



HAL
open science

POUR DES PRATIQUES DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION LIBÉRÉES EN GÉOGRAPHIE ET SHS

Arnaud Banos

► **To cite this version:**

Arnaud Banos. POUR DES PRATIQUES DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION LIBÉRÉES EN GÉOGRAPHIE ET SHS. Géographie. Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 2013. tel-01112668

HAL Id: tel-01112668

<https://shs.hal.science/tel-01112668v1>

Submitted on 3 Feb 2015

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.

UNIVERSITE DE PARIS I – PANTHEON-SORBONNE

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

ARNAUD BANOS

**POUR DES PRATIQUES
DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION
LIBÉRÉES EN GÉOGRAPHIE ET SHS**

Jury :

Michel BUSSI, Professeur, Université de Rouen

Jean-Christophe FOLTETE, Professeur, Université de Franche-Comté

Jean-Louis GIAVITTO, Directeur de Recherche CNRS, IRCAM

Denise PUMAIN, Professeur, Université Paris 1

Lena SANDERS, Directrice de Recherche CNRS, Géographie-Cités

Christine VOIRON-CANICIO, Professeur, Université de Nice

2 décembre 2013

*« Droit devant soi, on ne peut pas aller bien loin »
-Antoine de Saint-Exupéry, *Le petit prince**

REMERCIEMENTS

« Que l'esprit de Laird me guide »
–Cédric Chateau

Quinze années ont passé depuis ma première inscription en thèse. J'ai du mal à y croire à l'instant où j'écris ces lignes. Celui que j'étais à l'époque me semble tellement loin... et si proche pourtant. Comment remercier toutes celles et ceux qui m'ont aidé – souvent sans même le savoir – pendant toutes ces années ? J'aimerais faire en sorte que chaque personne ayant compté pour moi se reconnaisse rien qu'en lisant ces lignes. Exercice impossible bien sûr ! Quoique...

Mes premiers remerciements vont à Denise Pumain, Lena Sanders et Christine Voiron. Trois femmes d'exception qui ont profondément marqué, chacune à leur manière, notre discipline et le géographe que je suis. Les réunir aujourd'hui dans le même jury est pour moi un joli cadeau de la vie.

Si j'ai rencontré Denise Pumain assez tardivement dans ma carrière, nos lignes de vie se sont instantanément entortillées. De S4 à GeoDiverCity, en passant par l'ISC-PIF, Géographie-Cités et les nombreux projets au sein desquels nous avons collaboré, nos interactions se renouvellent sans cesse. Travailler avec Denise est une chance et un plaisir. Dynamique, exigeante, brillante et tellement chaleureuse, avec elle j'apprends bien plus que mon métier. Lui demander de jouer le rôle de garante d'HDR était pour moi une évidence.

J'ai rencontré Lena Sanders bien plus tôt, alors que j'étais doctorant à Besançon, à l'occasion d'une étape du tour de France des modèles organisé par le GDR Libergéo. Le souvenir de notre rencontre dans la cave obscure du LEP reste lumineux. Je me souviens avoir été frappé par la douce humanité et l'humour pétillant de cette figure imposante de la géographie, alors directrice de Géographie-Cités. Nous avons partagé beaucoup de choses depuis et voir Lena Sanders voler littéralement dans les couloirs du 13 rue du Four reste un de ces improbables plaisirs professionnels dont je ne me lasse pas.

C'est toutefois bien Christine Voiron-Canicio qu'il m'a été donné de rencontrer en premier, à l'occasion de deux stages du DEA « Structures et Dynamiques Spatiales ». Christine m'a donc connu à l'aube de ma mutation, de la géographie sociale vers la géographie théorique et quantitative. J'ai découvert auprès d'elle que des sujets aussi compliqués que la géostatistique ou la morphologie mathématique pouvaient être enseignés de manière limpide, y compris au béotien intégral que j'étais à l'époque. Cette prise de conscience, à ce moment précis de mon évolution personnelle, a joué un rôle décisif dans mes choix professionnels.

Je remercie également Michel Bussi d'avoir accepté de faire partie de cette aventure. Son manuscrit de thèse a, sans qu'il le sache vraiment, joué un grand rôle dans ma décision d'intégrer le DEA Structures et Dynamiques Spatiales à Grenoble, à l'issue de ma maîtrise. Nos routes se sont depuis croisées à maintes reprises sans jamais vraiment se rencontrer et l'associer à ce moment important de ma carrière est un vrai plaisir.

Je remercie encore Jean-Christophe Foltête qui, à son habitude, se défendra d'avoir quoi que ce soit à voir avec tout ça. Ce que j'ai appris à ses côtés, simplement en l'observant, est pourtant toujours là... et bien là. L'énergie (infinie), l'enthousiasme (toujours contenu mais omniprésent), l'ouverture interdisciplinaire (assumée), le souci (permanent) de dépasser ses limites, autant de qualités évidentes chez celui que nous appelions tous familièrement JC dans les caves inondables (et inondées), insalubres, glaciales et tellement merveilleuses du LEP.

Je remercie enfin Jean-Louis Giavitto d'avoir accepté de participer à ce jury alors même que sa propre ligne de vie a bifurqué, il y a peu, vers des contrées plus musicales. Nous avons beaucoup échangé pendant mes années parISciennes et nombre d'idées formulées dans ce manuscrit en sont nées. Soumettre ce travail à la subtilité et à l'acuité de son jugement était pour moi un devoir autant qu'une nécessité, auxquels je suis plus qu'heureux de pouvoir me plier.

La liste des personnes que j'aimerais remercier maintenant me semble infinie. Je pense à tous mes collègues et amis de Géographie-Cités bien sûr, mais également de l'ISC-PIF, du RNSC, du LIVE, du SET, de ThéMA, de Keolis, de l'IFFSTAR, de l'OMS, de la RATP, d'Orange, de S4, de MIRO, de MAPS, d'ELIANE, de HEARTS, de CO-SMA-GEM, de TransMonDyn, de GeoDiverCity et de manière générale de tous ces projets auxquels j'ai participé depuis 15 ans. Les lister toutes et tous ici serait la pire chose que je puisse imaginer. Je sais que nombreux seront celles et ceux qui se reconnaîtront en lisant ces lignes, un petit sourire aux lèvres en se disant que, décidément, je n'ai pas changé.

Je voudrais cependant remercier explicitement mes proches, parents, frères et sœurs, ami(e)s, toutes celles et ceux qui me connaissent suffisamment bien pour s'étonner du chemin parcouru. Et tout particulièrement mes amours, Lucie, Hanna et Suzanne : vous savez mieux que personne le caractère doublement improbable de ce document. Je vous dois beaucoup.

Je voudrais enfin dédier ce manuscrit à tous les TDAH : du désordre et du chaos peuvent parfois naître, fugacement, l'ordre, l'harmonie et l'apaisement. Que pourrions nous espérer de plus ?

SOMMAIRE

Introduction : Itinéraire d'un géographe gâté

Explorer sans relâche les systèmes géographiques

Voir, toujours plus loin

Et si le vrai luxe c'était le calcul ?

L'irréductible complexité des systèmes géographiques

Y a-t-il un pilote dans l'avion ?

Partager l'espace, à ses risques et périls

Des métriques lentes pour maîtriser l'étalement urbain

Cette complexité nous dépasse, feignons d'en être les organisateurs

A la conquête de la fourmilière urbaine

Faisons les marcher : de MAGE à SIMTRAP

Des trajectoires individuelles à la ville en mouvement

En guise de conclusion : Libérer les pratiques de modélisation en Géographie et SHS

Itinéraire d'un géographe gâté

« One finds limits by pushing them »

–Herbert Simon

Je n'ai jamais aimé faire le point.

Après tout, pourquoi s'arrêter de courir pour réfléchir à la manière dont on court alors que l'on peut continuer à courir ?

Ce travail m'aura néanmoins permis de réaliser que j'ai globalement réussi à tenir un cap dans mes activités professionnelles, quand je pensais me contenter de réagir ponctuellement en fonction des opportunités qui s'offraient à moi. Je me voyais assez bien guidé par une heuristique gloutonne multi-objectifs évolutionniste : en d'autres mots je n'en faisais qu'à ma tête en fonction de mes envies du moment, en constante évolution. C'était oublier un peu vite que je fonçais tête baissée sur des rails posés il y a maintenant plus de quinze ans, alors que je découvrais le métier de chercheur en compagnie de Pierre Dumolard et Didier Josselin. Cette dépendance au chemin a joué un grand rôle dans ma carrière, je le réalise aujourd'hui.

Bien sûr, l'aspect "glouton" n'échappera pas à celles et ceux qui me connaissent bien. Après tout, j'ai changé sept fois de laboratoire et cinq fois d'institution depuis mon inscription en thèse en 1998¹.

¹ Par ordre chronologique depuis la thèse : l'UMR ThéMA (Besançon), Keolis (Rueil-Malmaison), l'INRETS (Arcueil), l'UMR SET (Pau), l'UMR Images et Villes (Strasbourg) et enfin l'UMR Géographie-Cités (Paris) et l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France.

Dans toute cette agitation, je me suis intéressé aux mobilités et aux transports urbains mais également aux risques des transports (accidents et pollution notamment), aux épidémies (SRAS et peste), au trafic routier, à l'accessibilité urbaine, aux déplacements piétons, à la morphogenèse urbaine, aux ontologies, à l'épistémologie, aux systèmes complexes, à l'analyse spatiale exploratoire des données, à la modélisation à base d'agents, à la géo-visualisation, la géo-computation, la géo-simulation... Derrière cette liste à la Prévert résident toutefois trois grandes problématiques : la caractérisation des structures spatiales et des processus de différenciation/organisation spatiale ; le rôle des interactions sociétés-environnement dans l'émergence des structures spatiales ; le rôle de la modélisation et de la simulation en géographie.

Cette appétence persistante, qui m'a conduit à ratisser large là où j'aurais tout aussi bien pu creuser profond, explique sans doute que je me sois retrouvé associé à ces deux grandes aventures scientifiques et humaines que sont le réseau européen S4² et l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France³. Participer au pilotage de ces deux magnifiques vaisseaux interdisciplinaires a été et continu d'être une expérience inoubliable, qui m'a convaincu de la justesse du point de vue de Richard Feynman⁴ : tout est intéressant, à partir du moment où l'on s'y investit suffisamment, en compagnie de collègues compétents et passionnés.

Cette inclination pour la diversité et la nouveauté, que j'ai parfois vécue comme une source de handicap dans un métier très largement bâti sur la spécialisation, je la ressens aujourd'hui comme une force. La recherche scientifique, et peut être plus encore dans le domaine des sciences humaines et sociales, a aussi besoin de passeurs de frontières, de voltigeurs, de papillons. Plus que jamais, il y a de la place pour les explorateurs.

En 1956, Richard Feynman soulignait, avec ce franc-parler dont il s'était fait une spécialité : « *In this age of specialization men who thoroughly know one field are often incompetent to discuss another* ». La situation est elle si différente aujourd'hui ? Bien sûr, l'interdisciplinarité a progressé sur tous les fronts et dans toutes les instances mais, en France tout au moins, les disciplines restent le socle fondamental sur lequel tout repose, aussi bien au niveau individuel qu'au niveau collectif. Dès lors, faire le pari de l'interdisciplinarité est aussi excitant que risqué, surtout en début de carrière. Je me souviens d'un jeune collègue physicien faisant une thèse en éconophysique⁵ et m'avouant continuer à faire des manipulations expérimentales la nuit afin de pouvoir encore publier dans son domaine d'origine et augmenter ses chances d'être recruté. On comprend qu'à ce prix là l'interdisciplinarité reste fragile. Et pourtant, elle perdure, car

² S4 (Spatial Simulation for Social Sciences) est un GDR-E CNRS fondé par Denise Pumain. Ce réseau européen regroupe plus de deux cent personnes issues d'une quarantaine de laboratoires, dans 15 pays différents (<http://s4.parisgeo.cnrs.fr/>).

³ L'ISC-PIF est à la fois un GIS CNRS-EHESS, fondé par Paul Bourguin et un Domaine d'Intérêt Majeur (DIM) de la Région Ile de France. Il regroupe en 2013 14 partenaires institutionnels et anime une communauté d'environ deux mille chercheurs en Ile de France (<http://www.iscpif.fr/>).

⁴ Prix Nobel de physique 1965.

⁵ L'éconophysique est un domaine de recherche à l'interface des sciences économiques et physiques, qui vise à résoudre certains problèmes économiques en leur appliquant des méthodes et théories développées pour expliquer certains phénomènes physiques complexes.

elle est fondamentale. Elle irrigue les disciplines et, en rendant possible des interactions entre elles, permet de faire en sorte que le « tout soit plus que la somme des parties », selon l'expression attribuée à Aristote et très largement associée depuis à la complexité.

Géographe de formation, j'ai toujours eu un rapport décomplexé à l'interdisciplinarité. Bien sûr le positionnement de cette discipline, entre nature et société, crée un terrain favorable à l'aventure interdisciplinaire. Mais, au-delà, c'est son caractère remarquablement peu normatif qui confère à mon sens à la géographie ce souffle de liberté si précieux. Si les géographes s'interrogent à juste titre sur la nature, les contours et les évolutions de leur discipline, ils ne sont –dans leur très grande majorité– pas obsédés par l'identification de ce que n'est pas la géographie.

J'ai donc choisi d'investir dès le départ, par goût et parce que c'était possible, dans l'interdisciplinaire, tout en restant fermement ancré dans ma discipline d'origine. De la direction marketing du groupe KEOLIS à l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France et au réseau européen S4, en passant par le Département de Recherche en Accidentologie de l'INRETS (IFFSTAR), l'Organisation Mondiale de la Santé, l'Université, le CNRS, c'est mon parcours tout entier qui s'inscrit dans cette logique. Les systèmes complexes, dans lesquels je suis tombé dès la fin de ma thèse, ont favorisé cette orientation. J'y ai trouvé un souffle de liberté, une envie de dépasser les frontières disciplinaires et de jouer avec les données et les modèles dont je ne saurais me passer aujourd'hui. J'y ai également trouvé une source d'inspiration inépuisable pour la géographie. Nombre des problèmes qu'aiment se poser les géographes s'inscrivent en effet dans une perspective proche, à la fois en termes conceptuels, mais également méthodologiques et techniques. Notre discipline évolue vite, en réponse aux changements de son environnement social, scientifique et institutionnel. Elle a cette capacité d'adaptation et d'apprentissage qu'ont, à mon sens, les constructions sociales non dogmatiques et faiblement normatives. J'en suis persuadé, la modélisation et la simulation informatique ont leur place au cœur même de notre discipline. Comme j'ai pu l'écrire par ailleurs, ces pratiques nous offrent une « *possibilité nouvelle de plonger au cœur de la complexité des sociétés humaines en compagnie de modèles simples, maniables et robustes. Notre créativité a tout à y gagner, si nous nous y prenons bien.*⁶ ».

Cette même créativité que j'appelais de mes vœux dès le début de ma thèse, après avoir plongé goulûment dans les travaux du mathématicien américain John Tukey autour de l'analyse exploratoire des données. Cette même créativité encore, à laquelle j'essayais de donner corps par la mise au point de prototypes informatiques dédiés à l'analyse spatiale exploratoire des données, s'inspirant des travaux de Tukey et s'ancrant dans cette logique d'abduction décrite par le philosophe américain Charles Peirce. Cette même créativité enfin, que je cherche toujours à entretenir dans ma propre pratique, mais également à encourager chez mes plus jeunes collaborateurs, en leur montrant par l'exemple que les méthodes, techniques et outils libèrent notre créativité bien plus qu'ils ne la contraignent, à condition d'inscrire leur utilisation au sein d'une démarche abductive assumée.

⁶ Banos A., 2010, La simulation à base d'agents en sciences sociales : une béquille pour l'esprit humain ?, *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*, Volume 5, numéro 2, pp. 91-100

J'ai souhaité cet exercice académique libérateur et jubilatoire. Je voulais quelque chose de personnel, qui me permette d'exprimer des convictions profondes et des principes auxquels je crois, sans pour autant tomber dans une "égo-géographie" de mauvaise facture. J'ai par ailleurs fait le pari de parler de modélisation de la manière la moins technique possible. On ne trouvera donc aucune équation ni aucun algorithme dans ce document. Le lecteur intéressé est cordialement invité à consulter le recueil de publications joint à ce volume, auquel je me référerai systématiquement.

Ceci énoncé, c'est à un bref voyage dans le temps que je convie maintenant le lecteur qui, s'il se laisse prendre au jeu, comprendra mieux la manière dont un jeune géographe, formé à la géographie sociale, en est arrivé à défendre bien des années plus tard des pratiques de modélisation libérées en géographie et en sciences humaines et sociales.

Xavier Piolle aimait commencer ses trop rares enseignements par cette drôle de question : « *d'où parlais-je ?* ». Je crois être en mesure de la formuler à mon tour aujourd'hui. Formé à la géographie sociale, dans la plus pure tradition paloïse, c'est en maîtrise que j'ai découvert la géographie quantitative et l'analyse spatiale. Tout à fait fortuitement à vrai dire. J'arrondissais à l'époque mes fins de mois en travaillant comme moniteur à la bibliothèque de section du département de géographie, sous la direction –bienveillante mais ferme– de Marie-Thérèse Labarthe, et j'avais la chance de pouvoir circuler librement dans les rayons interdits aux étudiants. C'est tout en haut d'une étagère poussiéreuse que je découvrais un jour une dizaine de livres en anglais, visiblement rarement utilisés, si j'en croyais la couche de poussière accumulée et la vétusté de leur côte bibliographique. Les noms de Haggett, Chorley, Berry ou Harvey⁷ ne me disaient rien bien sûr. Mais le titre *Explanation in geography* me sautait aux yeux. Je travaillais alors à mon mémoire de maîtrise, sur la question du vote frontiste dans les Pyrénées Atlantiques et je tournais depuis un certain temps déjà autour d'une difficulté : quelle explication pouvais-je bien donner aux structures spatiales révélées par la cartographie de ce vote et à leur permanence d'élections en élections ? C'est sans doute le caractère obsessionnel de cette question, amplifié par un sentiment d'urgence croissant au fur et à mesure que la date de remise des mémoires approchait, qui m'a poussé à me plonger dans la lecture de cet ouvrage en anglais, le premier en ce qui me concernait. Le peu que j'en ai compris m'a motivé à ouvrir les ouvrages de Berry, Haggett et Chorley. Un monde s'ouvrait à moi ! J'étais enfin armé pour lire la thèse de Michel Bussi (1991), intégralement photocopiée en début d'année et qui, de mes quatre piliers⁸ était de loin le moins accessible au jeune géographe que j'étais. Je rageais de ne pouvoir mettre en œuvre les mêmes méthodes d'analyse spatiale, moi qui ne savais produire que des régressions linéaires, mais je me familiarisais suffisamment avec sa démarche pour ressentir le besoin d'aller plus loin et lisais Kevin Cox et Ron Johnston,

⁷ Berry B., Marble D., *Spatial analysis: a reader in statistical geography*, Prentice-Hall, 1968, 512 pages ; Haggett P., Chorley R., 1970, *Network analysis in geography*, St. Martin's Press, 348 p. ; Haggett P., Cliff A., Frey A., 1977, *Locational analysis in human geography*, Arnold, 570 p. ; Harvey D., 1969, *Explanation in geography*, Edward Arnold, 521 p.

⁸ Les trois autres étant les ouvrages d'André Siegfried (1913), de François Goguel (1970), ainsi que celui de Frédéric Bon et Jean-Paul Cheylan (1988).

dans leur quête fascinante de ce qu'ils appelaient un effet de lieu ou de voisinage. Ces découvertes donnèrent à mon mémoire de maîtrise son orientation définitive.

Mon diplôme en poche, je partais à l'aventure. Je quittais Pau pour Grenoble et dans la même foulée je troquais les grandes figures de la géographie sociale paloise, Xavier Piolle, Guy Di Méo et Vincent Berdoulay contre Pierre Dumolard, Maryse Guigo et Henri Chamussy, les trois responsables du DEA « Structures et Dynamiques Spatiales » sur ce site. Nous étions cinq étudiants recrutés cette année là dont trois bretons. En une année, je découvrais Pierre Dumolard, les ordinateurs, les SIG, mais également Christine Voiron et la morphologie mathématique à Nice, Pierre Frankhauser et les fractales à Besançon, Loic Grasland et les réseaux à Avignon⁹. Je découvrais également les transports et les modèles d'interaction spatiale, Pierre Dumolard m'ayant proposé de travailler sur le transport routier transalpin de marchandises. Je découvrais enfin Didier Josselin, alors post-doctorant dans l'équipe. Didier qui passait ses journées sur une station Unix à programmer en SmallTalk et à lancer des simulations qui duraient des semaines entières. Didier qui jouait avec un drôle de petit logiciel doté d'une interface graphique interactive et dynamique et d'un langage de programmation aussi hermétique que fascinant pour le béotien intégral que j'étais : XLisp-Stat. Je ne savais pas alors, en m'emparant maladroitement de ce logiciel pour analyser mes données de flux de transport, que je vivais la deuxième grande bifurcation de ma vie de géographe, la première ayant été déclenchée par l'ouvrage de David Harvey¹⁰. XLisp-Stat n'était que la partie émergée d'un iceberg immense, c'est tout un univers qui se cachait derrière ces graphiques interactifs, ces histogrammes dynamiquement croisés et ces droites de régression manipulables à la souris : celui de l'analyse exploratoire des données ou EDA (Exploratory Data Analysis), portée par un auteur qui allait devenir central pour moi, le mathématicien John Tukey. Encouragé par Didier, je m'investissais dans l'association MIRAGE, qui organisait chaque année une école thématique autour de l'EDA, à Carcassonne. Jacques Vanpoucke, Monique Leguen, Roger Lafosse, Eugène Horber, Dominique Ladiray... tous statisticiens, devenus instantanément mes amis. C'est en compagnie de ces énergumènes, passionnés et dévoués, que je découvrais la statistique. Ce que j'avais pris, à la lueur de mes maigres enseignements universitaires dans le domaine, pour une discipline ardue et aride, se révélait au contraire vivante, vibrante et même joyeuse et ludique. Je découvrais que le statisticien pouvait être quelqu'un de malin, joueur et même remarquablement paresseux. Et je découvrais par la même occasion que cette attitude possédait des vertus cachées mais réelles : « *Whenever there is a hard job to be done I assign it to a lazy man; he is sure to find an easy way of doing it* » aimait à dire Walter Chrysler. Dans la foulée, je découvrais la statistique confirmatoire, la statistique non paramétrique, le bootstrap puis les indicateurs locaux, qui allaient devenir l'un de mes chevaux de bataille en thèse.

A l'issue de cette année de DEA particulièrement riche et exaltante pour le petit palois que j'étais¹¹, la réalité me rattrapa, sous forme d'un ordre de mobilisation

⁹ Le DEA Structures et Dynamiques Spatiales avait la particularité d'être organisé en réseau, entre plusieurs universités situées le long d'un axe Besançon/Aix-Marseille.

¹⁰ Ouvrage que David Harvey, devenu une figure emblématique de la géographie radicale, avait d'ailleurs depuis longtemps renié.

¹¹ Mes deux premières publications datent de cette période (Banos et Dornbusch, 1997 ; Banos 1999).

immédiat : j'avais quinze jours pour rejoindre mon régiment à Agen. Je passais alors deux mois de classe au 48^{ème} Régiment de Transmissions à Agen, puis huit mois au 35^{ème} Régiment d'Artillerie Parachutiste, à Tarbes. Enfermé deux jours sur trois dans le centre de transmission de la caserne, je découvrais combien le temps pouvait être élastique, à répondre jour et nuit au téléphone et à déchiffrer les messages codés adressés au régiment voisin, le 1^{er} Régiment de Hussards Parachutistes de Tarbes, alors impliqué dans les affrontements au Kosovo. Pour lutter contre le désœuvrement et l'ennui, j'apportais alors mon ordinateur et l'ouvrage de Luke Tierney, *Lisp-Stat : an object-oriented environment for statistical computing and dynamic graphics*.

J'avais maintes fois feuilleté cet ouvrage ardu en le refermant rapidement avec un sentiment croissant de frustration et de fascination. Je ne savais pas, bien sûr, qu'il deviendrait mon livre de chevet pendant les quatre années suivantes, le seul que j'emmenerais partout avec moi. Enfermé seul dans mon bunker, avec pour seule compagnie celle de Tierney, je sautais le pas et recopiais mes premières lignes de code dans Xlisp-Stat. Je me souviens encore de l'émotion qui s'emparait de moi lorsque le logiciel ouvrait un graphique ou me renvoyait un résultat numérique. La perspective de la prochaine école MIRAGE me motivait énormément et je décidais de donner vie à certains graphiques de Tukey, dessinés manuellement dans son ouvrage EDA. Je découvrais alors qu'un objectif concret et une solide motivation possédaient le pouvoir de faire sauter bien des barrières psychologiques... leçon que je garde toujours en mémoire et qui me guide depuis des années maintenant.

Mon service militaire terminé, Didier Josselin –alors fraîchement recruté comme chargé de recherche CNRS à Besançon– me proposa de réaliser une thèse en CIFRE en co-encadrement avec Pierre Frankhauser, à cheval entre le laboratoire ThéMA et le groupe VIA GTI, à Rueil-Malmaison. Je me lançais sans hésiter dans cette nouvelle aventure et découvrais la Franche-Comté et la Région parisienne, ThéMA et la direction marketing du groupe VIA GTI, la mobilité urbaine et les transports à la demande. L'expérience fut une fois de plus incroyablement riche. Je passais la moitié de la semaine à Rueil Malmaison, entouré d'ingénieurs et de spécialistes du marketing, et l'autre moitié dans la cave du pôle Paysage, en compagnie de Didier Josselin, Thierry Brossard, Daniel Joly, Jean-Claude Wieber et Jean-Christophe Foltête. Je découvrais une autre manière de faire de la géographie, un mélange extraordinaire de théories, de concepts et de méthodes qui prenaient corps et vie grâce aux programmes informatiques développés quasi quotidiennement par ces artistes exubérants. Je prenais conscience du lien très étroit unissant ces dimensions souvent dissociées de la démarche scientifique. Je comprenais, intuitivement, que cette grande liberté de pensée et cette créativité qui étaient la leur s'enracinaient pour partie dans cette autonomie méthodologique et technique. Je les regardais avec fascination se poser des problèmes nouveaux et chercher à les résoudre en s'amusant. Ils n'avaient pas peur de la difficulté ou de l'échec. Ils cherchaient des solutions avec enthousiasme et testaient des idées nouvelles en permanence. C'est, je crois, ce qui m'a permis de faire sauter mes dernières sources d'inhibition. Moi aussi je voulais pouvoir explorer des solutions nouvelles dans le cadre des mes travaux avec VIA GTI. Moi aussi je voulais pouvoir poser les problèmes qui m'intéressaient et non pas ceux auxquels je savais pouvoir répondre. Je me suis alors lancé dans la programmation en LISP avec frénésie, développant au sein de Xlisp-Stat les modèles statistiques dont j'avais besoin pour ma thèse. Rapidement, les fondations

de ce qui allait devenir MON logiciel ont vu le jour : GéoGrapheur. Tout à mon élan créatif, je vivais avec délices les six mois d'inactivité imposés par le rachat de VIA GTI et sa transformation en KEOLIS. Loin de me freiner, cet interlude me donnait la possibilité de tester mes méthodes et modèles sur des données disponibles, au lieu d'attendre de pouvoir finir de constituer les miennes. Je venais en effet de rencontrer Sylvain Lassarre, statisticien de formation et chercheur à l'INRETS, et co-encadrant de la seule fille de la cave, Florence Huguenin-Richard. Florence effectuait sa thèse sur des problématiques de sécurité routière et elle disposait de jeux de données géo-référencés incroyables sur les accidents de la circulation à Lille. Nous avons collaboré tous les trois de manière ininterrompue à partir de ce moment là, si bien que ma thèse soutenue, j'enchaînais avec un post-doctorat de deux ans à l'INRETS, chez Sylvain. Employé à plein temps dans le cadre du projet européen HEARTS (Health Effects and Risks of Transport Systems), piloté par l'Organisation Mondiale de la Santé, je donnais libre cours à ma passion pour la modélisation spatiale. Toutefois, les modèles statistiques que je développais et manipulais depuis des années maintenant, commençaient à montrer leurs limites. Je peinais à intégrer les interactions entre les composants des systèmes que je modélisais et la sophistication des méthodes à mobiliser dans cette perspective croissait beaucoup plus vite que les gains obtenus. J'étais mûr pour les systèmes complexes, que je ne connaissais pas à l'époque. La lecture d'un ouvrage de vulgarisation scientifique, romancé et romantique à souhait, dans la lignée du Chaos de James Gleick, joua une fois de plus un rôle de détonateur dans ma carrière. Je veux parler du livre de Mitchell Waldrop *Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos*, que je lisais en vacances et qui racontait la manière dont l'économiste Brian Arthur, lisant lui même un ouvrage en vacances, avait eut le déclic de sa carrière. Je dévorais tous les autres chapitres, parlant de physiciens, de biologistes, d'éthologues, de médecins, d'informaticiens, de mathématiciens. Je ne comprenais pas tout bien sûr, mais j'étais fasciné par cette idée que des comportements locaux en interaction pouvaient suffire à engendrer des structures à des niveaux supérieurs. L'accent mis sur les processus d'auto-renforcement, d'amplification des fluctuations, de dépendance aux conditions initiales, mais également le pouvoir des interactions indirectes (la stigmergie) chez certaines espèces d'insectes sociaux, tout me parlait. Je sentais, de manière très intuitive mais avec force que beaucoup de problèmes auxquels j'avais été confronté, au cours de ma thèse et dans le cadre de mon post-doctorat, prenaient un sens nouveau à la lumière de ces idées. Avidé d'en savoir plus, je dégoutais le petit ouvrage de Mitchell Resnick *Turtles, Termites, and Traffic Jams : Explorations in Massively Parallel Microworlds*. Quelle révélation ce fut ! Non seulement la plupart des concepts et méthodes esquissés dans l'ouvrage de Waldrop étaient repris, développés et exemplifiés, mais en plus un logiciel était fourni (StarLogo), qui permettait de tester toutes ces idées. Je fus instantanément mordu. Je passais les semaines suivantes à développer un petit prototype, SAMU¹², qui allait devenir le premier d'une longue série de prototypes. Non seulement je pouvais enfin explorer le rôle des interactions locales dans les structures spatiales observées, mais je pouvais le faire dans ce même état d'esprit adopté depuis ma thèse. Cet élargissement radical de mes horizons scientifiques, je suis loin d'en avoir mesuré toute l'ampleur, même plus de dix ans après. Je garde aujourd'hui le même émerveillement pour les systèmes complexes, leur intersection particulièrement riche avec la

¹² http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/geosimul/samu/samu_english.html

géographie et les SHS, mais également l'interdisciplinarité, à mon sens exemplaire, qu'ils imposent et permettent de construire.

Bien des choses se sont passées depuis ces premières journées intenses de création de SAMU dans les préfabriqués de l'INRETS à Arcueil. Recruté à Pau en tant que Maître de Conférences en géographie, j'exerçais la moitié de mon service d'enseignement à la faculté des Sciences. Je partageais mon bureau avec un jeune professeur fraîchement recruté, Dominique Badariotti, et ensemble nous avons passé trois années somptueuses, en compagnie de nos deux zouaves Vincent Laperrière et Diego Moreno, alors doctorants. Les interactions avec Bruno Jobard, informaticien au LIUPPA et spécialiste de visualisation scientifique, étaient quasi quotidiennes et nous avons progressé tous ensemble sur les chemins de la complexité. Ces trois années extrêmement denses et riches, m'ont préparé à saisir la belle opportunité qui se présentait en 2006 : un poste de CR1 ouvert au concours CNRS, profilé « Modélisation des systèmes urbains ». Je tentais ma chance et décidais de profiter de mon succès inespéré pour aller visiter un temple de la géographie théorique et quantitative que je ne connaissais pas encore, le laboratoire Images et Villes à Strasbourg. Si je continuais à enseigner la modélisation spatiale et les systèmes complexes dans différents contextes, ma charge de cours avait fondu d'un coup et j'en profitais pour élargir mes activités à l'international. Je visitais ainsi Amy Griffin à Canberra, Francesco Escobar à Alcalá, Keumsook Lee à Séoul et réalisais plusieurs missions d'expertise pour l'OMS en Corée du Sud, en Chine et en Sicile avec Pierpaolo Mudu et Carlos Dora. Je rencontrais par ailleurs Denise Pumain pour la première fois à l'occasion de conférences et c'est au cours de l'une d'entre elles qu'elle me proposa de devenir Directeur Adjoint du réseau européen S4, qu'elle avait fondé et dirigeait depuis plusieurs années. De manière concomitante, je découvrais à Paris l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France, qui venait d'ouvrir ses portes. Je me souviens très bien de ma première visite et de ce sentiment de stupeur qui m'envahit au premier contact avec cette ruche en effervescence. Sans aucun doute possible et de manière frappante, ce lieu réunissait tout ce que j'avais toujours recherché dans ma pratique professionnelle. L'interdisciplinarité y régnait en maîtresse exigeante mais bienveillante, dans cet esprit de partage et cette croyance dans les vertus de l'auto-organisation chères à son fondateur Paul Bourguin. Je demandais instantanément à devenir membre de cette institution, afin de participer à cette aventure scientifique et humaine hors norme. Assez rapidement, Paul me proposa d'intégrer le comité directeur de l'ISC-PIF, puis d'en assumer avec David Chavalarias la fonction de Directeur adjoint, René Doursat en prenant alors la direction. Ce double rapprochement avec Paris, *via* S4 et l'ISC-PIF, ainsi que l'arrivée de ma seconde fille, Suzanne, m'incitèrent à demander ma mutation sur Paris, où je résidais depuis des années. Mon rattachement à l'UMR Géographie-Cités était alors logique et j'en suis devenu membre en 2009. Les quatre années qui suivirent furent aussi riches et denses que les précédentes, puisque je prenais la direction de l'ISC-PIF en 2011, ne la lâchant en 2013 que pour prendre dès l'année suivante la direction d'une autre magnifique structure, l'UMR Géographie-Cités.

Au cours de toutes ces années, la liste des collègues brillants avec qui j'ai eu l'occasion de travailler en étroite collaboration, sur des sujets très divers, est impressionnante. Pourtant, derrière cette indéniable diversité réside une même soif

d'explorer les systèmes géographiques dans leur complexité. Faire évoluer mon positionnement et ma démarche scientifique a toujours été au cœur de mes préoccupations et c'est riche de toutes les expériences et rencontres qui ont jalonné mon parcours que je milite aujourd'hui, plus que jamais, pour des pratiques de modélisation et de simulation décomplexées en géographie et en SHS.

*« Thus, the task is not so much to see what no one yet has seen,
but to think what nobody yet has thought about that which everybody sees. »*

-Arthur Schopenhauer

Explorer sans relâche les systèmes géographiques

*« When the only tool you own is a hammer,
every problem begins to resemble a nail »*

–Abraham Maslow

J'ai toujours cru aux vertus de l'exploration, que ce soit dans mes recherches ou dans ma vie personnelle. Lorsque j'ai découvert l'analyse exploratoire des données à la Tukey, j'ai été immédiatement séduit par la manière dont ce mathématicien génial plaçait l'individu et ses capacités cognitives au centre de la démarche statistique. Progressivement, j'ai réalisé que d'autres avaient envisagé ce positionnement bien avant lui, dans des contextes bien plus généraux. Je suis ainsi devenu un adepte du philosophe américain Peirce et de son principe d'abduction, qui constitue aujourd'hui la colonne vertébrale de ma démarche scientifique.

Ce principe, je crois que j'aurais du mal à l'exprimer de manière plus imagée que je n'ai pu le faire il y a 12 ans de cela, dans le premier article que j'ai soumis à Cybergéo, à la fin de ma thèse. Dans cet article, qui était un véritable cri du cœur (et que l'un des évaluateurs avait fort justement qualifié de "coup de gueule"), je défendais un point de vue qui me semble toujours d'actualité aujourd'hui. Voici ce que j'écrivais en substance pour caractériser l'abduction, en me focalisant sur l'analyse de données :

« Les progrès de l'informatique aidant, l'utilisateur s'est considérablement rapproché de ses données, jusqu'à pouvoir quasiment les toucher au sein d'environnements tactiles virtuels ! L'ordinateur n'est plus ce ventre électronique ingrat, limité à des fonctions d'entrée et sortie. Aujourd'hui, l'utilisateur peut naviguer en toute liberté dans un jeu de données au moyen de graphiques interactifs, déambulant ainsi au gré de ses intuitions, se frayant son propre chemin dans cette jungle de détails à grands coups d'hypothèses. [...]. La souris devient un prolongement naturel de l'esprit, l'utilisateur interrogeant ses données à travers les multiples vues à sa disposition, alternant les angles d'approche, naviguant en surface comme en profondeur par simple requête graphique, s'immergeant dans ses données jusqu'à en avoir une connaissance intime. Les formidables capacités humaines, en termes de visualisation, d'intuition, de raisonnement par analogie et de génération d'hypothèses, sont ainsi pleinement mises à contribution, dans le cadre d'une relation homme-machine ludique et réaliste, exploitant au mieux les qualités de chacune des parties. [...]. Cette capacité nouvelle d'exploration graphique, incitant à l'exploration spatiale, possède cependant ses limites. L'explorateur se frayant un chemin dans la forêt équatoriale à grands moulinets de sa machette sait qu'il est condamné à avancer : le chemin qu'il vient de tracer se referme très vite dans son dos, lui interdisant tout retour en arrière et lui laissant peu d'espoir de retrouver un jour cet itinéraire précis, fruit d'un enchaînement de décisions prises dans des contextes particuliers et dont les raisons s'estompent très vite. Sa progression est par ailleurs lente car, même doté d'une machette particulièrement affûtée et maniable, il doit recueillir en permanence toute indication –souvent fugace– lui permettant de progresser dans la bonne direction. Or, l'interprétation des signes qui jalonnent son itinéraire suppose qu'il ait un objectif, mais également qu'il soit ouvert à toute autre possibilité : obsédé par ce qu'il s'attend à trouver –et dont il ne peut avoir qu'une idée très vague, puisqu'il explore– il risque fort de passer à côté de merveilles qu'il n'attendait pas. Enfin, rien ne dit que la connaissance intime de la forêt équatoriale qu'il aura pu se forger tout au long de son chemin sera suffisante à ses collègues de la société de géographie pour comprendre cet organisme complexe, dont les règles de fonctionnement ne se réduisent pas à cette seule dimension locale¹ ».

On me pardonnera, je l'espère, le caractère quelque peu ampoulé et emphatique de ce paragraphe qui résume bien, je crois, l'esprit même de l'abduction au sens de Peirce, désignant cette capacité de l'être humain à générer des hypothèses temporaires à partir de l'information incomplète dont il dispose. Appliquée à la démarche scientifique, l'abduction renvoie ainsi à la capacité du scientifique à se mettre en position d'étonnement, à se laisser guider par la recherche de l'inattendu et plus généralement à laisser libre cours à sa créativité.

Au-delà du clin d'œil au jeune chercheur passionné et fougueux que j'étais il y a douze ans de cela, un point me frappe : vous remplacez « données » par « modèles » dans ce texte et il fonctionne tout aussi bien. Mieux, il illustre parfaitement ce que j'ai cherché à construire et transmettre depuis mes premiers pas dans la modélisation des systèmes complexes. Mais je brûle les étapes. Je ne suis pas venu à la modélisation et aux systèmes complexes aussi simplement que les développements précédents pourraient le laisser croire. Bien au contraire, le chemin que j'ai emprunté est sinueux et trouve son origine dans une réaction quasiment

¹ Banos A., 2001, [A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données](#), *Cybergeo*, n° 197

épidermique : je ne comprenais pas que l'on puisse mettre en œuvre aussi peu de méthodes d'analyse spatiale avec les outils de base en géographie (les SIG notamment), alors même que les manuels de géographie quantitative en étaient remplis. Je ne comprenais pas non plus qu'une autre communauté scientifique que je connaissais bien (les statisticiens) dispose de plateformes communes (SAS et S+ puis R), regroupant de manière incrémentale toutes les méthodes validées par la communauté et que chacun pouvait alimenter, alors que nous, géographes, nous étions aussi largement tributaires des sociétés commercialisant les SIG. Bien sûr, des développements étaient possibles, mais tout était compliqué, lourd et fastidieux. C'est, je crois, cette prise de conscience qui m'a incité à m'engager sur une voie que je n'aurais jamais imaginé pouvoir suivre un jour, celle du développement de méthodes et d'outils informatiques voués à élargir l'espace des possibles pour les géographes. La démocratisation des méthodes quantitatives en géographie a toujours été au cœur de mes préoccupations. Je ne voulais pas simplement contribuer à diffuser ou même proposer de nouvelles méthodes. Non, je voulais donner les moyens aux géographes dans ma situation, avec un bagage scientifique et technique initial limité, de mettre en œuvre concrètement des méthodes que je pensais utiles, afin qu'ils gagnent en autonomie. Voici, sans nul doute, le principal fil rouge de ma carrière. La géo-visualisation et la géo-computation m'ont permis de faire mes premiers pas dans cette direction et je m'y suis engagé avec bonheur.

Voir, toujours plus loin

Les géographes savent depuis toujours l'importance de la visualisation dans l'acquisition et la diffusion de l'information. La carte est ainsi un mode de communication visuel absolument remarquable, irremplaçable. Toutefois, la diversité des données et des problèmes auxquels le géographe est confronté l'amène souvent à diversifier ses points de vue et, dans certains cas, à faire évoluer ce précieux support cartographique multiforme. Dès que j'ai commencé à faire acte de géographe, j'ai été confronté à la richesse mais également aux difficultés de l'exercice. Très rapidement, il m'est apparu que les systèmes spatiaux que j'explorais gagnaient à être explorés visuellement dans leurs composantes spatiale et temporelle, mais également attributaire. L'ensemble des variables caractérisant ces systèmes devait ainsi contribuer à former une image cohérente de ce système. Par ailleurs, il m'est apparu rapidement que la visualisation pure, sans interaction directe entre l'observateur et l'observé, limitait considérablement la portée et l'intérêt de l'exercice. J'ai donc proposé un protocole exploratoire permettant de multiplier points de vue et possibilités d'interaction graphique, au sein du logiciel GéoGrapheur² développé pendant ma thèse (figure 1).

² J'ai travaillé au développement de ce logiciel –que j'utilise encore aujourd'hui– pendant plusieurs années. Mes sources d'inspiration étaient nombreuses, mais les plus importantes ont sans doute été John Tukey, Edward Tufte, Paul Welleman, Chris Brundson, Anthony et David Unwin, ainsi que Stan Openshaw.



Figure 1 : Une exploration multi-dimensionnelle graphique des affections respiratoires dans le Doubs. Les objets jaunes apparaissant dans chacune des fenêtres ont été sélectionnés à partir de l'histogramme en bas à gauche (GéoGrapheur).

L'exercice était toutefois limité à des jeux de données de taille modeste (quelques centaines d'objets), pour des questions de réactivité du logiciel mais également d'intelligibilité des représentations graphiques. Il y a dix ans, cette contrainte n'en était pas vraiment une. La « révolution des données », comme on l'a appelée par la suite, était encore à venir. Pourtant, que les données soient massives ou pas, un même besoin de visualisation existe. On peut même considérer que ce besoin croît avec la taille des jeux de données. Dix ans séparent la figure 2 de la précédente. La taille du jeu de données manipulé est mille fois supérieure, mais les principes restent les mêmes. On retrouve ainsi les transformations dynamiques de variables chères à l'EDA, l'agrégation de données sous des formes différentes (cellules, réseaux) et la multiplication des points de vue. La nécessité de développer, à dix ans d'intervalle, des prototypes *ad hoc* révèle une chose : les SAGE (Systèmes d'Analyse Géographique Exploratoire) que j'appelais de mes vœux en 2001 et qui auraient dû à mon sens remplacer les SIG (Systèmes d'Information Géographique), trop centrés sur la manipulation de bases de données spatiales, n'ont toujours pas vu le jour. Le géographe continue à être sous-équipé pour manipuler les données spatiales à sa guise et réaliser les traitements dont il a besoin. La collaboration avec des informaticiens est plus que jamais de rigueur dans ce domaine à l'évolution très rapide. L'un des enjeux, à mon sens, est alors de ne pas se laisser guider par la technologie mais par des principes bien définis. Cette responsabilité incombe au géographe. A lui de garder le cap !

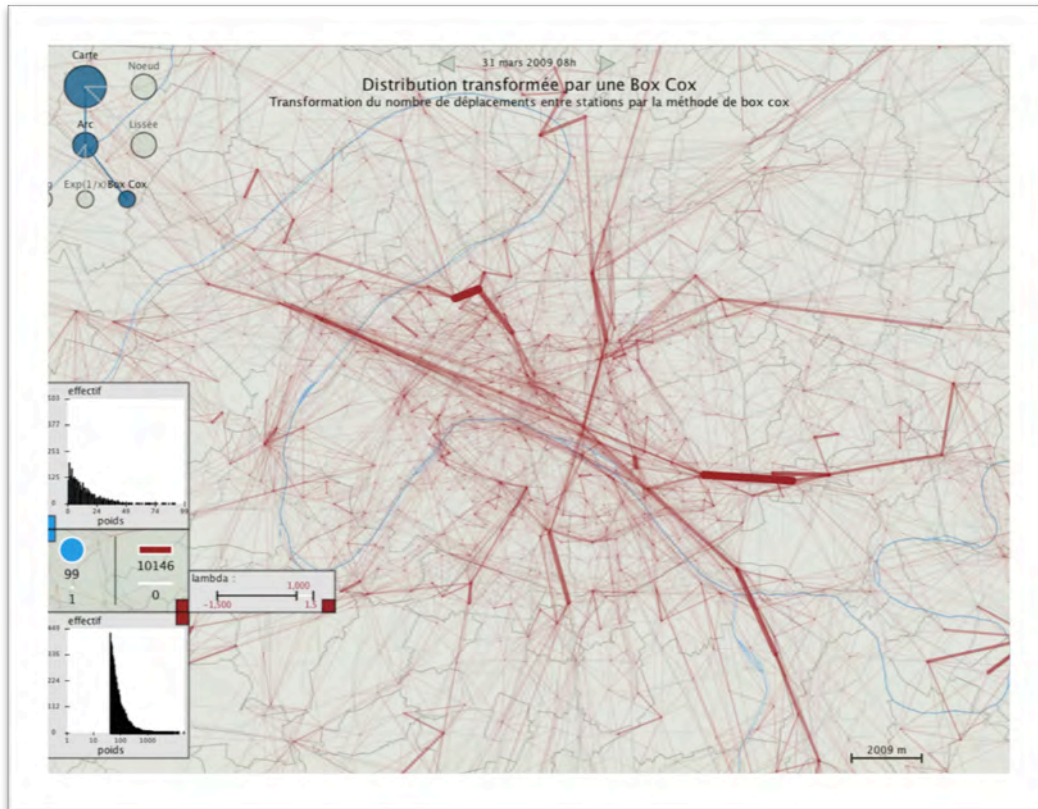


Figure 2 : La mobilité quotidienne révélée par la téléphonie mobile. Nombre de déplacements entre stations d'antennes à Paris, le 11 mars 2009 à 8h (prototype développé par Quentin Lobbé et Julie Fenchong).

Ces principes de base ne se limitent toutefois pas à la visualisation de données. Tout modèle, qu'il soit alimenté par des données ou non, gagne ainsi beaucoup à être visualisé de la même manière. Le prototype SMARtExposure, développé dans le cadre d'un projet avec l'OMS sur les risques industriels en Sicile, permet d'illustrer cette proposition. Le modèle agent développé vise ainsi à simuler, sur la base de données d'enquêtes, la mobilité quotidienne des habitants de cette région. La localisation des activités, les modes de transport utilisés et le trafic sur le réseau (1) sont couplés de manière dynamique au cours de la simulation avec les diagrammes d'activités (3) des groupes ciblés (2). La mise en relation avec des données de pollution (ici le Benzène) permet par ailleurs d'estimer l'exposition de groupes vulnérables, dans ses composantes statique et mobile (4). Dans un contexte pauvre en données comme celui-ci, l'exploitation systématique de toutes les dimensions disponibles et leur mise en correspondance revêtent un intérêt tout particulier.

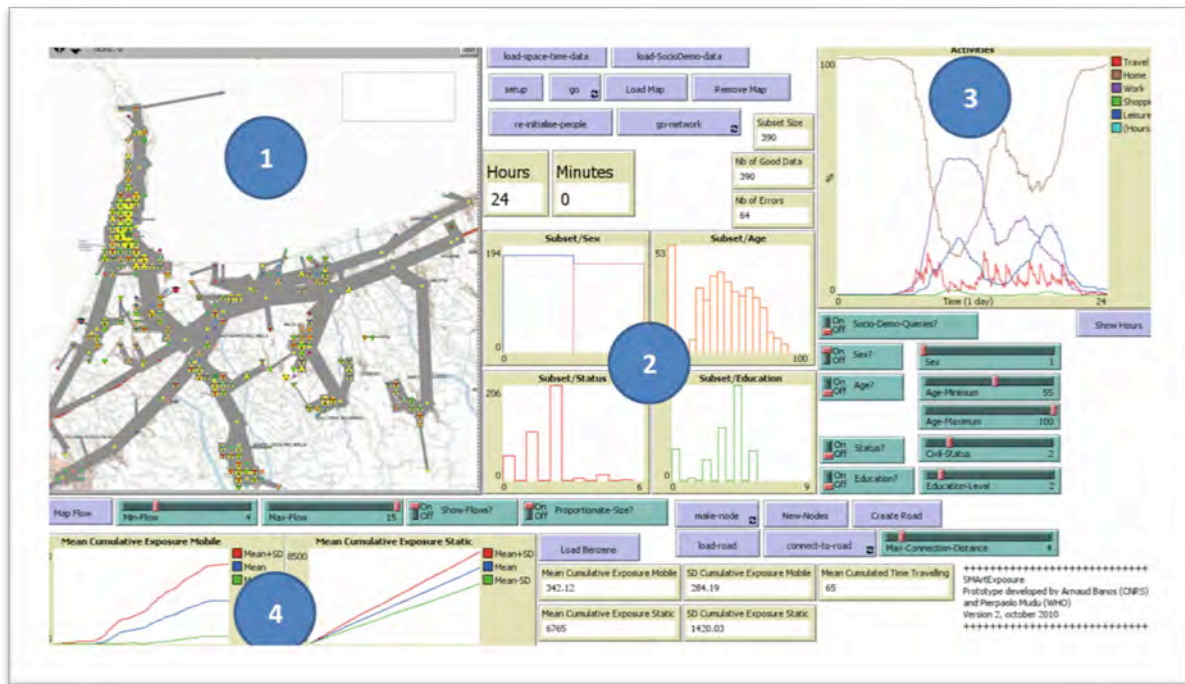


Figure 3 : Le prototype SMARtExposure permet de simuler les mobilités quotidiennes et l'exposition à la pollution industrielle de populations vulnérables dans des contextes pauvres en données (ici, la Sicile).

Cette stratégie de géo-visualisation prend un intérêt tout particulier dans un cadre spatio-temporel. En redonnant de la dynamique, du rythme, aux structures géographiques, ce sont les processus sous-jacents que l'on se permet d'explorer. Les premières animations cartographiques informatisées semblent remonter aux années 1970, avec les travaux précurseurs de Tobler (1970) et de Moellering (1973). Dans l'esprit de ces pionniers, la création de séquences animées devait permettre de faciliter notre compréhension des dynamiques spatio-temporelles. En associant deux dimensions jusque-là largement disjointes, l'objectif affiché était de créer du sens. L'animation devenait le vecteur de notre compréhension, par la reproduction de dynamiques difficilement observables autrement (MacEachren, 1994 ; Openshaw et al., 1994). Toutefois, de mon point de vue, la visualisation –physiquement passive mais cérébralement active– d'animations spatio-temporelles ne saurait constituer une fin en soi. Il s'agit également de permettre à l'utilisateur d'explorer, de tester et de vérifier toutes les idées qui ont pu émerger au cours de ce processus. Dans cet esprit, j'ai proposé une spirale méthodologique (figure 5) fondée sur la transformation progressive des données, transformation permettant de passer d'une information ponctuelle discrète tri-dimensionnelle (localisation dans le plan et dans le temps) à une information ponctuelle multi-dimensionnelle, quasi continue (figure 4).

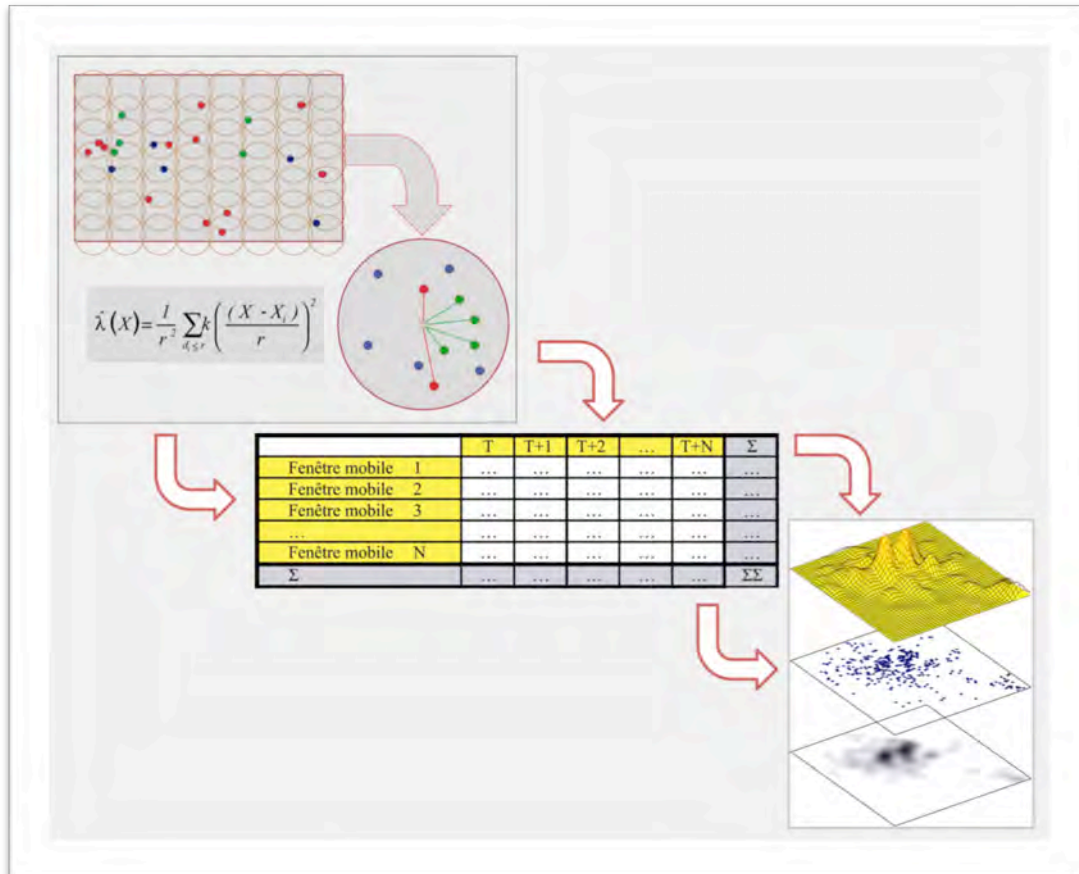


Figure 4 : Un protocole de transformation des données spatio-temporelles pour révéler structures et dynamiques spatiales (GéoGrapheur).

La zone est ainsi quadrillée au moyen de fenêtres mobiles, éventuellement adaptatives en fonction de la densité locale d'informations. Chaque fenêtre devient ensuite le réceptacle d'un certain nombre de traitements, s'appliquant aux objets localisés dans ce sous-espace artificiel. Dans le cadre de l'animation de cartes lissées, il s'agit d'estimer, pour chacune des couleurs présentes (représentant une date) au sein de chacune des fenêtres, la densité de points correspondante. La distance séparant chaque individu du centre de la fenêtre est calculée, de manière à introduire une fonction de pondération spatiale. La mesure de densité obtenue pour chaque fenêtre et pour chaque catégorie d'horaire présente est alors stockée sous forme d'un tableau individus-variables. Une carte lissée peut enfin être réalisée pour chaque instant t choisi, et représentée en deux ou trois dimensions. Bien sûr, la procédure de lissage de l'information induit une dégradation inévitable des points de détail mais conduit en échange à une mise en valeur améliorée des structures d'ensemble.

En couplant ces point de vue (figure 5), la complexité des configurations spatio-temporelles est alors mise en exergue, ce qui constitue le but même de la méthode : réintroduire de la complexité là où l'on a trop souvent tendance à la réduire pour des raisons opérationnelles.

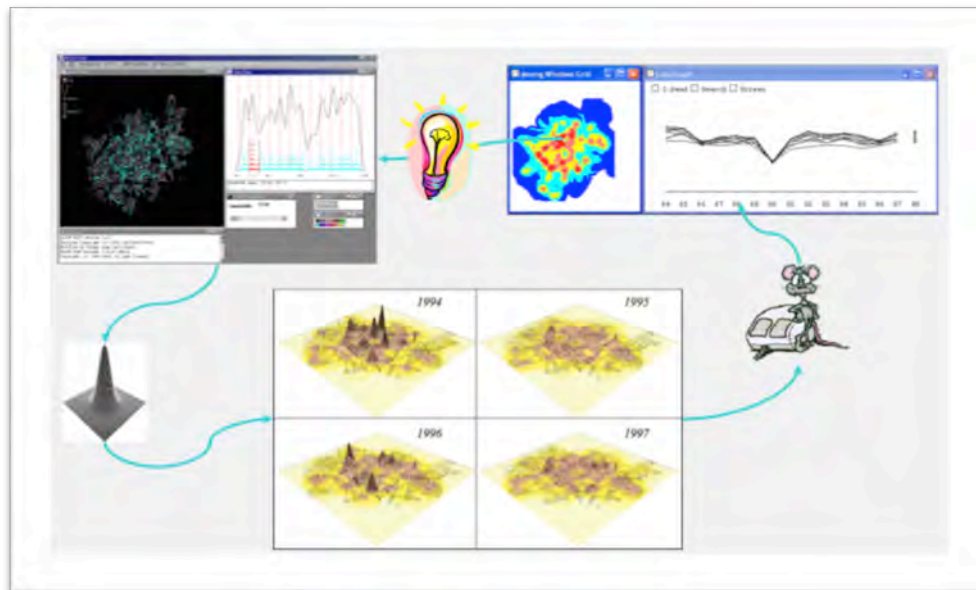


Figure 5 : Une spirale de traitements pour explorer de manière active les dynamiques spatio-temporelles à l'œuvre (GéoGrapheur).

On notera que l'animation cartographique, représentée dans la figure 5 par la succession de cartes du milieu, reste aujourd'hui encore le principal support visuel mobilisé par les géographes pour représenter et communiquer les dynamiques spatiales sous-jacentes. Bien sûr l'animation a ses vertus, bien identifiées par les pionniers qu'étaient Tobler et Moellering. Cependant, elle implique une certaine passivité de l'utilisateur, condamné à visualiser un phénomène sans pouvoir interagir avec le processus en cours. Or, l'expérience montre que de multiples hypothèses embryonnaires sont formulées au cours de la visualisation d'une animation (abduction) : comment, dès lors, exploiter cette richesse pour le moins fragile et fugace? Bien entendu, il est toujours possible de rendre l'utilisateur maître du déroulement même de l'animation, en lui permettant des retours en arrière, arrêts sur image et autres défilements en boucle. Il est toutefois possible d'offrir davantage : comment faire moins en effet que de proposer à l'utilisateur de tester lui-même ses idées, en interagissant directement avec l'information disponible ? En d'autres mots, comment encourager, amplifier et exploiter l'abduction ?

Dans cet esprit, j'ai proposé un outil de navigation spatio-temporelle (à droite dans la figure 5), qui donne à l'utilisateur un pouvoir d'investigation accru. Cet instrument de navigation se compose de deux graphiques liés, exploitant l'information contenue dans l'animation cartographique. Il ne s'agit plus ici de faire évoluer le document cartographique en fonction de l'information temporelle disponible, mais de permettre à l'utilisateur de naviguer dans sa zone d'étude, à la découverte des configurations dévoilées au cours de l'étape d'animation. Le semis de points composant la carte n'est autre que le semis des fenêtres circulaires utilisées précédemment, coloriées en fonction d'un critère simple, la somme en ligne des valeurs de densité contenues en colonne (figure 4). Cette colorisation permet de qualifier utilement la zone d'étude et d'éviter ainsi une navigation spatiale aveugle. Le géographe explore alors cette carte avec sa souris et les distributions temporelles correspondantes sont affichées en temps réel dans le graphique de droite. À l'issue de ces différentes étapes de

transformation-représentation, l'objectif est clairement de gagner en connaissance sur les données initiales. En prenant de la distance avec ce matériau brut, on se donne les moyens d'y revenir, doté d'intuitions nouvelles qui ne demandent qu'à être confirmées. On touche toutefois ici une limite fondamentale de cette démarche : mobilisée seule, la géo-visualisation ne peut pas permettre de dépasser le stade des intuitions. L'approche graphique, interactive et progressive proposée, est en effet largement fondée sur la capacité de l'utilisateur à s'étonner, mais également sur sa capacité à identifier visuellement des structures locales parfois complexes. Or, ce dernier point est pour le moins délicat : cette capacité est-elle équivalente d'un utilisateur à l'autre ? À quel degré de complexité faisons-nous référence ? Est-il efficace, souhaitable, ou même logique de laisser en permanence l'utilisateur accomplir cette tâche ? Pour moi, la réponse est aujourd'hui évidente, mais lorsque j'ai commencé à développer ces méthodes et outils il y a plus de dix ans maintenant, je pensais naïvement que je pouvais réellement contribuer à libérer les géographes en leur donnant les moyens pratiques de se placer au cœur d'une démarche abductive. Et puis, progressivement, j'ai réalisé que les collègues que je formais ou ceux avec qui je travaillais, s'ils étaient pour la plupart enthousiasmés par ces possibilités nouvelles, n'en modifiaient pas pour autant leurs pratiques. Pire, certains d'entre eux se retrouvaient totalement désemparés et la démarche s'avérait au final contre-productive. J'ai alors compris un point important : à trop vouloir libérer l'utilisateur, il arrive souvent qu'on le perde. Car il ne s'agit pas simplement de donner des moyens techniques nouveaux pour que les pratiques changent, même dans le cadre d'une démarche scientifique. Bien d'autres contraintes s'exercent sur les individus, dont il faut tenir compte. Cette prise de conscience progressive, que j'ai vécue à l'époque comme une perte d'innocence, m'a amené à développer des stratégies complémentaires, à la fois pour guider l'utilisateur dans sa stratégie au moyen de guides numériques, mais également dans le domaine de la formation. Former ne pouvait plus se limiter à enseigner des méthodes et des techniques, ce qu'il fallait, c'était partager une véritable culture, par l'exemple. Je reviendrai sur ces différents points par la suite, car ils sont au cœur de ma démarche actuelle.

La démarche exploratoire, appliquée au contexte de la géo-visualisation, avait été formalisée auparavant par un grand spécialiste du domaine, Alan MacEachren (1994). Son cube (figure 6), largement diffusé dans la littérature, positionnait l'exploration comme un fondement de la démarche scientifique, perçue comme une progression linéaire entre deux grands moments : le démarrage sur un nouveau sujet, largement inconnu, pour lequel des besoins d'exploration se font clairement sentir et la finalisation (« *présent* »), sous forme de publication par exemple, processus normé s'il en est.

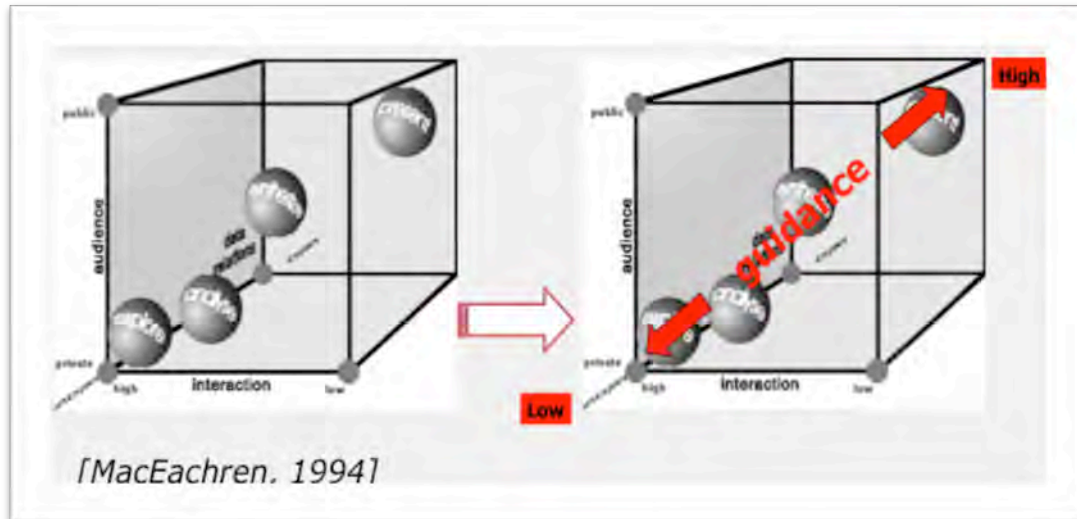


Figure 6 : L'incomplétude fondamentale du cube de MacEachren.

Mes différentes déconvenues m'ont alors poussé à soulever une incomplétude fondamentale dans ce schéma trop vertueux : si on y regarde bien, l'accompagnement (« *guidance* ») du chercheur croît dans le même sens. C'est ce qui explique que, dans certaines disciplines au moins, les articles soient tous rédigés selon la même structure, seul le contenu changeant. Bien sûr, les protocoles expérimentaux, de traitement, de modélisation, sont supposés être connus et maîtrisés, en tout cas reproductibles. Mais la réalité est beaucoup moins simple dans ce domaine : il suffit de chercher à reproduire un modèle à partir des spécifications données dans la plupart des articles scientifiques, toutes disciplines confondues, pour réaliser que cette reproductibilité est loin d'être systématique. En revanche, lorsque le chercheur est face à des données nouvelles, il est beaucoup plus libre. Libre d'appliquer des protocoles de traitement qui ont fait leurs preuves et qu'il maîtrise, mais qui standardisent singulièrement les analyses menées, ou alors libre d'innover, d'imaginer et/ou de mettre en oeuvre de nouveaux traitements, adaptés aux données et aux objectifs. Autrement dit, libre de se laisser guider par les moyens ou par les objectifs. On voit tout de suite qu'il ne s'agit pas d'un véritable choix. Peu de chercheurs sont suffisamment formés pour s'inscrire dans une démarche adaptant les moyens aux objectifs. Seule une démarche interdisciplinaire permet de s'approcher de cet idéal. Mais elle a un prix, dont je n'avais qu'une vague idée à l'époque. Toutefois, la nécessité de repositionner l'accompagnement (« *guidance* ») à toutes les étapes de la démarche scientifique était pour moi évident. Une première manière de progresser dans le domaine était alors de coupler plus systématiquement deux champs à l'époque largement disjoints, la géo-visualisation et la géo-computation.

Et si le vrai luxe c'était le calcul ?

La majorité des méthodes statistiques les plus couramment utilisées aujourd'hui en SHS ont été élaborées entre 1800 et 1950, c'est à dire à une époque où les capacités de calcul étaient faibles. Or, un chercheur en SHS peut aujourd'hui mettre en œuvre, dans la résolution d'un problème unique, un volume de calculs largement supérieur au volume annuel mondial mis en œuvre dans les années 1920 (Efron et Tibshirani, 1991). Si nos capacités de calcul ont été et continuent d'être démultipliées, la résolution de théorème reste en revanche une activité coûteuse et de longue haleine. Ce paradoxe devrait nous inciter, selon John Tukey, à nous focaliser sur ces capacités de calcul et à nous émanciper des hypothèses « *pré-calculatoires* » sur lesquelles reposent la plupart de nos méthodes (Tukey, 1986). Une conséquence immédiate de cette attitude est un gain de liberté considérable. Libéré de nombreuses hypothèses contraignantes, le choix des méthodes mises en œuvre par le scientifique peut enfin relever de critères d'utilité et de pertinence, bien loin du critère traditionnel de faisabilité mathématique (Efron et Tibshirani, 1991). Ce point de vue, quelque peu extrême, doit être replacé dans son contexte : l'éclosion de la statistique non paramétrique et l'introduction croissante du rôle de l'informatique dans une discipline très largement mathématique jusque-là. Cette vision générale m'a toutefois inspiré et encouragé à aller plus loin dans ma démarche de "libération des géographes".

Ainsi, au vu de la figure 5, on pouvait légitimement se demander s'il ne serait pas judicieux d'aller encore plus loin, en imaginant par exemple le moyen de rechercher automatiquement certaines configurations clés, exploitant ainsi conjointement et au mieux les capacités de calcul de l'ordinateur et les capacités d'interprétation de tout utilisateur humain. Pour moi, il devenait clair que l'interactivité graphique que je cherchais à construire devait se doubler :

- d'indicateurs pertinents et fiables, adaptés aux conditions locales qu'ils sont censés décrire ;
- d'une force d'investigation plus automatisée, à même d'opérer un premier tri dans la jungle foisonnante des détails ;
- d'outils de valuation et d'évaluation des structures et phénomènes découverts, mais également des indicateurs et opérations de tri réalisés par l'explorateur lui même.

Une question naturelle que l'on est amené à se poser, à la lecture de la figure 5, concerne en effet la présence éventuelle de configurations temporelles proches en d'autres lieux du territoire étudié. Il est évident qu'une recherche manuelle serait ici fort coûteuse en temps et en énergie, suggérant la mise à disposition d'une procédure de recherche automatisée. L'opération intellectuelle suggérée ici relève, on l'aura deviné, d'une logique de requête. Il s'agit de rechercher toutes les configurations temporelles strictement identiques ou très proches d'une configuration de référence. Trois particularités doivent être soulignées. En premier lieu, la logique de requête est ici délibérément inductive : l'utilisateur observe des phénomènes qu'il aurait sans doute du

mal à décrire (ou même à imaginer) *a priori*, et cherche ensuite à évaluer leur occurrence spatiale. En second lieu, la solution proposée doit être capable d'identifier des configurations « plus ou moins » proches d'une situation de référence. Or, comment formaliser ce besoin d'une certaine forme de « flou » ? Enfin, la procédure de formulation de la requête est graphique (figure 7).

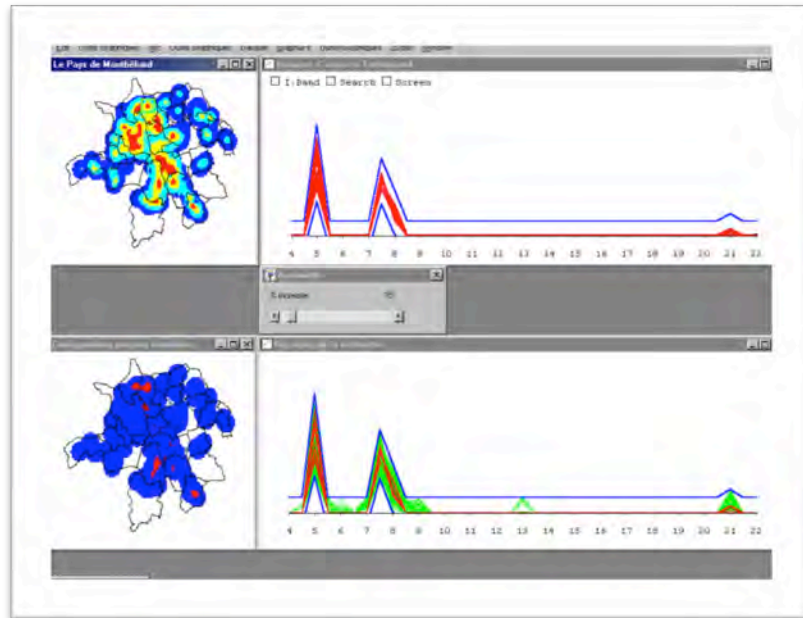


Figure 7 : De la navigation à la formulation de requêtes spatiales complexes pour estimer la demande de transports en commun dans le Pays de Montbéliard. Les pics temporels correspondent à des intensités de départ au travail vers la zone industrielle de Technoland (GéoGrapheur).

Ce point de vue est fort différent de celui sous-jacent au fonctionnement des SIG actuels, pour lesquels la logique de requête peut être qualifiée de :

- déductive (l'utilisateur doit savoir précisément ce qu'il recherche, de manière à pouvoir l'exprimer) ;
- abstraite (le langage fonctionnel de formulation des requêtes, même doublé d'interfaces conviviales, reste abstrait) ;
- complexe (la formulation *a priori* de requêtes complexes est un défi majeur pour la plupart des utilisateurs).

La figure 7 illustre la solution retenue : elle permet de formuler graphiquement des requêtes à la fois complexes et floues. Les deux graphiques supérieurs décrivent le processus de formulation de la requête, tandis que les graphiques inférieurs en exposent les résultats. L'utilisateur sélectionne une distribution temporelle observée, considérée comme situation de référence, qui prend alors une couleur rouge. Puis, au moyen d'un curseur, il définit de manière interactive et dynamique une bande de sélection de part et d'autre de la distribution de référence, formalisant ainsi très simplement et de manière exclusivement graphique ce qu'il entend par « plus ou moins proche ». Une fois la requête formulée, toutes les distributions temporelles contenues dans la bande de sélection définie sont recherchées et affichées. À quelques détails près (fluctuations locales autour de 6h00, 9h00 et 13h00), ces distributions ressemblent de très près à

notre situation de référence, à la fois en termes de forme et d'intensité. La carte de gauche identifie alors en rouge les fenêtres mobiles concernées.

Une fois encore, on pressent la solitude de l'utilisateur laissé seul face à ses données. Que faire des structures détectées ? Quand doit-il s'arrêter ? Ne pourrait-on lui mâcher un peu le travail et l'accompagner en identifiant pour lui des grandes catégories de structures temporelles par exemple ? De nombreuses méthodes permettent d'aller dans ce sens (par exemple dans la figure 8 un couplage ACP/Nuées dynamiques).

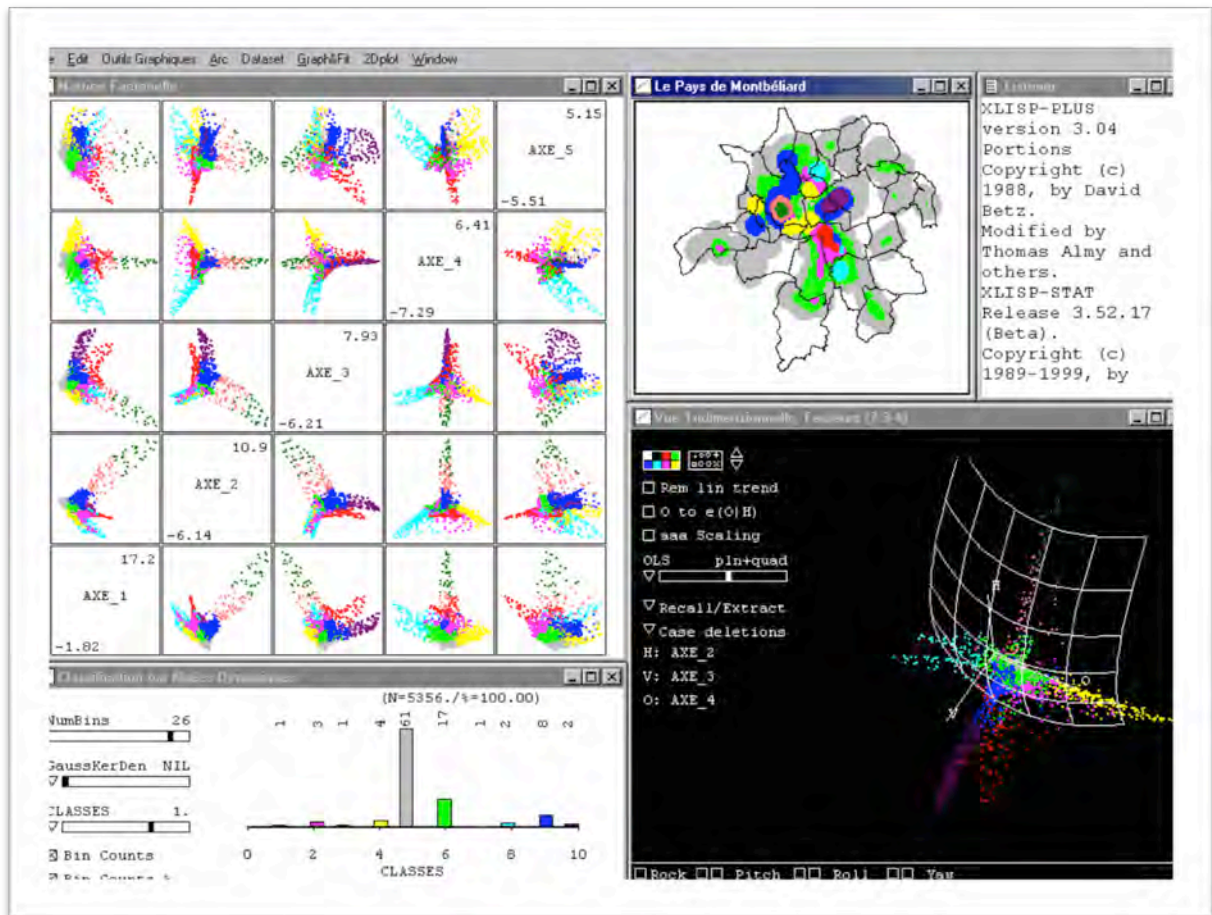


Figure 8 : Navigation dans l'espace multi-dimensionnel créée par une Analyse en Composantes Principales et une classification par nuées dynamiques (GéoGrapheur).

Ce qui m'importait, toutefois, c'était que l'ensemble reste cohérent, conserve le même esprit. Les résultats issus d'un tel traitement devaient donc pouvoir être intégrés directement à la démarche, afin que l'utilisateur puisse naviguer avec la même facilité au sein de ce nouvel espace multi-dimensionnel, mais également passer d'un espace à l'autre (figure 9). Libérer ne voulait donc pas dire pour moi « abandonner », mais au contraire accompagner le géographe dans sa démarche, en lui offrant des possibilités alors inédites.

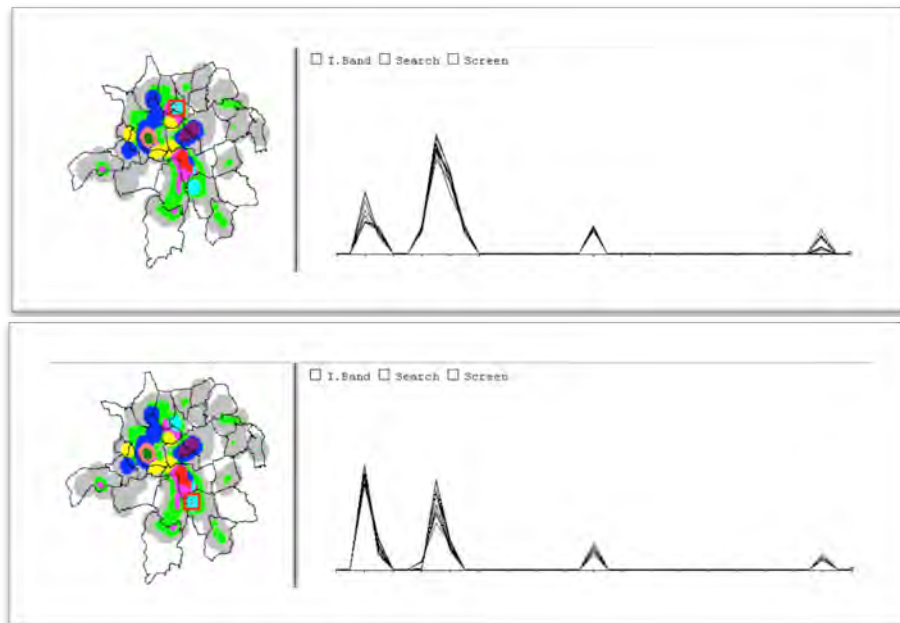


Figure 9 : Vers des territoires de desserte en Transport Public. Comparaison de profils temporels de zones appartenant à la même classe statistique (GéoGrapheur).

Ces travaux portaient en eux les prémises de mon investissement ultérieur dans le domaine du data-mining spatial. La route vers la détection automatisée de structures était tracée, dans cette optique de surveillance territoriale défendue par Stan Openshaw, l'un des géographes qui m'inspirait le plus à l'époque. Openshaw, avec sa « *machine d'analyse géographique* » (GAM) (Openshaw et al., 1987), avait en effet jeté les bases d'une force de recherche brute, qui sillonnerait sans relâche des bases de données géo-référencées massives et complexes, à la recherche de structures, et ce à travers les échelles géographiques. L'application la plus simple que l'on pouvait imaginer, la comparaison de semis de points, se révélait extrêmement efficace et utile en épidémiologie spatiale et, de manière plus générale, en géographie. J'ai développé ma propre version de cette GAM, l'utilisant avec bonheur dans des contextes variés, et je reste aujourd'hui encore impressionné par cette intuition remarquable qu'avait eu Openshaw dans les années 80 : la simplicité est un atout, si elle est couplée à une puissance de calcul adéquate. Marcher dans les pas de ce grand géographe m'a ouvert l'esprit et a fini de me désinhiber. Je me suis lancé à corps perdu dans la statistique spatiale, développant moi-même les méthodes dont j'avais besoin pour mes analyses lorsqu'elles n'étaient pas disponibles.

Convaincu que « *l'espace fait une différence* », j'ai entrepris de montrer, GéoGrapheur à l'appui, que les indicateurs locaux pouvaient nous apporter beaucoup. J'ai exploré sans relâche les indicateurs locaux d'association spatiale (Anselin, 1995), testant leurs propriétés et proposant des tests de significativité statistique non-paramétriques à la Monte-Carlo, moins contraignants à mettre en œuvre que les tests analytiques existants, pour peu que l'on dispose de la ressource en calcul nécessaire (figure 10).

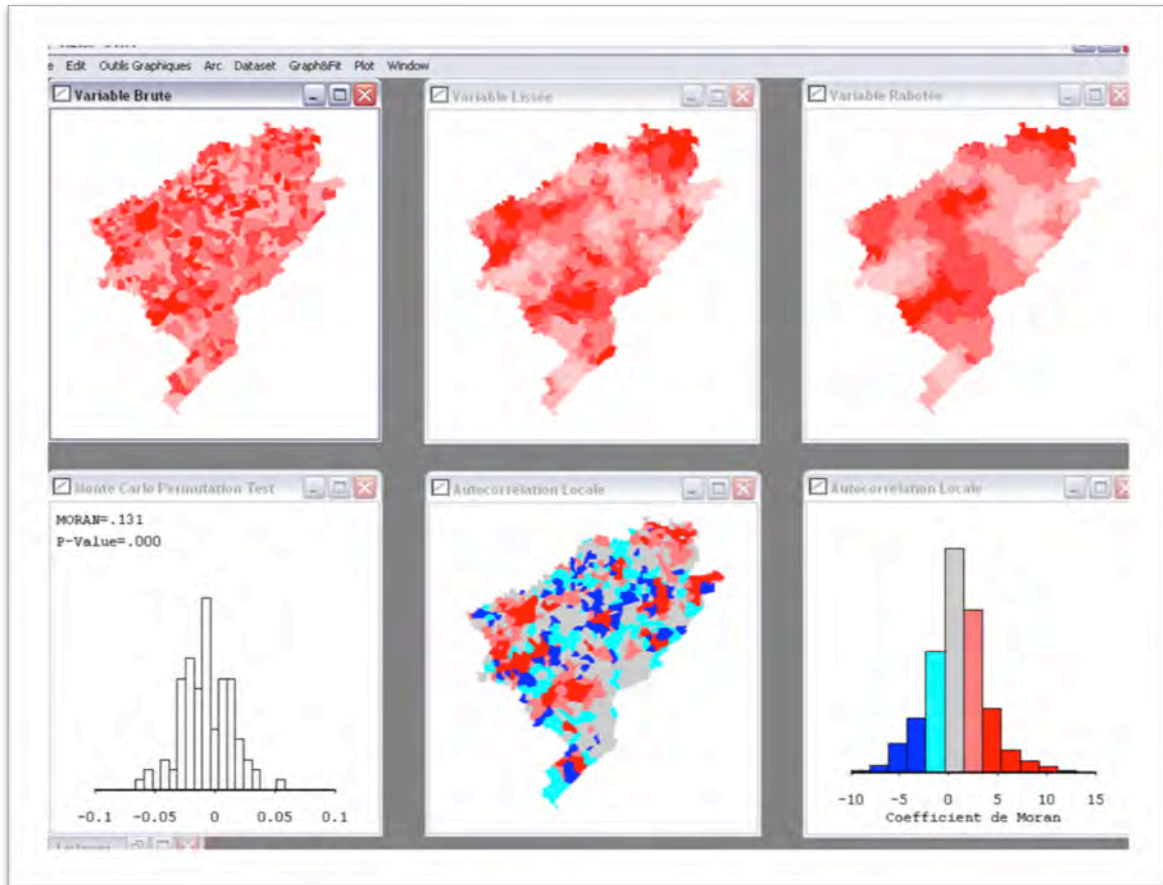


Figure 10 : Au cœur de l'autocorrélation spatiale avec les indicateurs locaux d'association spatiale -LISA. Le coefficient global de Moran (0.131) est décomposé en valeurs locales, positives et négatives. Leur cartographie révèle polarités et discontinuités spatiales dans la géographie des affections respiratoires dans le Doubs (GéoGrapheur).

Dans la foulée, je me suis emparé des travaux alors naissants autour de la Geographically Weighted Regression (GWR) (Brunsdon et al., 1996). Je trouvais l'idée géniale : relâcher l'hypothèse de stationnarité inhérente au modèle linéaire généralisé et se donner les moyens de révéler les variations locales des paramètres des modèles globaux. La méthode n'en était qu'à ses débuts à l'époque et les tests de significativité, développés par la suite par les auteurs, n'existaient pas encore. J'en proposais alors des versions non-paramétriques, basées sur des méthodes de type bootstrap, qui permettaient de fixer des ordres de grandeur, au prix de calculs un peu longs.

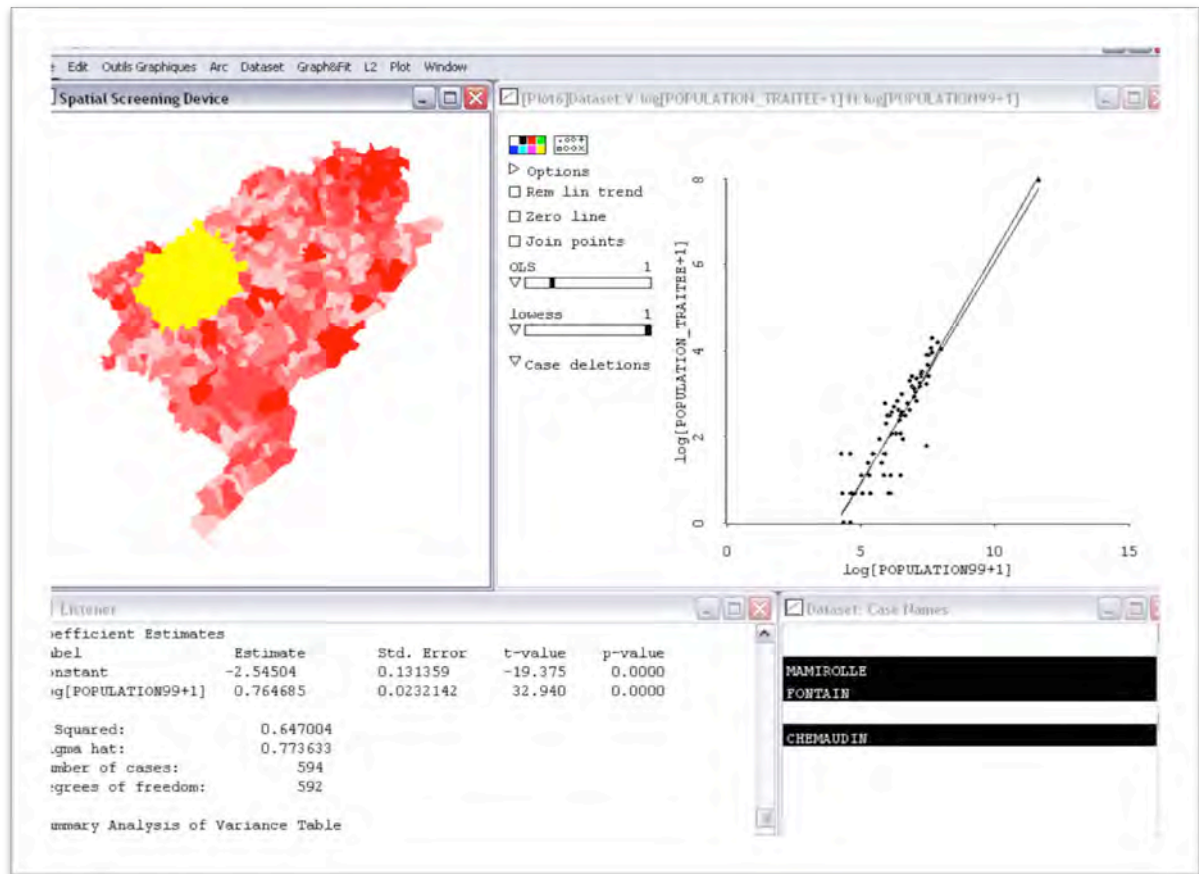


Figure 11 : L'interface GWR de GéoGrapheur. Le même modèle (ici une régression linéaire) est calculé localement, au sein de la fenêtre de sélection spatiale, les entités spatiales étant pondérées en fonction inverse de leur distance au centre de la fenêtre (GéoGrapheur).

Ce que j'ai aimé tout de suite, dans cette libération par le calcul, c'est les possibilités quasiment infinies qu'elle ouvrait. Subitement, tout ou presque devenait possible. Des analyses auxquelles je n'aurais pas pensé jusque-là, pour la simple raison que je savais ne pas pouvoir les conduire, devenaient évidentes. Les estimateurs pouvaient être affinés, et pour certains d'entre eux, de manière impressionnante même. Par exemple, dans le cas de l'estimation de densités par la méthode des noyaux (KDE), il devenait possible de pondérer les surfaces lissées obtenues par d'autres données difficiles à manipuler, par exemple le réseau routier dans le cas des accidents de la circulation. Ce faisant, je m'orientais –sans le savoir à l'époque– vers l'intégration de données hétérogènes et multi-sources, enjeux que je défends aujourd'hui passionnément.

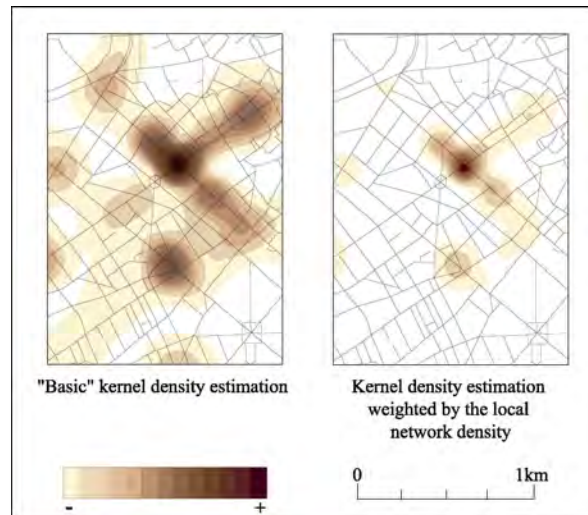


Figure 12 : Pondération de l'estimateur de densité d'accidents de la circulation par la densité du réseau routier (réalisation Florence Huguenin-Richard).

Plus récemment, dans le cadre du projet interdisciplinaire ELIANE³, la question suivante se posait : pouvons nous estimer l'accessibilité des populations aux ressources du territoire, en tenant compte des mobilités géographiques et notamment des mobilités professionnelles quotidiennes ? L'enjeu était alors de coupler un modèle de potentiel local avec un modèle de flux, afin de construire un estimateur plus fin de l'accessibilité réelle des populations. La figure 13 compare deux solutions : la première, classique, est centrée sur les communes de résidence ; la seconde, beaucoup plus gourmande en calcul, tient compte des communes de résidence et de travail ainsi que des flux intercommunaux.

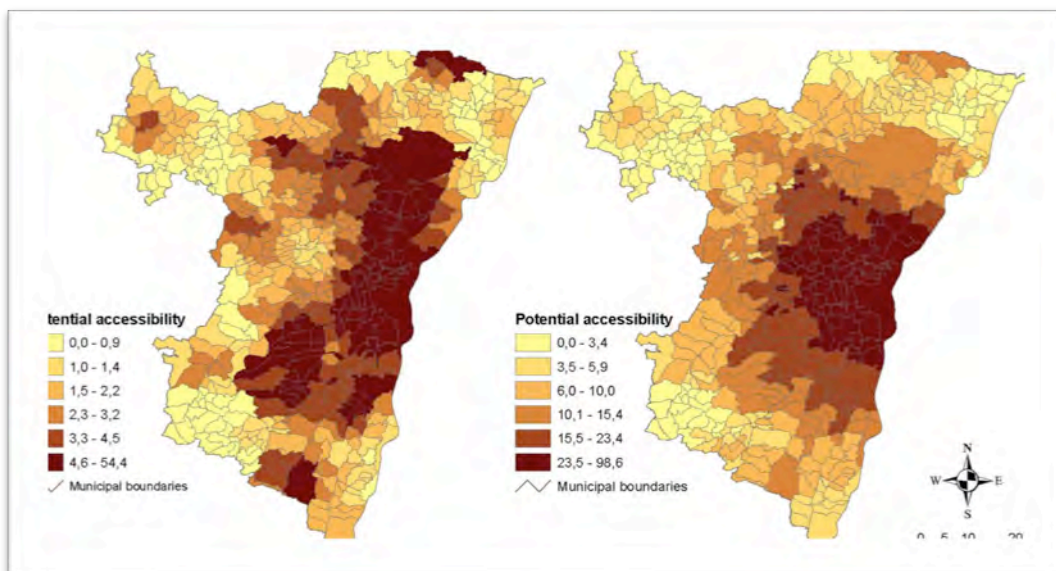


Figure 13 : Accessibilité des populations aux supermarchés dans le Bas-Rhin, en tenant compte uniquement des communes de résidence à gauche et en intégrant les déplacements domicile-travail à droite (Salze et al., 2011).

³ <http://www.elianeproject.eu/>

On constate que les résultats sont très différents et que la première carte peut difficilement être considérée comme une approximation de la seconde, beaucoup plus réaliste.

Ces différents travaux, menés pendant plusieurs années, dans le cadre de projets différents, avec des collègues différents, m'avaient préparé aux systèmes complexes. A leur philosophie, mais également à leurs méthodes. Bien sûr, tout restait à découvrir pour moi, mais j'étais prêt et motivé. Et lorsque je compris que je pourrais accroître mes capacités d'exploration des systèmes spatiaux par la modélisation et la simulation, je plongeais sans hésiter. La fourmilière urbaine n'attendait plus que moi.

L'irréductible complexité des systèmes géographiques

En 2005, alors que j'étais en poste à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, le Festival International de Géographie de Saint-Dié m'a invité à venir présenter mes travaux à l'occasion de son édition annuelle. C'était la première fois qu'on me demandait de présenter mes travaux en cours devant le grand public. J'y ai pris goût par la suite au point, lors du festival de la science à Strasbourg, de faire courir au milieu des stands des enfants de primaire pour leur faire comprendre ce qu'est la distance de freinage dans le modèle SAMU, et même de faire de la simulation sociale expérimentale avec des collégiens à l'ISC-PIF. Mais sur le moment, j'étais un peu désarçonné, ne sachant pas trop comment qualifier mes travaux et encore moins comment les présenter de manière accessible, sans artifice technique ni jargon hermétique. L'idée m'est alors venue de fonctionner par analogie et l'image de la fourmilière urbaine s'est imposée à moi comme une évidence. Voilà ce que j'explorais avec mes petits modèles ! Autant les « palpitations du territoire » m'avaient collé à la peau les années précédentes, résumant bien mes investigations spatio-temporelles tous azimuts, autant la fourmilière urbaine est devenue une sorte de signature, même si elle présente certains inconvénients, dont celui de m'amener à me justifier systématiquement.

Dans mon esprit, postuler que l'on peut étudier les sociétés à la manière d'un éthologue étudiant une fourmilière ne signifie nullement que les premières se réduisent à la seconde. Bien au contraire, les limites de l'analogie naturaliste permettent à mon sens de mieux appréhender la spécificité des phénomènes sociaux. Au-delà, une telle mise en parallèle ouvre la voie à des horizons méthodologiques renouvelés, faisant de la modélisation et de la simulation des méthodes d'investigation scientifique à part entière, à même de nous aider à mieux explorer les phénomènes dans leur complexité.

Toutefois, comment aborder l'incroyable effervescence de cette fourmilière urbaine, cette vie bouillonnante et grouillante dont elle est le siège ? Appréhendée à un niveau microscopique, tout ne semble être qu'amalgame de comportements individuels particuliers, spécifiques, non généralisables. Et pourtant, des structures plus ou moins nettes, plus ou moins durables, semblent émerger par moments de cette invraisemblable diversité, pour peu que l'on accepte de prendre de la hauteur, de s'éloigner temporairement des individus pour observer le territoire.

L'approche réductionniste nous pousse à déconstruire les processus, en décomposant le tout en sous-ensembles plus simples (les parties), jusqu'à ce que le cœur même du ou des phénomènes étudiés apparaisse, tel un diamant débarrassé de sa gangue⁴. Il est pourtant de plus en plus évident aujourd'hui que la course à la décomposition analytique est illusoire puisque, pour reprendre Herbert Simon (1962) ou Philip Anderson (1972), le tout est non seulement plus que la somme des parties⁵, mais il est également de nature complètement différente, l'émergence impliquant souvent un saut qualitatif. Même si nous connaissions l'ensemble des facteurs intervenant dans les actions individuelles, nous ne serions pas pour autant capables de prédire le comportement d'un groupe d'individus et *a fortiori* d'un territoire, compte tenu des multiples interactions à l'œuvre. C'est cette limite fondamentale qui m'a poussé à m'inscrire dans une famille théorique regroupant des travaux variés autour des systèmes complexes, de la simulation de sociétés artificielles et de la simulation à base d'agents et visant à mieux comprendre les phénomènes complexes non plus en les déconstruisant, mais en les reconstruisant.

Alexis Drogoul a joué un rôle important dans cette orientation personnelle. Ses travaux m'ont réellement fait prendre conscience de nombreux enjeux, à une époque où la simulation multi-agents était encore pour moi une spécialité informatique hors de mes compétences. Ainsi, j'ai compris de manière intuitive qu'en créant des mondes artificiels, informatiques, peuplés d'agents artificiels autonomes agissant au sein de réseaux d'interactions à géométrie variable, le chercheur en SHS avait les moyens de se doter de plateformes d'expérimentation d'un genre nouveau, lui permettant de reproduire *in silico* des situations difficiles à observer, afin de mieux les étudier. La constitution de ce que Drogoul appelait des véritables laboratoires virtuels permettait même d'introduire une composante expérimentale novatrice dans l'étude des phénomènes sociaux, puisque ce ne sont plus seulement les résultats de la simulation qui devenaient objets d'attention, mais également les processus souvent complexes par lesquels ces résultats avaient été obtenus (Drogoul, 2000). L'objectif devenait alors plus clair : il s'agissait de reconstruire, par simulation, les processus susceptibles d'engendrer les structures socio-spatiales observées, et de raisonner ainsi sur la base de scénarios comparatifs, en adoptant une démarche prospective orientée y compris vers l'aide à la décision.

Une telle approche se justifie de la manière suivante : notre capacité à anticiper le comportement d'un système complexe est fondamentalement liée à notre capacité à le penser, le formaliser et le simuler (Zwirn, 2005 ; Epstein et Axtell, 1997). Selon l'acception la plus courante aujourd'hui, un système complexe est constitué d'un grand nombre d'éléments en interactions non linéaires, situés dans un environnement. Ces éléments (ou entités) actifs, dénommés agents dans la terminologie informatique usuelle, agissent dans et sur cet environnement, qui les influence en retour. Un tel système ne bénéficie pas, de plus, d'un mode de contrôle global, centralisé. Le pouvoir d'action des agents est réduit à une dimension très locale, et certaines structures globales observées sont le fait de processus d'auto-organisation. Dans une telle

⁴ Les benzécristes s'y reconnaîtront.

⁵ Ainsi que l'aurait énoncé Aristote bien avant eux.

perspective, les multiples interactions, qui plus est localisées, entre agents peuvent conduire à l'apparition de propriétés à un autre niveau d'observation ou d'agrégation, intermédiaire ou global, non déductibles à partir des simples propriétés des agents. Ces propriétés sont dites émergentes et leur identification constitue l'un des principaux enjeux des théories de la complexité.

Enfin, certains systèmes complexes sont également qualifiés d'adaptatifs, afin de souligner leur capacité à évoluer, essentiellement par mutation ou par apprentissage, soit au niveau des comportements des agents, soit au niveau des agents eux-mêmes. Penser la ville et de manière plus générale les systèmes urbains à travers ce prisme théorique implique une évolution significative de nos façons de penser et de formaliser ces objets géographiques classiques (Batty 2005 ; Portugali, 2002 ; Pumain et *al.* 1989 ; Pumain, 1998 ; Pumain et Sanders, 2013).

Dans cette perspective, la démarche que je mets en œuvre aujourd'hui peut être qualifiée à la fois de :

- centrée sur les individus, au sens de l'individualisme méthodologique, mais également centrée sur les lieux, dans une perspective plus holistique ;
- générative, dans la mesure où elle vise à identifier les micro-spécifications suffisantes pour générer des macro-phénomènes ou macro-structures ;
- interactionniste, enfin, puisqu'elle considère le territoire comme un système adaptatif complexe auto-organisé, constitué d'un grand nombre d'agents en interaction dans un environnement en évolution permanente.

L'idée de reconstruire (générer) le fonctionnement d'un système par l'identification d'un ensemble réduit, nécessaire et suffisant, de briques élémentaires insérées dans un réseau d'interactions approprié, soulève inévitablement toute une série de questionnements épistémologiques, logiques, méthodologiques et même techniques. De manière plus générale, une telle entreprise peut difficilement aboutir sans une feuille de route cohérente et suffisamment détaillée. Or, force est de constater qu'un tel cadre n'existe pas vraiment à l'heure actuelle. Le chercheur peut, au mieux, se laisser guider par un nombre réduit de principes, afin d'éviter de créer des modèles inutilement compliqués, dont les résultats seraient aussi difficiles à analyser et à comprendre que le phénomène initialement étudié (Schweitzer, 2003). Toutefois, si je partage l'idée que, dans un système complexe, l'essence même de la complexité réside souvent dans des interactions relativement simples mais suffisamment nombreuses pour permettre l'émergence de structures globales, je suis beaucoup plus réticent à partager l'idée selon laquelle nos laboratoires virtuels seraient avant tout dédiés à l'expérimentation de modèles simples, fondés sur des processus essentiellement locaux.

Ainsi, cette prédominance des processus locaux que l'on retrouve dans nombre de modèles de simulation spatiale (Batty, 2005 ; Benenson et Torrens, 2001 ; Portugali, 2003), véhicule à mon sens une vision extrêmement réductrice de la structure de l'espace géographique et des processus d'interaction spatiale dont il est le siège, conduisant notamment à nier les effets de structure, d'échelles, de réseaux et d'allotopie, toutes options difficiles à admettre pour un géographe. De manière plus générale, la « fusée à deux étages » (micro et macro) très souvent mobilisée pour décrire et

expliquer les systèmes complexes (et dont j'use personnellement depuis des années), si elle permet de faire passer très simplement et avec un minimum d'interférences nombre de concepts importants, encourage également une certaine dérive de la modélisation de ces systèmes vers des modèles à deux étages.

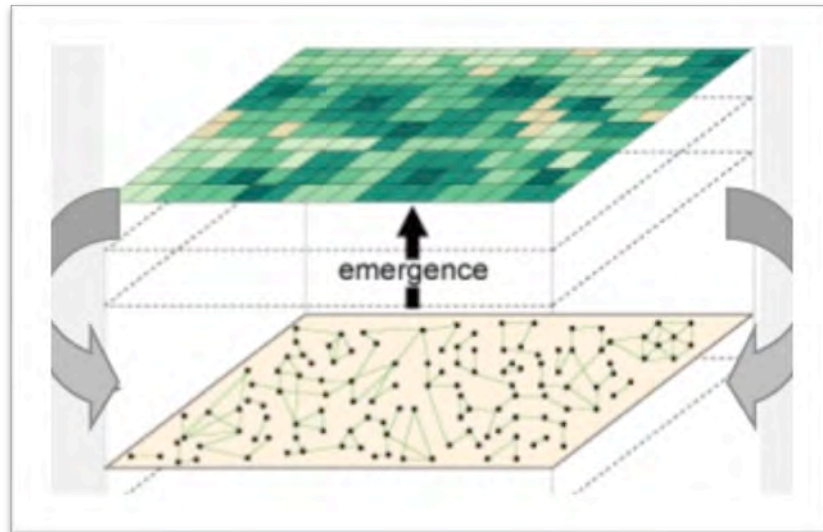


Figure 14 : Une vision standard mais fort utile des systèmes complexes, entre micro et macro (Source : Eric Daudé).

Or, deux phénomènes importants sont oblitérés dans cette vision de la complexité. Tout d'abord, les systèmes sociaux sont ouverts, ils interagissent avec d'autres systèmes et les phénomènes d'émergence et d'immergence ne se limitent pas à cette vision tubulaire. Ensuite, la complexité des systèmes sociaux réside également dans l'emboîtement des structures et des échelles, ainsi que la multi-appartenance des entités de base (les individus) et la variabilité de leur rôle à ces différents niveaux (Muller et Auber, 2011 ; Pumain et Sanders, 2013 ; Banos et Sanders, 2013). J'y vois pour ma part, dans une certaine mesure, une manifestation de l'influence considérable exercée par la physique dans le domaine de la modélisation des systèmes complexes. Cette vision dichotomique, micro-macro, très largement représentée dans cette discipline, s'est très bien exportée dans les SHS en général et la géographie en particulier. Pourtant, s'il est nécessaire de s'inspirer et éventuellement d'emprunter des théories, concepts, méthodes et modèles aux autres disciplines, il est fondamental pour la géographie de continuer à développer son propre corpus. Seule l'innovation dans ces domaines permet d'adapter toujours mieux les démarches aux problèmes et d'élargir les champs d'investigation et l'espace des solutions possibles

Enfin, si je reconnais à ces modèles simples un rôle heuristique indéniable, je suis plus réservé quant au primat dont ils font l'objet dans le domaine de la simulation spatiale, et notamment quant à leur capacité à réellement nous aider à mieux comprendre un système complexe tel que la ville par exemple. Si le principe de parcimonie reste à mes yeux un guide de formalisation incontournable, je lui reprocherais volontiers de favoriser une certaine forme de domination des modèles les plus simples.

Pourtant, je suis intimement persuadé que, dans ce domaine comme dans de nombreux autres, nous avons besoin de diversité. « *There is no one best way* » aimait à dire Herbert Simon et je crois que c'est particulièrement vrai dans le domaine de la modélisation. Ce qui ne veut pas dire que tout soit possible, bien au contraire. Avec Lena Sanders, nous avons cherché à clarifier un peu les choses et nous avons proposé une grille de lecture, le « fer à cheval », qui permet de catégoriser simplement les modèles de systèmes complexes en géographie (figure 15).

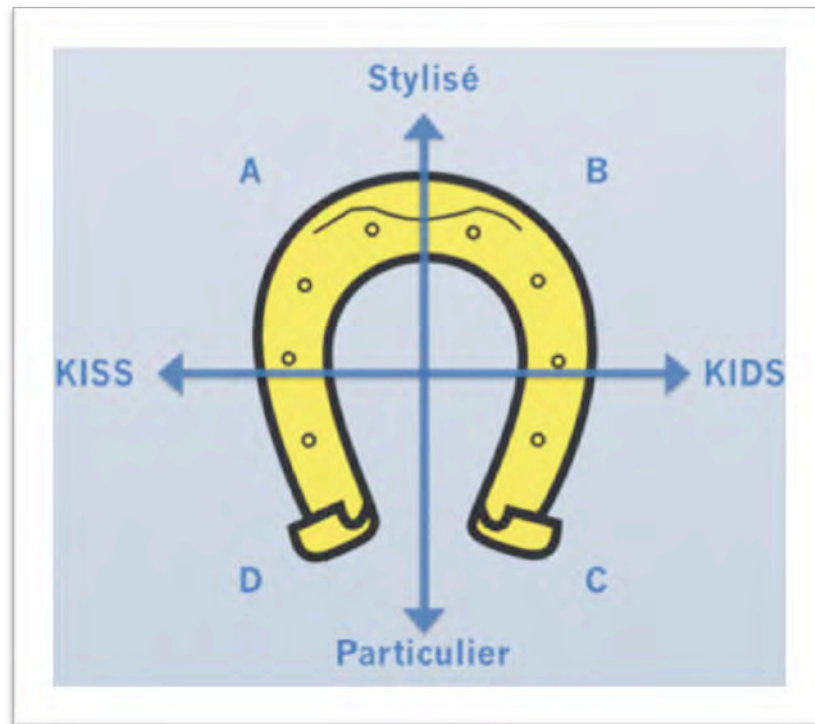


Figure 15 : Le « fer à cheval », une grille de lecture des modèles de systèmes complexes en géographie (Banos et Sanders, 2013).

En croisant niveau d'abstraction (particulier-stylisé) et de simplification (KISS-KIDS) des modèles, il devient ainsi possible de les catégoriser, mais également de définir des parcours types entre ces modèles, voire même de formuler des recommandations de bonnes pratiques, le long du « fer à cheval » notamment. L'opposition particulier-stylisé ne pose pas de problème particulier et renvoie au positionnement du modélisateur relativement à l'observé auquel il s'intéresse et qu'il cherche à modéliser : « *une organisation spatiale précise, observée en un lieu donné à un moment donné, ou une organisation-type, simplifiée, que l'on observe de manière répétée dans le temps et/ou l'espace* » (Banos et Sanders, 2013). En revanche, l'axe KISS-KIDS est singulièrement jargonneux et ne parlera vraisemblablement qu'à une poignée de convertis. La distinction qu'il implique est pourtant fondamentale et sera très utile pour la suite de ce document. Aussi, sur la base de ce que nous avons écrit sur le sujet avec Lena Sanders, j'en rappellerai brièvement ici les grandes lignes.

De manière très générale, système complexe ne rime pas nécessairement avec modèle complexe, cette expression ne rime pas plus avec modèle simple d'ailleurs : tout dépend des objectifs (Varenne, 2008). Herbert Simon aimait à dire que les systèmes complexes peuvent être utilement explorés par simulation, *via* des modèles simples. Il allait même plus loin en rappelant qu'il n'est pas toujours nécessaire de connaître l'intégralité du comportement des constituants élémentaires de la matière, dans ses niveaux les plus fins, pour construire des ponts ou des avions (Simon, 1969). L'approche KISS, proposée par Robert Axelrod, s'inscrit dans cette filiation : Keep it Simple, Stupid ! Dans cette perspective, la complexité d'un modèle à base d'agents doit résider dans les résultats issus de sa simulation, non dans ses hypothèses (Axelrod, 1997).

Epstein et Axtel (1996) et plus récemment Epstein (2006) ont poussé assez loin ce principe de simplification extrême, au point d'en faire un des fondements de leur « *manifeste générativiste* » : pour eux, « expliquer » un phénomène social observé revient à le « générer » par simulation (sous entendu « informatique »), après identification des « micro-spécifications » nécessaires et suffisantes pour reproduire le macro-phénomène observé.

Le caractère normatif de ce positionnement ne vous aura pas échappé. Personnellement, je le trouve excessif et partiel, même s'il s'avère très fructueux dans certaines configurations. Ainsi, pour Rosaria Conte, une explication générative au sens de Epstein et Axtell doit s'appuyer sur une chaîne de causalité identifiée, sous peine de se limiter à une simple reproduction d'effets ou de phénomènes observés (Conte, 2007). Une approche concurrente a d'ailleurs émergé, en réaction, dénommée KIDS : Keep It Descriptive, Stupid ! (Edmonds & Moss, 2005). Dans cette perspective, il est important de « *conserver une approche explicative et de tâcher de rendre toute partie du modèle isomorphe (similaire de structure) aux phénomènes que l'on cherche à modéliser* » (Amblard et al., 2006). L'approche KISS privilégie donc la reproduction de structures macroscopiques observées, tandis que l'approche KIDS se focalise d'avantage sur les mécanismes sous-jacents⁶.

⁶ Le débat est aujourd'hui plus apaisé et des propositions moins tranchées ont vu le jour. En particulier, Edmonds et Moss suggèrent que nul modèle entièrement KISS ou KIDS ne saurait être suffisant et que le plus souvent c'est une combinaison des deux qu'il faut viser.

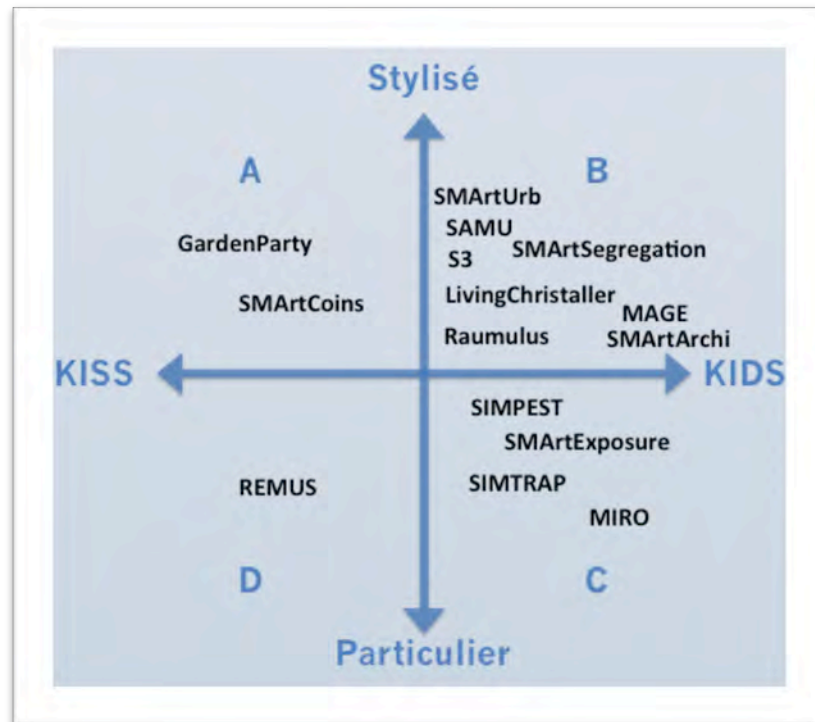


Figure 16 : Dix ans de déambulation au sein du « fer à cheval ».

Au cours des dix dernières années, j'ai navigué sans contrainte entre les quatre quadrants du « fer à cheval », développant ou contribuant à des modèles très différents, en fonction des problèmes et objectifs rencontrés (figure 16). Ce sont toutefois les quadrants B et C qui m'ont le plus occupé, mes centres d'intérêts ayant toujours été polarisés par deux grands attracteurs, la recherche fondamentale d'un côté et la recherche appliquée de l'autre. La présentation de quelques-uns de ces modèles me permettra d'illustrer ce double ancrage.

Y a-t-il un pilote dans l'avion ?

*« Human beings, viewed as behaving systems, are quite simple.
The apparent complexity of our behavior over time is largely
a reflection of the complexity of the environment
in which we find ourselves »*
–Herbert Simon¹, Prix Nobel d'Economie 1978

« People are endlessly complicated »
–Daniel Kahneman², Prix Nobel d'Economie 2002

Franck Varenne (2008) distingue fort utilement les « *modèles à visée de compréhension* » des « *modèles de simulation* » et je retiendrai sa distinction pour catégoriser les deux grands domaines au sein desquels j'ai le plus contribué. Je me focaliserai dans cette partie sur les modèles de compréhension dont la vocation est, comme leur nom l'indique, de contribuer à une meilleure compréhension des processus à l'œuvre au sein des systèmes complexes et notamment des phénomènes d'émergence dont ils sont le siège. On cite souvent « l'intelligence collective » comme exemple d'émergence sociale et, de manière générale, on a souvent tendance à associer aux processus bottom-up des vertus essentiellement positives. Pourtant, l'émergence n'a rien d'un processus vertueux et de nombreuses externalités négatives des systèmes anthropisés peuvent être considérées comme émergentes. La question du pilotage de

¹ Herbert Simon, 1969, *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, 231 p.

² Daniel Kahneman, *Maps of bounded rationality: A perspective on intuitive judgment and choice*. In T. Frangsmyr (Ed.), Nobel Prizes 2002

ces systèmes se pose alors de manière récurrente, afin de pouvoir réguler ces effets indésirables et éventuellement infléchir leur course. Toutefois, ceux qui s'essayaient à l'exercice sont rapidement confrontés à une même difficulté, typique de ces systèmes : l'absence de pilote clairement identifiable. Piloter ces systèmes est donc une gageure, mais c'est justement pour cette raison que nous avons besoin de modèles simples, dédiés à l'exploration de ces phénomènes d'émergence.

Partager l'espace, à ses risques et périls

Lorsque je me suis mis en tête de développer mon premier modèle agents, SAMU³, dans mon bureau en préfabriqué à l'INRETS, mon objectif était bien naïf : contribuer à revaloriser la marche à pied, longtemps délaissée par les pouvoirs publics et la recherche, en profitant de ce que je pressentais être un début d'aspiration générale à des modes de vie urbains moins agressifs, protégés des externalités négatives engendrées par l'invasion automobile. Il me semblait alors que mieux comprendre les déplacements des piétons dans un environnement urbain mouvant, caractérisé à la fois par un ensemble de contraintes et d'opportunités, mais également de nuisances et de dangers, pourrait devenir un enjeu important de la planification urbaine. Je formulais alors une hypothèse forte, en contradiction avec ce que les psychologues de l'INRETS me racontaient de l'irréductible complexité des processus cognitifs mobilisés dans le simple acte de traverser la route pour un piéton : en dépit de la complexité avérée des mécanismes cognitifs en jeu, la dynamique d'ensemble des interactions piétons-véhicules devait pouvoir être approchée à partir de règles individuelles relativement simples, mais intégrées dans un réseau d'interactions localisées en évolution permanente. A partir de là, je me lançais dans NetLogo en collaboration avec Sylvain Lassarre et Abhimanyu Godara, alors stagiaire à l'INRETS, et créais un environnement urbain virtuel, peuplé d'entités autonomes (piétons et automobilistes) animées par des motifs propres et agissant dans le cadre d'une architecture distribuée. Cet environnement urbain était, dans un premier temps, simplifié à l'extrême : un quadrillage de rues et de trottoirs, de type Manhattan. Quant aux entités, elles étaient guidées par des règles de fonctionnement simples, de type stimulus-réaction, la perception de l'environnement urbain et des autres agents se faisant au moyen d'un champ de vision propre à chaque catégorie d'agents (piétons et automobilistes). Il me fallait absolument un modèle de trafic pour les automobiles. J'avais travaillé pendant deux ans avec des ingénieurs trafic dans le cadre du projet européen HEARTS, et j'avais une petite idée de la difficulté et de l'ampleur de la tâche. Comment imaginer un modèle de trafic simple, qui en reproduise néanmoins les grandes caractéristiques ? La découverte du modèle d'automate cellulaire NaSch (Nagel et *al.*, 1992) fut une vraie révélation. Adapté avec Abhimanyu et Sylvain à notre problème, ce modèle permettait de faire en sorte que chaque véhicule modifie sa vitesse en fonction de celle du véhicule devant lui, tout en tenant compte de la vitesse légale autorisée et de la présence de

³ Simulation Agent et Modélisation Urbaine. Modèle et documentation disponibles depuis le site : http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/geosimul/samu/samu_english.html

limiteurs de vitesse (feux, stop) et d'obstacles (piétons en situation de traversée). L'introduction d'une distance de freinage dans l'algorithme permettait d'ancrer le modèle dans une réalité physique et autorisait ce que tous les modèles de trafic furent à tout prix : des collisions entre véhicules et avec les piétons. Par ailleurs, l'introduction d'une composante stochastique dans ce modèle déterministe permettait effectivement de reproduire le « diagramme fondamental », qui caractérise en théorie du trafic les relations fonctionnelles entre trois grandes variables du trafic automobile : la vitesse, le débit et la densité. De manière surprenante pour moi, cette capacité disparaissait si on supprimait cette composante stochastique. Bien sûr, l'idée d'injecter du bruit dans un modèle n'était pas vraiment nouvelle en ce qui me concernait, la statistique y ayant largement recours de son côté. Non, c'était plutôt le lien très étroit que cela impliquait avec l'émergence de propriétés macroscopiques qui me fascinait. Ce premier succès nous motiva beaucoup pour la composante piétonne du modèle. Nous avons alors cherché à la simplifier autant que nous pouvions. Les piétons étaient ainsi localisés au hasard à l'initialisation et convergeaient tous vers la même destination, selon un principe de descente de gradient. Après bien des tâtonnements, le comportement de traversée a finalement été modélisé au moyen d'un jeu de coordination, dans lequel l'incitation à agir des uns est une fonction croissante de l'action des autres (Taillard, 2006). Deux types de comportements de traversée ont ainsi été différenciés :

- Un comportement « raisonnable » : le piéton s'arrête et inspecte son environnement avant de traverser
- Un comportement « déraisonnable » : le piéton traverse sans s'arrêter, en aveugle

Chaque fois qu'un piéton se trouvait en situation de traversée, il adoptait alors l'un des deux comportements précédents, soit en reproduisant ses comportements passés (mémoire), soit en adoptant le comportement le plus répandu (imitation).

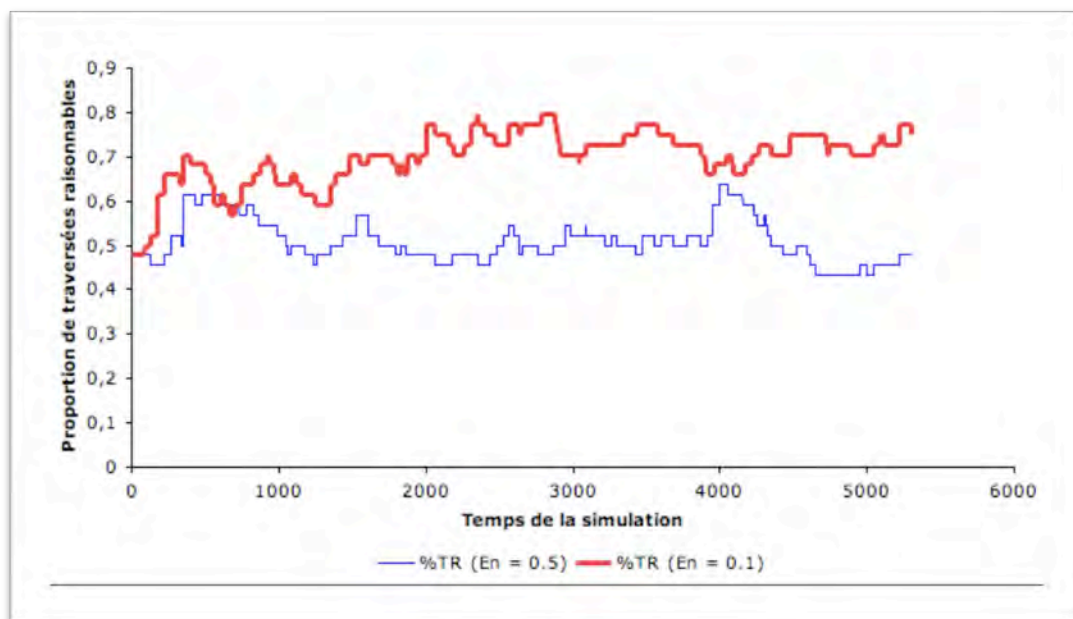


Figure 17 : Proportion de piétons traversant raisonnablement au cours de la simulation, pour deux niveaux de bruit différent ($En = 0,1$ et $En = 0,5$).

L'introduction d'une composante stochastique permettait là aussi d'obtenir de manière endogène, pour des seuils de bruit donnés, des variations intéressantes de comportement, sous forme de périodes d'équilibre ponctuées de brèves périodes de changement (figure 17). Cet algorithme dont Sylvain Lassarre avait eu l'idée, me troublait. D'un côté, je trouvais très malin cette manière de coupler comportement individuel et dynamique collectif, micro et macro. De l'autre, je ne voyais pas du tout comment valider empiriquement cette composante du modèle. Mais l'heure n'était pas à brider notre créativité par de basses contingences matérielles ! Un des intérêts de ce type de modèle me semblait justement résider dans sa capacité à générer, par simulation, infiniment plus de données que ce dont nous pouvions rêver dans la réalité. Il était en particulier possible de générer très précisément, pour un jeu de paramètres donné, les trois composantes essentielles d'un modèle de risque d'accidents, visant à mettre en relation la fréquence des accidents avec la population exposée (piétons) et le champ de danger (véhicules). La figure 18 illustre de quelle manière ces trois variables étaient obtenues par agrégation au niveau d'unités spatiales élémentaires (cellules), enregistrant en permanence les événements dont elles étaient le support.

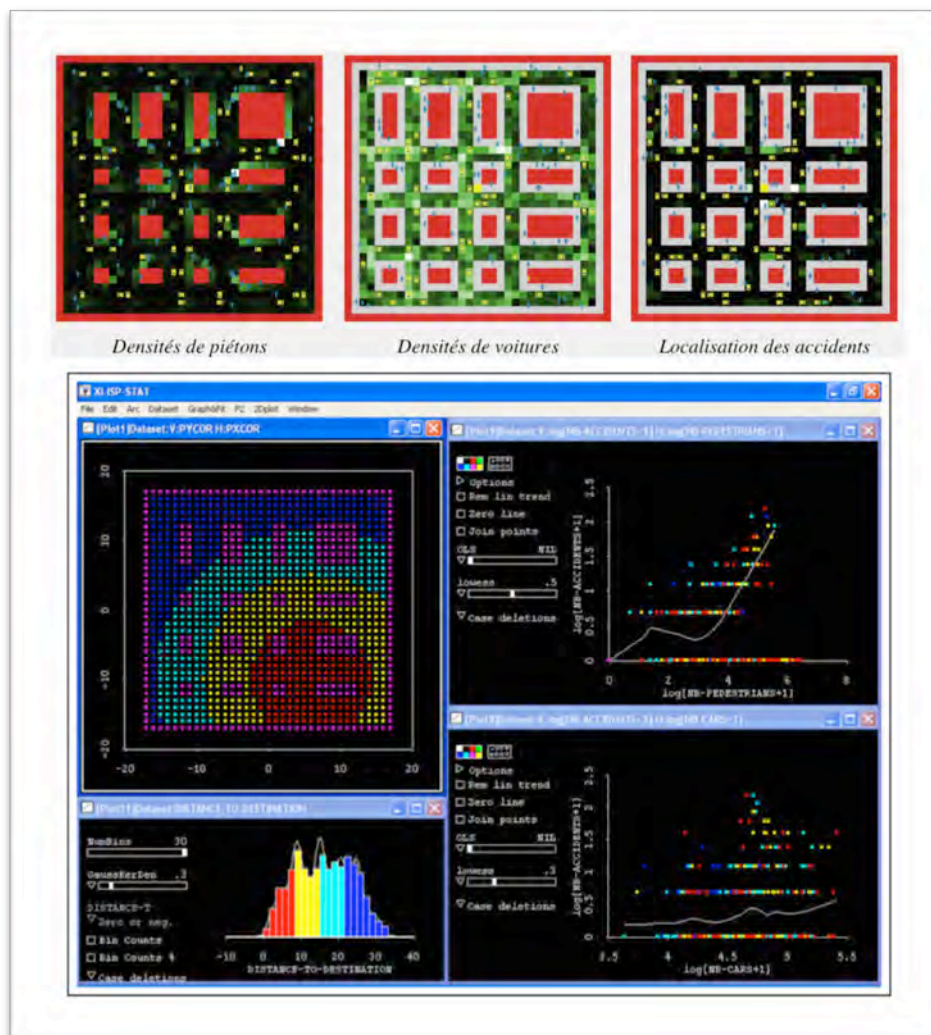


Figure 18 : Exemple de sorties de simulation permettant d'alimenter un modèle de risque dans GéoGrapheur (SAMU et GéoGrapheur).

Sur cette base, Sylvain et Abhimanyu (Lassarre et *al.*, 2007) ont pu montrer qu'un modèle statistique associant ces trois variables donnait un résultat étonnamment bon ($R = 0,814$), qui plus est proche des estimateurs empiriques classiques. L'occurrence et la localisation des accidents pouvaient bien être explorées comme émergeant des interactions entre piétons et véhicules dans un espace urbain partagé.

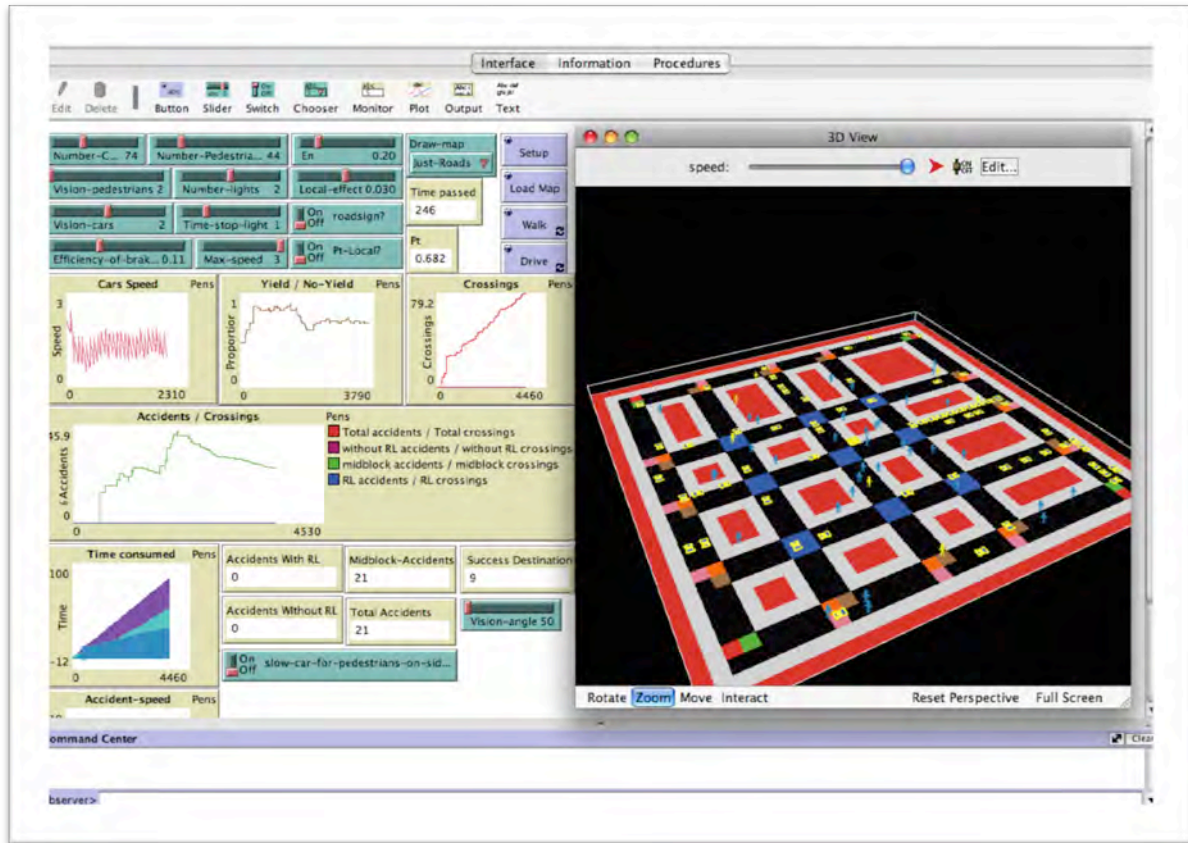


Figure 19 : « Pourtant, ça devait être simple au départ... » ou la dernière version de SAMU, avec ses nombreux paramètres (SAMU).

Lorsque je revois ce modèle, placé en accès libre sur mon site internet⁴, je suis toujours amusé de voir l'écart entre ce qu'il est devenu (figure 19) et ce que nous avons initialement prévu. « Pourtant, ça devait être simple au départ... » est une remarque qui m'est venue souvent à l'esprit depuis et qui m'a guidé dans toutes mes aventures ultérieures de modélisation.

Des métriques lentes pour maîtriser l'étalement urbain

Alors que j'étais en poste à Strasbourg, au sein de l'UMR Images et Villes, Cyrille Genre-Grandpierre m'a sollicité pour participer à un projet PREDIT qu'il coordonnait à Avignon. Je connaissais bien Cyrille pour l'avoir côtoyé en thèse à Besançon, mais n'avais jamais vraiment collaboré avec lui. L'occasion était belle : il s'agissait de tester par la

⁴ http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/geosimul/samu/samu_english.html

modélisation ses idées sur la métrique lente des réseaux (Genre-Grandpierre, 2007). Le point d'entrée était le suivant : de par leur double hiérarchisation par la topologie et la vitesse, les réseaux routiers favorisent les trajets longs en voiture et renforcent de manière endogène le processus d'étalement urbain. Cyrille avait montré, en travaillant sur différents réseaux routiers, dans différents pays, que leur efficacité⁵ croissait avec la distance parcourue (figure 20).

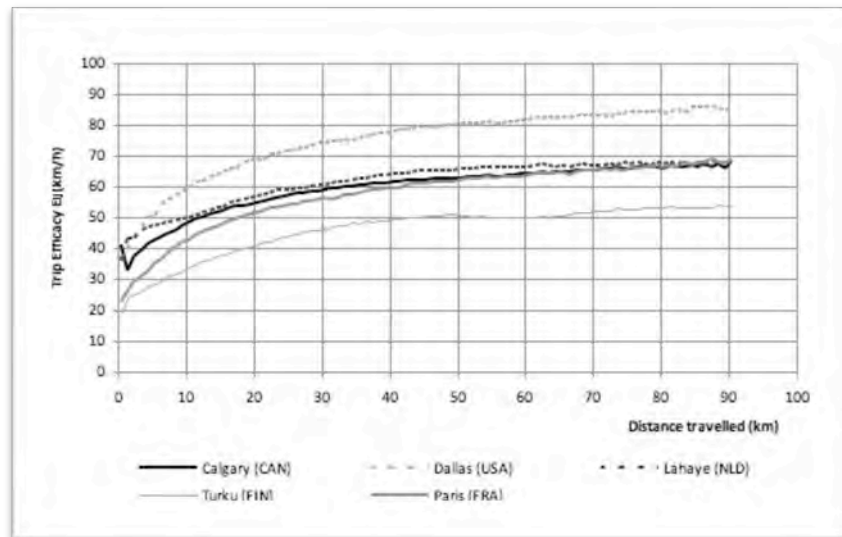


Figure 20 : La propriété « accélérante » des réseaux routiers mise en évidence par Cyrille Genre-Grandpierre (Banos et Genre-Grandpierre, 2012).

L'objectif de Cyrille était de reproduire ce phénomène par un modèle puis de tester, par simulation, des stratégies de régulation de cette propriété des réseaux routier. Ce qu'il appelait des métriques lentes. Voilà qui ne pouvait que m'intéresser ! Le pilotage des systèmes complexes est un enjeu majeur : comment influencer sur la course de ces systèmes alors même que, par définition, les processus qui les gouvernent sont très difficilement identifiables ? Je sautais sur l'occasion et entrepris de développer, avec Cyrille, ce qui allait devenir SMARtSlowSpeed (figure 21).

Il fut assez facile de reproduire la propriété accélérante des réseaux routiers, topologie et vitesse structurant fortement cette dynamique. L'inverser était une autre affaire. Mais Cyrille avait son idée. Il tournait depuis longtemps déjà autour d'une métaphore guerrière proposée par Stanley et Ostrowsky (1985). Les auteurs imaginaient un champ de bataille truffé de mines anti-personnel, regroupées en amas dont la distribution des tailles serait fractale : le nombre d'amas d'une taille donnée dépendait, selon une loi de puissance, de cette même taille. Dans ce paysage accueillant, les auteurs positionnaient des postes de commandement, s'échangeant des messages au moyen de fantassins capables de contourner les amas de mines. L'idée de base était la suivante : dans ce contexte, le temps mis par un fantassin pour relier deux postes de commandement ne pouvait pas, sur la base d'une vitesse de marche constante, être simplement proportionnel au temps. Ce temps ne pouvait croître que de manière non linéaire avec la distance.

⁵ Cette efficacité est une vitesse moyenne, calculée pour un ensemble d'origines-destinations à partir du ratio de la distance euclidienne et le temps de parcours par le plus court chemin dans le réseau.

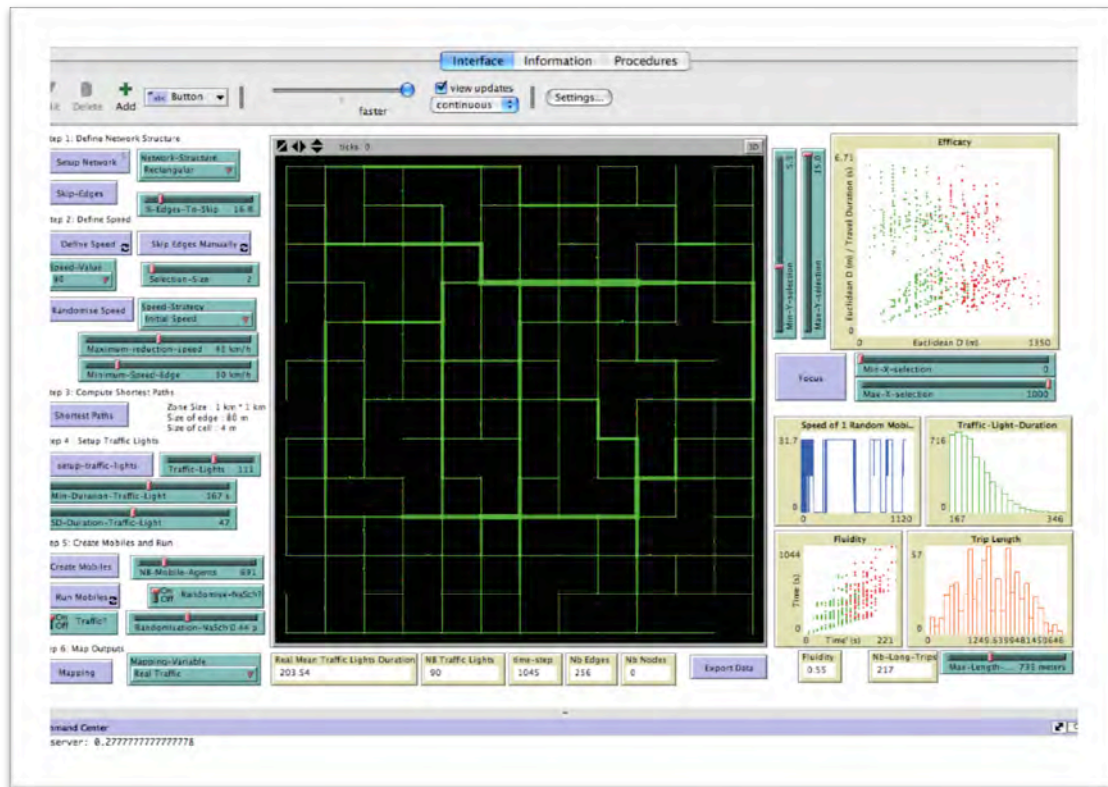


Figure 21 : Le modèle SMartSlowSpeed permet de créer des réseaux routiers selon différentes géométries, de les caractériser en terme de vitesse, puis d'y localiser des feux de signalisation selon différentes stratégies. Un modèle de trafic à base d'agents permet d'estimer l'efficacité du réseau créé.

Le lien entre cette métaphore et les réseaux routiers ? Imaginons que les feux de circulation soient ces amas de mines et que leur durée suive une loi de puissance, alors on devrait pouvoir jouer de manière efficace sur cette métrique lente que Cyrille recherchait. Bien entendu, pour avoir une chance d'être efficace, une telle mesure devait s'affranchir d'un gros problème : celui de l'adaptation des agents, qui auraient tôt fait de contourner les feux les plus longs. Mais Cyrille avait tout prévu : si la durée des feux était tirée au sort de manière régulière dans la même loi de puissance, alors s'adapter ne servait plus à rien. Les agents n'auraient plus intérêt à explorer des stratégies alternatives et le problème serait résolu. En raisonnant de cette manière, on s'affranchissait volontairement de tout un ensemble de contraintes, liées au trafic routier, à sa sécurité, à l'acceptation sociale de la part des conducteurs et, *in fine*, à l'acceptation sociale de tous ceux qu'un tel dispositif pénaliserait. Car il était évident que les individus parcourant les plus longues distances (les banlieusards et les périurbains) seraient les plus touchés par une telle mesure qui devait conduire, sur le long terme, à une possible re-densification urbaine. Mais nous avons décidé de ne pas nous positionner d'emblée dans la sphère du « socialement réaliste » et de nous concentrer sur la métrique lente. Car si le dispositif imaginé par Cyrille ne marchait pas, il devenait inutile d'envisager toutes ces complications.

A partir de là, nous avons imaginé une procédure de génération de ces feux de signalisation qui permette de maximiser leur impact tout en maîtrisant le nombre, ainsi que leur effet sur la fluidité du trafic (figure 22).

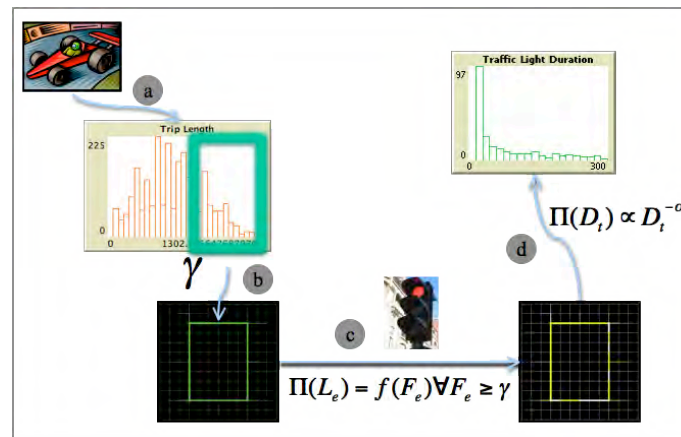


Figure 22 : La stratégie de localisation des feux de signalisation dans S³ (SMartSlowSpeed).

Il était évident que les arcs les plus empruntés par les véhicules ayant les itinéraires les plus longs devaient être ciblés. Cette première étape de sélection impliquait un calcul de plus court-chemin (Floyd-Warshall) ainsi qu'un calcul de betweenness⁶, afin de déterminer les arcs les plus mobilisés dans les itinéraires (figure 22a) et en tirer au sort un certain nombre (figure 22b). Une fois localisés sur ces arcs (figure 23c), la durée des feux était tirée au sort dans une loi de puissance (figure 24d). Il ne restait plus qu'à ajouter un modèle de trafic, adapté du modèle NaSch de SAMU, et les premières explorations pouvaient être réalisées.

Deux éléments importants ont pu être mis en évidence. Tout d'abord, la stratégie imaginée permettait bien d'introduire une métrique lente et de faire en sorte que l'efficacité des réseaux routiers décroisse avec la distance parcourue, allant dans le sens d'une possible densification urbaine. Toutefois, bien plus que le nombre de feux de signalisation, c'est la durée de ces feux qui semblait jouer un rôle clé (figure 23).

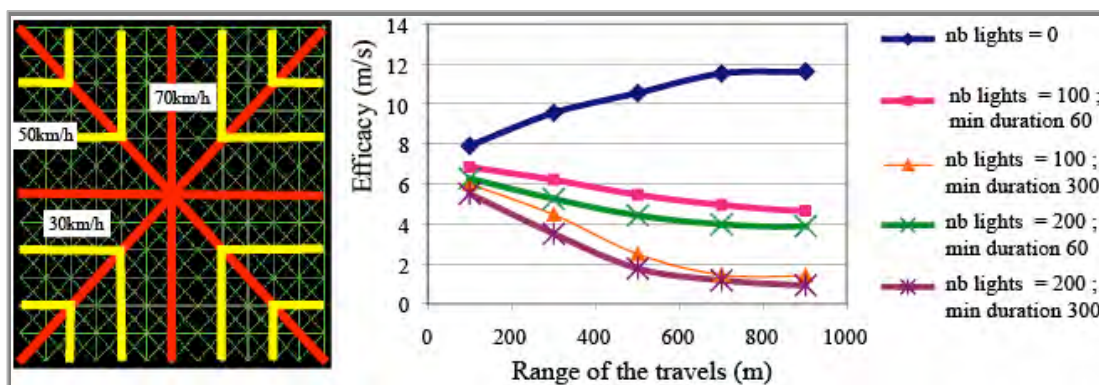


Figure 23 : La propriété « accélérante » des réseaux routiers peut être inversée au moyen d'un nombre réduit de feux de signalisation bien positionnés et de durée suffisante (Banos et Genre-Grandpierre, 2012).

Ensuite, l'utilisation fine du modèle de trafic permettait de montrer que la stratégie actuelle du laisser-faire, qui consiste à laisser le système se réguler tout seul par la congestion, produit des effets très similaires (figure 23).

⁶ Il s'agit d'une mesure de centralité dans les réseaux, tenant compte du nombre de fois où un nœud/arc appartient à un plus court chemin pour un ensemble de nœuds origine/destination.

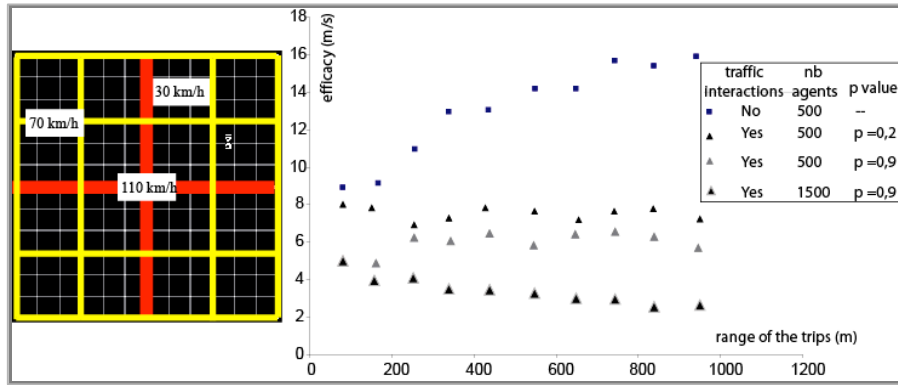


Figure 24 : La congestion routière permet d'obtenir des résultats très proches et agit déjà comme une métrique lente [*p* renvoie ici à l'étape de randomisation décrite dans SAMU] (Banos et Genre-Grandpierre, 2012).

La question de l'acceptation sociale d'une telle mesure prenait alors un sens différent, qui méritait d'être exploré plus avant : après tout, une stratégie de pilotage (les feux de signalisation) devrait être capable de produire de meilleurs résultats qu'un processus non maîtrisé (la congestion).

Cette complexité nous dépasse, feignons d'en être les organisateurs⁷

À peu près à la même époque, j'étais impliqué dans l'ANR CO-SMA-GEM (Corpus d'Ontologies pour les Systèmes Multi-Agents en Géographie, Economie, Marketing et Sociologie), coordonnée par Denis Phan. On y parlait beaucoup d'ontologies comme son nom l'indique et le modèle de Schelling était une référence commune à l'ensemble des participants, si bien qu'il était mobilisé de manière incessante dans les discussions et argumentations. Comme la plupart des collègues impliqués dans les systèmes complexes, je connaissais ce modèle comme un exemple canonique d'émergence de propriétés macroscopiques à partir de comportements microscopiques non coordonnés mais mutuellement interdépendants. Les nombreux débats autour de la question de la légitimité de ce modèle à nous apprendre des choses quant aux processus de ségrégation sociale me paraissaient excessifs et souvent déplacés, tant il est vrai que Schelling lui-même s'était bien gardé de mettre le doigt dans cet engrenage. Son modèle était purement théorique et s'inscrivait parfaitement dans le quadrant A du « fer à cheval ». Le caractère très simplifié, voire « neutre » de l'espace géographique dans ce modèle (une simple grille) ne me choquait pas non plus et je trouvais même que Schelling s'était donné bien du mal vu ses capacités calculatoires de l'époque, surtout si on comparait son travail avec celui d'un économiste plus jeune mais dont on parlait beaucoup à ce moment là, Paul Krugman. Dans son modèle de cité lisière (« *edge city* »)

⁷ Référence en forme d'hommage à un essai de François Ascher, dont les nombreux travaux ont joué un rôle central dans ma thèse et qui avait accepté d'en présider le jury. Ascher F., 2000, *Ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs. Essai sur la société contemporaine*, L'Aube, 304 p.

sur lequel je travaillais en parallèle, Krugman avait en effet réduit la ville à un ruban de Moebius, et lui avait donné le petit nom de « *race city* »).

La manière dont certains économistes ont tendance à réduire l'espace géographique à une double fonction de compartimentage et d'interactions localisées, me semble plutôt compréhensible, surtout du point de vue du modélisateur, qui cherche en général à maîtriser les différentes sources de perturbation possibles.

Paul Krugman l'exprime très clairement lorsqu'il choisit de son côté de réduire la ville à un ruban : *"I want to focus on self-organization : the emergence of structure that arises not from inherent differences among locations but from the internal logic of the system"* (Krugman, 1996).

Un tel objectif est naturellement souhaitable pour tout modélisateur, fut-il géographe. Toutefois, pour ce dernier une étape supplémentaire semble devoir être franchie. L'un des principes de base de cette discipline est en effet que la différenciation de l'espace fait partie de ce que Krugman appelle ici la logique interne du système. Autrement dit, l'espace n'est pas un simple support, mais joue un rôle actif dans la dynamique même des processus sociaux, par ses caractéristiques propres. S'affranchir dans un premier temps de la structure spatiale pour éclairer les processus de différenciation spatiale me semble acceptable. Explorer par la suite l'influence exercée par une structure spatiale elle-même différenciée l'est tout autant, notamment parce qu'une telle approche renforce les réflexions sur les actions à mettre en œuvre, par exemple au moyen de politiques d'aménagement du territoire.

Néanmoins, introduire des structures spatiales différenciées dans un modèle implique de s'affranchir d'un certain nombre de contraintes, dont certaines sont purement formelles.

Ainsi peut-on lire que « *les automates cellulaires sont des automates répartis sur les nœuds d'un réseau périodique, c'est-à-dire une structure géométrique discrète, conservée par certaines opérations de translation et de rotation* » (Weisbuch, 1989). Par la force de l'usage, cette définition initiale est quasiment devenue une position ontologique : « automate cellulaire = structure spatiale homogène », limitant de fait les possibilités d'évolution. C'est pourquoi certains auteurs ont proposé d'étendre le formalisme existant à ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui des « *automates géographiques* »⁸ (Takeyama et Couclelis, 1997 ; O'Sullivan, 2001 a, 2001b ; Moreno et al., 2009).

C'est dans ce contexte que deux publications (Fagiolo et al, 2007 ; Fossett and Dietrich, 2009) m'ont poussé à passer à l'action et à m'investir sérieusement dans ce qui était pour moi jusque là un « modèle jouet ». Ecrits par des économistes et des

⁸ De manière plus générale, la modélisation implique une formalisation mathématique et informatique explicite de l'espace géographique (Langlois, 2010). On notera que les débats anciens, dans la discipline, autour des espaces newtonien (absolu ou de position) et leibnizien (relatifs ou de situation), sont au cœur du « [spatial computing](#) » (Giavitto, 2003 ; Michel, 2007). Re-visiter ces débats géographiques à la lueur des développements récents en informatique me semble faire partie de ces occasions interdisciplinaires à ne pas manquer.

sociologues, ces articles prétendaient montrer, simulations à l'appui, que « *l'espace ne comptait pas dans le modèle de Schelling* » et que le moteur de la dynamique était exclusivement comportemental. En tant que géographe, cette démonstration me semblait étonnante. Envisagée du point de vue des systèmes complexes, rompue de longue date aux effets de réseaux, elle devenait carrément suspecte.

Avant d'aller plus loin, revenons à la source. Que dit le modèle de Schelling ? Prenons un nombre pair n de ménages, dont $n/2$ de couleur x et $n/2$ de couleur y , localisés au hasard sur $(n + m)$ cases d'un échiquier et donnons leur la règle de comportement suivante : si la proportion de ménages de couleur y dans le voisinage d'un ménage de couleur x est supérieure à un seuil λ , alors ce ménage déménage vers une des m cases libres possédant une proportion de ménages de couleur x inférieure au seuil λ .

Bien entendu, on imagine sans trop de peine que si la valeur du seuil λ est faible (tolérance faible), la dynamique de relocalisation des ménages va conduire rapidement à une organisation spatiale très structurée, marquée par une séparation plus ou moins nette entre les deux types de ménages. Ce qui est plus surprenant et qui a fait le succès de ce petit modèle c'est le paradoxe suivant : même si la valeur du seuil λ est élevée (par exemple 70% de voisins de couleur différente tolérés), la dynamique du modèle va quand même tendre à séparer spatialement les deux catégories de ménages : au final, les ménages n'auront pas en moyenne 70% de voisins de couleur différente, mais plutôt 30%. Autrement dit, « *l'agrégation de demandes individuelles modérées produit un effet de ségrégation qui excède largement ces demandes et les caricature* » (Boudon, 1984).

Cette dynamique ségrégative soulignée par Boudon me semblait pouvoir être renforcée par certains effets des réseaux spatiaux, notamment les effets de cliques, définies comme des sous graphes constitués de sommets deux-à-deux adjacents (Wasserman et Faust, 1994). Mon hypothèse était que ces cliques pourraient agir comme des attracteurs locaux, des « trappes » à ségrégation (figure 25), qui se constitueraient assez rapidement dans la dynamique du modèle de Schelling et ce, de manière irréversible, compte tenu de l'importance des contacts intra-groupe par rapport aux contacts inter-groupes.

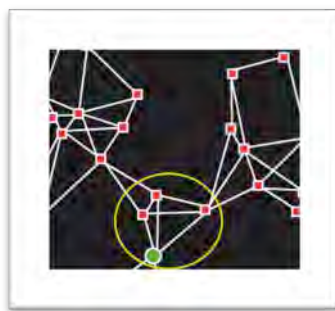


Figure 25 : Illustration de possibles effets de cliques dans la dynamique ségrégative du modèle de Schelling : les nœuds interfaces (entourés) verrouillent les deux cliques du haut et en bloquent l'évolution (SMArtSegregation).

Afin de tester cette hypothèse, j'ai donc construit un générateur de réseaux géographiques se différenciant par l'existence de cliques.

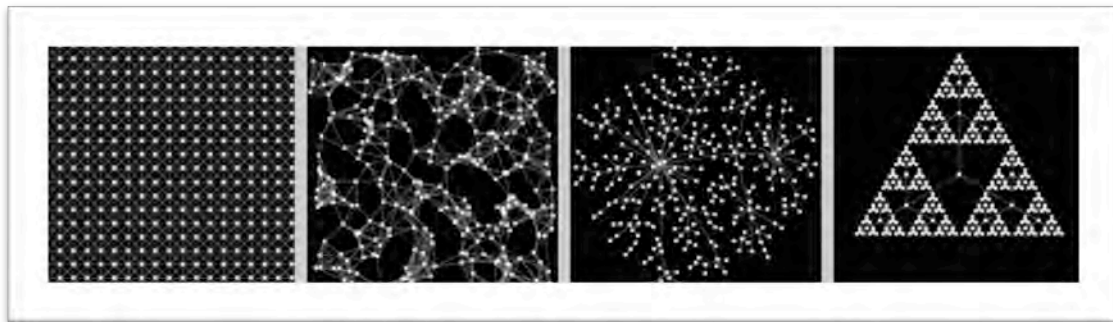


Figure 26 : Quatre réseaux de taille et densité identiques et présentant des effets de cliques croissant de gauche à droite (SMArtSegregation).

L'application du modèle de Schelling dans ces différents réseaux produit bien l'effet escompté. Non seulement la dynamique ségrégative est partout à l'œuvre (figure 27), mais en plus elle est significativement renforcée par les cliques (figure 28).

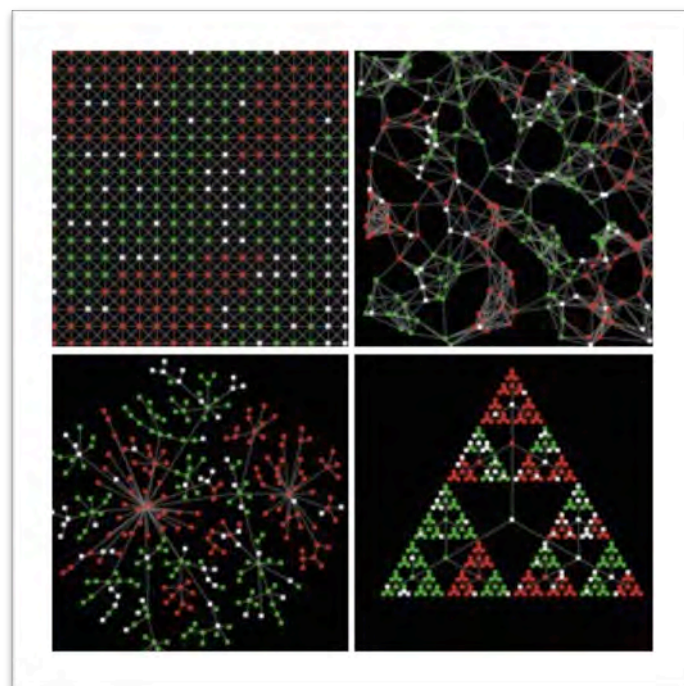


Figure 27 : Exemples de configurations spatiales obtenues après convergence (SMArtSegregation).

Encore mieux : l'introduction d'une faible dose de bruit (celui là même dont j'avais découvert les propriétés avec SAMU) permet de converger vers un équilibre pour des seuils de tolérance très faibles voire nuls, dans le cas des réseaux hiérarchisés présentant de forts effets de clique (réseaux invariant d'échelle et fractal ici). Avec ce petit coup de pouce, le modèle de Schelling devient alors un algorithme de partitionnement de l'espace en communautés mutuellement exclusives.

Au-delà des nombreuses critiques qui ont pu être formulées à l'encontre du modèle de Schelling, et dont certaines me semblent justifiées, ce modèle mérite notre

attention. Il souligne en effet de manière remarquable les possibles effets pervers de décisions individuelles interdépendantes mais non coordonnées et notamment le fait que l'agrégation d'utilités individuelles ne correspond pas forcément à un optimum collectif. Il s'agit donc moins, à mon sens, de le voir comme « le » modèle générique de ségrégation que comme « un » modèle de ségrégation, centré sur un mécanisme spécifique d'amplification de fluctuations locales conduisant, dans certaines configurations de l'espace des paramètres, à des situations de ségrégation, toutes choses étant égales par ailleurs.

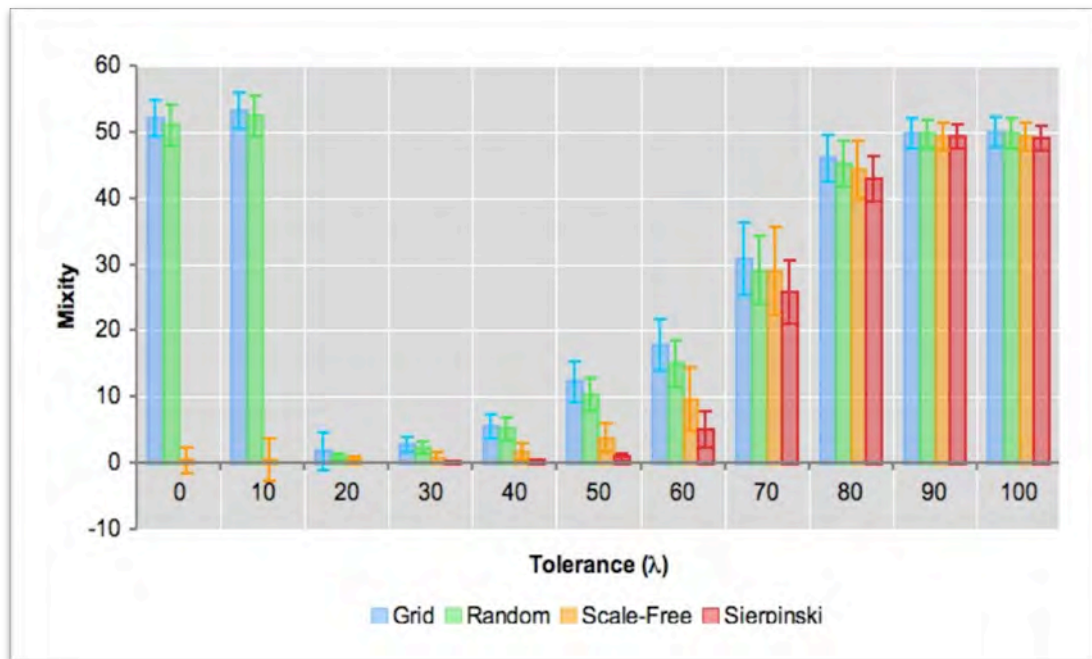


Figure 28 : Influence du seuil de tolérance sur le niveau de ségrégation globale (« Mixity »). Lorsque la tolérance est élevée, les quatre types de réseaux montrent une forte mixité. Celle-ci décroît très rapidement lorsque la tolérance baisse, mais significativement plus vite pour les réseaux invariant d'échelle et fractal. Seuls ces deux réseaux permettent de converger vers un équilibre pour les seuils de tolérance inférieurs à 10%. Les intervalles de variation ont été obtenus à partir de 1000 répliques (SMArtSegregation).

Le modèle SMArtSegregation suggère l'existence d'un effet réseau, perturbant de manière significative la dynamique même du modèle et orientant sa course vers ces attracteurs que constituent les cliques. Les structures urbaines fractales, qui ont pu être proposées et défendues pour leur capacité à favoriser à la fois la mixité et l'accessibilité (figure 29), seraient alors plus vulnérables au processus de ségrégation sociale à la Schelling. Cette apparente contradiction entre mixité des fonctions et mixité des populations souligne bien la nécessité d'encourager des approches davantage intégrées de la complexité des organismes urbains.

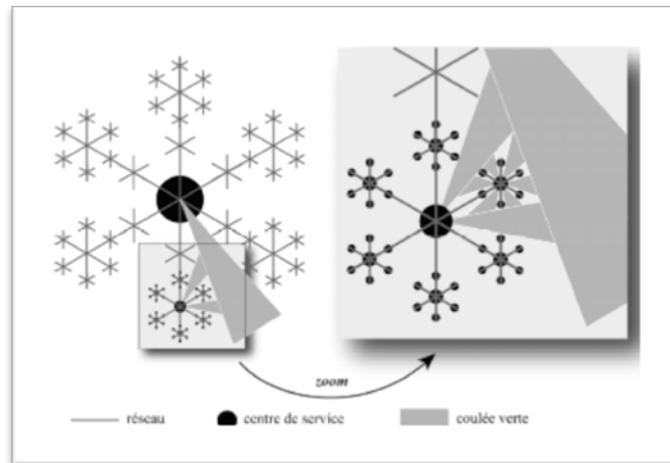


Figure 29 : Une structure spatiale urbaine fractale favoriserait à la fois la mixité des fonctions urbaines et l'accessibilité des populations à ces fonctions (source : Frankhauser et al., 2007).

Explorer par la modélisation est devenu une seconde nature chez moi. Bien sûr, une telle démarche possède un prix. Elle doit en effet s'ancrer dans une culture élargie (mais toujours incomplète) de la modélisation aussi bien que du domaine thématique, que la collaboration avec des spécialistes de ce domaine, aussi riche soit elle, ne permet pas toujours de compenser. Pourtant, ces années de pratique m'ont convaincu du rôle heuristique considérable que peuvent jouer certains modèles simples, dans des contextes appropriés. Au-delà, leur mise en œuvre prépare à des collaborations interdisciplinaires plus pointues, autour de modèles de simulation d'une toute autre ampleur.

A la conquête de la fourmilière urbaine

« All models are wrong, but some are useful »

–George Box

On ne saurait renier ses origines. Depuis ma thèse avec Keolis, en passant par mon postdoc à l'INRETS, la problématique de la mobilité individuelle dans des espaces porteurs de contraintes, mais également d'opportunités, a toujours éveillé mon intérêt. Avec SAMU, j'avais découvert que la modélisation à base d'agents pouvait y jouer un rôle important. Deux projets considérables, par la taille et la durée, m'ont par la suite permis d'explorer plus avant ces possibilités et de participer au développement de modèles de simulation. Contrairement aux modèles de compréhension développés précédemment, ces modèles de simulation visent à reproduire un système, éventuellement en couplant des processus dont certains ne sont pas bien compris. La comparaison de scénarios devient alors un exercice possible, quoique toujours délicat à mettre en œuvre.

Faisons les marcher : de MAGE¹ à SIMTRAP²

Depuis SAMU, j'avais un peu laissé de côté la question de la mobilité des piétons. C'est en croisant Angèle Paré-Charpentier lors d'une conférence que mon intérêt a été réactivé. Angèle réalisait une thèse de géographie en CIFRE à la RATP et elle travaillait

¹ Modélisation Agent à Grande Echelle

² Simulation of exchanges between TRains And Platforms

sur les déplacements des usagers au sein des stations de Métro. Elle utilisait pour cela un modèle développé pour la RATP par une société privée, modèle qui contraignait sa démarche. Ce modèle, fermé, ne souffrait en effet aucune modification. Par ailleurs, le moteur comportemental des piétons, au cœur de ses préoccupations, ne lui était pas accessible. Enfin, ce modèle ne lui permettait pas de tester des scénarios d'aménagement et d'adopter l'approche expérimentale de type « si-alors », qu'elle cherchait pourtant à mettre en œuvre. En discutant avec elle il devint évident que le modèle piéton de SAMU était à des années lumières de ses besoins. Il était bien trop théorique et approximatif pour être simplement adapté à ce nouveau problème. Je connaissais un peu la littérature sur le sujet, mais pas suffisamment. Une immersion plus poussée suffit à me convaincre de l'intérêt de cette collaboration.

En premier lieu, pour le gestionnaire des espaces publics de transport, au sein desquels les expériences *in vivo* sont difficiles à mener, la simulation des déplacements piétons reste un moyen avantageux d'explorer les flux, tant dans des perspectives fonctionnelles que sécuritaires.

En second lieu, les approches traditionnelles, encore largement mobilisées au sein de la RATP, s'appuyaient de manière privilégiée sur des approches macroscopiques, inspirées des théories cinétiques des fluides et des gaz et réduisant les interactions interindividuelles à une dimension marginale. Ces approches globales visaient notamment à dimensionner les espaces par le calcul de leurs capacités d'accueil, déduites à partir des débits théoriques des différentes zones de circulation (escaliers, couloirs, portes de sorties, tourniquets...). En accord avec la théorie du trafic, ces débits étaient estimés à partir des vitesses de marche mesurées, des densités observées et de la relation fondamentale unissant ces trois variables. Dans une telle perspective l'obtention de données d'observation spécifiques aux espaces étudiés était et reste un enjeu clé, toujours problématique. Des protocoles expérimentaux continuent ainsi à être proposés mais restent difficiles à reproduire de manière systématique dans des contextes différents.

En troisième lieu, les approches microscopiques développées, afin de dépasser les limites des approches macroscopiques précédentes, n'étaient pas pleinement satisfaisantes. La plupart de ces travaux plus récents étaient ainsi centrés sur l'émergence de comportements collectifs à partir de comportements individuels simples. Le modèle de forces sociales de Helbing (Helbing et *al.*, 2001), très en vogue à l'époque, semblait prometteur. Inspiré de la dynamique moléculaire des flux granulaires, ce modèle avait permis de montrer que, dans certaines conditions, il était possible de reproduire l'émergence de comportements collectifs non centralisés, tels que la formation de files au-dessus d'une densité critique de piétons, les changements oscillatoires de la direction de marche aux passages étroits, l'apparition temporaire de circulation giratoire aux intersections. Ces travaux s'appuyaient toutefois sur une représentation particulièrement simplifiée de l'environnement urbain (un couloir, une place, un pont) et des stratégies et motivations des piétons.

Or, par construction, l'espace d'une station de métro est fondamentalement hétérogène et anisotrope, combinaison de zones accessibles et inaccessibles, d'obstacles, de générateurs de flux, d'attracteurs et de directions plus ou moins imposées. Par ailleurs, le modèle devait pouvoir s'intégrer dans le calendrier de la thèse d'Angèle et

devait être réalisable sur un temps relativement court. Enfin, ces nouvelles approches n'étaient pas vraiment connues au sein de la RATP et je souhaitais éviter un découplage trop important, qui aurait rendu la collaboration plus difficile.

Nous sommes donc partis des propriétés structurelles et fonctionnelles des espaces accessibles aux usagers dans les stations de métro. Nous avons cherché à enrichir cet espace physique, en y distinguant des points de repères et des directions préférentielles. Dans cette perspective, nous nous sommes inspirés de travaux classiques en géographie montrant le rôle structurant joué par certains nœuds et points de repères sur la représentation mentale que les individus se font de leur environnement (Lynch 1998 ; Cauvin, 1999). Un graphe d'orientation a ainsi été créé (figure 30), les sommets de ce graphe étant définis comme des points de décision localisés, et ses arêtes comme des orientations privilégiées entre sommets adjacents. Un point de décision pouvait être vu comme un pivot, un lieu où un choix d'orientation s'impose. Ce point pouvait correspondre, dans l'espace physique de la station, à un point de repère (panneau de signalisation), un service particulier (magasin, guichet, automate...), ou simplement à une intersection.

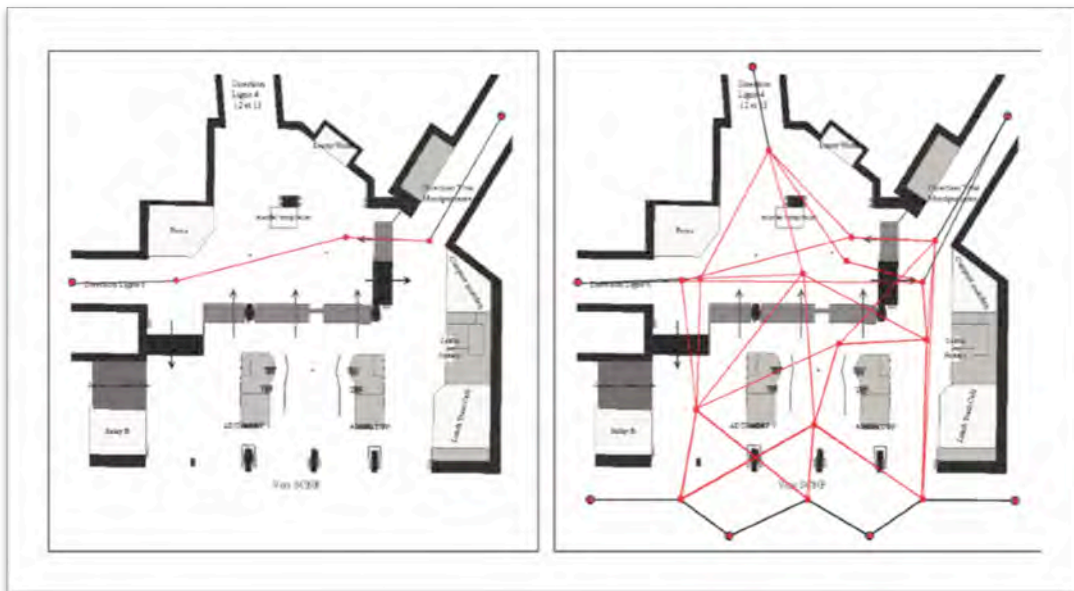


Figure 30 : Adjonction d'un graphe d'orientation à l'espace physique de la station de métro Montparnasse (MAGE).

Une fois l'environnement ainsi défini, il devenait possible d'y injecter des agents, dans un premier temps très simplifiés, dont la tâche consistait à atteindre une destination à partir d'une origine fixée. Sur leur chemin, ces agents devaient interagir avec leur environnement physique proche, ainsi qu'avec d'autres voyageurs éventuellement croisés. L'itinéraire global de chaque agent était fixé à l'initialisation à partir du graphe d'orientation, en fonction du couple origine-destination affecté à l'agent. Néanmoins, cet itinéraire pouvait également évoluer en fonction des attracteurs (un magasin, un distributeur de billets, un marchand ambulant...) rencontrés par l'agent au cours de son déplacement et des choix qu'il effectuait localement.

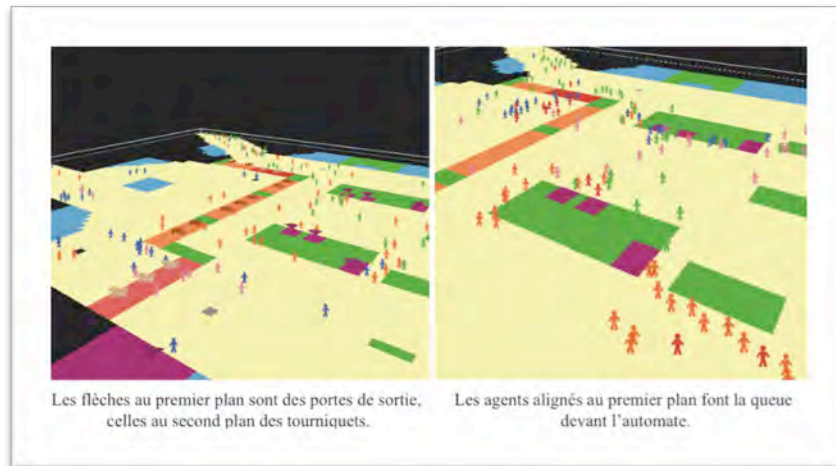


Figure 31 : MAGE en action (MAGE).

Sur une telle base, il devenait possible d'intégrer la plupart des spécifications des spécialistes à la RATP, y compris les files d'attente devant les automates (figure 31). Bien entendu, le modèle gagnait rapidement en complexité mais nous avons réussi à garder le lien avec la RATP, ce qui était l'un des objectifs. Nous savions qu'il nous serait impossible, dans le temps imparti, de spécifier correctement les propriétés de MAGE. Nous n'avions ni le temps ni les moyens (à l'époque je ne connaissais pas encore l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France) de réaliser des plans d'expériences afin d'explorer de manière systématique le comportement du modèle dans l'espace de ses paramètres. Nous souhaitions pourtant que ce modèle soit notre cheval de Troie à la RATP. La manifestation concrète d'une première collaboration fructueuse, avec des résultats approximatifs mais prometteurs (figure 32), qui pourraient fleurir par la suite.

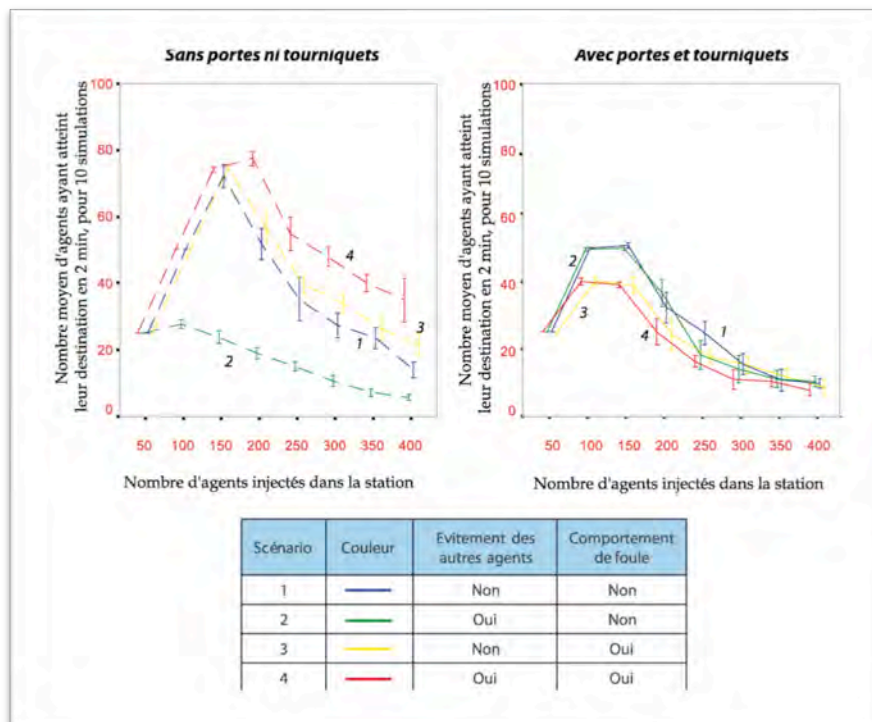


Figure 32 : Diagramme débits-densités obtenus à partir de flux bi-directionnels, pour plusieurs scénarios (l'intervalle de variation autour de chaque point a été obtenu à partir de 10 répliques) (MAGE).

C'est à ce moment là que je pris conscience de la nécessité de disposer de ce que j'appelais instantanément des « modèles kleenex », à usage unique et jetable. L'objectif principal de MAGE était de convaincre en interne, à la RATP, de l'intérêt et du potentiel de ces nouvelles approches. Le modèle devait forcément perdre en généralité et en optimalité ce qu'il gagnait en spécificités métiers et en intelligibilité pour les spécialistes de la RATP. Il fallait également accepter d'investir du temps et de l'énergie dans un modèle qui était destiné, dès le début, à une vie courte et limitée. A l'époque, j'avais essentiellement l'expérience de SAMU en tête, modèle dans lequel je m'étais beaucoup investi et qui continuait à vivre indépendamment de moi grâce aux travaux d'expérimentation que continuaient à mener Sylvain Lassarre et Abhimanyu Godara. Envisager ma pratique de modélisation sous cet angle là ouvrait de nouvelles perspectives, mais avait également une conséquence importante : je devais absolument améliorer mes performances de modélisateur, afin que chaque nouveau modèle me coûte un peu moins de temps et d'énergie. Moi qui n'avais jamais suivi de cours de modélisation ou d'informatique, je sentais que seule l'amélioration de cette fluidité me permettrait d'intégrer réellement la modélisation au cœur de ma démarche exploratoire. En maîtrisant suffisamment les méthodes et outils, il deviendrait plus facile de se concentrer sur les problèmes à résoudre. C'est dans cet esprit que, dans la foulée de MAGE, je collaborais avec Nadir Tazdait, un architecte de la société ReadyMade, qui m'avait sollicité dans le cadre du projet de rénovation du hall d'accueil de la Cité des Sciences et de l'Industrie, à Paris. Cette opération coup de poing, dans la plus pure tradition des appels d'offres architecturaux, me permettait à la fois d'améliorer mes temps de réactivité, mais également de continuer à explorer les relations entre forme et fonctionnement, structures et processus.

Cette nouvelle collaboration était amusante : l'architecte imaginait un nouveau hall d'accueil pour la Cité des Sciences (figure 33) et je devais en déduire l'utilisation qui en serait faite par les usagers.

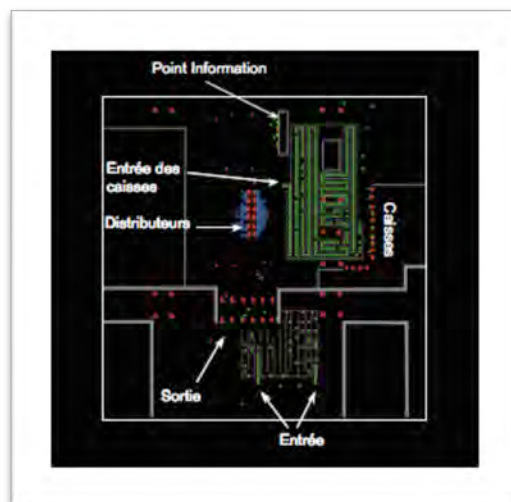


Figure 33 : Un scénario de ré-aménagement du hall d'accueil de la Cité des Sciences et de l'Industrie (SMArtArchi).

Pour cela, nous pouvions disposer de données d'enquêtes et de comptages, mais également d'informations assez précises sur les temps moyens de transaction aux guichets et automates, ainsi que sur l'utilisation qui était faite de ces deux modes d'achat

des tickets d'entrée. Les scénarios définis étaient extrêmement précis (figure 34), bien plus que dans le cadre de ma précédente collaboration avec la RATP, et permettaient la mise ne œuvre d'une véritable démarche comparative.

Nb caisses fonctionnelles	10
Nb automates fonctionnels	12
Durée transaction information	100s
Durée transaction ticket	100s
Durée transaction automate	30% 30s ; 70% 100s
Période simulée	1h
Vitesse de marche maximum	5 km/h

Figure 34 : Exemple de paramètres d'un scénario de simulation.

Le modèle permettait de hiérarchiser différentes propositions et d'identifier les lignes de force et de faiblesse des aménagements imaginés (figure 35). La détection des possibles points de friction des flux était également rendue possible et permettait d'affiner les propositions architecturales.

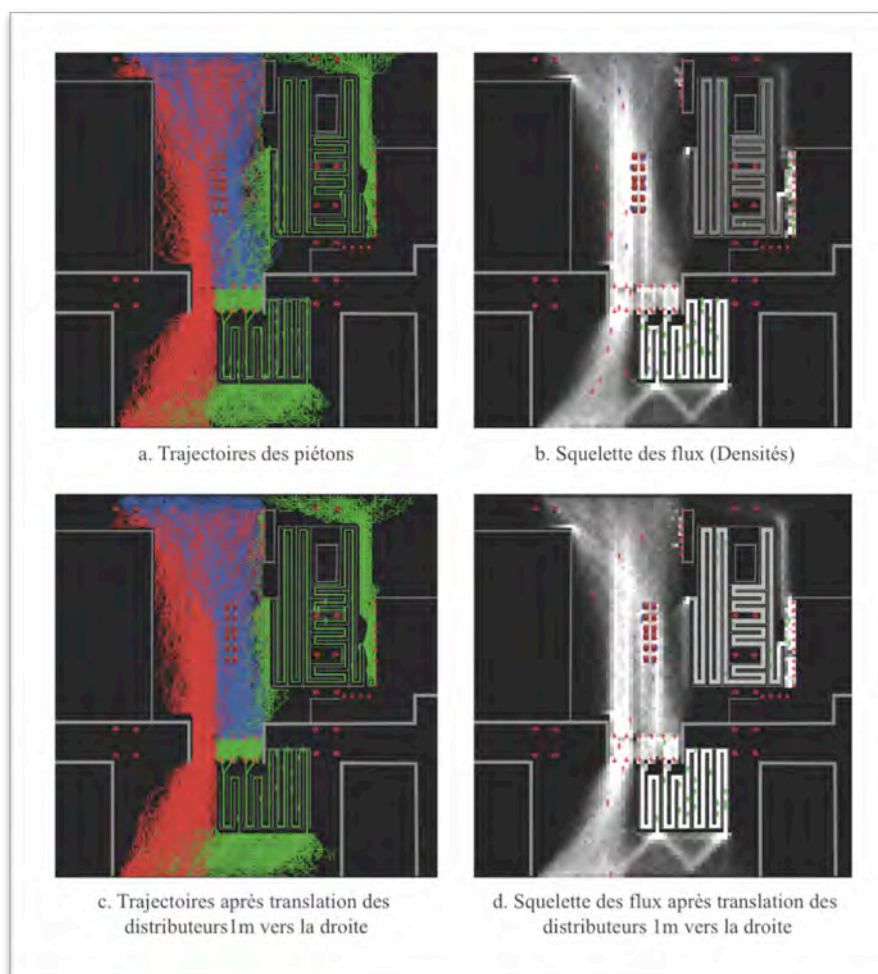


Figure 35 : Les lignes de force révélées (SMArtArchi).

Cette brève incursion dans le monde de l'architecture avait achevé de me convaincre de l'intérêt de ces approches à base d'agents pour l'exploration de la mobilité piétonne dans des espaces construits. J'avais gagné en fluidité et en réactivité, mais je sentais que mes compétences en terme de formalisation et de développement atteignaient un palier. Il me fallait faire évoluer ma démarche et intégrer des vrais spécialistes dans mes collaborations. Mes relations avec la RATP étaient alors au beau fixe et je décidais de leur proposer l'aventure d'une thèse CIFRE, cette fois ci en co-cadrement avec un informaticien, spécialiste de ces questions. Cyrille Bertelle, Professeur d'informatique au Havre et l'un des piliers de ce qui allait devenir par la suite l'Institut des Systèmes Complexes en Normandie, accepta avec enthousiasme de jouer le jeu. Ainsi est né le projet SIMTRAP, porté par Jérémy Fiegel dans le cadre de sa thèse en informatique.

Depuis l'expérience de MAGE, la RATP entrait dans une phase d'acquisition de matériel roulant et son intérêt avait évolué vers la problématique des échanges quai-trains et la question du dimensionnement et des performances des solutions disponibles se posait avec acuité. Non seulement notre échelle d'analyse évoluait significativement, mais nos interlocuteurs à la RATP changeaient et nous nous retrouvions dans la situation initiale de MAGE : il nous fallait convaincre. Sur la base des expériences précédentes, il était évident qu'un tel modèle ne pourrait voir le jour et éventuellement être utilisé en interne que s'il était co-construit avec les collègues de la RATP. Nous ne pouvions pas leur livrer un modèle clés en main, pas plus que nous ne pouvions recueillir leurs spécifications pour les intégrer dans un modèle. Il nous fallait réellement construire ce modèle avec eux, afin qu'ils se l'approprient d'une part, mais également afin d'exploiter toute leur expertise et les connaissances non formalisées qu'ils réunissaient sur le sujet des échanges quai-trains. De ce point de vue, le modèle devait jouer un rôle de médiation et faciliter ces échanges et ces transferts de connaissances. Il devait constituer un socle commun et partagé à partir duquel l'interdisciplinarité pourrait se construire et s'établir dans la durée. Pour cela, il fallait que le modèle soit expressif pour les non spécialistes et qu'il puisse être modifié facilement, éventuellement en temps réel, afin d'intégrer leurs spécifications. Clairement, je souhaitais que nous nous placions collectivement dans une démarche abductive et je pensais que le modèle pouvait jouer un rôle de facilitateur. Ce positionnement global, qui était également un pari, nous a incité à utiliser NetLogo comme plateforme de développement, alors même que nous étions partis au départ sur des environnements mieux adaptés à la complexité du modèle que nous envisagions. Co-construire le modèle était plus important que ses performances propres. Je retrouvais ici le point de vue de Tukey sur la puissance d'une méthode, définie comme produit de sa puissance mathématique et de sa probabilité de mise en œuvre. Par ailleurs, nous savions pouvoir étendre considérablement les capacités de NetLogo, en termes de puissance et de rapidité de calcul notamment, en exploitant au maximum ses liens avec des bibliothèques java externes.

Le modèle développé (figure 36) n'a plus rien à voir avec MAGE. Il dépasse tout ce que j'aurais pu concevoir et imaginer seul. Et le moment où nos collaborateurs de la RATP s'en sont réellement emparés, intellectuellement et psychologiquement, reste une des plus belles expériences d'interdisciplinarité de ma carrière.

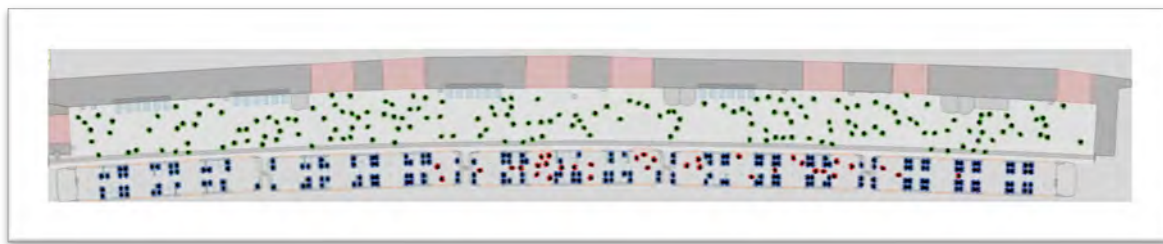


Figure 36 : Le modèle SIMTRAP (SIMTRAP).

Des trajectoires individuelles à la ville en mouvement

Peu après la fin de ma thèse à Besançon, j'ai collaboré avec Thomas Thévenin alors en train d'achever la sienne. Nous avons travaillé à maintes reprises ensemble dans le cadre du très fermé « club gazoil³ » du laboratoire ThéMA. Cette fois-ci il s'agissait de mettre en évidence les rythmes urbains quotidiens d'une agglomération à partir de données hétérogènes et incomplètes. La difficulté provenait de notre volonté de changer de niveau d'observation, des trajectoires individuelles à la ville en mouvement. Le modèle développé à cette occasion dans GéoGrapheur était de type Monte-Carlo, affectant des dizaines de milliers d'individus dans l'espace urbain sur la base de distributions de probabilités empiriques, construites à partir de données statistiques et géomatiques très hétérogènes. Le résultat obtenu, valorisé sous forme d'une animation cartographique (figure 37), nous a ouvert les portes d'un programme national de recherche sur les transports, le PREDIT.

Portés par notre élan, alors même qu'aucun de nous n'avait de poste, nous nous sommes en effet aventurés à répondre à un appel d'offre du PREDIT. Comme responsable statutaire, nous avons sollicité Christophe Lang, maître de conférence en informatique à l'Université de Franche-Comté. Nous avons déjà travaillé avec Christophe dans le cadre d'un projet interdisciplinaire coordonné par Didier Josselin et nous y avons pris goût.

L'objectif du projet que nous envisagions était de coupler trajectoires individuelles et palpitations du territoire, de manière à plonger au cœur du moteur des rythmes urbains quotidiens.

³ Jérôme Bolot en était le troisième et dernier membre. Nous nous étions retrouvés affublés de ce surnom délicat parce que nous étions les seuls membres du pôle Paysage de ThéMA à ne pas faire du paysage, mais à travailler sur des questions de mobilité et de transport.

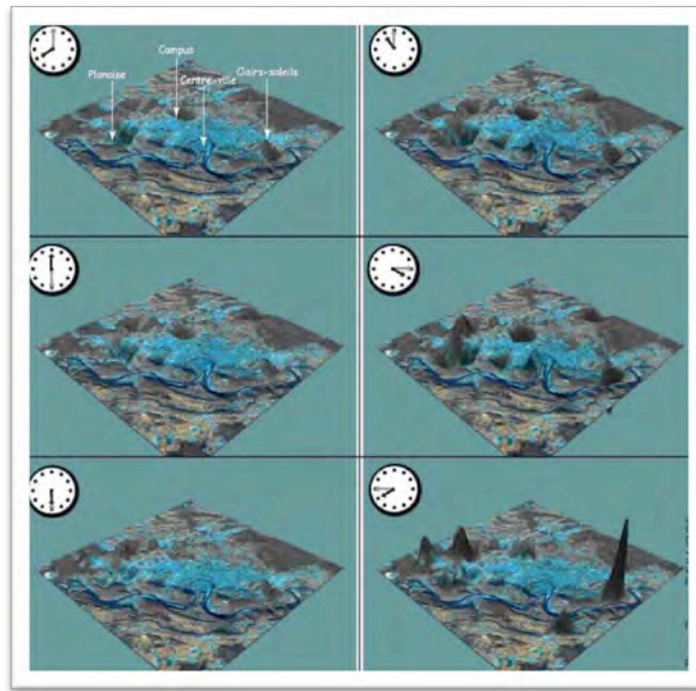


Figure 37 : Les palpitations du territoire révélées (Banos et Thévenin, 2005).

Pourtant, autant nous étions à l'aise avec le niveau macroscopique, autant le niveau microscopique nous échappait⁴. Il nous manquait cette compétence dans le projet. Sonia Chardonnell était toute désignée pour jouer le quatrième mousquetaire. Je connaissais Sonia depuis ma période grenobloise chez Pierre Dumolard, où elle effectuait sa thèse sur la Time Geography. Elle en était devenue une experte incontournable et en discutant avec elle il s'avéra qu'un rapprochement osé pourrait nous permettre d'avancer. Time Geography et systèmes multi-agents semblaient en effet reposer sur des ontologies suffisamment proches pour être compatibles. Voilà qui valait la peine d'être tenté. L'objectif devenait alors d'explorer, par la simulation et en partant des individus, les rythmes urbains quotidiens. La Time Geography nous permettrait de définir un ensemble de contraintes s'exerçant sur les agents et, en les plongeant dans un univers urbain virtuel, nous espérions être capable de mieux comprendre la manière dont ces comportements individuels non coordonnés, sous contraintes de temps de d'espaces, menaient à l'émergence de la ville en mouvement. Mis à part Christophe Lang qui avait effectué sa thèse dans le domaine, nous n'y connaissions pas grand chose en simulation multi-agents. Nous avons alors décidé d'affecter l'essentiel du budget demandé au financement d'une allocation doctorale en informatique. C'est ainsi que Nicolas Marilleau a rejoint l'équipe. Bien des années plus tard, nous collaborons toujours dans le cadre de MIRO, devenu un projet ANR.

Très rapidement, il s'avéra que le rapprochement entre Time Geography et systèmes multi-agent était fécond. Non seulement les principes fondamentaux de la Time Geography (figure 38) se formalisaient aisément, mais en plus leur intégration dans un SMA leur conférait une portée nouvelle. Les contraintes qui s'exerçaient sur les

⁴ J'étais assez versé à l'époque dans la théorie des choix discrets, ayant mobilisé dans le cadre de ma thèse les travaux de McFadden et ceux de Ben Akiva-Lerman, mais je n'étais guère motivé pour m'investir dans un modèle de micro-simulation dont je pressentais toutes les difficultés et les limites.

agents pouvaient évoluer de manière dynamique, au gré des transformations de l'espace urbain dans le temps court d'une journée.

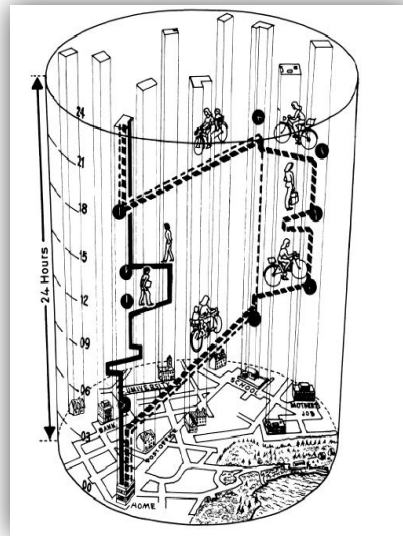


Figure 38 : L'aquarium spatio-temporel de la Time Geography. Les individus sont localisés de manière indissociable dans le temps et l'espace (Source : Couclelis, 1992.)

La ville et les individus étaient plongés dans des cycles courts de co-évolution. Mieux, les agents pouvaient s'adapter à leur environnement et faire évoluer leurs propres stratégies, en fonction de leurs succès et échecs passés. En rejouant un grand nombre de fois la même journée, avec les mêmes agents, nous pouvions les observer s'adapter et trouver des solutions pratiques à de difficiles problèmes d'optimisation sous contrainte spatio-temporelle. Puisque tout semblait possible, nous pouvions nous permettre de rêver en grand. En couplant des données décrivant l'espace urbain, à la fois en terme de structure et de fonctionnement, nous allions pouvoir créer des villes virtuelles plus vraies que nature (figure 39). Ces villes ne demanderaient plus qu'à être peuplées d'agents virtuels eux mêmes très réalistes, créés à partir de données socio-démographiques et d'enquêtes. Plongés dans un environnement urbain qu'ils ne connaîtraient que de manière très imparfaite (grâce à l'ajout de filtres cognitifs), ces agents se comporteraient en explorateurs urbains et réaliseraient leurs emplois du temps en respectant les contraintes formulées et en exploitant les opportunités disponibles. Encore mieux, en jouant sur ces contraintes et opportunités, il serait possible de définir des scénarios urbains et de les comparer sur une base quasi expérimentale.

De manière implicite, nous nous placions dans la perspective du « deepening KIDS » (Hassan et *al.*, 2008), visant à mettre en œuvre des protocoles de simulation davantage pilotés par les données empiriques existantes celles-ci pouvant être massives, hétérogènes et bruitées... autant d'éléments contribuant à accroître la complexité du problème à traiter tout en l'ancrant dans une réalité moins virtuelle. Et cet accroissement de complexité était bien réel.

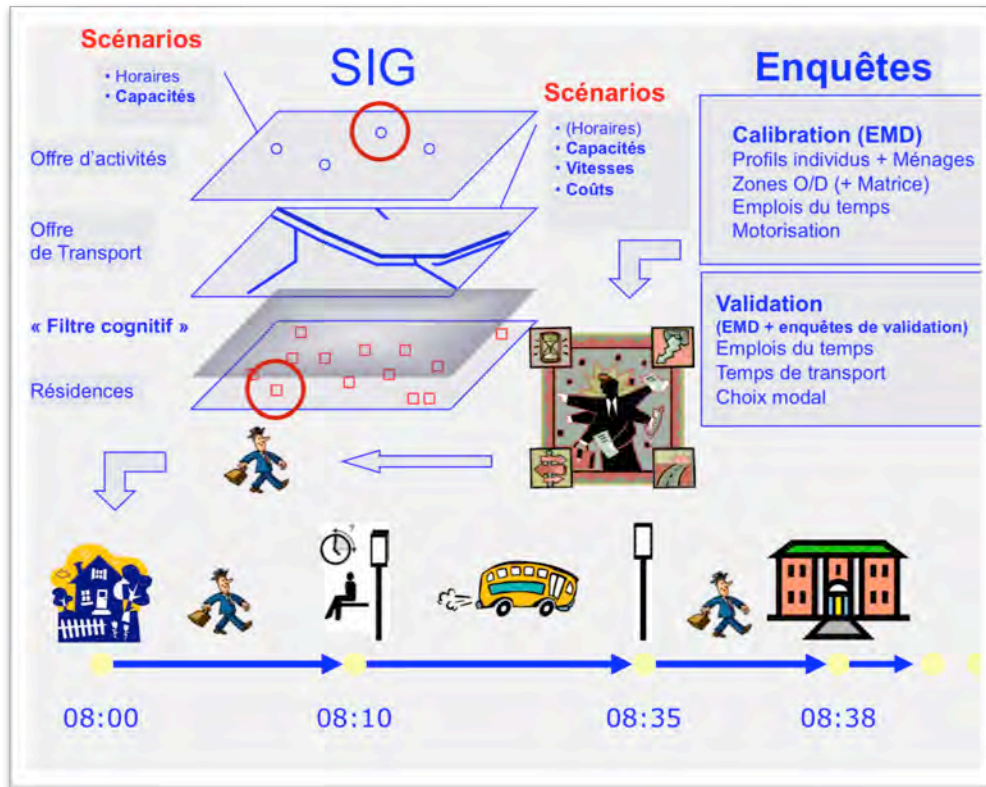


Figure 39 : Le projet d'ensemble de MIRO.

Il nous fallait ainsi résoudre un problème épineux. Autant la création d'un environnement urbain virtuel, même détaillé, était à portée de main, compte tenu de notre expérience dans le domaine des Systèmes d'Information Géographique, autant la constitution de populations synthétiques d'agents était un vrai problème. Quelques procédures existaient dans la littérature, mais la spécificité de nos agents « time-géographiques », rendait difficile toute importation directe. Nous avons donc mis au point un générateur de populations synthétiques d'agents compatible avec nos objectifs. À partir des données de recensement de population, des groupes d'agents étaient ainsi créés. La mise en concordance de leurs profils socio-démographiques avec ceux de l'enquête ménages-déplacements permettait de définir des budgets d'emplois du temps pour chacun de ces groupes. Un grand nombre d'agents pouvait ensuite être créé pour chaque groupe, chacun doté d'un budget temps individualisé (figure 40).

Il restait alors à transformer ce budget temps en une séquence ordonnée et cohérente d'activités (un emploi du temps), que l'agent traduirait lui-même dans l'espace en explorant les possibilités offertes et en essayant de minimiser ses temps de déplacement. La difficulté résidait dans le fait était que la solution au problème de chaque agent dépendait des solutions retenues par les autres agents, *via* la congestion. On retrouve ici le problème des comportements individuels non coordonnés mais mutuellement interdépendants dont nous avons vu précédemment qu'ils étaient susceptibles de conduire à des phénomènes d'émergence contre-intuitifs au niveau macroscopique. Une fausse bonne idée, dans le feu de l'action, a été d'élargir le degré de liberté des agents. Non seulement ils pourraient, sous certaines contraintes, chercher la configuration spatiale qui leur conviendrait le mieux, mais en plus ils pourraient adapter leurs emplois du temps aux contraintes rencontrées.

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

Figure 40 : Exemple de profils d'agents synthétiques générés par tirage aléatoire. A cette étape, les incohérences sont détectées (ici l'agent A10000 possède un temps de transport nul mais en Transports Publics).

Les activités considérées comme non obligatoires pouvaient ainsi être déplacées ou supprimées, jusqu'à ce que les agents trouvent une solution satisfaisante. Donner plus d'autonomie et de flexibilité aux agents devait nous aider à identifier des situations de quasi équilibre. La réalité s'avéra moins clémente (figure 41).

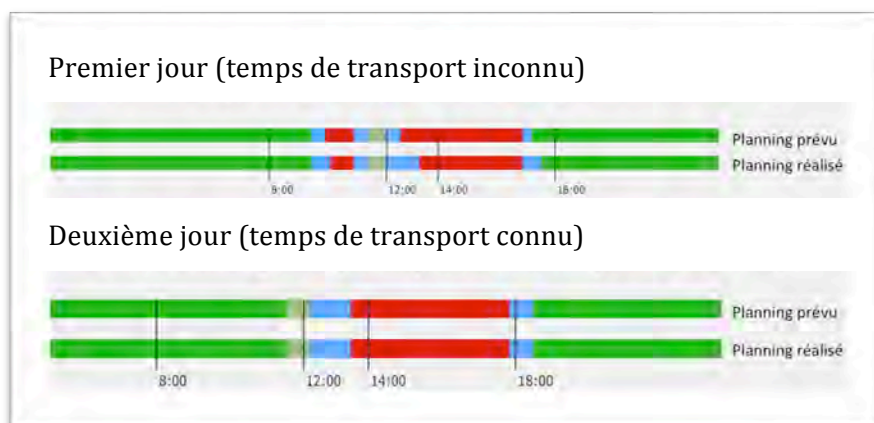


Figure 41 : Exemple d'évolution du planning d'un agent en fonction de son expérience passée, (en vert, le domicile, en rouge le travail, en bleu le transport).

Les agents s'adaptèrent bien, modifiant leur planning d'un jour sur l'autre en fonction de l'expérience de la journée. Leurs stratégies, telles qu'elles avaient été

définies, allaient plutôt dans le sens d'une simplification des emplois du temps. Toutefois, nous nous retrouvons avec plusieurs dizaines de milliers d'agents adaptatifs, faisant évoluer en permanence leurs objectifs et leurs connaissances, au fur et à mesure des simulations. Le modèle était devenu d'une complexité extrême et nous passions beaucoup de temps à imaginer des indicateurs de suivi, aussi bien aux niveaux microscopique et mésoscopique que macroscopique.

Bien sûr, l'intégration de contraintes environnementales telles que les horaires d'ouverture et de fermeture des lieux d'activités, jouait en notre faveur (figure 42). Si dans une première simulation, les agents étaient libres d'accomplir toutes les tâches à n'importe quel moment de la journée, des conditions plus réalistes ont été introduites dans une seconde expérimentation : les tâches ne pouvaient s'accomplir que dans une fenêtre de temps limitée pour un lieu donné, définie à partir d'une enquête sur les horaires d'ouverture et de fermeture des lieux d'activités dijonnais. La figure 41 permet de mesurer les différences entre les deux scénarios. La première simulation engendre des emplois du temps peu représentatifs de la population réelle. La majorité des individus simulés travaille en effet uniquement l'après-midi. Les résultats du second test reflètent davantage la réalité. Les agents simulés commencent leur journée de travail vers 10h00 pour la terminer vers 18 H00, ce qui révèle toutefois un léger décalage avec la situation observée.

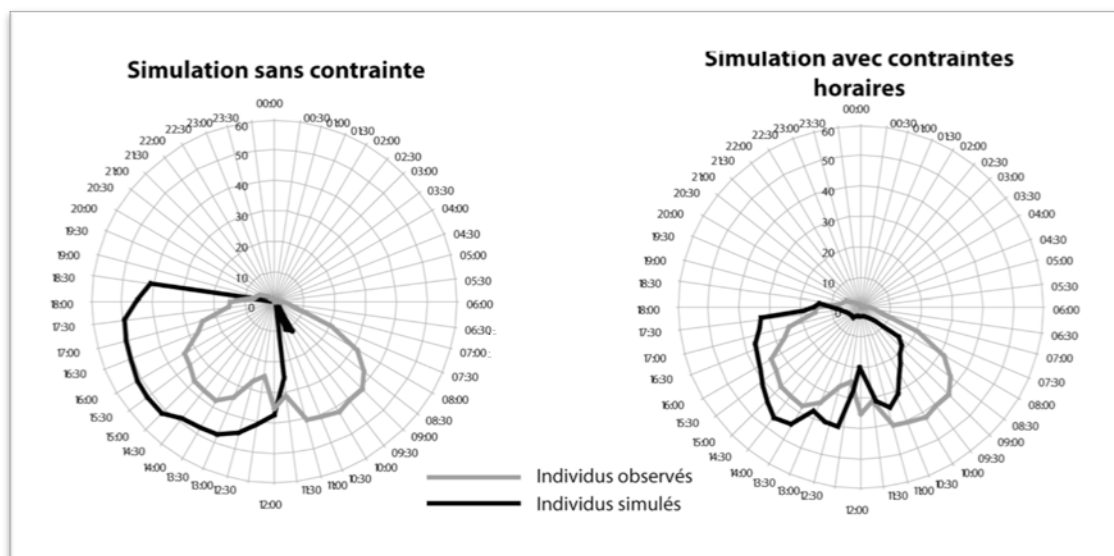


Figure 42 : Distribution horaire des individus observés et simulés pour le motif travail.

Une petite digression me semble ici nécessaire. Il serait dommage, à mon sens, de voir les développements précédents d'un point de vue uniquement technique, comme la résolution d'un problème donné par l'ajout de contraintes. Ils nous révèlent en effet également un principe fondamental des systèmes complexes. Que sont ainsi les horaires d'ouverture des lieux d'activité ?

La Time Geography nous dit qu'il s'agit de la manifestation de contraintes de pouvoir (le code du travail définit clairement les horaires en fonction des activités) et de coordination (il faut que les différents individus, salariés et clients dans le cas des services commerciaux par exemple, se trouvent aux même endroit et au même moment pour que la rencontre et au final la transaction commerciale aient lieu). Ces contraintes sont très largement énoncées (code du travail) et renforcées (coordination) par la collectivité. En tenir compte comme nous l'avons fait dans la figure 42 revient donc à prendre en considération cette rétroaction fondamentale, dite top-down, au cœur de la figure 14. Toutefois, cette contrainte d'horaires d'ouvertures n'est pas incluse dans le système à proprement dit. Elle n'émerge pas du comportement des agents, comme pourrait sembler l'indiquer la figure 14. Dans le cas classique du trafic automobile, la congestion émerge bien des interactions entre conducteurs et vient en retour influencer leurs comportements. Mais réduire les systèmes complexes à cette boucle de rétro-action immédiate et endogène est à mon sens un raccourci qui montre rapidement ses limites. Les systèmes sociaux peuvent difficilement être réduits à cette dynamique endogène entre deux niveaux (Pumain et Sanders, 2013).

Une des grandes difficultés, à mon sens, est de réussir à dépasser cette dichotomie simpliste sans pour autant surdéterminer de manière évidente le modèle. Identifier ce qui est strictement nécessaire et éliminer le reste est une tâche ardue, qui implique la mise en œuvre d'analyses de sensibilités coûteuses en temps de calcul, même dans le cas de modèles beaucoup plus simples comme SIMPEST (Laperrière *et al.*, 2009), mais également le développement de modèles alternatifs, concourant tous pour la position de modèle final.

Une des pistes creusées dans cette perspective a été d'intégrer des acteurs humains au sein du simulateur. Dans la lignée des approches ComMod⁵, il nous semblait intéressant de construire une version simplifiée du simulateur et d'en faire un modèle participatif : le modèle jouerait alors le rôle de support commun et de médiateur entre des acteurs humains qui auraient vocation à agir sur le même système de manière non coordonnée mais mutuellement interdépendante. Un système complexe emboîté dans un autre système complexe en quelques sortes. Cette approche, de type « jeu sérieux », était nouvelle pour nous mais nous pressentions des évolutions intéressantes, en phase avec notre objectif général. Le prototype développé, SMArtAccess (Figure 43), est toujours en développement à l'heure actuelle, mais a déjà été testé auprès d'étudiants de niveau Master 1 en géographie.

L'idée de ce système multi-agent multi-acteur est simple. Imaginons une ville virtuelle, peuplée d'agents virtuels. Pour simplifier les choses et rendre le jeu intelligible aux acteurs sans toutefois qu'il en devienne trivial, imaginons que chaque agent, localisé au hasard, ait un objectif simple : réaliser une chaîne de déplacement fixe Domicile - Travail - Service Universel - Service commercial - Domicile. Imaginons également que chaque agent soit rationnel, maximisateur mais dispose d'une information imparfaite : une manière simple de définir cette chaîne est alors de minimiser un temps global de

⁵ <http://cormas.cirad.fr/ComMod/>

transport. Chaque agent effectuera alors la chaîne de déplacement minimisant son temps total de transport, sans tenir compte du trafic.



Figure 43 : Le jeu sérieux SMrtAccess permet à des acteurs humains d'agir sur le même système urbain de manière non coordonnée mais mutuellement interdépendante (SMrtAccess).

Imaginons maintenant que l'on confie à différents acteurs humains les rôles de l'environnement urbain au sein duquel évoluent ces agents. Par exemple, un acteur aurait en charge la gestion du réseau routier et des vitesses autorisées, un autre localiserait les services universels, un autre les services publics, un acteur encore différent s'occuperait de la localisation des lieux de domicile des agents et enfin un acteur jouerait le rôle d'acteur public, chargé de faire en sorte que le système satisfasse certaines exigences macroscopiques de fonctionnement et de durabilité. Le tout sous la houlette d'un maître du jeu, formé au préalable, qui aurait pour fonction de s'assurer du bon déroulement du jeu mais qui mettrait également à la disposition des joueurs des protocoles de communication en fonction des besoins exprimés. Pour que ce soit amusant, chaque joueur se verrait attribuer des objectifs spécifiques (par exemple maximiser sa rentabilité économique pour le joueur « services commerciaux ») et disposerait d'indicateurs spécifiques à son activité, connus de lui seuls. Chacun jouerait à tour de rôle puis, une fois le tour achevé, les agents redéfiniraient leurs chaînes de déplacement à partir des nouvelles conditions environnementales.

On retrouve dans ce simple jeu nombre de thématiques au cœur de la complexité des systèmes sociaux : l'existence de comportements non coordonnés mais mutuellement interdépendants ; l'existence d'objectifs multiples non nécessairement compatibles ; l'existence d'intérêts individuels différenciés et relativement bien définis et d'un intérêt collectif plus flou et non nécessairement partagé ; le pilotage d'un système doté d'un moteur propre par plusieurs acteurs intervenant à des niveaux différents mais de manière non dominante ; la possibilité pour les acteurs de définir des

stratégies éventuellement en interaction avec les autres acteurs. Autant de problèmes fondamentaux qui gagnent à mon sens à être explorés aujourd'hui grâce à ce genre de jeux sérieux. Le modèle, devenu participatif, devient alors un support idéal pour étudier les interactions inter-individuelles et l'émergence de stratégies de coopération permettant l'échange d'information, la construction de stratégies communes et le repositionnement des intérêts individuels au profit d'un intérêt collectif mieux partagé.

Libérer les pratiques de modélisation en Géographie et SHS

« No pessimist ever discovered the secret of the stars or sailed an uncharted land, or opened a new doorway for the human spirit »

–Helen Keller

Les SHS sont les grandes absentes du livre blanc sur le calcul intensif au CNRS¹. Les besoins y sont pourtant considérables, notamment en géographie. Nous devons prendre la place qui est la nôtre et faire valoir nos besoins dans le domaine, tout en inscrivant notre démarche dans une spirale vertueuse (figure 44), au sein de laquelle disciplinarité et interdisciplinarité s'alimentent mutuellement.



Figure 44 : Une spirale vertueuse à réinventer en permanence.

¹ [Livre blanc sur le calcul intensif au CNRS en 2012](#)

Il ne suffit pas de mettre en contact des disciplines pour que l'interdisciplinarité émerge. La pluridisciplinarité s'en contente facilement, mais l'interdisciplinarité implique des interactions entre disciplines et par conséquent une nécessaire acculturation : il est difficile d'interagir avec l'autre si on ne cherche pas à comprendre son mode de fonctionnement, ses objectifs et son langage, bref sa culture. Donner les moyens aux géographes et, au delà, aux chercheurs en sciences humaines et sociales, de devenir plus autonomes dans leur démarche de modélisation va pour moi dans ce sens. Voilà qui peut sembler paradoxal, mais en première impression seulement. Depuis plus de dix ans maintenant, je milite pour la libération des pratiques de modélisation et de simulation dans ces disciplines. A travers le GDR-E S4, l'ISC-PIF et le réseau MAPS par exemple, j'ai essayé de contribuer à former de jeunes chercheurs dans cet esprit, au cours de nombreuses formations et écoles d'été intensives, toutes organisées dans le même esprit : désinhiber et libérer les participants, en les amenant à prendre conscience de leurs capacités et de leur possible autonomie dans le domaine de la modélisation et de la simulation spatiales. Les chercheurs en SHS en général, et en géographie en particulier, ont en effet aujourd'hui les moyens d'accéder à un niveau d'autonomie et d'initiative inégalé dans le domaine du traitement des données et de leur modélisation. Ce qui ne signifie nullement qu'ils deviennent indépendants et peuvent s'affranchir des spécialistes dans ces domaines très pointus, en évolution rapide et permanente. Bien au contraire ! Cette nouvelle donne permet de repositionner les interactions entre ces communautés et les modes de travail interdisciplinaires à un niveau à mon sens beaucoup plus fécond. Les spécialistes des données et des modèles ne sont plus vus comme des Interfaces Homme-Machine « humanisés », les spécialistes des SHS ne sont plus appréhendés comme des fournisseurs de données ou de problèmes en entrée et des aides à l'interprétation-validation en sortie. C'est l'ensemble du dispositif interdisciplinaire qui évolue, vers des interactions plus riches, nombreuses et fertiles. Car donner aux chercheurs en SHS les moyens de construire, d'analyser, d'expérimenter par eux mêmes des méthodes et des modèles les amène à s'investir de manière incomparablement plus profonde et durable dans ces domaines considérés par beaucoup comme difficiles et arides et pour lesquels ils n'ont reçu, pour la plupart, qu'une formation très superficielle. Ce faisant, ils élargissent leur domaine de compétence avec un enthousiasme et une énergie renouvelés, et peuvent interagir de manière bien plus efficace et pertinente avec les spécialistes de ces domaines. Ces derniers, en retour, y gagnent des collègues plus exigeants, capables de poser les problèmes à un niveau plus avancé et de contribuer réellement à la construction des méthodes, des modèles et même des outils nécessaires à leur résolution. Cette « co-construction » est, pour moi, le fer de lance d'une interdisciplinarité vivante et productive, en un mot réussie, bénéficiant aussi bien à la démarche scientifique globale qu'aux disciplines.

Dans ce contexte, je crois beaucoup à la place de la modélisation. Tout d'abord parce que derrière ce terme se cache une incroyable diversité de pratiques, trop souvent méconnue. Le philosophe des sciences Franck Varenne (2008) a ainsi identifié vingt catégories de modèles, renvoyant chacune à des pratiques spécifiques, irréductibles les unes aux autres, et pourtant tout aussi pertinentes et dans une large mesure complémentaires. J'y crois ensuite parce que le modèle peut devenir un formidable médiateur, voire même un catalyseur de collaborations disciplinaires et

interdisciplinaires. Sa genèse implique la création d'une ontologie partagée, la construction progressive d'un langage commun. La démarche expérimentale « si-alors » qu'il permet de construire élargit singulièrement notre espace des possibles et nous offre des manières nouvelles de questionner le monde dans lequel nous vivons. Pour prendre corps, cet idéal doit néanmoins reposer sur un certain nombre de principes forts. Voici ceux que je retiens de toutes mes années de pratique, dans des contextes très différents.

Principe 1 : Modéliser c'est apprendre

Un géographe formé à la modélisation et devenu autonome s'apercevra rapidement que ses connaissances du phénomène qu'il cherche à modéliser sont finies. Modéliser est en effet un processus fondamentalement itératif qui –et ce d'autant plus s'il est guidé par un principe d'abduction– implique une interaction forte entre le modèle développé et la vision progressivement construite du phénomène en question. Cette co-évolution est au cœur de la démarche de la modélisation et en fait à mon avis toute la saveur et la richesse.

Principe 2 : le modélisateur n'est pas omni-compétent

En conséquence du principe précédent, le modélisateur doit avoir conscience du caractère fondamentalement limité de ses compétences. Ce qui peut être perçu comme une faiblesse est pour moi une force. Assumée, cette réalité mène naturellement à la collaboration. De manière très générale, je dirais même que modéliser un système complexe est un acte par essence collaboratif.

Principe 3 : les modèles de simulation doivent s'enraciner dans les données

Lorsqu'on commence à modéliser, il est facile et tentant de se cantonner à un niveau relativement théorique, en s'affranchissant de la contrainte des données. Les modèles de compréhension peuvent même, pour certains d'entre eux, ne jamais être confrontés à aucune donnée. Les modèles de simulation, en revanche, ont vocation à reproduire des processus et des structures observés et leur sont intimement liés. La validation de ces modèles est une tâche lourde et faussement évidente –la comparaison directe sorties du modèle/données d'observation n'étant qu'une des nombreuses manières de valider un modèle– mais néanmoins bien définie aujourd'hui. Ce qui est plus incertain et délicat en revanche, c'est de faire évoluer les pratiques de modélisation en fonction des nouvelles données disponibles. Et celles-ci ne sont pas simplement plus nombreuses qu'avant, loin s'en faut (figure 45). Si on les compare aux données de recensement ou d'enquêtes par exemple, que les chercheurs en SHS affectionnent encore particulièrement, le contraste est frappant. Engendrées par une multitude de nouveaux capteurs géo-localisés, ces données n'ont plus rien à voir avec les précédentes². Leur quantité remplace dans une large mesure leur qualité et force est de constater que nous ne savons pas encore vraiment comment les exploiter à la mesure de leur potentiel. Celui-ci me semble

² Si le terme « Big data » est à la mode, des expressions comme « avalanche de données », voire « déluge de données » reviennent également souvent. Ces expressions évoquent le caractère à la fois massif et exogène de ces données, pour la plupart passives, qui impliquent de moins en moins la communauté scientifique dans le processus de création.

immense. Une fois que nous aurons compris ce que ces données mesurent vraiment, que nous aurons une idée précise de tous les biais qu'elles renferment, alors nous pourrons progresser dans la compréhension de leurs propriétés et nous pourrons commencer à les exploiter et les coupler entre elles ainsi qu'avec d'autres données. Car ces données, fondamentalement hétérogènes, multi-sources et bruitées, peuvent nous faire progresser dans la compréhension des systèmes socio-spatiaux³ et leur visualisation est plus que jamais de rigueur (Dorling, 2012). En vertu du principe 1 (Modéliser c'est apprendre), cette « révolution des données » devrait également s'accompagner d'une évolution des pratiques de modélisation et, pourquoi pas, d'une « révolution des modèles ».

Le diagramme compare deux types de données à l'aide d'une foudre centrale. À gauche, les données traditionnelles sont décrites par cinq caractéristiques. À droite, les données massives sont décrites par six caractéristiques.

Données traditionnelles	Données « massives »
Structurées	Peu structurées
Sémantiquement riches	Sémantiquement pauvres
Peu nombreuses	Massives (Big Data)
Propriétés connues	Hétérogènes, bruitées, incomplètes, multi-sources
Rares	Flux continu

Figure 45 : la révolution des données « massives ».

Principe 4 : le comportement de chaque modèle doit être connu de manière précise

Une critique souvent formulée à l'encontre des modèles informatiques, à base d'agents notamment, concerne la difficulté à en caractériser le comportement. Le parallèle avec les systèmes dynamiques est souvent fait, pour lesquels des outils mathématiques existent et permettent, dans certains cas, de caractériser finement le comportement des systèmes d'équations différentielles couplées définies. Cette contrainte est de moins en moins vraie aujourd'hui et l'accès à une ressource de calcul digne de ce nom permet d'élargir considérablement le domaine des possibles. Bien entendu, la parcimonie reste de rigueur et il est sage de limiter autant que possible le nombre de paramètres inclus dans les modèles, mais la doctrine du « modèle à trois paramètres » auxquels nombre de modélisateurs des sciences humaines et sociales sont renvoyés lorsqu'ils présentent leurs travaux devant des communautés de scientifiques, est aujourd'hui dépassée. La complexité des modèles doit être adaptée aux problèmes traités et aux objectifs fixés et la ressource en calcul doit permettre de s'en approcher toujours plus. Des plateformes

³ La place occupée aujourd'hui par ces « big data » a de quoi en énerver certains. Le mathématicien [Samuel Arbesman](#) réagit ainsi vertement en suggérant « Stop Hying Big Data and Start Paying Attention to 'Long Data' ». C'est oublier un peu vite d'une part que ces données massives, qui ont pour l'instant une profondeur historique faible, sont amenées à constituer, sur le long terme, des séries temporelles colossales et d'autres part que de nombreux projets reconstituent et/ou exploitent depuis longtemps ces « long data » (les projets SIMPOP, Harmonie-Cités, TransMondyn en sont quelques exemples au sein de Géographie-Cités).

collaboratives telles qu'OpenMole⁴ existent dorénavant et permettent aux modélisateurs de tous horizons de définir et réaliser les plans d'expériences, les analyses de sensibilité et les stratégies de calibration automatiques dont ils ont besoin. En faisant en sorte d'impliquer activement ces modélisateurs dans la construction même de la plateforme, y compris de manière minimaliste en intégrant leurs plans d'expériences et stratégies de calibration à la librairie existante, on se donne les moyens de créer un processus d'auto-renforcement qui en favorisera la croissance et la diffusion au sein d'une communauté élargie.

Principe 5 : le modélisateur doit cesser de proposer des solutions uniques et optimales à des problèmes complexes

Les modèles de systèmes complexes se caractérisent par l'existence de solutions multiples, dont aucune n'est en général meilleure que les autres, si on s'en tient aux seuls principes ayant présidé à la construction du modèle. L'enjeu est alors d'identifier, par la simulation, un ensemble de solutions présentant une certaine optimalité par rapport aux objectifs définis. La caractérisation de fronts ou surfaces de Pareto⁵ est un problème difficile mais qui permet de progresser dans le sens d'un plus grand réalisme : le plus souvent, dans un cadre multi-objectifs, le modèle ne permet pas de choisir de manière endogène, c'est à dire à partir des critères ayant guidé sa fabrication, une ou plusieurs solutions. D'autres critères, externes, doivent souvent être mobilisés, qui n'étaient pas prévus au départ. Ce processus nous renvoie une fois de plus au principe 1 (modéliser c'est apprendre).

Principe 6 : Le modélisateur n'est pas le « gardien de la vérité prouvée », ses modèles doivent être accessibles dans leur intégralité afin d'être reproduits

Tout comme un protocole expérimental, un modèle a vocation à être reproduit par d'autres afin d'être validé ou réfuté. Ce critère de reproductibilité s'applique également aux données, à leurs protocoles de création ainsi qu'aux traitements dont elles font l'objet⁶. Cette exigence poppérienne est loin d'être aussi répandue qu'elle le devrait. Les modèles, dans le champ des SHS mais pas uniquement, satisfont encore trop rarement à ce critère de reproductibilité. Les raisons en sont multiples et pas forcément négatives : attachement fort et personnalisé à des modèles que l'on a parfois mis des années à développer ; souci de garder les clés de certains secrets de fabrication élaborés de longue haleine ; désir de conserver une longueur d'avance sur les concurrents dans un domaine d'activité toujours plus compétitif ; auto-censure liée au caractère parfois approximatif et non optimal des implémentations informatiques réalisées par des non spécialistes. Toutes ces

⁴ Plateforme libre développée à l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France et soutenue par l'ERC GeoDiverCity. <http://www.openmole.org/>

⁵ « Lorsqu'une solution est associée à une seule valeur, on parle de problème mono-objectif, lorsqu'elle est associée à plusieurs valeurs, de problème multi-objectifs (ou multi-critères). Dans ce dernier cas, on recherche un ensemble de solutions non dominées (le « front de Pareto »), solutions parmi lesquelles on ne peut décider si une solution est meilleure qu'une autre, aucune n'étant systématiquement inférieure aux autres sur tous les objectifs » (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Métaheuristique>).

⁶ L'initiative BEQUALI (<http://quali.dime-shs.sciences-po.fr/>) est de ce point de vue remarquable.

raisons sont des fausses bonnes raisons et ne doivent pas nous faire oublier le caractère fondamentalement cumulatif des savoirs en SHS (Pumain, 2005), l'aspect positif de la critique constructive et de l'évaluation dans le processus scientifique, ainsi que le statut de bien public des connaissances et objets produits par ce processus. L'ouverture et le partage devraient aujourd'hui faire partie des bonnes pratiques. En formant les chercheurs en SHS, en leur donnant les moyens d'être plus autonomes, en rendant plus fluide le processus de création des modèles, en favorisant l'interdisciplinarité et l'échange des bonnes pratiques on progresse dans le bon sens bien sûr. Mais ce n'est pas suffisant. Certaines revues scientifiques spécialisées comme JASSS⁷ par exemple, encouragent les auteurs d'articles à livrer leur code informatique couplé à une description standardisée de leur modèle (formalisme ODD, Grimm et *al.*, 2006). Cette stratégie va dans le bon sens mais pénalise les modélisateurs d'adoption, pour lesquels cette « preuve par le code » chère aux informaticiens est souvent perçue comme un contrôle technique que leur modèle souvent perçu comme non conforme ne réussira jamais à passer. Si la formation et la collaboration interdisciplinaire permettent de réduire ces effets, je suis persuadé également qu'une possibilité de publication rapide des modèles accélérerait la diffusion des bonnes pratiques. Des initiatives existent depuis longtemps, par exemple la librairie des modèles de NetLogo⁸, la plateforme OpenABM⁹, ou encore la plateforme des modèles de S4¹⁰. Ces initiatives sont toutefois déconnectées du processus de publication scientifique, qui est aujourd'hui l'un des principaux moteurs de l'activité des scientifiques. Il me semble qu'une revue telle que Cybergéo¹¹, possède à la fois la légitimité scientifique et le format nécessaires à une telle évolution. Une rubrique « Modèles » offrirait ainsi la possibilité aux auteurs de modèles en géographie de publier un article court sans attendre d'avoir des résultats, et leur permettrait à la fois de faire date, de définir le contexte scientifique du modèle et d'en décrire le contenu au moyen d'un formalisme standardisé. Le code commenté intégral du modèle accompagnerait cet article, ainsi qu'une petite animation ou mieux, une applet interactive. En vertu du principe 1 (Modéliser c'est apprendre), ce modèle aurait vocation à évoluer en fonction des analyses ultérieures menées par les auteurs, mais également en fonction des propositions d'amélioration ou d'extension proposées par d'autres. Rendre possible ces évolutions c'est reconnaître le caractère fondamentalement cumulatif de la production des connaissances, ainsi que son caractère itératif et interactif.

Principe 7 : Les modèles ne sont plus des enfants uniques

Il y a une certaine forme de dépendance au chemin et d'effet de verrou (locking-in) dans le processus de développement des modèles : les premiers choix jouent souvent un rôle décisif et une fois que les premières fondations du modèle sont bâties, il devient difficile de revenir en arrière, et ce d'autant plus qu'il est nécessaire

⁷ <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>

⁸ <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/index.cgi>

⁹ <http://www.openabm.org/>

¹⁰ <http://www.spatial-modelling.info/>

¹¹ <http://cybergeo.revues.org/>

de faire tourner ce modèle pour avoir une idée réelle de son comportement et de sa pertinence. L'investissement collectif se limite donc souvent à un modèle unique, pas forcément le meilleur des modèles pouvant être développés, et qui, malgré tout, continue à exister et être utilisé dans les laboratoires¹² pendant des années, alors même que le bon sens voudrait que soit développé un ensemble de modèles alternatifs, concourant tous pour la position de modèle final.

Ce phénomène très général, s'il est surtout de l'ordre de la contrainte dans le développement de modèles de compréhension habituellement beaucoup plus légers, devient à mon avis un véritable facteur limitant dans le cas des modèles de simulation développés dans des contextes interdisciplinaires. Le fonctionnement par projets dont nous sommes devenus coutumiers dans la recherche publique française achève d'entériner ce processus : redévelopper un modèle ne fait pas partie des stratégies gagnantes à l'ANR ou auprès de l'Europe.

La seule manière de progresser dans ce domaine est alors de créer, localement, les conditions favorables à cette nécessaire évolution des pratiques. Ce qui a pu être réalisé par Denise Pumain à Géographie-Cités me semble à ce titre exemplaire : en combinant habilement trois dynamiques convergentes (l'UMR Géographie-Cités ; l'ERC GeodiverCity ; l'antenne Systèmes Complexes ISC-PIF/Paris1), Denise a réussi à fédérer une équipe pluridisciplinaire de choc¹³, dans laquelle chaque thématicien possède l'autonomie suffisante¹⁴ pour développer ses propres modèles de compréhension mais également contribuer de manière efficace aux modèles de simulation développés collectivement. Ceux-ci sont développés et redéveloppés en fonction des besoins et des évolutions (théoriques, méthodologiques et techniques) et leur comportement est systématiquement étudié par la mise au point de plans d'expériences sur la grille systèmes complexes.

Cette belle réalisation reste toutefois fragile. Les bourses ERC n'ont pas vocation à être pérennisées et les institutions de recherche, CNRS et Université en tête, n'ont pas les moyens de prendre le relais. Dans ce contexte, je crois d'autant plus à l'importance d'initiatives collectives, interdisciplinaires, inter-institutionnelles et fondamentalement ouvertes, à l'image de l'Institut des Systèmes Complexes de Paris-Ile de France. Alimenter et préserver ce genre de « bien commun » ne peut que profiter à la recherche en général, surtout dans un contexte qui continue à encourager le repliement institutionnel et même disciplinaire.

Principe 8 : Les modèles ont vocation à être couplés

Si les données gagnent à être couplées (principe 3), les modèles aussi. Les géographes ressentent ainsi souvent le besoin d'introduire dans leurs modèles des environnements géographiques plus réalistes. La création de connexions fortes avec les systèmes d'information géographique est depuis longtemps un enjeu et un défi majeur au même titre que la mise au point de modèles de simulation hybrides,

¹² Et dans biens d'autres institutions également. Voir Brian Arthur, 1984 *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. University of Michigan Press, Ann Arbor.

¹³ <http://geodivercity.parisgeo.cnrs.fr/blog/staff/>

¹⁴ Cette autonomie ne s'invente pas bien sûr. Elle s'acquière par le travail et la coopération. Des formations internes régulières permettent de lui donner vie.

associant Systèmes Multi-agents et Automates Cellulaires (Gimblett et al., 2002). De tels modèles visent à faire évoluer les propriétés de l'environnement en parallèle et en interaction avec le comportement des agents qui le sillonnent. Ce couplage de dynamiques, fonctionnant à des échelles de temps et d'espace différentes, est à mon sens un enjeu fondamental pour toutes celles et ceux qui travaillent sur les interactions hommes-milieus. Il renvoie toutefois à un pluriformalisme difficile, dont certaines bases sont déjà anciennes¹⁵ et dont nous ne pourrions plus faire encore très longtemps l'économie¹⁶. Les premiers travaux réalisés au sein du réseau MAPS dans le cadre du modèle MicMac –fruit d'une collaboration entre géographes, informaticiens et mathématiciens- me semblent à ce titre prometteurs. Ce modèle porte en effet sur la propagation d'épidémies dans des populations structurées. La dynamique de fond de l'épidémie y est modélisée au moyen d'un modèle continu par équations différentielles, tandis que les comportements de mobilité des individus et leurs stratégies d'adaptation à l'épidémie sont formalisées sous forme de règles (agents), ces deux dynamiques étant synchronisées sur la base de données épidémiologiques réelles. Derrière les contraintes méthodologiques et techniques qui sont nombreuses, ce genre de projet me semble important pour les sciences humaines et sociales pour lesquelles les entités de base en interaction, les individus ou groupes d'individus, sont à la fois doués d'intentionnalité (ils ont des objectifs multiples, non nécessairement compatibles), de réflexivité (ils possèdent la capacité d'évaluer leur situation, le contexte dans lequel ils évoluent et leurs propres actions) et d'adaptabilité (ils peuvent s'adapter aux évolutions du contexte et de l'environnement dans lequel ils se situent). Autant de caractéristiques fondamentales que l'on peine encore aujourd'hui à introduire dans nos modèles.

Principe 9 : Les mathématiques ne sont pas le langage universel des modèles

Nombre de chercheurs en SHS, ont et continuent de recevoir une formation faible voire nulle en mathématiques et de manière plus générale en modélisation. Faisant partie de cette dernière catégorie, je ne peux que témoigner de la difficulté qu'il y a à combler certaines lacunes, surtout lorsqu'elles sont aussi fondamentales que nombreuses. Compter sur les autodidactes, les « réfugiés » et « adoptés » issus d'autres disciplines et les rares personnes ayant bénéficié d'une double formation relève, à l'échelle globale, d'une stratégie du laisser-faire qui a ses limites. Mon investissement systématique depuis plus de dix ans maintenant dans des formations intensives et des écoles d'été centrées sur la modélisation informatique et mathématique des systèmes complexes est une manière pour moi de contribuer à améliorer, à mon échelle, une situation que je ne vois guère évoluer dans l'offre de formation universitaire française. Par ailleurs, j'ai toujours considéré que la diffusion large des méthodes de modélisation est une responsabilité qui incombe à celles et ceux qui ont l'opportunité de pouvoir en faire l'acquisition. Toutefois, les vecteurs de cette diffusion ne sauraient être réduits aux langages formels, valorisés

¹⁵ Par exemple le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification) proposé par Bernard Zeigler (Bernard Zeigler, *Theory of Modeling and Simulation*, Wiley Interscience, New York, 1976, 1re éd.)

¹⁶ Pour Franck Varenne, cette « pluriformalisation est un moyen nouveau de recourir au formel dans les sciences » (Varenne, 2012a).

par la communauté scientifique. D'une part parce que c'est le meilleur moyen de renforcer cette asymétrie structurelle dont souffrent les SHS. D'autre part parce que les mathématiques et, de manière générale les langages formels, ne sont pas forcément universels, indépendamment même du contexte social et institutionnel que je viens de décrire. Le mathématicien Jean-François Colonna¹⁷ rappelle ainsi « *la difficulté, voire l'impossibilité [pour les mathématiques] de construire des représentations « naïves » (textuelles en langues naturelles et surtout visuelles) des objets étudiés* »¹⁸. C'est dans cet esprit que je me situais lorsque je décidais de créer « SMArtSuite », une librairie libre de modèles à base d'agents tous développés en NetLogo (Figures 46-47).

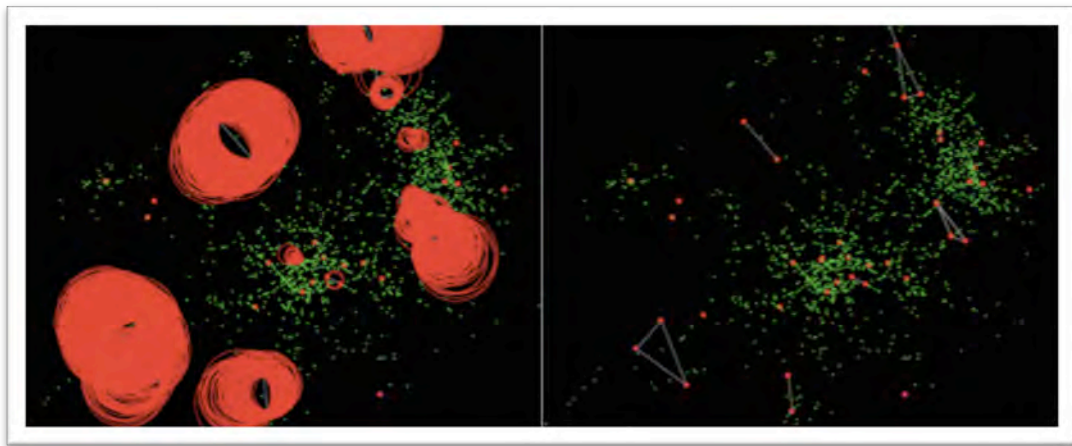


Figure 46 : La « Machine d'Analyse Géographique » de Stan Openshaw, développée dans SMArtGAM. Les deux semis de points (rouge et vert) sont comparés et les sur-représentations locales (« points chauds ») de points rouges sont identifiées. Les points rouges appartenant à un même point chaud sont connectés (SMArtGAM).

SMArtGAM¹⁹ et SMArtKDE²⁰ ont été mes premières réalisations : je souhaitais favoriser la diffusion (encore aujourd'hui très lente) de ces méthodes remarquables dans la communauté des géographes en dépassant leur formalisme mathématique et informatique.

Je suis persuadé qu'en révélant, visuellement, le fonctionnement de méthodes même sophistiquées, et en permettant à l'utilisateur de les manipuler, d'interagir avec elles, on peut en partie faire sauter cette barrière des langages formels. Donner une bonne intuition des méthodes est le meilleur moyen de faire en sorte qu'elles soient utilisées correctement, mais également que leurs utilisateurs se donnent à terme les moyens plus formels de les comprendre.

¹⁷<http://www.lactamme.polytechnique.fr/Mosaic/descripteurs/AQuoiServentLesMathematiques.01.html>

¹⁸Franck Varenne rappelle de son côté que pour Boltzmann, « comprendre consiste à se forger des images ». Et par là même que, pour ce grand physicien, « les modèles ont un pouvoir de synthèse imagée plus grand que le symbolisme mathématique » (Varenne, 2012b).

¹⁹ <http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/geosimul/smartgam/gam.html>

²⁰ <http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/geosimul/smartkde/kde.html>

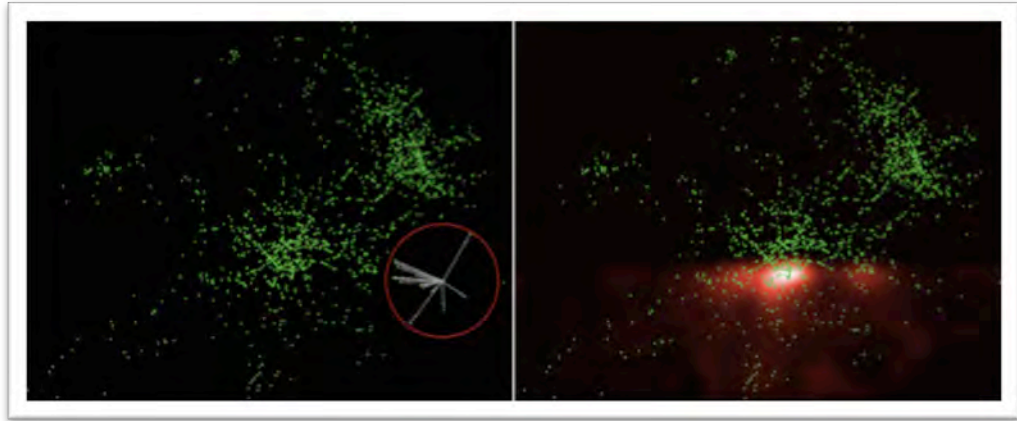


Figure 47: Le lissage par noyaux (Kernel Density Estimation) développé dans SMArtKDE. Une surface (densité de probabilité) est construite à partir du semis de points initial, grâce à une fenêtre mobile circulaire (kernel) parcourant la zone (SMArtKDE).

Ces grands principes, je les ai progressivement définis et affinés au cours de mes années de pratique dans des contextes très diversifiés. Ils structurent aujourd’hui la vision que j’ai de mon métier et des actions que je souhaite mener dans le futur. Contribuer à l’émergence de pratiques de modélisation et de simulation décomplexées en géographie et en SHS est l’objectif que je me suis fixé et je ne doute pas qu’il me conduira vers ces « horizons bleus dépassés le matin »²¹ que j’ai toujours recherchés.

« Those are my principles. If you don’t like them I have others »
–Groucho Marx

²¹ C. Baudelaire: *Les Fleurs du mal*, Femmes damnées (1861)

Références Bibliographiques

Avertissement au lecteur : afin d'alléger le texte et d'améliorer la lisibilité de la bibliographie, j'ai dissocié ici les références citées dans le texte (dont certaines sont des références personnelles) de mes références personnelles, pas forcément toutes citées dans le texte. Ces dernières sont alors classées à la fin en fonction de grands thèmes facilement identifiables à partir du texte.

Références bibliographiques citées dans le texte

- AMBLARD F., PHAN D., 2006, *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermès Science, 448 p.
- AMBLARD F., ROUCHIER J., BOMMEL P., 2006, *Evaluation et validation de modèles multi-agents*, in AMBLARD F., PHAN D., *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermès-Lavoisier, pp. 103-120
- ANDERSON P., 1972, *More is different*, Science, n° 177, pp. 393-396
- ANSELIN L., 1995, *Local indicators of spatial association: LISA*, Geographical Analysis, Vol. 27, n° 2, pp. 93-115.
- ARTHUR B., 1994, *Increasing returns and paths dependence in the economy*, Ann Arbor, University of Michigan Press
- ASCHER F., 2000, *Ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs. Essai sur la société contemporaine*, Editions de L'Aube, 304 p.

- AXELROD R., 1997, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and collaboration*. Princeton Studies in Complexity, Princeton University Press, New Jersey, 232 p.
- BADARIOTTI D., BANOS A., LAPERRIERE V., 2010, *Modélisation d'un système complexe : la peste*, in WEISBUCH G., ZWIRN A. (Dir), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*, Vuibert, Paris, pp. 221-241
- BADARIOTTI D., LAPERRIERE V., BANOS A., 2009, *Réalisation d'un modèle contingent à base d'agents pour simuler des épidémies de peste à Madagascar Le modèle SIMPEST*, Revue Internationale de Géomatique, N°4/2009, pp. 253-275
- BANOS A., DORNBUSCH J., 1997, *Effet de barrière suisse : une autre méthode d'évaluation des conséquences de la réglementation routière suisse*, Notes de Synthèse du Service Economique et Statistique, N° 113, pp. 37-40
- BANOS A., 1999, *A propos des flux transalpins de poids lourds : peut-on parler d'un effet de barrière suisse ?*, Revue Géographique de l'Est, Tome XXXIX, Vol. 4, n° 5, pp. 179-183
- BANOS A., 1999, *Quelle implication de l'utilisateur dans une stratégie de data-mining spatial ? Illustration à partir de l'appréhension spatio-temporelle des accidents de la route en milieu urbain*, Revue Internationale de Géomatique, Vol. 9, n° 4, pp. 441-456
- BANOS A., 2001, *Enhancing mobility behaviour analysis using spatial interactive tools and computer intensive methods*, Geographic Information Sciences, Vol. 7, n° 1, pp. 35-41
- BANOS A., 2001, *A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données*, Cybergeog, n° 197
- BANOS A., 2001, *Le lieu, le moment, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain*, Thèse de Géographie, Université de Franche-Comté, Besançon, 355 p.
- BANOS A., 2002, *Une stratégie d'exploration spatio-temporelle des flux pendulaires. Application à la desserte d'une zone industrielle*, Revue Internationale de Géomatique, Vol. 12, n° 2, pp. 225-244
- BANOS A., 2005, *La voie de l'étonnement : favoriser l'abduction dans les Systèmes d'Information Géographique*, in FOTSING J.-M. (Dir), *Apport des SIG à la recherche*, Editions Presses Universitaires d'Orléans, pp. 237-254
- BANOS A., 2009, *Simulating pedestrian behavior in complex and dynamic environments: an agent-based perspective*, in BAVAUD F., MAGER C., (Dir), *European Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, FGSE, Lausanne, pp. 1-27
- BANOS A., 2010, *La simulation à base d'agents en sciences sociales : une béquille pour l'esprit humain ?*, Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales, Volume 5, numéro 2, pp. 91-100
- BANOS A., 2012, *Network effects in Schelling's model of segregation: new evidences from agent-based simulation*, Environment and Planning B, Volume 39, n°2, 393-405
- BANOS A., BANOS F., 2003, *Towards integrated spatial surveillance tools of urban risks : space-time analysis of road accidents in Lille*, in BANOS A., BANOS F., BROSSARD T., LASSARRE S. (Dir), *Géographie des risques des transports*, Editeurs, Paradigme, Orléans, pp. 9-22

-
- BANOS A., BANOS F., BROSSARD T., LASSARRE S., (Dir), 2003, *Géographie des risques des transports*, Paradigme, Orléans, 310 p.
- BANOS A., BOFFET-MAS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2010, *MIRO : des trajectoires individuelles à la ville en mouvement*, in ANTONI JP (Dir), *Modéliser la ville : formes urbaines et politiques de transport*, Economica, 448 p.
- BANOS A., BOFFET-MAS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2010, *Simuler la mobilité urbaine quotidienne : le projet MIRO*, in BANOS A., THEVENIN T. (Dir), *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, Hermès, pp. 51-88
- BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2005, *Simulating the swarming city: a MAS approach*, Proceedings of the 9th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, London, June 29-30, 15p.
- BANOS A., GENRE-GRANDPIERRE C., 2012, *Towards New Metrics for Urban Road Networks. Some Preliminary Evidence from Agent-Based Simulations*, in HEPPENSTALL, A.J.; CROOKS, A.T.; SEE, L.M.; BATTY, M. (Eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp. 627-642
- BANOS A., GODARA A., LASSARRE S., 2005, *SAMU: contribution to the study of urban "anthill"*, Proceedings of the Second Indian International Conference on Artificial Intelligence, Pune, India, 20-22 December, 13 p.
- BANOS A., GODARA A., LASSARRE S., 2005, *Simulating pedestrians and cars behaviours in a virtual city : an agent-based approach*, Proceedings of the European Conference on Complex Systems, Paris, 14-18 November, 4 p.
- BANOS A., HUGUENIN-RICHARD F., 2000, *Spatial distribution of road accidents in the vicinity of point sources: application to child pedestrian accidents*, Geography and Medicine, Editions Elsevier, pp. 54-64
- BANOS A., LANG C., (Dir), 2007, *Modéliser et simuler les mobilités spatiales et les systèmes de transport : nouveaux enjeux, nouvelles approches*, Cahiers Scientifiques du Transport, n°52, 118 p.
- BANOS A., LASSARRE S., 2008, *Simuler les interactions piétons-automobilistes dans un environnement urbain : une approche à base d'agents*, Territoire en Mouvement, n°1, pp. 58-66
- BANOS A., LASSARRE S., PARE A., TAZDAIT N., 2010, *Simuler les déplacements de piétons dans des environnements dynamiques*, in BANOS A., THEVENIN T. (Dir), *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, Hermès, pp. 117-144
- BANOS A., MORENO D., PIVANO C., TAILLANDIER P., 2011, *Chrystaller, still alive!*, Cybergeog, <http://cybergeog.revues.org/24878>
- BANOS A., PARE A., 2009, *Simuler les déplacements de piétons dans une station de métro : une approche à base d'agents*, Revue Internationale de Géomatique, N°4/2009, pp. 277-302
- BANOS A., PARROTT L., (Dir), 2009, *Simulation spatiale à base d'agents*, Revue Internationale de Géomatique, Vol. 4/2009, 172 p.
-

- BANOS A., SANDERS L., 2013, *Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie*, in KUPIEC J., SIBERSTEIN M. ET VARENNE F. (Eds), *Modèles, Simulations, Systèmes, Matériologiques, A paraître*
- BANOS A., THEVENIN T. (Dir), 2010, *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, Hermès, Paris 244 p.
- BANOS A., THEVENIN T. (Dir), 2010, *Systèmes de transport urbain : caractérisation de l'offre et estimation de la demande*, Hermès, Paris 240 p.
- BANOS A., THEVENIN T. (Dir), 2011, *Geographical Information and Urban Transport Systems*, Wiley, ISTE, London, 248p.
- BANOS A., THEVENIN T., 2005, *La carte animée pour révéler les rythmes urbains*, Revue Internationale de Géomatique, Vol 15, n° 1, pp. 11-31
- BANOS A., THEVENIN T., 2010, *Generation of Potential Fields and Route Simulation Based on the Household Travel Survey*, in THERIAULT M., DES ROSIERS F. (Dir), *Modeling urban Dynamics*, ISTE, London, pp. 83-101
- BATTY M., 2005, *Cities and complexity*, MIT Press, Cambridge, 565 p.
- BEN AKIVA M., LERMAN S., 1984, *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*, The MIT Press, Cambridge, 390 p.
- BENENSON I., TORRENS P., 2002, *Geosimulation: automata-based modelling of urban phenomena*, Wiley, Chichester, 287 p.
- BERRY B., MARBLE D., *Spatial analysis: a reader in statistical geography*, Prentice-Hall, 1968, 512 pages
- BLUE V., ADLER J., 1998, *Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation*, Transportation Research Record, vol. 1644, pp. 29-36
- BON F., CHEYLAN JP., 1988, *La France qui vote*, Paris, Hachette, 464 p.
- BOUDON R., 1984, *La place du désordre. Critique des théories du changement social*, Paris, Presses Universitaires de France, 1984, 245 p.
- BRETAGNOLLE A., DAUDE E., PUMAIN D., 2006, *From theory to modelling: urban systems as complex systems*, Cybergeog, n°. 335, <http://193.55.107.45/ectqg13/335res.htm>
- BRUNSDON C., 1998, *Exploratory spatial data analysis and local indicators of spatial association with Xlisp-Stat*, The Statistician, Vol. 47, n° 3, pp. 471-484
- BRUNSDON C., FOTHERINGHAM S., CHARLTON M., 1996, *Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity*, Geographical analysis, Vol. 28, n° 4, pp. 281-298.
- BURA S., GUERIN-PACE F., MATHIAN H., PUMAIN D., SANDERS L., 1996, *Multi-agents system and the dynamics of a settlement system*, Geographical Analysis, vol 28, n°2, p161-178
- BUSSI M., 1991, *Effet spatial et comportement électoral : la France de l'Ouest sous la cinquième République*, Thèse Nouveau Régime : Géographie, Université de Rouen, 555 p.

- BUSSI M., 2008, *Modeling Spatial Logics of Individual behaviors: from methodological Environmentalism to the Individual Resident Strategist*, in GUERMOND Y. (dir.), *The modelling Process in geography*, Wiley, ISTE, London
- CAUVIN C., 1999, *Propositions pour une approche de la cognition spatiale intra-urbaine*, Cybergéo, N°72, 24 p.
- CONTE R., 2007, Review of Joshua Epstein, 2007, *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling (Princeton Studies in Complexity)*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Volume 10, Issue 4, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/4/reviews/conte.html>
- COUCLELIS, H., 1992, *People manipulate objects (but cultivate fields): Beyond the raster vector debate in GIS*, In FRANK, A.U., CAMPARI, I. AND FORMENTINI, U., (Eds.), *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, Lecture Notes in Computer Science, N°639, Berlin, SpringerVerlag, pp. 65-77
- COURGEAU D., 1995, *Migration theories and behavioural models*, International Journal of Population Geography, Vol. 1, pp. 19-27
- DAUDE E., 2008, *Multi-agent Systems for Simulation in Geography: Moving Towards an Artificial Geography*, in GUERMOND Y. (dir.), *The Modeling Process in Geography: From Determinism to Complexity*, Wiley, ISTE, London, p. 309-329
- DIACONIS P., EFRON B., 1983, *Computer-intensive methods in statistics*, Scientific American, Vol. 248, n° 5, pp. 96-108.
- DORLING D., 2012, *The Visualisation of Spatial Social Structure*, Wiley, 401 p.
- DROGOUL A., 2000, *Systèmes multi-agents distribués*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Paris 6, 117 p.
- EDMONDS B., MOSS S., 2005, *From KISS to KIDS in Multi-Agent and Multi-Agent Based Simulation*, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3415/2005, 130-144
- EDMONDS B., MOSS S., 2005, *From KISS to KIDS – An ‘Anti-simplistic’ Modelling Approach, in Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3415/2005, pp. 130-144
- EFRON B., TIBSHIRANI R., 1993, *An introduction to the bootstrap*, Chapman & Hall, New York, 436 p.
- EPSTEIN J., 2006, *Generative social science: studies in agent-based computational modeling*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 356 p.
- EPSTEIN J., AXTELL R., 1996, *Growing artificial societies: social science from the bottom up*, Brookings Institution Press, MIT Press, Washington DC
- FAGIOLO, G., VALENTE, M., VRIEND, N.J., 2007, *Segregation in Networks*, Journal of Economic Behavior and Organization, Vol. 64, 316-336
- FENCHONG J., 2012, *Organisation spatio-temporelle des mobilités révélées par la téléphonie mobile en île de France*, Thèse de Géographie, Université de Paris 1

- FIEGEL J., BANOS A., BERTELLE C., 2009, *Modeling and simulation of pedestrian behaviors in transport areas : the specific case of platform/train exchanges*, ICCSA 2009, 29 juin-2 juillet, Le Havre
- FOSSETT M, DIETRICH DR, 2009, *Effects of city size, shape, and form, and neighborhood size and shape in agent-based models of residential segregation: are Schelling-style preference effects robust?*, *Environment and Planning B: Planning and Design* 36(1) 149 – 169
- FRANKHAUSER P., HOUOT H., TANNIER C., VUIDEL G., 2007, *Vers des déplacements péri-urbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*, Rapport PREDIT, GO 1, Projet n° 05MT5020, 67 p.
- GENRE-GRANDPIERRE C., BANOS A., 2010, *New types of metrics for urban road networks explored with S3: an agent-based simulation platform*, in BAI Q., FUKUTA N. (Dir), *Advances in Practical Multi-Agent Systems*, Studies in Computational Intelligence, Volume 325, Springer, pp. 267-286
- GENRE-GRANDPIERRE, C., 2007, *Des réseaux lents contre la dépendance automobile? Concept et implications en milieu urbain*, *L'Espace Géographique*, 1, 27–39
- GIAVITTO J.-L., 2003, *Topological collections, transformations and their application to the modeling and the simulation of dynamical systems*, In *Rewriting Technics and Applications (RTA'03)*, volume LNCS 2706 of LNCS, Springer, pp 208–233
- GIMBLETT R., 2002, *Integrating GIS and agent-based modelling techniques for simulating social and ecological processes*, Oxford University Press, London, 327 p.
- GINOT,V., LE PAGE, CH., SOUISSI, S., 2002, *A multi-agents architecture to enhance end-user individual based modelling*, *Ecological Modelling*, n°157, pp. 23–41
- GLEICK J., 1988, *Chaos: making a new science*, Penguin, 352 pages
- GODARA A., LASSARRE S., BANOS A., 2007, *Simulating pedestrian-vehicle interaction in an urban network using cellular automata and multi-agent models*, In A. Schadschneider and al. (Editors), *Traffic and granular flow'05*, Springer, Berlin
- GOGUEL F., 1970, *Géographie des élections françaises sous la troisième et quatrième République*, Paris, Armand Colin, 185 p.
- GRIMM V. ET AL., 2006, *A standard protocol for describing individual-based and agent-based models*, *Ecological Modelling*, vol. 198, pp. 115-126
- GUERMOND, Y., 2008, *The Modeling Process in Geography: From Determinism to Complexity*, ISTE, J. Wiley, London, 376 p.
- HAGERSTRAND T., 1970, *What about people in regional science ?*, *Papers of the Regional Science Association*, N°24, pp. 7-21
- HAGGETT P., CHORLEY R. , 1970, *Network analysis in geography*, St. Martin's Press, 348 p.
- HAGGETT P., CLIFF A., FREY A., 1977, *Locational analysis in human geography*, Arnold, 570 p.
- HARVEY D., 1969, *Explanation in geography*, Edward Arnold, 521 p.
- HELBING D., MOLNAR P., FARKAS I., BOLAY K., 2001, *Self-organizing pedestrian movement*, *Environment and Planning B*, n° 28, pp. 361-383

- KAHNEMAN D., 2003, *Maps of bounded rationality: A perspective on intuitive judgment and choice*, In T. Frangsmyr (Ed.), *Nobel Prizes 2002*
- KLEIJNEN, J.P.C., 1987, *Statistical Tools for Simulation Practitioners*, Marcel Dekker, Inc., NY, 429 p.
- KRUGMAN P., 1996, *The self-organizing economy*, Blackwell Publishers, 122 p.
- LANGLOIS, P., 2010, *Simulation des systèmes complexes en géographie, fondements théoriques et applications*, Collection IGAT, Hermès-Sciences Lavoisier, 335 p.
- LANGLOIS, P., DAUDE, E., 2006, *Introduction aux modélisations multi-agents des systèmes complexes en géographie*, in AMBLARD F., PHAN D., (Dir), *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermès-Science, Paris, pp. 358-372
- LAPERRIERE V., BADARIOTTI D., BANOS A., MULLER J.P., 2009, *Structural validation of an individual-based model for plague epidemics simulation*, *Ecological Complexity*, Volume 6, Issue 2, Pages 102-112
- LASSARRE S., GODARA A., 2007, *Pedestrian accident risk assessment in urban systems using virtual laboratory SAMU*, 11th World Conference on Transport Research in Berkeley, 23-28, 2007, 13 p.
- LYNCH, K., 1998, *L'image de la cité*, Dunod, Paris, 221 p.
- MAC EACHREN A., 1994, *Time as a cartographic variable*, *Visualization in Geographic Information Systems*, pp. 115-130.
- MCDANIEL R., DRIEBE J., 2005, *Uncertainty and surprise in complex systems: questions on working with the unexpected*, Springer Verlag, NY, 200 p.
- McFADDEN D., 1979, *Quantitative methods for analysing travel behaviour of individuals: some recent developments*, *Behavioral travel modelling*, pp. 279-318.
- MICHEL O., 2007, *There's Plenty of Room for Unconventional Programming Languages or Declarative Simulations of Dynamical Systems (with a Dynamical Structure)*, Mémoire d'HDR : Informatique, Université d'Evry Val d'Essonne, 111 p.
- MOELLERING H., 1973, *The automated mapping of traffic crashes*, *Survey and Mapping*, Vol. 33, pp. 467-477
- MORENO D., BADARIOTTI D., BANOS A., 2009, *Integrating morphology in urban simulation through reticular automata*, in BAVAUD F., MAGER C., (Dir), *European Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, FGSE, Lausanne, pp. 261-309
- MÜLLER J.P., AUBERT S. 2011, *L'ontologie pour construire une représentation multi-niveau de et par les systèmes sociaux*, In 18èmes Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, 19-23 janvier 2009, Rochebrune, France
- NAGEL, K., & SCHRECKENBERG, M., 1992, *Cellular automaton models for freeway traffic*, *Journal of Physics I*, 2, pp. 2221-2229
- O'SULLIVAN D., 2001, *Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model*, *Environment and Planning B*, vol. 28, pp. 687-705

- OPENSHAW S., 1995, *Developping automated and smart spatial pattern exploration tools for geographical information systems applications*, The Statistician, Vol. 44, n° 1, pp. 3-16
- OPENSHAW S., ABRAHART R., 2000, *Geocomputation*, Taylor & Francis, London, 413 p.
- OPENSHAW S., CHARLTON M., WYMER C., CRAFT A., 1987, *A mark I geographical analysis machine for the automated analysis of point data sets*, International Journal of Geographical Information Systems, Vol. I, n° 4, pp. 335-358
- OPENSHAW S., OPENSHAW C., 1997, *Artificial intelligence in geography*, John Wiley & Sons, Chichester, 329 p.
- OPENSHAW S., WAUGH D., CROSS A., 1994, *Some ideas about the use of map animation as a spatial analysis tool*, Visualization in Geographical Information Systems, pp. 131-138
- PEIRCE C., 1993, *A la recherche d'une méthode*, recueil de textes traduits de Peirce sous la direction de Deledalle E., Théétète éd.
- PORTUGALI J., 2000, *Self-organization and the city*, Springer-Verlag, NY, 352 p.
- PUMAIN D., 1991, *Commentary: Plea for the Experimentation and Comparison of Dynamic Models*, Environment and Planning A 23(4) 463-464
- PUMAIN D., 1998, *Urban Research and Complexity*, in BERTUGLIA C.S., BIANCHI G., MELA A., (Eds) *The City and its Sciences*, Physica, Verlag, Heidelberg, pp. 323-362
- PUMAIN D., 2006, *Alternative explanations of hierarchical differentiation in urban systems*, in PUMAIN D. (Eds), *Hierarchy in natural and social sciences*, Springer, Methodos series 3, pp. 169-222
- PUMAIN D., 2005, *Cumulativité des connaissances*, Revue Européenne des Sciences Sociales, XLIII-131, p. 5-12
- PUMAIN D., SANDERS L., 2013, *Theoretical principles in inter-urban simulation models: a comparison*, Environment and Planning A, *accepted for publication*
- PUMAIN D., SANDERS L., SAINT-JULIEN T., 1989, *Villes et auto-organisation*, Paris, Economica, 192 p.
- RESNICK M., 1994, *Turtles, termites, and traffic jams: explorations in massively parallel microworlds*, MIT Press, 163 p.
- SALTELLI A., CHAN K., SCOTT E.M., 2000, *Sensitivity analysis*, volume 134, Wiley New York, 494 p.
- SALZE P., BANOS A., ET AL., 2011, *Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale: an extended commuting-based interaction potential model*, International Journal of Health Geographics, 10:2 doi:10.1186/1476-072X-10-2
- SANDERS L., (Dir), 2007, *Models in Spatial Analysis*, ISTE, London, 319 p.
- SANDERS L., PUMAIN D., MATHIAN H., GUERIN-PACE F., BURA S., 1997, *SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism*, Environment and Planning B, n° 24, pp. 287-305
- SCHELLING T., 1978, *Micromotives and Macrobehavior*, W.W. Norton & Company, 252 p.

- SCHWEITZER F., 2003, *Brownian Agents and active particles*, Springer-Verlag, 420 p.
- SIEGFRIED A., 1995 (1913 1^{ère} édition), *Tableau politique de la France de l'Ouest*, Paris, Imprimerie Nationale, 636 p.
- SIMON H., 1962, *The architecture of complexity*, Proceedings of the American Philosophical Society, n° 106, pp. 467-482
- STANLEY, H. E., OSTROWSKY, N., 1985, *On growth and form: fractal and non fractal patterns in physics*, Dordrecht/Boston, Springer, 324 p.
- TAILLARD P., 2006, *Quel degré de rationalité favorise la coordination des agents ?*, Revue d'Economie Politique, Vol. 116, n° 1, pp 23-42
- TAKEYAMA M., COUCLELIS H., 1997, *Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra*, International Journal of Geographical Information Science, vol. 11 (1), 73-91
- TIERNEY, L., 1990, *Lisp-Stat: an object-oriented environment for statistical computing and dynamic graphics*, New-York, John Wiley & Sons, 397 p.
- TOBLER W., 1970, *A computer movie simulating urban growth in the Detroit region*, Economic Geography, Vol. 46, pp. 234-240
- TUFTE, E., 1986, *The visual display of quantitative information*, Graphics Press, 197 p.
- TUFTE, E., 1990, *Envisioning information*, Graphics Press, 126 p.
- TUFTE, E., 1996, *Visual explanations : images and quantites*, Graphics Press, 156 p.
- TUKEY J., 1969, *Analysing data: sanctification or detective work?*, The American Psychologist, Vol. 24, pp. 83-91.
- TUKEY J., 1977, *Exploratory data analysis*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 688 p.
- TUKEY J., 1980, *We need both exploratory and confirmatory*, The American Statistician, Vol. 34, n° 1, pp. 23-25.
- TUKEY J., 1986a, *The futur of processes of data analysis*, The Collected Works of John Tukey, Vol. IV, pp. 517-547
- TUKEY J., 1997, *More honest foundations for data analysis*, Journal of Statistical Planning and Inference, n° 57, pp. 21-28
- UNWIN A., 1998, *Exploratory spatial data analysis with local statistics*, The Statistician, Vol. 47, n° 3, pp. 415-421
- UNWIN A., 2000, *Using your eyes – making statistics more visible with computers*, Computational Statistics and Data Analysis, Vol. 32, pp. 303-312
- UNWIN D., 1996, *GIS, spatial analysis and spatial statistics*, Progress in Human Geography, Vol. 20, n° 4, pp. 540-551.
- VARENNE F., 2007, *Du modèle à la simulation informatique*, Vrin, Mathesis, 249 p.
- VARENNE F., 2008, *Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances*, Physique et interrogations fondamentales n°11, Modèles : jusqu'où va le

- réel ?, Société française de physique, 10/12/08, BNF. Vidéo: <http://webcast.in2p3.fr/PIF11/>
- VARENNE F., 2012a, *Les frontières entre modèles formels : juxtaposition, intégration, fusion, composition*, in SCHMID A.-F. (dir), *Epistémologie des frontières*, Paris, Petra, pp. 177-229.
- VARENNE F., 2012b, *Théorie, réalité, modèle : Epistémologie des théories et des modèles face au réalisme dans les sciences*, Editions Matériologiques, 262 p.
- VELLEMAN P., 1997, *The philosophical past and the digital futur of data analysis : 375 years of philosophical guidance for software design on the occasion of John W. Tukey's 80th birthday*, *The practice of data analysis : essays in honor of John Tukey*, pp. 317-337
- WALDROP M., 1994, *Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos*, Penguin Books, 380 p.
- WASSERMAN S., FAUST K., 1994, *Social Network Analysis*, Cambridge University Press, 825 p.
- WATTS D., STROGATZ S., 1998, *Collective dynamics of small-world networks*, *Nature*, vol. 393(4), pp. 440-442
- WEISBUCH G., 1989, *Dynamique des Systèmes Complexes : une introduction aux réseaux d'automates*, Paris, InterEditions / CNRS, 212 p.
- ZEIGLER B., 1976, *Theory of Modeling and Simulation*, Wiley Interscience, New York
- ZWIRN H., 2006, *Les systèmes complexes : Mathématiques et biologie*, Éditions Odile Jacob, coll. « Sciences », 219 p.

Références personnelles classées par thèmes

[A] = Article dans une revue à comité de lecture ; [O] = Ouvrage ou direction d'ouvrage ;
[C] = chapitre d'ouvrage ; [P] = Acte de conférence à comité de lecture ; [V] = Valorisation

Flux transalpins de poids lourds (DEA)

[A] BANOS A., 1999, *A propos des flux transalpins de poids lourds : peut-on parler d'un effet de barrière suisse ?*, Revue Géographique de l'Est, Tome XXXIX, Vol. 4, n° 5, pp. 179-183

[V] BANOS A., DORNBUSCH J., 1997, *Effet de barrière suisse : une autre méthode d'évaluation des conséquences de la réglementation routière suisse*, Notes de Synthèse du Service Economique et Statistique, N° 113, pp. 37-40

Mobilités, transports et risques urbains

[O] BANOS A., BANOS F., BROSSARD T., LASSARRE S., (Dir), 2003, *Géographie des risques des transports*, Paradigme, Orléans, 310 p.

[O] BANOS A., THEVENIN T. (Dir), 2010, *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, Hermès, Paris 244 p.

[O] BANOS A., THEVENIN T. (Dir), 2010, *Systèmes de transport urbain : caractérisation de l'offre et estimation de la demande*, Hermès, Paris 240 p.

[O] BANOS A., THEVENIN T. (Dir), 2011, *Geographical Information and Urban Transport Systems*, Wiley, ISTE, London, 248p.

Stratégie exploratoire

[A] BANOS A., 1999, *Quelle implication de l'utilisateur dans une stratégie de data-mining spatial ? Illustration à partir de l'appréhension spatio-temporelle des accidents de la route en milieu urbain*, Revue Internationale de Géomatique, Vol. 9, n° 4, pp. 441-456

[A] BANOS A., 2001, *Enhancing mobility behaviour analysis using spatial interactive tools and computer intensive methods*, *Geographic Information Sciences*, Vol. 7, n° 1, pp. 35-41

[A] BANOS A., 2002, *Une stratégie d'exploration spatio-temporelle des flux pendulaires. Application à la desserte d'une zone industrielle*, Revue Internationale de Géomatique, Vol. 12, n° 2, pp. 225-244

[A] BANOS A., 2001, *A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données*, Cybergeog, n° 197

[A] BANOS A., LACASA J., 2007, *Spatio-temporal exploration of SARS epidemic*, Cybergeog, article 408

[A] BANOS A., THEVENIN T., 2005, *La carte animée pour révéler les rythmes urbains*, Revue Internationale de Géomatique, Vol 15, n° 1, pp. 11-31

- [C] BANOS A., 2005, *La voie de l'étonnement : favoriser l'abduction dans les Systèmes d'Information Géographique*, in FOTSING J.M. (Dir), *Apport des SIG à la recherche*, Editions Presses Universitaires d'Orléans, pp. 237-254
- [C] BANOS A., BANOS F., 2003, *Towards integrated spatial surveillance tools of urban risks : space-time analysis of road accidents in Lille*, in BANOS A., BANOS F., BROSSARD T., LASSARRE S. (Dir), *Géographie des risques des transports*, Editeurs, Paradigme, Orléans, pp. 9-22
- [C] BANOS A., THEVENIN T., 2008, *Création de champs de potentiel et simulation d'itinéraires à partir de l'enquête ménages-déplacement*, in THERIAULT M., DES ROSIERS F. (Dir), *Information Géographique et Dynamique Urbaine, Volume 1 : Analyse et simulation de la mobilité des personnes*, Hermes Sciences Publishing, pp. 119-138
- [C] BANOS A., THEVENIN T., 2010, *Generation of Potential Fields and Route Simulation Based on the Household Travel Survey*, in THERIAULT M., DES ROSIERS F. (Dir), *Modeling urban Dynamics*, ISTE, London, 352 pp.
- [P] BANOS A., 2001, *Localizing people during surveys: a versatile strategy*, Proceedings of the 6th International Conference on Geocomputation, Brisbane, 21-26 september, 7 p.
- [P] BANOS A., 2002, *From individual statements to market maps : a geomarketing approach to public transport planning*, Actes du XIIème Colloque Européen de Géographie Théorique et Quantitative, Cybergeo, n° 220, 12 p.
- [P] BANOS A., BOLOT J., 2001, *Représentation surfacique d'événements ponctuels discrets : comparaison méthodologique à partir de la distribution des accidents de la route dans la communauté urbaine de Lille*, Actes des Quatrièmes Rencontres de ThéoQuant, Besançon, pp. 235-244.
- [P] BANOS A., HUGUENIN-RICHARD F., 2000, *Spatial distribution of road accidents in the vicinity of point sources: application to child pedestrian accidents*, Geography and Medicine, Editions Elsevier, pp. 54-64
- [P] BANOS A., HUGUENIN-RICHARD F., 2001, *Méthode d'identification de concentrations locales d'événements dans un semis de points : application aux accidents de la route*, Actes des Quatrièmes Rencontres de ThéoQuant, Besançon, pp. 245-253.
- [V] BANOS A., 2006, *Geosimulating the swarming city: a bouquet of alternatives*, Geoinformatics, December, Vol 8, pp.58-60
- [V] BANOS A., JOSSELIN D., 2004, *Public Transport, Geo-marketing and GIS Technologies : Board the TGV and 'Go with the Flow'*, GeoInformatics, Vol. 7, pp. 10-13
- [V] BANOS A., LACASA J., 2005, *Mapping the SARS epidemic: interactive exploration and new approaches for understanding*, Geoinformatics, March, Vol 8, pp.22-25

Systèmes complexes

- [A] BANOS A., 2010, *La simulation à base d'agents en sciences sociales : une béquille pour l'esprit humain ?*, Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales, Volume 5, numéro 2, pp. 91-100

-
- [A] BANOS A., MORENO D., PIVANO C., TAILLANDIER P., 2011, *Chrystaller, still alive!*, Cybergeog, <http://cybergeog.revues.org/24878>
- [C] BANOS A., LASSARRE S., PARE A., TAZDAIT N., 2010, *Simuler les déplacements de piétons dans des environnements dynamiques*, in BANOS A., THEVENIN T. (Dir), *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, Hermès, pp. 117-144
- [C] BANOS A., SANDERS L., 2012, *Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes*, In HEGRON G., *La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain*, Commissariat général au développement durable, Paris, pp. 50-63
- [C] BANOS A., SANDERS L., 2013, *Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie*, in KUPIEC J., SIBERSTEIN M. ET VARENNE F. (Dir), *Modèles, Simulations, Systèmes*, Editions Matériologiques, A paraître
- [O] ALAOUI A., BANOS A., BERTELLE C., DUCHAMP G., (Dir), 2011, *Emergent Properties for Natural and Artificial Complex Systems*, Proceedings of EPNACS 2011, September 15, Vienna, Austria, 109 p.
- [O] ALAOUI A., BANOS A., BERTELLE C., DUCHAMP G., (Dir), 2012, *Self-Organization, Management and Control*, Proceedings of SOMC-12, September 6, Brussels, Belgium, September 15, Vienna, Austria, 39 p.
- [O] BANOS A., 2008, *Simulation de processus émergents dans l'espace géographique*, Colloque International de l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences « Emergence : de la fascination à la compréhension », Paris, 15-16 décembre 2008, 25 p.
- [O] BANOS A., LANG C., (Dir), 2007, *Modéliser et simuler les mobilités spatiales et les systèmes de transport : nouveaux enjeux, nouvelles approches*, Cahiers Scientifiques du Transport, n°52, 118 p.
- [O] BANOS A., PARROTT L., (Dir), 2009, *Simulation spatiale à base d'agents*, Revue Internationale de Géomatique, Vol. 4/2009, 172 p.
- [P] BANOS A., 2009, *Simulating pedestrian behavior in complex and dynamic environments: an agent-based perspective*, in Bavaud F., Mager C., (Dir), *European Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, FGSE, Lausanne, pp. 1-27

Projet ELIANE

- [A] CHARREIRE H., CASEY R., SALZE P., KESSE-GUYOT P., SIMON C., CHAIX B., BANOS A., BADARIOTTI D., TOUVIER M., WEBER C., OPPERT JM., 2010, *Leisure-time physical activity and sedentary behavior clusters and their associations with overweight in middle-aged French adults*, International Journal of Obesity, N°34, pp.1293–1301
- [A] CHARREIRE H., CASEY R., SALZE P., SIMON C., CHAIX B., BANOS A., BADARIOTTI D., TOUVIER M., WEBER C., OPPERT JM., 2010, *Measuring the food environment using geographical information systems: a methodological review*, Public Health Nutrition, N° 13, pp. 1773–1785
- [A] BILLAUDEAU N., OPPERT JM., SIMON C., CHARREIRE H., CASEY R., SALZE P., BADARIOTTI D., BANOS A., WEBER C., CHAIX B., 2011, *Investigating disparities in spatial accessibility to and characteristics of sport facilities: Direction, strength, and spatial scale of associations with area income*, Health & Place, Volume 17, Issue 1, Pages 114-121
- [A] CASEY R., OPPERT JM., WEBER C., CHARREIRE H., SALZE P., BADARIOTTI D., BANOS A., FISCHLER C., GIACOMAN HERNANDEZ C., CHAIX B., SIMON C., 2011, *Determinants of childhood obesity: what can we learn from built environment studies?*, Food Quality and Preference, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.06.003>
- [A] CHARREIRE H., SIMON C., CHAIX B., CASEY R., SALZE P., GIACOMAN C., BANOS A., BADARIOTTI D., FISCHLER C., WEBER C., OPPERT JM., 2011, *Comment évaluer l'environnement alimentaire à l'aide des systèmes d'information géographique ? Revue méthodologique*, Cahiers de nutrition et de diététique, 46, pp. 111-119
- [A] SALZE P., BANOS A., OPPERT JM., CHARREIRE H., CASEY R., SIMON C., CHAIX B., BADARIOTTI D., WEBER C., 2011, *Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale: an extended commuting-based interaction potential model*, International Journal of Health Geographics, 10:2 doi:10.1186/1476-072X-10-2
- [A] CHARREIRE H., WEBER C., CHAIX B., SALZE P., CASEY R., BANOS A., BADARIOTTI D., KESSE-GUYOT E., HERCBERG S., SIMON C., OPPERT JM., 2012, *Identifying built environmental patterns using cluster analysis and GIS: Relationships with walking, cycling and body mass index in french adults*, International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 9:59 doi:10.1186/1479-5868-9-59

Projet SAMU

- [A] BANOS A., LASSARRE S., 2008, *Simuler les interactions piétons-automobilistes dans un environnement urbain : une approche à base d'agents*, Territoire en Mouvement, n°1, pp. 58-66
- [P] BANOS A., GODARA A., LASSARRE S., 2005, *SAMU : contribution to the study of urban "anthill"*, Proceedings of the Second Indian International Conference on Artificial Intelligence, Pune, India, 20-22 December, 13 p.
- [P] BANOS A., GODARA A., LASSARRE S., 2005, *Simulating pedestrians and cars behaviours in a virtual city : an agent-based approach*, Proceedings of the European Conference on Complex Systems, Paris, 14-18 November, 4 p.

- [P] GODARA A., LASSARRE S., BANOS A., 2007, *Simulating pedestrian-vehicle interaction in an urban network using cellular automata and multi-agent models*, In. Schadschneider A., and al. (Eds), *Traffic and granular flow'05*, Springer, Berlin

Projet SIMPEST

- [A] BADARIOTTI D., BANOS A., LAPERRIERE V., 2007, *Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar*, *Cybergeo*, article 393
- [A] BADARIOTTI D., LAPERRIERE V., BANOS A., 2009, *Réalisation d'un modèle contingent à base d'agents pour simuler des épidémies de peste à Madagascar Le modèle SIMPEST*, *Revue Internationale de Géomatique*, N°4/2009, pp. 253-275
- [A] LAPERRIERE V., BADARIOTTI D., BANOS A., MULLER J.P., 2009, *Structural validation of an individual-based model for plague epidemics simulation*, *Ecological Complexity*, Volume 6, Issue 2, pp. 102-112
- [C] BADARIOTTI D., BANOS A., LAPERRIERE V., 2010, *Modélisation d'un système complexe : la peste*, in Weisbuch G., Zwirn A. (Dir), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*, Vuibert, Paris, pp. 221-241
- [P] BADARIOTTI D., BANOS A., LAPERRIERE V., 2006, *SIMPEST: un modèle contingent à base d'agents pour simuler les épidémies de peste à Madagascar*, *Colloque SAGEO'06*, 11-13 Septembre, Strasbourg, 19 p.
- [P] BADARIOTTI D., BANOS A., LAPERRIERE V., 2007, *Systèmes complexes et catastrophes épidémiques. L'apport de la modélisation individu-centrée à l'étude des catastrophes sanitaires : le cas de la peste à Madagascar*, *Actes des 14èmes Journées de Rochebrune*, Megève, 21-27 janvier 2007, Editions ENST (Paris), pp. 33-44
- [P] LAPERRIERE V., BADARIOTTI D., BANOS A., 2007, *Sensitivity of plague local epidemics to the population size and spatial distribution*, *Proceedings of the 15th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, Montreux (Switzerland), 7-11 September 2007, pp. 233-239

Projets REMUS et RAUMULUS

- [A] BADARIOTTI D., BANOS A., MORENO D., 2007, *Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus*, *Cybergeo*, article 403
- [A] BADARIOTTI D., BANOS A., MORENO D., 2009, *Morphologie urbaine et réseau : Etude des discontinuités et des ruptures induites par le réseau de circulation à l'aide du modèle Remus*, *Revue Internationale de Géomatique*, Vol 19/1, pp. 45-66
- [A] MORENO D., BADARIOTTI D., BANOS A., 2012, *Un automate cellulaire pour expérimenter les effets de la proximité dans le processus d'étalement urbain : le modèle Raumulus*, *Cybergeo*

- [P] BADARIOTTI D., BANOS A., MORENO D., 2006, *Modélisation de la structure spatiale urbaine par un automate cellulaire non stationnaire : le modèle REMUS*, Colloque SAGEO'06, 11-13 Septembre, Strasbourg, 16 p.
- [P] MORENO D., BADARIOTTI D., BANOS A., 2009, *Integrating morphology in urban simulation through reticular automata*, in BAVAUD F., MAGER C., (Dir), *European Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, FGSE, Lausanne, pp. 261-309
- [P] Moreno D., Badariotti D., Banos A., 2012, *Reticular automata models: using non-regular neighborhoods to simulate segregation*, CAMUSS 2012 (Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems), November 8-10, Porto, Portugal, 13 p.

Projet SMArtSlowSpeed

- [C] BANOS A., GENRE-GRANDPIERRE C., 2012, *Towards new metrics for urban road networks. some preliminary evidence from agent-based simulations*, in HEPPENSTALL, A.J.; CROOKS, A.T.; SEE, L.M.; BATTY, M. (Eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp. 627-642
- [P] GENRE-GRANDPIERRE C, BANOS A., 2010, *New types of metrics for urban road networks explored with S3: an agent-based simulation platform*, in BAI Q., FUKUTA N. (Dir), *Advances in Practical Multi-Agent Systems, Studies in Computational Intelligence*, Volume 325, Springer, pp. 267-286

Projet SMArtSegregation

- [A] BANOS A., 2010, *A la recherche d'effets réseaux dans la dynamique du modèle de ségrégation de Schelling*, Cybergeog, [article 492](#)
- [A] BANOS A., 2012, *Network effects in Schelling's model of segregation: new evidences from agent-based simulation*, *Environment and Planning B*, Volume 39, n°2, 393 – 405
- [P] BANOS A., 2009, *Quelle ontologie spatiale dans le modèle de Schelling ?*, Journées de Rochebrune, Megève, 18-24 janvier, 12 p.

Projets MAGE et SIMTRAP

- [A] BANOS A., CHARPENTIER A., 2010, *Simulating pedestrian movement in dynamic environments*, Cybergeog, <http://cybergeog.revues.org/index23131.html>
- [A] BANOS A., PARE A., 2009, *Simuler les déplacements de piétons dans une station de métro : une approche à base d'agents*, *Revue Internationale de Géomatique*, N°4/2009, pp. 277-302
- [P] BANOS A., CAMPS JB, CHARPENTIER A., 2006, *Simuler les déplacements de piétons dans une station de métro*, Colloque SAGEO'06, 11-13 Septembre, Strasbourg, 18 p.
- [P] BANOS A., CHARPENTIER A., 2007, *Simulating pedestrian behaviour in subway stations with agents*, *Proceedings of the 4th European Social Simulation Association*, Toulouse, France, September 10-14, p. 611-621

- [P] BANOS A., PARE A., 2008, *Des agents dans le métro : le modèle MAGE*, Actes de la conférence INFORSID 2008, Fontainebleau, 27-28 juin, 13 p.
- [P] FIEGEL J., BANOS A., BERTELLE C., 2009, *Modeling and simulation of pedestrian behaviors in transport areas: the specific case of platform/train exchanges*, ICCSA 2009, 29 juin-2 juillet, Le Havre, 11 p.

Projet MIRO

- [C] BANOS A., BOFFET-MAS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2010, *MIRO : des trajectoires individuelles à la ville en mouvement*, in ANTONI JP (Dir), *Modéliser la ville : formes urbaines et politiques de transport*, Economica, 448 p.
- [C] BANOS A., BOFFET-MAS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2010, *Simuler la mobilité urbaine quotidienne : le projet MIRO*, in BANOS A., THEVENIN T. (Dir), *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, Hermès, pp. 51-88
- [P] BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2005, *Approche multi-agents de la ville en mouvement. Réflexions autour du projet MIRO*, Proceedings of the Joint Conference on Multi-Agent Modeling for Environment Management, CABM-HEMA-SMAGET 2005, Bourg St Maurice-Les Arcs, France, mars 2005, 17 p.
- [P] BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2005, *Modéliser et simuler la « fourmilière » urbaine par les systèmes multi-agent*, Actes du Colloque SAGEO, Avignon, 21-23 juin, 15p.
- [P] BANOS A., CHARDONNEL S., LANG C., MARILLEAU N., THEVENIN T., 2005, *Simulating the swarming city: a MAS approach*, Proceedings of the 9th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, London, June 29-30, 15p.
- [P] BANOS A., MARILLEAU N., THEVENIN T., CHARDONNEL S., LANG C., BOFFET-MAS A., 2006, *Génération d'emplois du temps individuels pour une simulation multi-agents des mobilités urbaines quotidiennes*, Colloque SAGEO'06, 11-13 Septembre, Strasbourg, 17 p.

Table des figures

<i>Figure 1 : Une exploration multi-dimensionnelle graphique des affections respiratoires dans le Doubs. Les objets jaunes apparaissant dans chacune des fenêtres ont été sélectionnés à partir de l'histogramme en bas à gauche (GéoGrapheur</i>	24
<i>Figure 2 : La mobilité quotidienne révélée par la téléphonie mobile. Nombre de déplacements entre stations d'antennes à Paris, le 11 mars 2009 à 8h (prototype développé par Quentin Lobbé et Julie Fenchong)</i>	25
<i>Figure 3 : Le prototype SMArtExposure permet de simuler les mobilités quotidiennes et l'exposition à la pollution industrielle de populations vulnérables dans des contextes pauvres en données (ici, la Sicile)</i>	26
<i>Figure 4 : Un protocole de transformation des données spatio-temporelles pour révéler structures et dynamiques spatiales (GéoGrapheur)</i>	27
<i>Figure 5 : Une spirale de traitements pour explorer de manière active les dynamiques spatio-temporelles à l'œuvre (GéoGrapheur)</i>	28
<i>Figure 6 : L'incomplétude fondamentale du cube de MacEachren</i>	30
<i>Figure 7 : De la navigation à la formulation de requêtes spatiales complexes pour estimer la demande de transports en commun dans le Pays de Montbéliard. Les pics temporels correspondent à des intensités de départ au travail vers la zone industrielle de Technoland (GéoGrapheur)</i>	32
<i>Figure 8 : Navigation dans l'espace multi-dimensionnel créée par une Analyse en Composantes Principales et une classification par nuées dynamiques (GéoGrapheur)</i>	33
<i>Figure 9 : Vers des territoires de desserte en Transport Public. Comparaison de profils temporels de zones appartenant à la même classe statistique (GéoGrapheur)</i>	34
<i>Figure 10 : Au cœur de l'autocorrélation spatiale avec les indicateurs locaux d'association spatiale –LISA. Le coefficient global de Moran (0.131) est décomposé en valeurs locales, positives et négatives. Leur cartographie révèle polarités et discontinuités spatiales dans la géographie des affections respiratoires dans le Doubs (GéoGrapheur)</i>	35

<i>Figure 11 : L'interface GWR de GéoGrapheur . Le même modèle (ici une régression linéaire) est calculé localement, au sein de la fenêtre de sélection spatiale, les entités spatiales étant pondérées en fonction inverse de leur distance au centre de la fenêtre (GéoGrapheur).</i>	36
<i>Figure 12 : Pondération de l'estimateur de densité d'accidents de la circulation par la densité du réseau routier (SMArtKDE)</i>	37
<i>Figure 13 : Accessibilité des populations aux supermarchés dans le Bas-Rhin, en tenant compte uniquement des communes de résidence à gauche et en intégrant les déplacements domicile-travail à droite (Salze et al., 2011).</i>	37
<i>Figure 14 : Une vision standard mais fort utile des systèmes complexes, entre micro et macro (Source : Eric Daudé).</i>	41
<i>Figure 15 : Le « fer à cheval », une grille de lecture des modèles de systèmes complexes en géographie (Banos et Sanders, 2013).</i>	42
<i>Figure 16 : Dix ans de déambulation au sein du « fer à cheval »</i>	44
<i>Figure 17 : Proportion de piétons traversant raisonnablement au cours de la simulation, pour deux niveaux de bruit différent ($E_n = 0,1$ et $E_n = 0,5$)</i>	47
<i>Figure 18 : Exemple de sorties de simulation permettant d'alimenter un modèle de risque dans GéoGrapheur (SAMU et GéoGrapheur)</i>	48
<i>Figure 19 : « Pourtant, ça devait être simple au départ... » ou la dernière version de SAMU, avec ses nombreux paramètres (SAMU)</i>	49
<i>Figure 20 : La propriété « accélérante » des réseaux routiers mise en évidence par Cyrille Genre-Grandpierre (Banos et Genre-Grandpierre, 2012)</i>	50
<i>Figure 21 : Le modèle SMArtSlowSpeed permet de créer des réseaux routiers selon différentes géométries, de les caractériser en terme de vitesse, puis d'y localiser des feux de signalisation selon différentes stratégies. Un modèle de trafic à base d'agents permet d'estimer l'efficacité du réseau créé.</i>	51
<i>Figure 22 : La stratégie de localisation des feux de signalisation dans S^3 (SMArtSlowSpeed)</i>	52
<i>Figure 23 : La propriété « accélérante » des réseaux routiers peut être inversée au moyen d'un nombre réduit de feux de signalisation bien positionnés et de durée suffisante (Banos et Genre-Grandpierre, 2012)</i>	52
<i>Figure 24 : La congestion routière permet d'obtenir des résultats très proches et agit déjà comme une métrique lente [« p » renvoie ici à l'étape de randomisation décrite dans SAMU] (Banos et Genre-Grandpierre, 2012)</i>	53
<i>Figure 25 : Illustration de possibles effets de cliques dans la dynamique ségrégative du modèle de Schelling : les nœuds interfaces (entourés) verrouillent les deux cliques du haut et en bloquent l'évolution (SMArtSegregation)</i>	55
<i>Figure 26 : Quatre réseaux de taille et densité identiques et présentant des effets de cliques croissant de gauche à droite (SMArtSegregation)</i>	56

<i>Figure 27 : Exemples de configurations spatiales obtenues après convergence (SMArtSegregation)</i>	56
<i>Figure 28 : Influence du seuil de tolérance sur le niveau de ségrégation global (« Mixity »). Lorsque la tolérance est élevée, les quatre types de réseaux montrent une forte mixité. Celle-ci décroît très rapidement lorsque la tolérance baisse, mais significativement plus vite pour les réseaux invariant d'échelle et fractal. Seuls ces deux réseaux permettent de converger vers un équilibre pour les seuils de tolérance inférieurs à 10%. Les intervalles de variation ont été obtenus à partir de 1000 répliquions (SMArtSegregation)</i>	57
<i>Figure 29 : Une structure spatiale urbaine fractale favoriserait à la fois la mixité des fonctions urbaines et l'accessibilité des populations à ces fonctions (source : Frankhauser et al., 2007)</i>	58
<i>Figure 30 : Adjonction d'un graphe d'orientation à l'espace physique de la station de métro Montparnasse (MAGE)</i>	61
<i>Figure 31 : MAGE en action (MAGE)</i>	62
<i>Figure 32 : Diagramme débits-densités obtenus à partir de flux bi-directionnels, pour plusieurs scénarios (l'intervalle de variation autour de chaque point a été obtenu à partir de 10 répliquions) (MAGE)</i>	62
<i>Figure 33 : Un scénario de ré-aménagement du hall d'accueil de la Cité des Sciences et de l'Industrie (SMArtArchi)</i>	63
<i>Figure 34 : Exemple de paramètres d'un scénario de simulation</i>	64
<i>Figure 35 : Les lignes de force révélées (SMArtArchi)</i>	64
<i>Figure 36 : Le modèle SIMTRAP (SIMTRAP)</i>	66
<i>Figure 37 : Les palpitations du territoire révélées (Banos et Thévenin, 2005)</i>	67
<i>Figure 38 : L'aquarium spatio-temporel de la Time Geography. Les individus sont localisés de manière indissociable dans le temps et l'espace (Source : Couclelis, 1992)</i>	68
<i>Figure 39 : Le projet d'ensemble de MIRO</i>	69
<i>Figure 40 : Exemple de profils d'agents synthétiques générés par tirage aléatoire. A cette étape, les incohérences sont détectées (ici l'agent A10000 possède un temps de transport nul mais en Transports Publics)</i>	70
<i>Figure 41 : Exemple d'évolution du planning d'un agent en fonction de son expérience passée, (en vert, le domicile, en rouge le travail, en bleu le transport)</i>	70
<i>Figure 42 : Distribution horaire des individus observés et simulés pour le motif travail</i>	71
<i>Figure 43 : Le jeu sérieux SMrtAccess permet à des acteurs humains d'agir sur le même système urbain de manière non coordonnée mais mutuellement interdépendante (SMArtAccess)</i>	73
<i>Figure 44 : Une spirale vertueuse à réinventer en permanence</i>	75
<i>Figure 45 : la révolution des données « massives »</i>	78

Figure 46 : La « Machine d'Analyse Géographique » de Stan Openshaw, développée dans SMArtGAM. Les deux semis de points (rouge et vert) sont comparés et les sur-représentations locales (« points chauds ») de points rouges sont identifiées. Les points rouges appartenant à un même point chaud sont connectés (SMArtGAM). 83

Figure 47 : Le lissage par noyaux (Kernel Density Estimation) développé dans SMArtKDE. Une surface (densité de probabilité) est construite à partir du semis de points initial, grâce à une fenêtre mobile circulaire (kernel) parcourant la zone (SMArtKDE). 84

Table des matières

Introduction : Itinéraire d'un géographe gâté	11
Explorer sans relâche les systèmes géographiques	21
Voir, toujours plus loin	23
Et si le vrai luxe c'était le calcul ?	31
L'irréductible complexité des systèmes géographiques	38
Y a-t-il un pilote dans l'avion ?	45
Partager l'espace, à ses risques et périls	46
Des métriques lentes pour maîtriser l'étalement urbain	49
Cette complexité nous dépasse, feignons d'en être les organisateurs	53
A la conquête de la fourmilière urbaine	59
Faisons les marcher : de MAGE à SIMTRAP	59
Des trajectoires individuelles à la ville en mouvement	66
En guise de conclusion : Libérer les pratiques de modélisation en Géographie et SHS	75
Références bibliographiques	85
Table des figures	103
Table des matières	107