

Construction inter-disciplinaire de multi-modélisation pour l'étude des systèmes de villes

Paul Chapron*, Clémentine Cottineau**, Romain Reuillon***, Sébastien Rey-Coyrehourcq**, Clara Schmitt**

* : post-doctorant, UMR Géographie-Cités, GeoDiverCity

** : doctorant(e), Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR Géographie-Cités, GeoDiverCity

*** : ingénieur de recherche, UMR Géographie-Cités, GeoDiverCity

“La vertu systémique est [...] de se situer à un niveau transdisciplinaire, qui permet à la fois de concevoir l'unité de la science et la différenciation des sciences, non seulement selon la nature matérielle de leur objet, mais aussi, selon les types et les complexités des phénomènes d'association/organisation.”

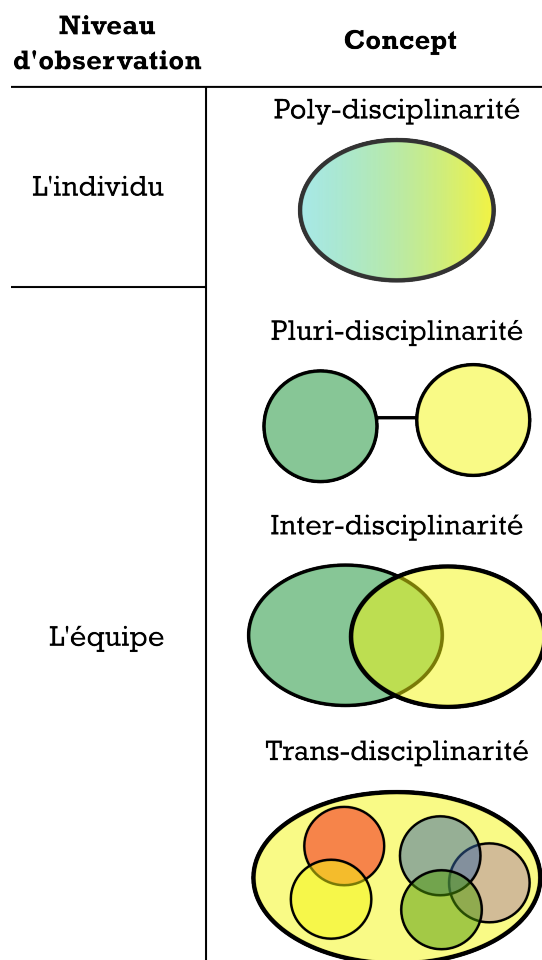
(Morin, 2005, p 29)

L'étude des systèmes complexes apparaît transversale à la catégorisation disciplinaire, et ce pour au moins deux raisons :

Premièrement, cet objet de recherche se réfère à une dynamique, à un fonctionnement multi-niveaux et à des processus d'interactions à l'origine de phénomènes d'émergence, où aucune discipline ne semble donc plus légitime qu'une autre pour traiter ces objets (Morin, 2005 ; Banos, 2013). Au contraire, la recherche de chaque domaine sur les systèmes complexes semble profiter à l'ensemble des disciplines, et ce d'autant plus lorsqu'elles se rencontrent (Bourgine et al., 2009; Weisbuch, Zwirn, 2010).

Deuxièmement, le caractère non-linéaire des relations et la multiplicité des éléments en interaction compliquent leur étude et rendent impossible la résolution mathématique de leur dynamique globale. Le développement de l'étude des systèmes complexes est donc allé de pair avec un usage largement diffusé de la simulation comme outil pour animer et tester les mécanismes de production des phénomènes recherchés (Gilbert, Troitzsch, 1999). Or cette approche “contient des éléments méthodologiques hétérogènes (formalisation logique et/ou mathématique, attention aux logiques des acteurs, modélisation des structures d'interdépendance, sensibilité à la variabilité des contextes, etc.)» (Manzo, 2005, p 63), et s'accompagne d'une formalisation sous forme de programme informatique : le modèle implanté (Sibertin-Blanc, 2010). C'est sur ce point et du fait de l'hétérogénéité de compétences requises par cet outil que l'inter-trans-pluri-disciplinarité semble un passage obligé.

Figure 1 : Poly, pluri, inter ou trans ?



“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”
(Banos, 2013, p 12)

2013 - Géographie-Cités - GeoDiverCity

Nous avons représenté dans la figure 1 quatre formes de rencontre entre disciplines à deux niveaux d'observation : l'individu-chercheur et l'équipe de recherche. Ainsi, nous définissons la polydisciplinarité comme la double, parfois triple, formation de certains chercheurs. Au sein de notre équipe, il existe ainsi un informaticien-géographe, une ingénieur agronome-géographe, une géographe-économiste. Cette polydisciplinarité individuelle n'implique évidemment pas que chacun pourrait se passer des compétences de chercheurs d'autres disciplines, mais elle pourrait au contraire favoriser la rencontre, le travail et le dialogue dans les projets à plusieurs disciplines : « *la démarche reste personnelle et ne nécessite pas le partage d'un projet commun (il semble que cela soit la manière la plus courante de débiter dans l'interdisciplinarité mais elle peut rester occasionnelle)* » (Barrué-Pastor, 1992, p 458).

Ainsi, au niveau de l'équipe de recherche, trois formules semblent se distinguer :

Une approche *pluri-disciplinaire* serait selon nous caractéristique de projets partageant un objet de recherche commun abordé par des chercheurs de différentes disciplines. Elle impliquerait le partage de réflexions, de méthodes, de résultats, mais pas de véritable processus de recherche croisant deux ou plusieurs disciplines. Dans le cas de la rencontre entre géographie, économie, archéologie et

informatique par exemple, l'approche pluri-disciplinaire consisterait par exemple à produire pour les premières des modèles conceptuels d'interactions entre villes ou points de peuplement, et à confier la formalisation, l'implémentation et/ou l'intégration des modules de modèles aux informaticiens.

Une approche *inter-disciplinaire* correspondrait à la rencontre autour d'un objet de recherche complexe regroupant plusieurs champs disciplinaires, non pas en association, mais en interaction, c'est-à-dire en recherche conjointe à partir d'un projet co-construit de modélisation, qui n'est pas isolé dans l'une ou l'autre des disciplines mises à profit, mais le socle commun d'où vont découler des interprétations et des apports de connaissances différents dans chaque discipline participante. L'insertion de nos pratiques dans un cadre "systèmes complexes" suppose voire impose une ouverture à la fois dans le cadre de la construction mais aussi de l'évaluation des modèles. Les techniques qui font défaut à notre discipline existent dans le cadre d'autres disciplines des systèmes complexes, mais celles-ci sont de prime-abord bien souvent inaccessibles car elles apparaissent sous une forme "brute", propre à un champ restreint d'application, qu'il nous faut encore intégrer pour véritablement parler d'inter-disciplinarité. Au final, souvent clamée comme le point fort des systèmes complexes, cette diffusion des méthodes et des outils, pour qu'elle soit effective, doit encore être concrétisée par des équipes inter-disciplinaires, afin de mettre en perspective et d'intégrer ces nouveautés dans un contexte contraint par des objectifs de recherche d'abord tournés vers la géographie (dans notre cas).

Enfin, nous conservons le terme de *trans-disciplinaire* pour qualifier non pas des équipes ou des chercheurs, mais des pratiques et méthodes - qu'elles soient développées dans un cadre interdisciplinaire ou non - qui sont adoptées/adaptées largement par plusieurs disciplines. Les approches modélisatrices sont alors trans-disciplinaires.

Ce que nous souhaitons présenter lors des rencontres multi-disciplinaires de Rochebrune est un projet interdisciplinaire rassemblant des chercheurs en géographie et des chercheurs en informatique, autour de la construction de familles de modèles d'interactions entre villes. Les modèles sur lesquels nous nous appuyons sont SimpopLocal et MARIUS¹, et ils se situent dans la continuité d'une famille de modèles plus large : SIMPOP.

SimpopLocal étudie la structuration hiérarchique de peuplements au moment de l'émergence des villes, quelques 3000 ans après celle de l'agriculture (Bairoch, 1985) en simulant la dynamique de croissance de systèmes de peuplement sous contrainte environnementale. À visée clairement exploratoire, ce modèle vise d'abord à reproduire et à étudier dans des conditions particulières (fortes contraintes environnementales) un phénomène très bien décrit dans la littérature par un fait stylisé : l'organisation hiérarchique de systèmes de peuplements sous forme d'une distribution rang-taille à partir des interactions spatiales (échanges d'information notamment) entre les unités de peuplement (Berry, 1964).

¹ Modélisation des Agglomérations de Russie Impériale et Union Soviétique

MARIUS est un modèle qui vise à reproduire les trajectoires des villes de l'ex-Union soviétique. À partir d'une configuration initiale correspondant à la situation réelle des villes de cet espace en 1959, nous cherchons par simulation à aboutir à une configuration finale proche de la situation observée en 2010, tout en reproduisant l'essentiel de la diversité des trajectoires urbaines observées empiriquement. La construction de ce modèle est réfléchi en amont pour intégrer les ajouts successifs et alternatifs de mécanismes (par exemple la redistribution territoriale, l'échange de biens, etc.) et d'éléments de l'environnement de simulation (l'effet de la distance, la présence de ressources localisées, etc.). Il se base sur des règles d'interaction en partie communes avec celles développées pour simuler les échanges entre villes européennes ou américaines (Simpop2 et EuroSim; Sanders et al., 2007; Bretagnolle, Pumain, 2010) et permet ainsi d'évaluer le degré de spécificité des règles nécessaires à la reproduction des trajectoires urbaines post-soviétiques.

Cette famille de modèles repose sur la théorie évolutive des systèmes de villes (Pumain, 1997) et poursuit un triple objectif. Premièrement, implémenter cette théorie en des objets manipulables et accessibles : les modèles. Un modèle de simulation probant ajoute non seulement à la validité de la théorie, mais la rend également opérationnelle, actionnable. D'autre part, la famille de modèles SIMPOP rassemble des modèles hétérogènes, qui, s'ils partagent la même théorie, ont été conçus pour être appliqués à différents objets géographiques. Ce faisant, elle autorise une vision réflexive de la théorie, en permettant la distinction et la comparaison des éléments constitutifs de ces modèles. Distinguer les éléments communs, partagés par tous les systèmes de villes, de ceux qui relèvent de chaque pays dont le système urbain est modélisé permet de mieux cerner le domaine d'application de la théorie et les conséquences de son adaptation à un contexte géo-historique particulier. Enfin, comme tout dispositif expérimental virtuel, la famille de modèles de simulation permet de tester différentes hypothèses, d'explorer la dynamique des systèmes modélisés, et d'envisager des expériences impossibles hors de la simulation, permettant à terme d'amender le corpus théorique.

1. Les défis de l'inter-disciplinarité

Cette discussion et ce retour d'expérience portent sur les défis posés par le projet d'inter-disciplinarité et les dispositifs qui ont pu être mis au point pour tenter d'y répondre. Les défis principaux posés dans le cadre de ces projets inter-disciplinaires peuvent se répartir en quatre catégories.

1.1. Dialoguer

« Si le mythe de la construction d'un langage commun est vite tombé, il a fait place à la recherche de correspondances entre mots, concepts et définitions, mais aussi à l'émergence d'éléments de vocabulaire qui ont facilité la communication » (Barrué-Pastor, 1992, p 465).

En premier lieu, on peut identifier le défi du *dialogue* et l'inter-compréhension entre chercheurs de disciplines différentes. En amont des projets, il s'agit d'expliquer et de comprendre les objectifs de toutes les parties, leurs enjeux, et d'identifier avec un vocabulaire explicite, désambiguïsé et partagé, les différentes questions de recherche. Cette étape implique autant des processus de traduction entre disciplines que des moments réflexifs sur les hypothèses et résultats attendus implicites au sein d'une même discipline. Ce dialogue préalable a fait intervenir des acculturations de géographes à la méthodologie de la simulation (itérations, calcul distribué, synchronicité/asynchronicité, équi-finalité, reproductibilité, etc.) autant que des explicitations de la théorie des systèmes de villes et de la notion de faits stylisés (configurations déduites de l'observation et de l'étude statistique d'un système de villes particulier ou généralisées à partir de la comparaison de plusieurs systèmes) en direction des informaticiens.

1.2. Innover dans les différentes disciplines

« Certaines innovations méthodologiques peuvent être interprétées comme étant le résultat d'un niveau d'exigences qui ne cesse de monter. Exigence scientifique d'autant plus stimulée qu'elle se situe dans un contexte où l'interdisciplinarité peut être indifféremment perçue comme une pratique dévalorisante ou bien stimulante. Cette pratique de l'inconfort a favorisé paradoxalement les audaces méthodologiques. »

(Barrué-Pastor, 1992, p 471).

Le second défi de ces projets inter-disciplinaires concerne la *production de connaissances dans les différents domaines* de recherche. Si par production de connaissances nous entendons la mise en oeuvre de nouvelles techniques, ou de nouvelles méthodologies, alors il faut replacer leur construction dans un cadre temporel. Ces outils et méthodologies doivent être éprouvés pour s'avérer robustes, et c'est probablement selon un cercle vertueux, fait d'allers-retours entre utilisateur et créateur, que s'enrichissent et se construisent les outils qui font aujourd'hui figures de standard. Sans compter que le développement de nouvelles méthodologies s'appuyant sur ces outils n'exclut pas la mise à jour de nouveaux besoins, la boucle vertueuse étant alors enclenchée. À ce titre, les récits des géographes (Pumain, Robic, 2002) montre bien comment J.-P. Benzécri et les autres acteurs de la statistique française ont co-construit leurs outils en s'appuyant sur de nombreux cours ou ateliers fournissant moult retours sur la performance de leurs outils.

1.3. Fixer les limites

Troisièmement, un véritable dialogue et la construction inter-disciplinaire d'une famille de modèles doit aussi passer par un défi de compréhension des *frontières* propres à chacune des disciplines en jeu. Or les arbitrages possibles et acceptables dans chaque champ ne sont pas évidents pour tous. Par exemple, les contraintes relatives à l'exécution des expériences de simulation *in silico* peuvent

nécessiter de simplifier les mécanismes géographiques pour rester dans des temps de calcul acceptables au terme des nombreuses républications du modèle (jusqu'à 500 000 exécutions dans le cas de SimpopLocal ; Schmitt et al., 2013) et des procédures de calibration et d'évaluation automatiques. Pour autant, toutes les simplifications n'ont pas la même valeur théorique et le géographe doit veiller à maintenir certaines frontières. Inversement, la garantie de la répétabilité des expériences de simulation et d'un certain niveau de parcimonie des modèles entre autres peuvent être des frontières que les informaticiens ont intérêt à défendre.

1.4. Travailler ensemble

« L'interdisciplinarité, pour être fructueuse et porteuse de renouveau, nécessite une certaine continuité temporelle et territoriale, ne serait-ce que pour assurer la maîtrise des différentes phases de recherche, rendue beaucoup plus compliquée par la mise en relation de plusieurs disciplines. »
(Barrué-Pastor, 1992, p 464)

Enfin, on peut identifier un défi *institutionnel*, lié à la difficulté de former de véritables équipes inter-disciplinaires pérennes. En effet, la mise en place d'une telle équipe ne peut se faire qu'à plusieurs conditions dont :

- a) la création d'un projet porteur de cette inter-disciplinarité (c'est-à-dire proposant la garantie d'un apport théorique à la convergence des différents domaines), et porté par une personne reconnue au-delà de sa propre discipline,
- b) l'existence d'une équipe de recherche qui s'inscrit dans une histoire, une temporalité longue, du fait de...
- c) un support/soutien institutionnel fort, se traduisant notamment par des financements, l'accès à des ressources (informatique, administrative, lieux de travail et de rencontres), des ouvertures de poste pour la pérennisation, etc..

2. Répondre aux défis de l'inter-disciplinarité

Ces défis sont relativement généraux et communs à nombre de projets se situant à l'intersection entre plusieurs disciplines. La suite du texte présente les actions et méthodologies utilisées, choisies et développées pour y répondre dans le cadre de la construction de modèles d'interaction entre villes sur le temps long.

2.1. La rencontre « à mi-chemin »

La première réponse proposée dans les expériences concernées a consisté à construire le projet dans une *rencontre « à mi-chemin »* des différentes appartenances disciplinaires. Cela prend en compte l'acculturation et l'explicitation des enjeux des différentes parties. On entend en cela qu'il y a acculturation lorsque les chercheurs d'une discipline font partager aux chercheurs de l'autre des éléments de leur "culture" disciplinaire, avec ses implicites, tandis que l'explicitation correspond à

désambigüer et présenter les enjeux parfois cachés d'un concept ou d'un fait stylisé. La co-construction de ces modèles sur un temps long permet cet échange et cette rencontre « à mi-chemin ».

Dans notre cas, le processus d'acculturation a mobilisé deux types de supports : des *articles thématiques, qui traitent des objets étudiés des points de vue de la géographie et de l'informatique*, et des *objets interdisciplinaires préexistants* (typiquement des modèles de simulation spatiale) utilisés alors comme une pierre de Rosette.

Pour les aspects généraux liés à la modélisation géographes et informaticiens se sont échangés divers articles ou ouvrages de références (Amblard, Phan, 2007; Gilbert, Troitzsch, 1999). Dans le cas du modèle MARIUS, ce sont les auteurs (Sapir, 1992 ; Buckley, 1995 ; Eckert, 2004 ; Gaye, 2006) qui ont été mobilisés pour les aspects qualitatifs des tendances observées en Russie. Enfin dans le cas du modèle SimpopLocal pour les aspects qualitatifs ayant permis d'estimer paramètres, mécanismes et tendances observés, ce sont les auteurs (Bairoch, 1985; Berry, 1964; Favaro, 2011; Turchin, 2003; Verhulst, 1845; Arthur, 2009; Archeomedes, 1998; etc. voir Schmitt, 2013)

D'autre part, les modèles de simulation simples et connus sont providentiels pour l'acculturation : ils fournissent d'une part une preuve concrète de l'efficacité des modèles pour expliquer des aspects précis d'un phénomène, et d'autre part, en tant que résultat d'un processus transdisciplinaire antérieur, ils permettent aux thématiques de rendre compte du résultat des opérations de simplification ou de complexification requises par la modélisation. Citons trois exemples emblématiques : le modèle de ségrégation de Schelling, *Sugarscape* de J.M. Epstein et R. Axtell (1996), ou encore le modèle d'attachement préférentiel de Barabasi conduisant à l'apparition d'une loi de puissance dans la centralité de degré dans les réseaux sans échelle typique. Informaticiens et Géographes peuvent alors mieux cerner les concessions qui ont dû être faites de part et d'autre pour aboutir au modèle.

Enfin, nous y reviendrons, les plateformes de simulation intégrées comme Netlogo facilitent grandement l'acculturation, pour des raisons différenciées selon qu'elles sont abordées par des géographes ou par des informaticiens, car leur bibliothèque de modèles et leur langage simple permettent de se saisir immédiatement des enjeux de la simulation.

Après l'acculturation, il s'agit d'explicitier les concepts d'une façon qui fasse consensus entre les différentes disciplines. Ne disposant pas d'une méthode particulière pour réussir ce défi, nous nous contenterons de donner des exemples empiriques issus de l'élaboration de MARIUS et SimpopLocal : la "loi rang-taille", le marché d'échanges, et le formalisme de représentation.

La "loi rang-taille" est sans doute l'élément théorique pour lequel l'explicitation est la plus facile. Il s'agit d'une relation statistique entre le rang d'une ville et sa population totale, et dont la pente de la droite d'ajustement log-linéaire donne lieu à une mesure qui rend compte du degré de la hiérarchie d'un système

de villes. Cette notion a été largement diffusée en géographie depuis plusieurs décennies. C'est aussi l'un des faits stylisés les plus simples à reproduire : des modèles simplistes probabilistes (Gibrat) comme des modèles plus raffinés (SimpopLocal, SimpopNet) proposent des mécanismes génératifs qui conduisent à son établissement. L'explicitation de cet élément est du ressort du géographe : il s'agit d'un élément de son corpus théorique. En le présentant comme le résultat d'un processus de renforcement d'une caractéristique des villes (leur population), la loi rang-taille peut être identifiée à une famille de mécanismes bien connus : l'*avantage cumulatif* (ou l'attachement préférentiel dans le cas du modèle de Barabasi) qui conduit sous certaines conditions à l'apparition d'une loi de puissance dans la répartition de la caractéristique dans la population - ou bien la *croissance distribuée* à la Gibrat (1931) issue d'une répartition aléatoire de taux de croissance sur un grand nombre de pas de temps réguliers. Cette identification permet alors de faire des analogies entre la loi rang taille et les réseaux invariants d'échelle de Barabasi, un élément mixte, où informaticiens et géographes peuvent se retrouver : ils y sont acculturés.

Comme tout modèle, MARIUS et SimpopLocal s'inscrivent dans une théorie générale, ici celle des systèmes de villes évolutionnaires (Pumain, 1997). Cette théorie postule que les interactions entre villes font apparaître des concurrences et inter-dépendances génératrices de trois propriétés principales : l'espacement des villes, leur différenciation par la taille, et leur spécialisation économique et fonctionnelle. Les interactions entre villes sont donc un objet dont l'explicitation est capitale. Pour le géographe, les villes sont amenées à échanger toutes sortes de biens, services, hommes, informations et capitaux. On peut synthétiser cette circulation multidimensionnelle sur le long terme par une diffusion d'innovations. Les échanges d'innovations entre villes sont opérés selon un certain nombre de règles qui ne tiennent en rien au hasard : le concept de diffusion en simulation renvoie à une vaste littérature qui remonte facilement jusqu'aux premières expérimentations d'Hägerstrand en 1952. La variété des mécanismes identifiés, formalisés, et testés empiriquement lorsque le phénomène de diffusion est traduit dans le langage informatique amène à l'exposition d'une nouvelle dimension, celle de la représentation informatique de ces règles. C'est à ce niveau que se place la confrontation entre les objectifs des informaticiens, guidés dans leur développement non pas par un souci de réalité historique, mais par un souci d'optimisation et de réduction dans la complexité algorithmique animant les interactions entre différents objets dans la simulation, et ceux des géographes. Ainsi dans le cadre de SimpopLocal, le choix d'une règle de diffusion, et de la nature de cet objet à diffuser a soulevé un certain nombre de questions quant à la nature et à l'efficacité algorithmique des implémentations à programmer puis à confronter. Plus concrètement, est ce que l'innovation doit être matérialisée par un agent ou non, et comment implémente-t-on la ventilation des innovations (agentifiés ou pas) entre les villes ? Autre niveau de médiation entre informaticiens et géographes, le choix du niveau d'abstraction dictant l'implémentation des mécanismes n'est pas anodin. Celui-ci motive une analyse au cas par cas, mécanismes après mécanismes, afin de trouver la bonne composition capable

d'éclairer les questionnements ayant motivé la réalisation du modèle de simulation. La composition résultante s'appuie en général sur la flexibilité et la capacité d'hybridation du formalisme SMA, facilitant ainsi l'insertion et le couplage de formalismes de types différents. Ainsi, dans le cas du modèle MARIUS, l'informaticien non-spécialiste pourrait objecter qu'un modèle entités-centré ne correspond pas à l'économie dirigée en vigueur à cette époque. Il pourrait alors proposer de développer un module de gouvernance, qui modélise cette politique de peuplement dirigé en utilisant des variables agrégés, plutôt que de se reposer sur les propriétés émergentes d'un SMA. L'explicitation par le géographe des nuances et subtilités historiques permet de dépasser cet *a priori* en invoquant par exemple la persistance - même durant l'époque soviétique - d'un marché concurrentiel du travail, lié notamment à la pénurie récurrente de force de travail, qui permettait donc aux travailleurs, si ce n'est de "voter avec leurs pieds", du moins de faire jouer la concurrence entre usines et entre villes pour obtenir des avantages plus conséquents, malgré les restrictions concernant la mobilité individuelle avec l'usage d'un passeport intérieur (Sapir, 1992; Buckley 1995). De la même façon, des auteurs ont montré que les tentatives de contrôle de la taille des villes par les autorités sont restées sans effets notables (Clayton, Richardson, 1989), et contribuent donc à penser qu'une certaine marge d'auto-organisation était possible dans les mécanismes inter-urbains en Union Soviétique.

Enfin, l'utilisation de l'outil informatique contraint les modélisateurs à adopter, à un moment ou à un autre, un certain formalisme de représentation. Ce formalisme est d'abord déterminé par le paradigme de modélisation retenu : celui des SMA. Cela conduit à catégoriser systématiquement, dans les éléments thématiques, ce qui relève des agents, de leurs attributs, de l'environnement, et des interactions entre eux. Le formalisme supporte donc une bonne partie de l'explicitation. Ce découpage peut sembler imposé uniquement pour des raisons techniques au géographe, qui sinon continuerait de parler de «dynamique démographique» et de «hiérarchisation des villes», mais il permet, par compositions des éléments de chaque catégorie, de proposer un ensemble étoffé de mesures. Ces mesures, obtenues par combinaison et agrégation des attributs des agents suivant les différentes dimensions de la modélisation (effectif des agents, localisation, temporalité) permettent à la fois d'identifier la construction des mesures thématiques traditionnelles, mais également d'en proposer de nouvelles, induites par la catégorisation en amont.

Dans le cas de SimpopLocal, l'un des indicateurs pertinents pour les thématiciens consiste à opérer une classification sur les trajectoires des villes. Cette classification repose sur des algorithmes de classifications dont les variantes et le paramétrage influencent les résultats ; ainsi, de la même façon qu'il lui a fallu expliciter les choix d'implémentation pour les mécanismes, il appartient également à l'informaticien d'explicitier les conséquences du choix d'une variante de ces mesures les unes par rapport aux autres. C'est à partir de ce dialogue que se forme une boucle vertueuse qui permet d'éclabousser par des innovations méthodologiques ou techniques chacune des disciplines participantes; en effet il

n'est pas rare que l'amélioration ou le transfert d'outil pour la résolution d'une problématique commune amènent la possibilité de poser de nouvelles questions, qui elles-mêmes motiveront plus tard la création de nouveaux outils qui n'existent dans aucune des disciplines initiales...

2.2. Des concepts et des formalismes communs

Deuxièmement, le défi du dialogue et la compréhension réciproque des enjeux de frontières propres à chaque discipline nécessite l'usage de *concepts communs* pour se parler. Certains sont empruntés à l'une, à l'autre ou à une tierce discipline (l'économie, l'archéologie, selon les modèles et les mécanismes choisis dans les différents modèles). Il s'est avéré que l'usage de métaphores a aussi pu constituer un pont efficace dans l'inter-compréhension. La mise en place de *formalismes adaptés* pour la compréhension des mécanismes en jeu dans les modèles joue pour beaucoup dans la co-construction d'un savoir intermédiaire, à l'orée de deux champs syntaxiques, et intégrable par les deux parties. La nature de l'outil ou du formalisme, et son acceptation par la discipline contribue à la réussite d'un tel dialogue.

Ainsi, dans le cadre de nos pratiques, l'utilisation d'un formalisme trop aride ou trop spécifique d'une discipline informatique tel qu'UML constituerait plus un frein à la discussion qu'un outil apte à favoriser le passage de la connaissance. Sur ce point, l'usage de métaphores, de dessin ou schéma, a permis de formaliser dans des termes bien plus clairs les attentes des géographes, constituant ainsi un intermédiaire plus satisfaisant pour la constitution d'un pont entre disciplines. Le langage de modélisation UML, s'il possède de nombreux points forts, peut s'avérer trop lourd et trop long à mobiliser en situation réelle pour le modélisateur non informaticien. Ce langage de modélisation permet d'exprimer de façon non ambiguë des relations complexes entre des entités. Cette expressivité ne se manifeste malheureusement qu'au prix d'une bonne connaissance du langage, et la facilité à en décoder les diagrammes ne s'acquiert qu'au terme d'une pratique soutenue et raisonnablement longue. À l'inverse, les dessins et schémas simples que tout chercheur trace sur un tableau pour expliquer des concepts à un tiers sont certes peu rigoureux, non formalisés, et plus "volatiles", mais sont instantanément compris par l'interlocuteur s'ils sont mobilisés par le chercheur pour appuyer un discours.

Il nous semble que, de la même façon que l'analogie figurative, sans être un moyen fiable et scientifique d'exposer une théorie, peut servir de base à une analogie plus profonde et structurelle, qui conduise à l'identité (Paty, 2008), le dessin schématique, s'il est appuyé par un discours communément écrit, est un palliatif rapide et pratique à une formalisation plus poussée, et ceci tout particulièrement dans un contexte où les implémentations, les hypothèses et la forme des mécanismes évoluent rapidement (Machamer *et al.*, 2000, pp16-17).

Restent à déterminer les attentes des membres de l'équipe, en termes d'objectifs scientifiques à atteindre en s'appuyant sur la simulation du modèle. Ces objectifs eux-mêmes n'ont pas à être formalisés, mais ils doivent s'appuyer sur des mesures, interprétées par le modélisateur. Les multiples indicateurs issus d'un modèle doivent être organisés en ce que nous pourrions appeler des *indices de performances* du modèle. Ce sont très souvent des mesures employées dans la littérature thématique, par lesquelles on s'attend à retrouver les faits stylisés dans les sorties du modèle. Donnons deux exemples: la pente de la distribution rang-taille (sa valeur et sa variation) est l'une des premières mesures qui intéressera le géographe, tandis que la reproductibilité des comportements du modèle sera l'une des premières caractéristiques que l'informaticien examinera.

Ainsi, les membres de l'équipe doivent se constituer une base d'indices de performances, reflet de leurs attentes scientifiques.

Dans le cas de MARIUS, pour accompagner une modélisation incrémentale des systèmes de villes post-sociétiques, nous avons conçu un ensemble de *cibles*, qui sont une combinaison de critères au sens de l'optimisation, assorties d'une interprétation thématique sur la construction de cette combinaison. Il s'agit en quelque sorte d'un résumé du comportement adéquat du modèle, au sens de la question de recherche.

Revenons sur l'exemple de la distribution rang-taille. Dans MARIUS, la cible qui fait intervenir cette mesure est constituée de deux traitements successifs. La cible sera considérée atteinte si d'abord l'évolution de la pente de la distribution évolue dans le bon sens (i.e. celui constaté empiriquement dans les données) et qu'ensuite les coefficients d'ajustement de la régression qui calcule cette pente ne dépassent pas un certain seuil. Si cette cible est atteinte, la dynamique macroscopique du système sera considérée comme satisfaisante, du point de vue de sa hiérarchisation.

2.3. Des outils et des méthodes adaptés

Troisièmement, et afin de bénéficier des mêmes avantages de simplicité, le choix de certains *outils*, comme la plate-forme de modélisation, a aussi pu faciliter la rencontre et la compréhension mutuelle. Par exemple, la modélisation conjointe de modèles prototypes avec NetLogo avant d'utiliser des langages et plateformes plus performantes a permis aux géographes de se confronter aux choix induits par l'implémentation et de formaliser leurs hypothèses, et aux deux parties de produire un code commun lisible par tous.

Ces premières réponses ont permis de construire ensemble des modèles, ainsi que d'amorcer une réflexion sur ce processus et la *méthodologie* à adopter. Cette étape vise à répondre au second défi de l'inter-disciplinarité, qui est de produire des connaissances dans les différents domaines de recherche. Nous pensons y parvenir avec le développement d'une méthodologie de multi-modélisation (Rey-Coyrehourcq *et al.*, 2013), élaborée en amont de l'implémentation, par l'identification des mécanismes à introduire successivement ou alternativement selon une logique guidée par des questions thématiques

(Cottineau, Chapron, 2013). Cette nouvelle méthodologie naît directement des besoins des modélisateurs géographes. Elle est rendue possible grâce à l'utilisation massive de calcul distribué et de la plate-forme pour l'exploration de modèles de systèmes complexes OpenMOLE (Reuillon *et al.*, 2010 ; 2013). Cette plate-forme transdisciplinaire a été conçue grâce à un travail de plusieurs années au contact de multiples disciplines scientifiques : géographie (Reuillon *et al.*, 2012 ; Schmitt *et al.*, 2013), sciences de l'environnement (Lardy *et al.*, 2012), génie des procédés (Mesmoudi *et al.* 2010, Sicard *et al.*, 2011), biologie (Junier *et al.*, 2012), apprentissage (Tonda *et al.*, 2012)... et nous permet maintenant de développer des méthodes de modélisation innovantes. Ainsi, les différentes parties enrichissent les réflexions de leur champ disciplinaire et éventuellement celui des systèmes complexes d'apports engendrés par cette coopération. Par exemple, la multi-modélisation permet de tester l'impact de différents mécanismes et celui de l'ordre de leur introduction sur la capacité d'un modèle à reproduire une série de faits stylisés.

D'un point de vue géographique, cette démarche permet de sélectionner ou disqualifier des mécanismes candidats à l'explication d'un phénomène, et donc sur la dynamique d'un système de villes. Par exemple dans MARIUS et la modélisation des échanges inter-urbains avant et après la chute de l'URSS, la démarche de multi-modélisation permettra d'évaluer la capacité des différents mécanismes de marché (marché libre et concurrentiel ou marché dirigé par un agent gouvernance notamment) à reproduire les trajectoires des différentes villes. Ainsi, s'il est impossible d'affirmer qu'un mécanisme générateur (le marché libre et concurrentiel par exemple) est LE mécanisme à l'origine des interactions entre villes, la disqualification de ce mécanisme sur toute ou partie de la période pourra nous renseigner sur la possibilité d'envisager la gouvernance de l'économie comme un caractère strict ou non, de considérer l'auto-organisation du marché du travail repérée qualitativement par certains auteurs comme un candidat potentiel ou non à l'explication des trajectoires des villes post-soviétiques.

Cette réflexion commune permet de formaliser des méthodes et de produire des outils à l'intersection entre les deux disciplines. La réflexion s'inscrit dans une boucle vertueuse où interagissent en permanence ce processus de production des questionnements thématiques et le processus de production d'outils à même de les résoudre, mais aussi d'en générer en retour. Elle s'ancre de façon concrète dans une plateforme interdisciplinaire autour d'openMOLE, conçu comme un laboratoire catalyseur de ces outils inter-disciplinaire, et qui donne une visibilité à nos outils. La méthode de "multi-modélisation" constitue un cadre méthodologique pour tirer partie de l'automatisation des procédures de calibrage afin de construire et d'évaluer simultanément de multiples modèles d'une même famille de modèles. Cette approche dépasse largement la modélisation des systèmes de villes. Une fois intégrée dans des outils clef-en-main, elle constituera au même titre qu'OpenMOLE un outil transdisciplinaire au service des modélisateurs.

Conclusion :

L'inter-disciplinarité, si elle pose des défis importants, se révèle toutefois une opportunité scientifique extrêmement riche, notamment dans le champ de la simulation et des systèmes complexes. Nous avons ainsi montré que la participation de géographes et de chercheurs en informatique dans la modélisation de systèmes de villes a permis de développer des méthodes qui n'existaient encore dans aucune des deux disciplines. Deux tendances semblent émerger dans la pratique. Lors de la phase de réflexion et des premiers prototypages, les outils «légers» s'imposent : schémas informels, Netlogo. Lors de la construction du modèle à proprement parler, l'accent est mis sur la modularité : dans la conception incrémentale des modèles et dans la composition de cibles à partir d'indicateurs.

Remerciements

Il est indispensable de mentionner ici Denise Pumain qui, grâce à l'obtention d'un financement ERC, a permis de répondre au quatrième défi par la mise en place et la stabilité de ce travail d'équipe interdisciplinaire au sein du projet GeoDiverCity.

Bibliographie

Amblard F., Phan D., 2007, *Agent Based Modelling and Simulations in the Human and Social Sciences*, Oxford, The Bardwell Press.

Archaeomedes, Ed , 1998, Des oppida aux métropoles (Anthropos, coll.Villes, Paris) 290p

Arthur W B, 2009 *The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves* (Free Press, New York)

Bairoch P., 1985, *De Jéricho à Mexico, Villes et économie dans l'histoire*, Paris, Gallimard, coll. Arcades, 706p.

Banos A., 2013, *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 107p.

Barrué-Pastor M., 1992, « L'interdisciplinarité en pratiques », in Jollivet M. (dir.), *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontières*, CNRS Éditions, coll. « Sociologie », pp 457-475.

Berry B., 1964, « Cities as systems within systems of Cities », *Papers and Proceedings of the Regional Science association*, n°13, pp 147-163

Bourgine P., Chavalarias D., Perrier E. (eds.), 2009, "French complex systems roadmap", 82p, <http://arxiv.org/pdf/0907.2221v1>

Bretagnolle A., Pumain D., 2010, "Simulating Urban Networks through Multiscalar Space-Time Dynamics: Europe and the United States, 17th-20th Centuries.", *Urban Studies*, vol. 47, n° 13, pp 2819-2839.

Buckley C., 1995, "The myth of managed migration: Migration control and market in the Soviet period", *Slavic Review*, vol. 54, n°4, pp 896-916.

Clayton E., Richardson T., 1989, "Soviet control of city size.", *Economic Development and Cultural Change*, 38(1), p.155 165

Cottineau C., Chapron P., 2013, "Step-wise modeling. An incremental method for modeling cities trajectories in the post-Soviet urban system.", *European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography ECTQG 2013*, Dourdan (France), 5-9 Septembre 2013

Eckert D., 2004, *Le monde Russe*, Paris, Hachette Livre.

Epstein J.M., Axtell R., 1996, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up (Complex Adaptive Systems)*, The MIT Press.

Favaro J-M, Pumain D, 2011, "Gibrat Revisited: An Urban Growth Model including Spatial Interaction and Innovation Cycles" *Geographical Analysis*, 43 (3), pp 261-286

Gaye A., 2006, "Les trajectoires démographiques des régions en Russie.", *L'Information géographique*, 70(4), pp 66-72.

Gibrat R., 1931, *Les inégalités économiques*, Recueil Sirey.

Gilbert N., Troitzsch K., G., 1999, "Simulation for the social scientist." *B: Open University Press*, 1999.-295 c.

Hagerstrand T., 1952, *The propagation of innovation waves*.

Junier I., Dale R.K., Hou C., Kepes F., Dean A., 2012, “CTCF-mediated transcriptional regulation through cell type-specific chromosome organization in the beta-globin locus”, *Nucleic Acids Research*, vol. 40, pp 7718-7727.

Lardy R., Graux A.-I., Bachelet B., Hill D. R., Bellocchi G., 2012, “Steady-state soil organic matter approximation model: application to the pasture simulation model”, *International Environmental Modelling and Software Society*, pp 769-776.

Machamer P., Darden L., Craver C. F., 2000, “Thinking about mechanisms”, *Philosophy of science*, vol. 67, No. 1, pp 1-25.

Manzo G., 2005, « Variables, mécanismes et simulations: une synthèse des trois méthodes est-elle possible? Une analyse critique de la littérature. », *Revue française de sociologie*, 46(1), 37-74. <http://www.gemas.fr/IMG/pdf/manzo-2005-1.pdf>

Mesmoudi S., Perrot N., Reuillon R., Bourguine P., Lutton E., 2010, “Optimal viable path search for a cheese ripening process using a multi-objective ea”, *ICEC 2010, International Conference on Evolutionary Computation*, 24-26 oct, Valencia, Spain.

Morin E., 2005, *Introduction à la pensée complexe*, Points, coll. “Essais”, 2e ed., 158p.

Paty M., 2008, “Les analogies mathématiques au sens de Poincaré et leur fonction en physique”, in Durand-Richard M. J., *L'analogie dans la démarche scientifique*, l'Harmattan.

Pumain D., 1997, « Pour une théorie évolutive des villes », *L'espace géographique*, n°2, pp 119-134.

Pumain D., Robic M.-C., 2002, “Le rôle des mathématiques dans une “révolution” théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970”, *Revue d'Histoire des Sciences Sociales*, Vol. 1, No. 6, pp 123-144

Reuillon R., Chuffart F., Leclaire M., Faure T., Dumoulin N., Hill D., 2010, « Declarative task delegation in OpenMOLE », *HPCS*, 55-62.

Reuillon R., Rey-Coyrehourcq S., Schmitt C., Leclaire M., Pumain D., 2012, « Algorithmes évolutionnaires sur grille de calcul pour le calibrage de modèles géographiques », *Conférence France-Grilles*, pp. 12-16.

Reuillon R., Leclaire M., Rey-Coyrehourcq S., 2013, OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models, *Future Generation Computer Systems*, vol 29, num 8, pp. 1981-1990.

Rey-Coyrehourcq S., Schmitt C., Reuillon R., 2013, “SimProcess, a method and platform for building geographical simulation models : application to

SimPopLocal”, *European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography 2013*, Dourdan, France, September 5-9th.

Sanders L., Favaro J-M., Glisse B., Mathian H., Pumain D., 2007, « Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM », *Cybergeog : European Journal of Geography*, Dossier « Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005 », 392, 15p. <http://cybergeog.revues.org/8962>

Sapir J., 1992, *Feu le système soviétique*, Paris, La Découverte, coll. Essais, 190p.

Schmitt C., Rey-Coyrehourcq S., Reuillon R., Pumain D., 2013, “Half a billion simulations: Evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model”, *submitted to Environment and Planning B*.

Sibertin-Blanc C., 2010, “Modèles formels pour la reproduction des simulations à base d’agents”, *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*, Vol. 5, No. 2, pp 135-149

Sicard M., Perrot N., Mesmoudi S., Martin S., Reuillon R., Alvarez I., 2011, “Development of a viability approach for reverse engineering in complex food processes: Application to a camembert cheese ripening process. adaptation of the viability theory”, *Journal of Food Engineering (EFG)*.

Tonda A., Lutton E., Reuillon R., Squillero G., Wuillemin P. H., 2012, “Bayesian network structure learning from limited datasets through graph evolution”, *Genetic Programming*, pp 254 265.

Turchin P., 2003, *Historical Dynamics: Why States Rise and Fall* (Princeton University Press, Princeton)

Verhulst P F, 1845, *Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population*, *Nouveaux Mémoires de l'Academie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles*, 18, pp 1 41

Weisbuch G., Zwirn H. (eds.), 2010, *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité?*, Vuibert, Coll. “Philosophie des sciences”, 346p.