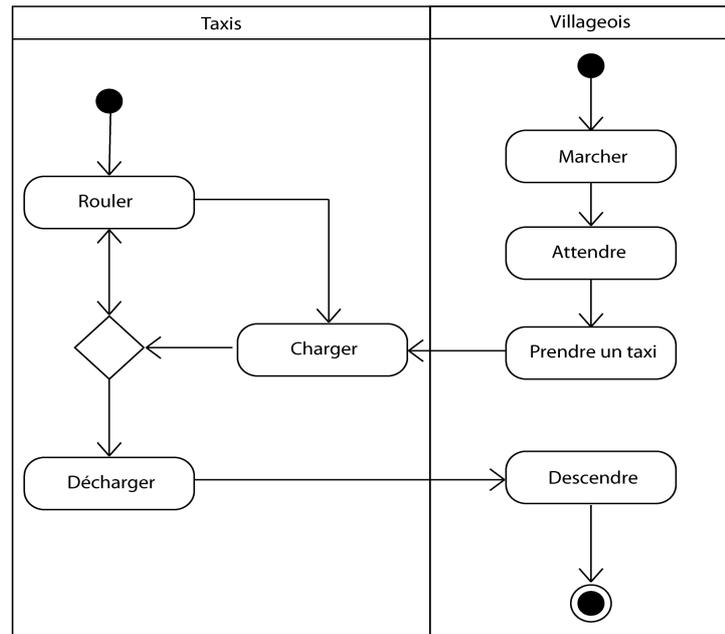


Figure 2 : Diagramme d'activité des agents

Pour comparer les différentes procédures d'optimisation, nous avons défini trois scénarios :

- *Scénario 1.* Minimisation de la distance par le taxi et par le client. Les agents vont se déplacer vers les stations les plus proches uniquement.
- *Scénario 2.* Maximisation du potentiel d'attractivité des stations par le villageois et minimisation de la distance par le taxi. Le villageois va se déplacer vers la station maximisant le rapport (potentiel d'attractivité / distance).
- *Scénario 3.* Maximisation du potentiel d'attractivité des stations par le villageois et le taxi.

2.2 Les grands concepts du modèle

Émergence : À l'état initial, chaque station et marché a un potentiel d'attractivité plus ou moins proche. Au cours de la simulation, la structure se modifie. En fin de simulation, on observe une forte disparité en termes d'attractivité, avec très souvent un marché accompagné de quelques stations, qui polarisent tout le territoire (fig. 9). La forme de cette polarisation émerge à un niveau global, mais elle résulte du fonctionnement des agents et de leurs interactions au niveau local. Par ailleurs, une structure en termes de flux de taxis apparaît rapidement sur l'interface. Les axes du réseau grossissent en fonction des flux. Il nous est donc possible de repérer les principaux axes de desserte en fin de simulation.

Perception : Les deux agents sont capables de mesurer la distance qui les sépare avec les différentes stations. Ils sont aussi capables de percevoir l'attraction des marchés et la fréquentation des stations. En revanche, ils n'ont aucune perception de la forme du réseau et de la localisation des stations. Leur connaissance de l'environnement est donc finalement très limitée, mais elle suffit pour qu'ils puissent atteindre leurs objectifs.

Interaction : Les taxis et les villageois peuvent échanger de l'information entre eux et avec leur environnement. Un villageois peut communiquer à un taxi son marché de destination. Lorsqu'il a déjà des clients et qu'il traverse une station, le taxi peut " appeler " des clients souhaitant se rendre au même marché que lui. Les stations sont marquées par la fréquentation des agents. En revanche, il n'y a pas d'interaction au sein des deux catégories d'agents (taxis et villageois) ce qui empêche toute forme de coopération.

2.3 Détails

2.3.1. L'initialisation

La figure 3 est une capture d'écran à l'état initial. Les simulations ont toutes été réalisées à partir de la même structure spatiale, seule la position des agents qui est aléatoire à l'initialisation a varié. Les variables d'état des agents ont toutes été initialisées de la même manière et les paramètres de simulation sont restés fixes.

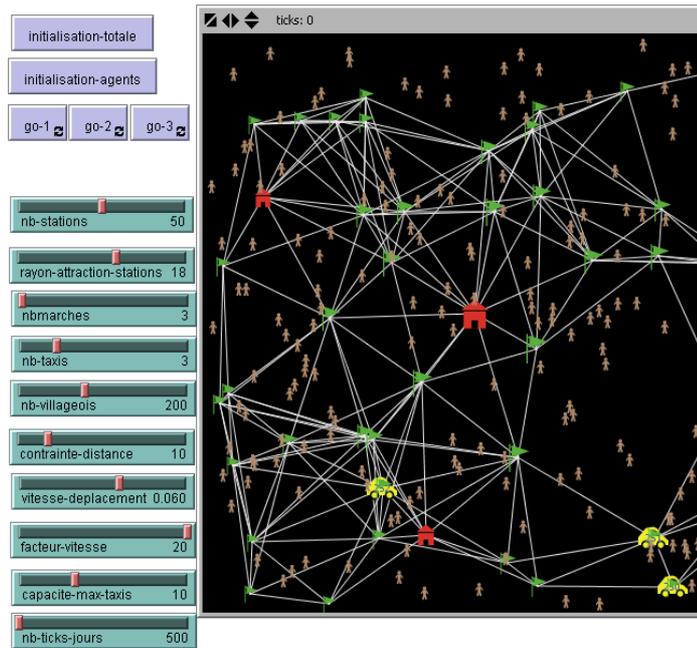


Figure 3 : Simulation à l'état initiale

2.3.2. Les variables d'entrée (inputs)

Ce modèle ne possède pas de variables d'entrée qui interviennent dans la simulation. Tous les paramètres sont figés et les variables d'état sont modifiées au cours de la simulation. Elles dépendent uniquement du fonctionnement interne du modèle.

2.3.3. Les sous-modèles

Pour donner plus de détails concernant le fonctionnement des agents nous présentons sur la figure 4 et 5 le diagramme d'état-transition des deux agents. Nous pouvons y lire les tests logiques utilisés dans le code informatique. Le bon sens de ces algorithmes détermine en partie la pertinence et le bon fonctionnement du modèle.

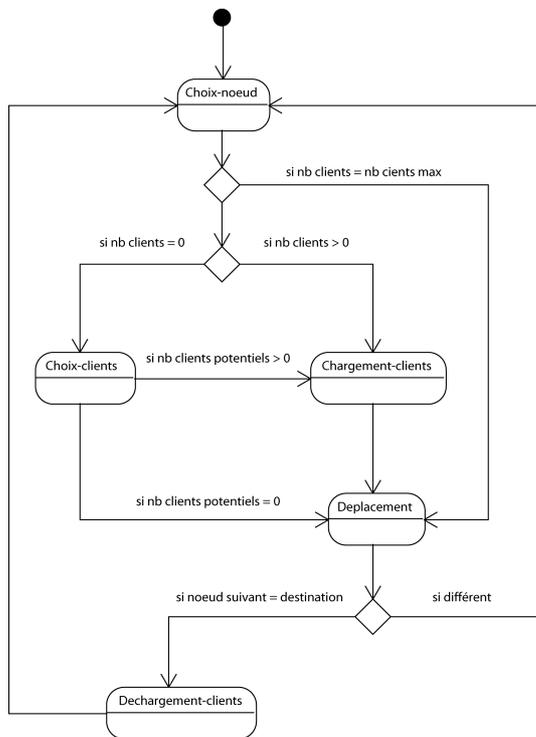


Figure 4 : Diagramme d'état-transition des taxis

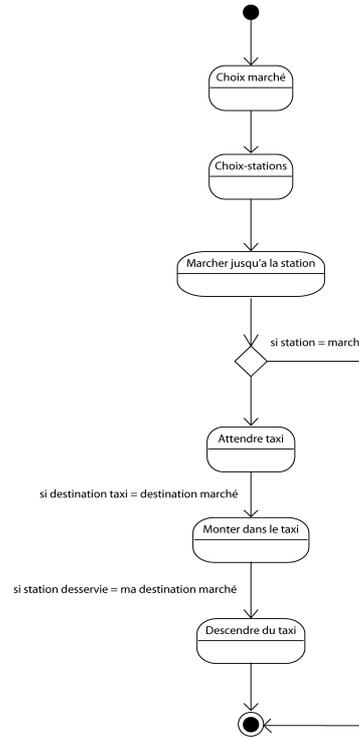


Figure 5 : Diagramme d'état-transition des villageois

3. Analyses de simulation

Pour analyser le modèle, nous posons deux hypothèses préalables. La première est que l'évolution de l'attractivité des stations et des marchés devrait être fortement influencée par leur position topologique sur le réseau. Une deuxième hypothèse est que l'optimisation combinée entre les taxis et les villageois (scénario 3) devrait faciliter et améliorer la desserte sur le territoire. Pour vérifier ces hypothèses, nous combinons différentes méthodes d'analyse. Dans un premier temps, nous expliquons l'information dégagée du suivi statistique des variables et des indicateurs. Nous nous focalisons ensuite sur l'évolution "spatio-temporelle" des flux de taxis. Nous proposons enfin une modélisation graphique de l'état final de la simulation pour expliquer comment les formes spatiales se sont structurées au cours de la simulation.

3.1. Fonctionnement du service

Ayant déjà présenté les résultats de l'analyse statistique exploratoire dans un précédent article (LAMMOGLIA *ET AL.* 2009), nous résumons ici les points essentiels concernant le fonctionnement du service de transport. Globalement, il est apparu, en comparant les trois scénarios, que le scénario 3 faisait émerger des formes sensiblement différentes des deux autres scénarios. Nous avons pu observer de grands mouvements grégaires et les taxis semblaient faire moins de tournées à vide. Pourtant, les différences, d'un point de vue statistique, sont restées assez faibles. On constate qu'au cours des trois scénarios, un grand nombre de stations n'ont pas été desservies, bloquant ainsi beaucoup de villageois dans les stations. L'efficacité des taxis (rapport entre le nombre de stations traversées avec prise en charge de clients, et le nombre total de stations traversées) ne s'est que très faiblement améliorée dans le troisième scénario. On a pu constater néanmoins que le scénario 3 avait permis de transporter plus de villageois au marché que dans les deux autres scénarios. L'analyse statistique permet donc de conforter notre deuxième hypothèse en précisant toutefois que les différences entre les trois scénarios sont moins marquées que ce que nous aurions pu penser.

3.1. Structuration des flux

Avec une deuxième simulation, nous avons choisi d'utiliser des calculs de dimension fractale pour analyser quantitativement l'évolution des flux de taxis au cours de la simulation. Pour ce faire, nous avons modifié le modèle d'origine de manière à ce que toutes les entités soient cachées sur le modèle, et que seules les routes utilisées par les taxis apparaissent avec une épaisseur proportionnelle à leur fréquentation. Ce procédé nous a permis de nous concentrer sur les flux uniquement. Par un export d'images répété toutes les 20 itérations, nous avons pu calculer l'évolution de la dimension fractale du réseau (Fig. 6). Pour plus de détails sur la méthode de calcul, nous renvoyons à un article soumis au colloque Géopoint 2010 (LAMMOGLIA 2010). Comme on le constate sur la figure 7, les premiers trajets se concentrent autour des marchés. Les traits sont alors épais et peu nombreux. Au cours de la simulation, on remarque que les taxis explorent petit à petit la quasi-totalité du réseau et pourtant la hiérarchie des routes les plus fréquentées reste semblable (Fig. 8). La courbe d'évolution de la dimension fractale (Fig. 6) confirme cette idée puisqu'on constate que sa croissance s'amortit très rapidement. Ceci indique que la structure est quasi-stable et que les taxis répètent les trajets les plus avantageux.

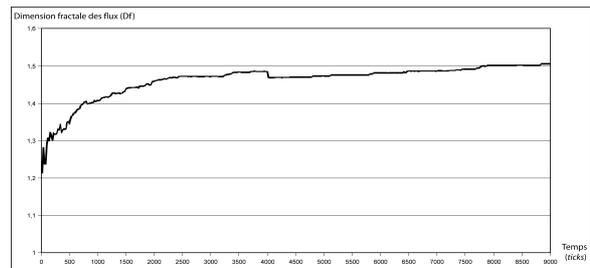


Figure 6 : Évolution de la dimension fractale

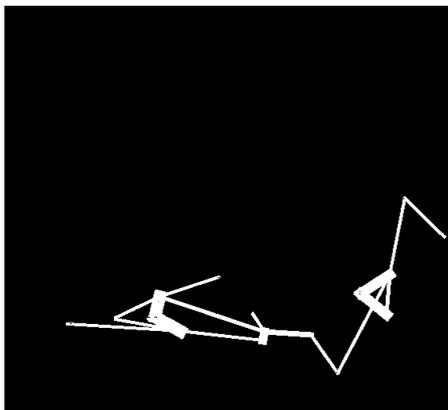


Figure 7 : Forme de la desserte à 220 itérations

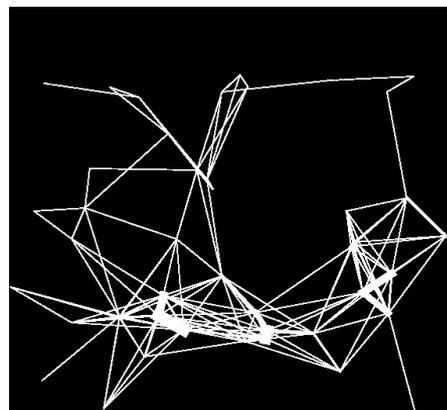


Figure 8 : Forme de la desserte à 8 600 itérations

3.2. Structuration de l'espace

La figure 8 est une modélisation graphique de la structure du territoire simulé avec le troisième scénario d'optimisation. Les rectangles représentent deux catégories de sous réseaux : les réseaux en forme d'étoile, facilitant la desserte (gris foncé), et les réseaux avec une forme contraignante (gris clair). Les cercles concentriques sont proportionnels à l'attractivité des marchés. On observe que le marché situé au centre du territoire et sur des réseaux en étoile polarise très fortement l'espace. Les deux traits violets montrent une rupture dans la desserte, avec un certain nombre de stations situées aux extrémités, qui ont été très peu desservies. Les cercles noirs représentent les stations. On observe que celles situées autour du marché central ont été très fréquentées par les villageois, servant ainsi de point de relais. Les flèches reliant ces stations indiquent les trajectoires les plus récurrentes des taxis.

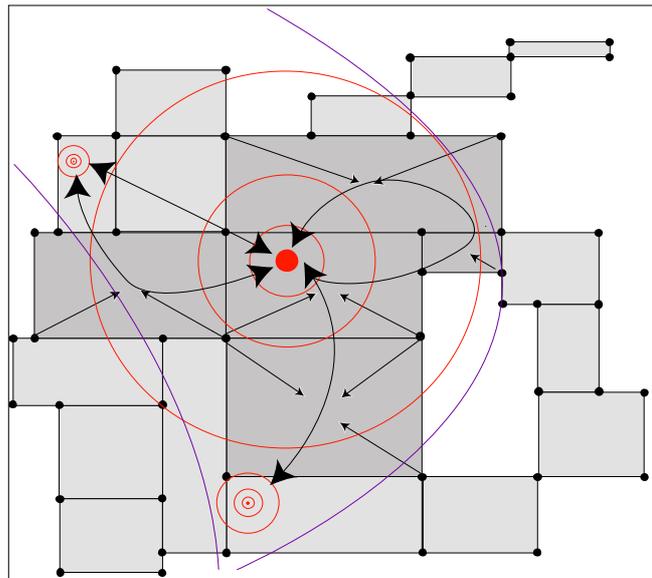


Figure 9 : Structure du territoire à la fin de la simulation

Cette modélisation montre que les conditions initiales du modèle, et notamment la structure spatiale de l'environnement influence fortement le fonctionnement du modèle. Nous vérifions donc notre première hypothèse : la polarisation de l'espace par les stations et les marchés est en partie déterminée par leur position sur le réseau. Ce sont les stations centrales, en termes de topologie, qui captent le plus de flux et qui deviennent les stations les plus rentables.

4. Conclusion

L'approche individu centré permet de simuler un modèle difficile à formaliser dans un langage mathématique. Cette difficulté s'explique par le nombre important d'entités, et d'interactions qui rendent le système complexe. Avec la simulation en SMA, le modélisateur peut se concentrer sur l'observation et la compréhension des phénomènes grâce à un saut d'échelle, c'est-à-dire par l'observation d'une morphologie créée à partir de processus connus à un niveau inférieur. En contrepartie, le passage entre les deux échelles, qui est considéré comme complexe, n'est pas nécessairement connu. Les systèmes multi-agent se prêtent plutôt bien à l'étude de systèmes de mobilité, et notamment pour les problématiques liées au transport. Comme nous l'avons vu, les méthodes d'analyse nous ont permis de vérifier ou de nuancer les hypothèses posées lors de la modélisation. Chose pas toujours facile à réaliser avec des expérimentations en grandeur nature. Nous pensons que les SMA doivent être utilisés pour comprendre et expliquer des phénomènes, plus que pour les décrire de manière exacte. D'autres approches et d'autres outils en géographie apparaissent plus appropriés pour décrire précisément les phénomènes et les objets (les SIG par exemple). Les simulations se produisent systématiquement dans un environnement théorique, et la transcription des résultats dans le monde réel n'est pas toujours évidente. Par contre, des phénomènes observés dans le monde réel peuvent être analysés et expliqués avec beaucoup plus de facilité.

Deux questions essentielles se posent concernant le paradigme multi-agent. La première concerne la validité du modèle, puisque dès le départ nous nous plaçons dans un cadre théorique, et nous nous détachons volontairement de la réalité. Le principe de parcimonie consiste à cibler les processus, et à ne considérer que ceux jugés essentiels pour le phénomène étudié. Il y a donc obligatoirement un écart entre le phénomène observé sur la simulation et celui observé dans la réalité. Les écarts peuvent être plus ou moins grands selon les modèles. Comment décider à partir de quand un modèle est valide ou non ? Comment justifier tels ou tels écarts ? La deuxième limite concerne les apports des simulations. Nous avons vu que celles-ci permettaient de comprendre des processus, mais qu'elles n'étaient pas directement applicables dans un cadre concret à cause de ces écarts. Quelle peut être la portée des analyses ? Comment justifier leur utilisation dans un contexte plus opérationnel ? Nous pensons que l'approche doit être utilisée pour la compréhension et l'explication des phénomènes, et que la dissociation entre le cadre théorique et le cas concret doit toujours être précisée. En revanche, il est possible et souhaitable de combiner la modélisation multi-agent avec d'autres approches, peut-être plus descriptives et moins théoriques. Ainsi, par une combinaison et une complémentarité des méthodes ne serait-il pas possible d'aborder des problématiques, telles que le fonctionnement des systèmes de transport, à la fois dans un cadre théorique et avec une portée opérationnelle ?

5. Perspectives

Les travaux résumés dans cette communication nous ont conduits progressivement vers un projet de thèse, qui est effectif depuis le 1er octobre 2010. Ce projet est financé par l'ADEME. Nous y reprenons les deux principaux volets abordés en Master. D'un point de vue thématique, nous proposons d'étudier les services de transport flexibles et semi-collectifs, comme de véritables alternatives à la voiture individuelle et aux services de transport collectifs (type bus). Des services de deux contextes sociétaux différents seront confrontés. Nous essayerons d'analyser, d'une part des services de transport flexibles français tels que le MODULOBUS (Josselin, Genre-Grandpierre 2005) qui est un prototype de TAD entièrement dynamique, et des services de transport flexibles opérationnels et rentables tels que Easytake à Avignon. D'autre part, nous nous rendrons à Dakar (Sénégal) pour étudier des services de transport spontanés et auto-organisés, tel que les Car Rapide, les Ndiagua Ndiaye, les Taxis-clandos, etc. L'objectif est de pouvoir proposer *in fine* des apports mutuels entre les différents services étudiés. Pour ce faire, nous souhaitons poursuivre les travaux méthodologiques de modélisation et de simulation avec l'approche individu centré, c'est-à-dire de continuer à améliorer la démarche, les méthodes, et de proposer de nouveaux modèles adaptés à cette problématique.

Un prochain travail va consister à comparer un service de transport opérant selon les mêmes principes que le scénario 3 (cf. 2.1.3.), avec un service de transport flexible fonctionnant selon un principe de coopération. La question est de savoir si des taxis capables de communiquer entre eux pour organiser la desserte peuvent être plus efficaces que des véhicules opérant de manière indépendante et en concurrence. De nombreuses formes de coopération peuvent être observées dans les pays en voie de développement, notamment pour les services de transport artisanaux, et ce, malgré une concurrence parfois très rude. Il nous semble donc intéressant d'essayer de modéliser et d'évaluer l'efficacité de ces modes de fonctionnement. Notre objectif à terme est de disposer de plusieurs modèles de référence, opérant avec des principes d'optimisation différents, pour ensuite pouvoir les comparer aux différents services de transport observés (France-Sénégal).

6. Bibliographie

DAUDÉ 2006

Daudé E. - Du complexe à la complexité : le retour de l'individu dans les modèles géographiques. Acte du colloque *Géopoint 2006*, Avignon. 261-267.

DAUPHINÉ 2003

Dauphiné A. - *Les théories de la complexité chez les géographes*. Anthropos edition, Economica, 248 p.

DELAGE ET AL. 2008

Delage M., Le Néchet F., Louail T., Mathian H. Rey Coyrehourcq S - Accessim : modélisation et simulation d'accessibilité et d'inégalités géographiques dans la ville, *Mappemonde*, 92

FERBER 1995

Ferber J. - *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris. 522 p.

GRIMM ET AL. 2006

Grimm V., Bergerb U., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske V., Goss-Custard J., Grand T., K. Heinz S., Huse G., Huth A., U. Jepsen J., Jørgensen C., M. Mooij W., Müller B, Pe'er G., Piou C., F. Railsback S., M. Robbins A., M. Robbins A., Rossmanith E., Rüger N., Strand E., Souissi S., A. Stillman R., Vabø R - A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, Volume 198, Issues 1-2, 115-126.

JOSSELIN, GENRE-GRANDPIERRE 2005

Josselin D., Genre-Grandpierre C. - Des transports à la demande pour répondre aux nouvelles formes de mobilité. Le concept de Modulobus, *Mobilités et temporalités*, (Eds : Montulet B. et al.), Facultés Universitaires Saint-Louis, Bruxelles. 151-164.

LAMMOGLIA 2010

Lammoglia A. - Évolution de la dimension fractale pour un modèle de trafic, Acte du colloque *Geopoint 2010*. Avignon. À paraître.

LAMMOGLIA ET AL.2009

Lammoglia A., Josselin D., Redjimi M., Guegan C., Mazouin A., Lemoy R. Ninot O. Simulation d'un transport spontané non régulé, par un système multi-agents. Acte du colloque *Sageo 2009*.

LE MOIGNE 1990

Le Moigne J.L. - *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod, Sciences Humaines, 178 p.

MULLER, GAERTNER 2000

Muller P., Gaertner N., - *Modélisation objet avec UML*. Eyrolles, 2ème édition. 540 p.