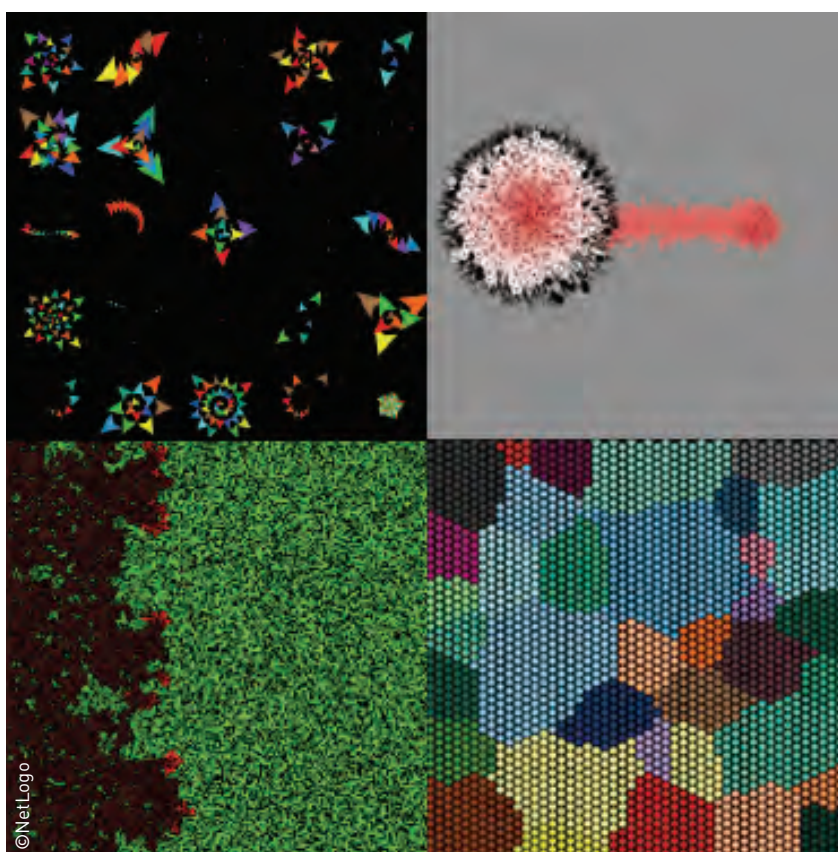


# MODÉLISATION URBAINE

## MODÉLISATION URBAINE ET SIMULATION SOCIALE UNE APPROCHE PAR LES OUTILS



# MODÉLISATION URBAINE ET SIMULATION SOCIALE

## UNE APPROCHE PAR LES OUTILS

Certains ne pourraient plus s'en passer - EDF, Dassault Aviation, L'Oréal, Total, la Direction générale de l'armement, Météo France, la Marine nationale, Air Liquide, Alcatel Lucent, Veolia Environnement, de nombreuses métropoles asiatiques, latino-américaines et nord-américaines, les biologistes, physiciens, médecins, climatologues, économistes, architectes, etc. – d'autres les testent avant adoption à l'instar de nombreuses collectivités locales européennes, tandis que d'autres s'en méfient, notamment les sociologues... Les technologies de simulation et de modélisation sont partout. Elles ont colonisé des pans entiers de l'économie et lorgnent désormais du côté des mondes urbains et de la société.



© Fotolia

Pour l'urbaniste américain John D. Landis de l'Université de Pennsylvanie, la période actuelle fait même figure d'âge d'or de la modélisation urbaine (Landis, 2012). Plusieurs facteurs expliquent cette envolée :

- Le concept de développement durable reliant urbanisation et environnement et exigeant d'anticiper les impacts des projets urbains et de l'activité de l'homme sur son environnement et la biodiversité ;
- La promotion, dans la foulée, de nouveaux principes d'urbanisme et de gestion des territoires urbains insistant sur la notion de projet et la détermination des futurs souhaitables comme guides à l'action et son évaluation ;
- Les progrès dans les outils. Outils théoriques avec l'essor de la pensée systémique renouvelant la manière d'appréhender les phénomènes complexes et outils techniques (progrès permanents de l'informatique, des capacités de calculs et de mémoire permettant des calculs de plus en plus complexes, tournant cognitiviste et neuronal,

apports de l'intelligence artificielle permettant de modéliser les capacités d'apprentissage, d'anticipation, voire des émotions) ;

- Le développement de bases de données et la systématisation de la collecte de données spatialisées et multi-échelles, la conservation et la mise à disposition de ces données sur un temps long, l'essor des données numériques, accessibles en temps réel et géolocalisées ;
- Un intérêt international pour la modélisation urbaine poussé par l'urbanisation fulgurante des pays asiatiques ;

Dans quelle mesure modélisation et simulation permettent-elles de mieux comprendre le « système ville », d'en anticiper ses évolutions, de guider les choix d'aménagement, d'améliorer la conduite des politiques publiques ?

Au-delà des mondes urbains, les phénomènes sociaux tels le bien-être, la maltraitance infantile, la tolérance sociale, la diffusion des opinions - pour ne citer qu'eux- font l'objet de modélisations. Ces nouvelles technologies semblent pleines de promesses pour répondre aux interrogations et incertitudes posées par la complexité du monde social et urbain. Face à la très grande diversité des modèles utilisés, des langages, des approches, des champs d'application, un peu d'acculturation est nécessaire.

S'appuyant sur des exemples, des entretiens avec des chercheurs et la littérature académique, ce document vise à donner un premier éclairage sur les principaux outils utilisés, leurs grandes caractéristiques ainsi que sur les enjeux, avantages et limites des démarches de modélisation urbaine et de simulation sociale.

*« Peu de pays dans le monde concentrent les talents nécessaires à la maîtrise de l'intégralité de la filière de la simulation. Ceci passe d'abord par la construction de machines de calcul. Ensuite par les logiciels de modélisation, puis par les utilisateurs. Seuls quatre pays disposent de l'ensemble de ces compétences : Les États-Unis, le Japon, la Chine et la France. »*

Philippe Vanier, PDG de Bull, unique constructeur européen de supercalculateurs (Vannier, 2014).

## Table des matières

---

|     |                                                                               |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.  | Modélisations et simulations : Des repères.....                               | 6  |
|     | Quelles finalités ? Décrire, comprendre, prédire, communiquer .....           | 7  |
|     | Décrire .....                                                                 | 7  |
|     | Expliquer .....                                                               | 7  |
|     | Prédire .....                                                                 | 9  |
|     | Dialoguer-Réfléchir collectivement .....                                      | 10 |
|     | Des langages physique, iconique et mathématique au langage informatique ..... | 12 |
|     | Le langage physique : l'approche sensible .....                               | 12 |
|     | Le langage de l'image : universalité et partage.....                          | 13 |
|     | Le langage mathématique : précision et prévision .....                        | 15 |
|     | Le langage informatique au service de la complexité .....                     | 17 |
|     | Quelques traits distinctifs .....                                             | 20 |
|     | Approches analytique versus systémique.....                                   | 20 |
|     | Approches sectorielles versus intégrées .....                                 | 23 |
|     | Approches micro versus macro .....                                            | 24 |
|     | Approches dynamiques versus statiques .....                                   | 25 |
|     | Approches territoriales et a-territoriales .....                              | 28 |
|     | Des modèles de données aux modèles de société virtuelles .....                | 30 |
| II. | Atouts et limites d'une démarche de modélisation .....                        | 32 |
|     | Des atouts originaux .....                                                    | 32 |
|     | La richesse d'exploration.....                                                | 32 |
|     | Un travail collectif de structuration de la connaissance.....                 | 32 |
|     | Un outil de démocratie participative.....                                     | 33 |
|     | La facilité d'appropriation.....                                              | 33 |
|     | Une pluralité de méthodes pour répondre à la variété des besoins .....        | 33 |
|     | Points de vigilance et limites .....                                          | 34 |
|     | Une vision partielle, partielle et simplifiée.....                            | 34 |
|     | Chaque modèle est adapté à ce qu'il modélise .....                            | 34 |
|     | Connaissance et disponibilité de l'information .....                          | 35 |
|     | Faciliter sans appauvrir .....                                                | 35 |
|     | Travailler en commun.....                                                     | 36 |
|     | Trouver le bon périmètre .....                                                | 36 |
|     | Une apparence trompeuse .....                                                 | 36 |
|     | L'instabilité des phénomènes sociaux .....                                    | 37 |
|     | Big Data .....                                                                | 37 |

|      |                                                    |    |
|------|----------------------------------------------------|----|
| III. | Les principaux modèles utilisés .....              | 38 |
|      | Les outils de modélisation individus-centrés ..... | 38 |
|      | La micro-simulation .....                          | 38 |
|      | L'automate cellulaire (AC) .....                   | 38 |
|      | Les systèmes multi-agents (SMA) .....              | 42 |
|      | Les modèles spécifiques aux systèmes urbains.....  | 45 |
| IV.  | Références .....                                   | 49 |

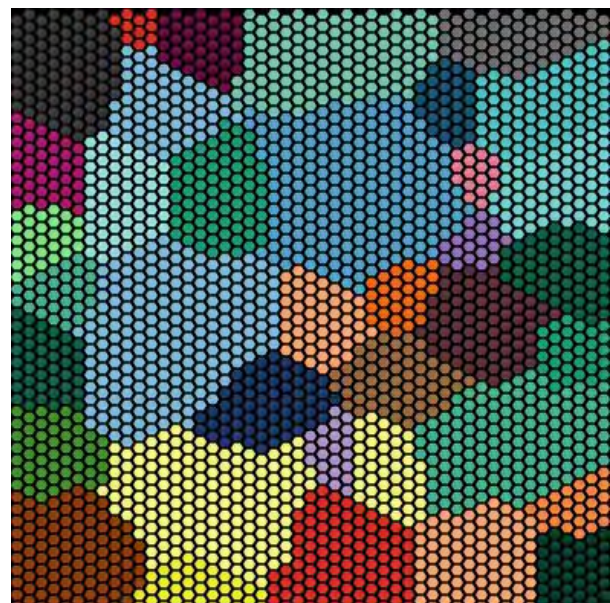
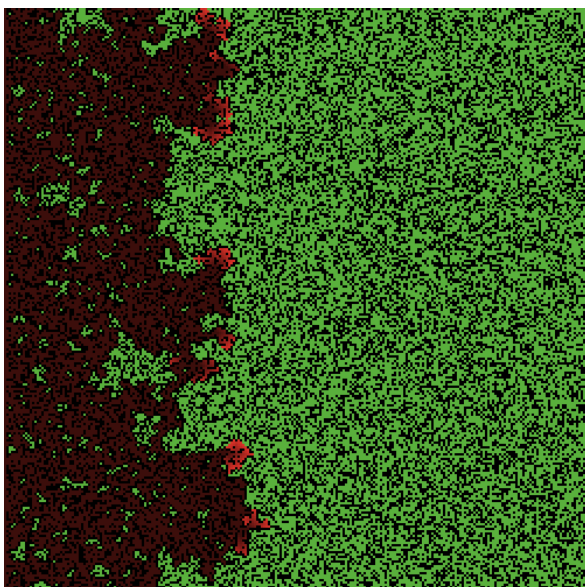
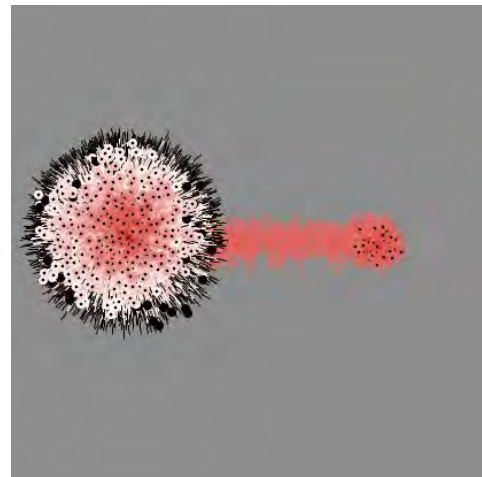
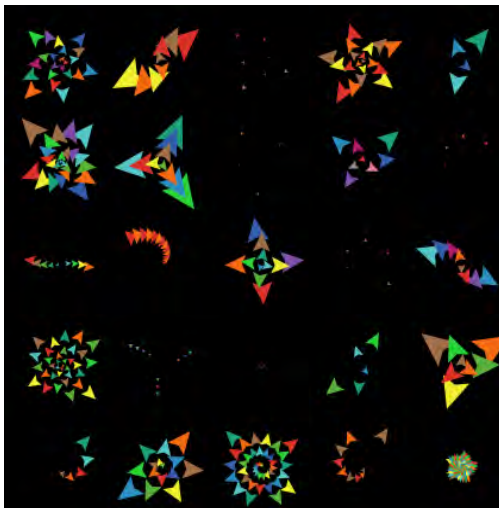
## I. Modélisations et simulations : Des repères

L'épistémologue Franck Varenne décrit **les modèles<sup>1</sup> comme « des constructions matérielles ou formelles servant à représenter quelque chose de réel ou de fictif »** et les simulations comme **« la reproduction artificielle d'une situation réelle ou la mise en œuvre d'un modèle »** (Varenne, 2011).

Modélisation et simulation reposent sur un subtil équilibre entre simplifier le phénomène étudié tout en gardant ce qui fait son identité profonde<sup>1</sup>. Quelles sont leurs finalités ? Quels langages utilisent-elles ? Y-a-t-il des grandes familles, des caractéristiques fortes qui permettent de les classer un tant soit peu ?

Les démarches et le continuum modélisation-simulation sont présentés ensemble dans ce document.

Exemples de simulations : sélection génétique / tumeur et résistance au traitement / propagation d'un feu de forêt / atomes- PlateformeNetLogo



1. Cela ne signifie pas que le modèle est simple : si certains modèles sont peu complexes (ex : calculs linéaires, modèle sectoriel...), d'autres intègrent une grande variété de paramètres et de leurs interactions pour se rapprocher au plus près d'un équilibre d'une « complexité simplifiée ».

## Quelles finalités ? Décrire, comprendre, prédire, communiquer

Pour l'épistémologue Franck Varenne, « *un modèle facilite la recherche d'information au sujet d'un système réel ou fictif, cela dans le cadre d'un processus à visée de représentation, de connaissance, de conceptualisation, de conception ou encore de transformation.* » (Varenne, 2011). En matière d'action publique, les démarches de modélisation permettent de donner une vision simplifiée d'une situation, de mieux comprendre ses mécanismes et son fonctionnement et de tester différents scénarios. Partant de là, la modélisation peut être un outil d'aide à la décision, avoir une utilisation prospective et/ou participative.

### Décrire

Un modèle descriptif met en avant quelques variables clés et leurs interactions. Il ne vise pas à donner une compréhension fine du processus modélisé mais plutôt à **faciliter son appréhension** en mettant à disposition un objet plus facilement accessible que le phénomène étudié (ex : maquette d'un projet urbain, carte de réseaux souterrains, modèles biologiques vivants, modèles de densité urbaine...). Il décrit la réalité selon les connaissances du moment et les comportements réels.

### OPTIMISER LA GESTION DE CHANTIERS : UNE DÉMARCHE ORIGINALE À LYON CONFLUENCE

A Confluence, un projet de gestion mutualisée des chantiers a été testé. L'initiative consiste à modéliser l'ensemble des flux entrants et sortants (camions, eau, déchets, etc.) pour déterminer dans quelle mesure les flux entrants peuvent être mutualisés. Cette mutualisation est ensuite mise en place via un cadencement et une obligation des parties prenantes du chantier de collaborer à cette fin. La collectivité a joué un rôle de tiers de confiance pour mettre en relation les entreprises privées et garantir que les données collectées auprès de ces acteurs (bilan exhaustif de tous les flux entrants) seront partagées avec les autres entreprises uniquement dans l'intérêt du chantier. (ADEME, 2016) p.26

### Expliquer

Un modèle explicatif s'intéresse au fonctionnement et aux relations de causalité du phénomène. Par exemple : comment les interactions entre revenus, densité urbaine et accessibilité d'un lieu impactent le choix modal des individus ?

**Il facilite l'élaboration d'une théorie, son interprétation, son illustration** (analogies avec des théories d'autres champs disciplinaires) **ou son utilisation**. Ainsi, face à la complexité des relations familiales, l'anthropologue Claude Lévi-Strauss a réalisé un modèle mathématique des relations familiales qui permettait de rendre compte de la réalité et prévoir

les possibilités d'unions entre les clans, leur évolution, etc. (Grawitz, 2001). En matière de planification urbaine, ces modèles sont utiles lorsque les aménageurs contrôlent certaines variables du phénomène (par exemple, la fréquence des bus) et s'intéressent à l'impact d'une modification d'une variable sur l'ensemble étudié (par exemple sur la mobilité résidentielle, l'implantation d'entreprises...).

Cet article décrit une méthodologie originale pour définir et hiérarchiser les actions nécessaires à l'atteinte des objectifs locaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, à partir de critères technico-économiques.

## QUELLES SONT LES CONDITIONS FAVORISANT L'ÉMERGENCE DE TERRITOIRES CREATIFS ?

Les villes mondiales telles Londres ou New York offrent un environnement humain, professionnel, éducatif et culturel riche et stimulant. Autant d'éléments qui attirent le capital humain « à haute valeur ajoutée », favorisent la diffusion des connaissances, l'essor des industries créatives basées sur le savoir et font émerger des territoires « créatifs », des clusters innovants boostant la croissance économique du territoire où ils se développent. Dans le même temps, d'autres espaces artistiques, comme à Paris ou Berlin, ont ce même potentiel de créativité en termes d'individus, sans pour autant que cela se traduise par de la croissance économique. Comment une ville en développement, en l'occurrence similaire à Karachi, peut-elle favoriser cet essor ?

Soutenu par des fonds pakistanais et américains, le projet de modélisation « Creative City Model » s'appuie sur un système multi-agents<sup>2</sup> pour mieux comprendre comment les comportements individuels dans différents environnements conduisent à l'émergence de ces macros-structures (clusters et diffusion de la connaissance). S'appuyant sur la littérature scientifique internationale, les auteurs retiennent plusieurs facteurs corrélés positivement au développement économique urbain par le fait qu'ils favorisent les interactions humaines et donc la diffusion de la créativité : une forte densité (qui est aussi source de congestion et nécessite donc des politiques favorisant la mobilité), la tolérance sociale et la politique foncière.

Dans le modèle, chaque individu a ses propres caractéristiques socio-économiques (niveau de revenu, d'éducation...), de tolérance sociale et de potentiel créatif. L'environnement urbain dans lequel ils évoluent reproduit différentes fonctions (résidentielles, économiques, zones naturelles, infrastructures...) et est doté de multiples attributs comme la croissance de la population, les restrictions ou non à la mobilité, la fuite des cerveaux hors du territoire, la mixité du foncier... Trois pistes d'action ont été testées : agir sur la mobilité (améliorer l'offre de transport ou au contraire la restreindre), sur la régulation du foncier et sur la recherche d'entre-soi. Les espaces denses et hautement créatifs tendent à s'étendre aux territoires environnants attirant les individus aux potentiels créatifs moyens ou élevés. La richesse augmente mais le prix du foncier aussi. Cette simulation montre notamment que le degré d'interactions entre les agents conditionne la diffusion des savoirs quelle qu'en soit l'origine (densité élevée, faible mobilité, ségrégation sociale). Il montre aussi la nécessité d'arbitrer entre ce type de croissance économique et l'équité sociale : les inégalités de revenus progressent à chaque

2. La simulation multi-agent est un des outils phare de la simulation sociale. Elle regarde comment les structures à l'échelle macro émergent de l'interaction des comportements d'entités simulées à l'échelle micro. Voir partie 3.

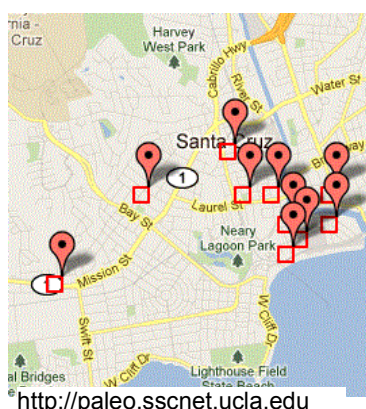


fois que le revenu global augmente grâce à la diffusion de la créativité. Plus le territoire est habité par des individus créatifs et prend de la valeur, plus l'accès au foncier est faible. Son coût provoque alors le déménagement des ménages à bas et moyens revenus (Ammar Malik, Crooks, Root, & Swartz, 2015).

## Prédire

Construit sur des relations de cause à effets simplifiées, le modèle prédictif vise à anticiper une évolution probable du phénomène, à construire des scénarios alternatifs et tester différents choix d'action et leurs conséquences potentielles. Un modèle prédictif n'a pas forcément besoin d'être explicatif. Il peut imiter les phénomènes réels (via une analyse probabiliste, une analogie avec d'autres modèles...) sans être en capacité de formuler des hypothèses sur leur production et interactions. Toutefois, ses résultats seront d'autant plus valides que ses dimensions descriptives et explicatives sont attestées.

### UN ALGORITHME LUTTE CONTRE LA CRIMINALITÉ À SANTA CRUZ



Depuis 2011, la police de Santa Cruz (Californie) utilise un modèle de prédiction pour diminuer le risque de crimes et délits (hors sphère domestique et crimes passionnels) : vols de voitures, cambriolages, agressions, rixes... De manière similaire aux tremblements de terre, les délits sont suivis de répliques (être victime d'un premier délit augmente la probabilité d'être victime d'un second, phénomène de criminalisation des quartiers...). L'algorithme s'inspire donc du modèle utilisé pour prévoir les répliques des séismes remodelé avec les résultats de recherches sur les comportements criminels. Connaître le lieu, le moment (jour et heure) et la nature de l'infraction permet de faire émerger les zones à risques. Le modèle combine des données historiques

sur 5 ans et des données actualisées collectées sur 1200 à 2000 lieux (en fonction de la nature des infractions). En temps réel, des cartes des zones à risques sont produites et transmises aux officiers de police qui ont la liberté d'aller y patrouiller ou non. Le modèle s'est avéré un complément intéressant aux méthodes traditionnelles de prévision et à l'expérience des policiers. Il a été estimé qu'il a permis de réduire significativement la criminalité (-19% de vols sur 6 mois) puisque les autres paramètres sont restés identiques (nombre de patrouilles, tournées...). Une autre expérimentation contrôlée scientifiquement a été menée à Los Angeles et conclut à la réelle efficacité du modèle, même pour des métropoles aux situations plus complexes. Ce modèle est utilisé par les départements de police de différents États (Washington, Caroline du Sud, Arizona, Tennessee). (Friend, 2013).

## Dialoguer-Réfléchir collectivement

Modèles et simulations peuvent aussi faciliter la **médiation entre différentes disciplines ou groupes ayant des discours, des représentations collectives différentes ou des intérêts divergents sur un objet ou une problématique commune qui doivent être appréhendés ou gérés de manière collective**. Ils peuvent **faciliter une sensibilisation à une problématique**.

### AMÉLIORER LE TRAFIC ET LE REPORT MODAL EN ILE-DE-FRANCE : UN MYTHE ?

Des chercheurs de l'Université Paris-Est ont cherché à apprécier les potentiels de trois politiques visant la réduction de l'usage de la voiture en Ile-de-France. Délaissant les modèles mathématiques pour leur effet boîte noire, ils ont opté pour des simulations de comportements individuels assises sur des données réelles car ces dernières sont « *plus transparentes, et donc mieux adaptées au dialogue avec un public large* ». L'objectif est de délimiter l'espace des possibles et ce que les gens ne feront certainement pas.

Les résultats sont intéressants car allant à l'encontre de l'idée que le potentiel de report modal ou celui de l'optimisation du lieu de résidence pour être proche de son travail sont importants. Au contraire, les ménages ont déjà des stratégies de rationalisation forte et les marges de manœuvre pour améliorer la situation sont faibles, n'en déplaisent aux politiques et aménageurs.

Pour les auteurs, ces modélisations « *nous renvoient comme facteurs limitants notre demi-siècle de planification de la région, nos croyances et les institutions qui y ont été associées : les transports publics rapides, et notamment les RER et trains de banlieue, éléments indispensables à une unité régionale du marché de l'emploi mise en cause ici par la logique de rapprochement, qui verraient fondre leurs clientèles ; les organismes de logement social, qui verraient leurs parcs excédentaires en grande couronne et dans les petites couronnes Nord et Est, et encore plus déficitaires à Paris et dans les Hauts de Seine ; les clusters, type La Défense, dont la concentration et la localisation ne seraient compatibles avec une proximité des actifs qu'au prix d'un effort sans doute hors de portée en matière de logement ; les communes de la partie centrale, dont beaucoup n'ont pas proportionné l'offre résidentielle aux emplois ; la ville de Paris enfin, qui verrait remplacer des actifs « haut de gamme » par des actifs moins bien côtés ; les couches supérieures enfin, qui seraient invitées à moins d'entre soi résidentiel. Ces difficultés expliquent sans doute que le rapprochement entre domicile et emploi, s'il existe encore parfois dans la rhétorique politique, soit si peu sur l'agenda politique : trop d'institutions, trop de gens qui comptent n'y ont pas intérêt.* » (Korsu, Massot, Orfeuil, & Proulhac, 2012).

**Ils peuvent aussi faciliter une prise de décision.** Dans ce cadre, le modèle est une aide à la décision soit collective (ex. : modèles d'action publique en cas d'épidémie), soit individuelle (ex. : modèles de gestion du risque financier). À cette fin, s'est développée la modélisation d'accompagnement, participative ou interactive<sup>3</sup>.

## PENSER LES FLUX SUR UN LIEU TOURISTIQUE

Site touristique majeur, les gorges du Verdon attirent chaque année près de 600 000 visiteurs et amateurs de sports. **Comment gérer le flux estival de quelques 7500 véhicules journaliers sur ce site naturel ?**

Pour répondre à cette question, une démarche de **modélisation d'accompagnement** a été menée **par l'association COMMod**. Elle a impliqué l'ensemble des acteurs concernés : élus et habitants des six communes, professionnels du tourisme, agent du parc régional. Après une enquête réalisée auprès des visiteurs pour établir une typologie des vacanciers (principaux objectifs de visite, zones d'arrêt privilégiées, horaires, mode d'alimentation), les acteurs locaux ont élaboré un modèle conceptuel représentant le fonctionnement actuel de la circulation



estivale dans les gorges. Le modèle informatique a facilité une prise de conscience collective des interactions entre les activités proposées aux visiteurs et la question du stationnement, de l'ampleur et de la localisation du problème. Des simulations ont permis de tester les différents scénarii possibles de canalisation du flux (navettes, sens uniques, information des visiteurs...) élaborés collectivement. Une telle démarche a permis aux acteurs de mieux connaître leurs activités respectives, leurs besoins, et visions et d'élaborer

des solutions collectives et globales.

<http://www.commod.org/>

3. Exemple : jeu de rôle Agape sur les interactions entre agriculture, apiculture et environnement en zones de grandes cultures ou élaboration d'un système multi-agent sur la gestion écologique d'une friche par l'association COMMod. Voir aussi les travaux récents de simulation d'écosystèmes urbains avec un cas d'étude sur le jardin partagé de San Jerónimo à Séville. (Pereira Dos Santos, et al., 2016)

## Des langages physique, iconique et mathématique au langage informatique

Reproduire le réel à des fins de modélisation suppose de choisir un langage approprié. Si, pendant longtemps, avoir un modèle théorique était un prérequis incontournable (le modèle permettant de formaliser les hypothèses et la simulation de faire tourner le modèle), ce n'est plus le cas actuellement. L'informatique a révolutionné les langages de modélisation, jusque-là essentiellement physiques, iconographiques ou mathématiques, sans pour autant les rendre caducs. Elle a aussi apporté de nouvelles manières de se questionner même en l'absence de théorie formalisée. Par ailleurs, le processus de modélisation peut nécessiter le recours à plusieurs modèles et langages différents : une visualisation pour les indicateurs spatiaux et un modèle mathématique pour tester la validité des relations, un modèle physique pour paramétrer une simulation informatique, etc. À noter que le degré d'abstraction du langage ne reflète pas forcément celui du processus de modélisation : un modèle mathématique peut être le reflet d'une modélisation simple, de même qu'une image peut résulter d'un processus complexe.

### Le langage physique : l'approche sensible



Maquette du projet Lyon Confluence.  
© AMA/Thierry Melot, 1999

Jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle, le modèle désigne principalement **une représentation physique réduite ou simplifiée d'un phénomène ou d'un objet.**



Reproduction des conditions naturelles de sites faisant l'objet de projets d'aménagement. Étude du comportement d'une digue. Société Artélia © Sierg.

Cette simplification, notamment le changement d'échelle, rend le phénomène étudié manipulable ou observable. **Bien que les pratiques de simulation se soient diversifiées, la simulation physique reste essentielle dans de nombreuses situations.** Que ce soit pour comprendre certains phénomènes naturels impactant notamment les projets d'aménagements (milieu montagnard, fluvial, côtier...), ou, en l'absence de modèle explicatif, pour reproduire les phénomènes observés de l'objet modélisé sans forcément reproduire son fonctionnement interne (simulateur de vol, exercice d'alerte et d'évacuation incendie, etc.) ou encore pour permettre des mesures servant à une modélisation mathématique ou informatique.

## Le langage de l'image : universalité et partage

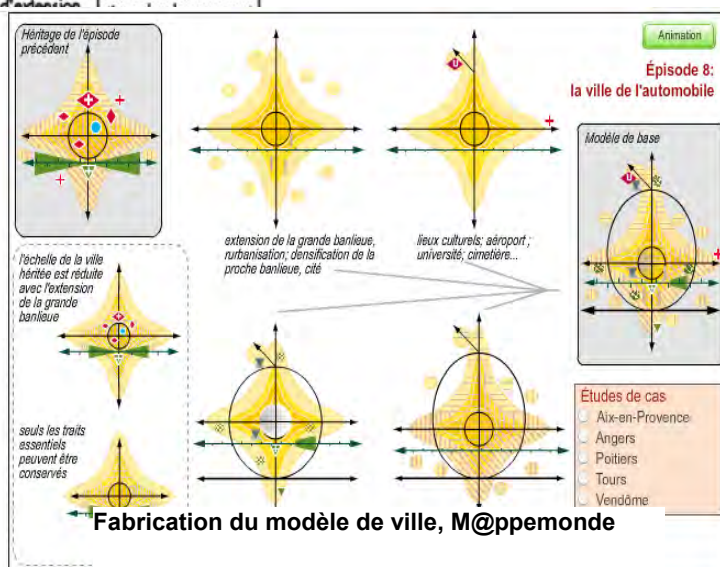
Le langage iconographique est une ressource essentielle en matière d'aménagement et de planification urbaine. Cartes, diagrammes, schémas fléchés et autres permettent de **décrire les organisations spatiales ou spatio-temporelles et leurs évolutions**, à l'instar de la ville<sup>4</sup>, ainsi que les relations de cause à effet, les flux ou encore les interactions entre acteurs (ex. : modéliser une politique publique).

|                        | Point                            | Ligne                                          | Aire                                  | Réseau                        |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Maillage               |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | chef-lieu                        | limite administrative                          | Etat, région...                       | centres, limites et polygones |
| Quadrillage            |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | île de réseau carrefour          | voies de communication                         | aire de desserte irrigation, drainage | graphe                        |
| Gravitation            |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | points attirés satellites        | lignes d'isotropie orbites                     | auréoles bandes                       | liaisons préférentielles      |
| Contact                |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | point de passage, d'entrée, etc. | rupture, interface                             | aires en contact                      | base avant-pays île de pont   |
| Tropisme               |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | centre d'attraction              | ligne de partage                               | surfaces de tendance                  | dissymétrie                   |
| Dynamique territoriale |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | évolutions ponctuelles           | axes de propagation                            |                                       |                               |
| Hiérarchie             |                                  |                                                |                                       |                               |
|                        | semis urbain                     | relation de dépendance limites administratives |                                       |                               |

Dans les années 80, face au développement des modèles issus de la formalisation mathématique, le géographe Roger Brunet propose de modéliser l'espace par la représentation graphique.

Il élabore un alphabet de signes représentant les structures et dynamiques fondamentales de l'espace qu'il baptise « chorème ». Le tableau présente les 4 figures de base retenues croisées avec les 7 dynamiques (Théry, 2008).

L'approche chrono-chorématique propose ainsi une modélisation de l'évolution morphologique et fonctionnelle de la ville française en 8 étapes allant de la ville fortifiée de l'époque romaine et gallo-romaine à la ville de l'automobile (Atelier de chrono-chorématique du CNAU, 2010)



4. Sur les problématiques liées à la représentation de la ville voir (Ruas, 2012)

### La simulation informatique recourt au langage iconique pour faciliter l'appropriation de l'outil par les utilisateurs finaux :

- **pour le paramétrage du modèle.** Par exemple, la plateforme de simulation multi-agents dédiée aux problématiques spatialisées et multiniveau MAGéo (Modélisation Agent Géographique), est conçue pour être « *suffisamment visuelle et intuitive pour être accessible aux utilisateurs sans expérience en programmation informatique* ». Le paramétrage du modèle se fait au moyen d'objets graphiques et les résultats se présentent sous forme de cartes et graphiques (Langlois, Blanpain, & Daudé, MAGéo, une plateforme de modélisation et de simulation multi-agent pour les sciences humaines, 2015).
- **pour le partage des résultats et la visualisation des données.** Rendu incontournable pour un projet urbain, l'image permet de faire surgir de nouveaux questionnements et facilite le dialogue.

## TERRA DYNAMICA POUR DES TERRITOIRES URBAINS AUGMENTÉS

Le projet Terra Dynamica vise à construire une animation dynamique de la ville, de ses activités et de ses acteurs. Il s'inscrit dans la continuité des projets Terra Numerica et Terra Magna. Le premier a permis de représenter des espaces urbains de grande dimension de façon réaliste, en 3 dimensions et haute définition (bâtiment, chaussée, végétation). Après la numérisation du patrimoine urbain et le développement de technologies relatives à l'acquisition de données (voie aérienne, terrestre, reconstruction des bâtiments), des plateformes d'exploitation visuelle et d'accès au contenu ont été développées. Le second a proposé des services innovants aux collectivités locales et professionnels de l'aménagement, de l'urbanisme, de l'environnement (SIG 3D, simulation d'Aménagement urbain, simulation d'Environnement urbain, Services 3D aux professionnels).

Dernier né, Terra Dynamica modélise « la vie dans la ville » via un système multi-agent (modélisation des comportements des piétons, véhicules...). Il souhaite développer de multiples applications et services dans le champ urbain, touristique, immobilier, environnemental, de la sécurité... Par exemple, des dispositifs de réalité augmentée pour découvrir les monuments et le patrimoine historique de la ville, des outils de réalité virtuelle pour tester des scénarii d'aménagement, des services sur internet et mobiles (préparer une visite, un trajet, localiser et visualiser des sites dans leur environnement et accès au contenu informatif et pédagogique associé, visites augmentées du patrimoine urbain, etc.)

### → Les applications environnementales



Simulation d'une inondation de la Seine à Paris en 2010 à partir des informations sur la crue de 1910.

Le projet est soutenu par les pôles de compétitivité Cap Digital et Advancity et est porté par le laboratoire d'informatique de Paris 6 (LIP 6, équipe Systèmes Multi-Agents).

<https://www.youtube.com/watch?v=7rJsOX6mxO8>

<http://www.terranumerica.com/>

## Le langage mathématique : précision et prévision

**L'approche analytique des mathématiques a longtemps été le langage phare pour reproduire un phénomène.** La modélisation nécessite d'identifier les composants clés, de les isoler et de leur assigner une valeur qui peut varier dans le temps ou l'espace (mesure, pourcentage, taux, variable par habitant, etc.). Ces valeurs sont ensuite mises en relation au moyen d'équations (déterministes, aléatoires ou formelles (logiques)). Avec l'essor des statistiques descriptives, des modèles plus formels se développent qui partent du réel et non d'une théorie. Par exemple, les modèles statistiques pour l'analyse de données cherchent à identifier la structure, les relations et dépendances logiques entre les données pour leur donner un sens et laissent de côté les valeurs en elles-mêmes. Certaines simulations reposent sur des représentations dans lesquelles temps et espace sont continus, tandis que d'autres, davantage adaptées aux systèmes complexes, font évoluer le système en fonction des événements qui sont générés au fur et à mesure de l'évolution de la simulation (ex : les simulations à événements discrets).

L'approche mathématique est utilisée pour les **approches quantitatives** complexes mais permet aussi, selon les cas, des **approches plus qualitatives** des phénomènes. De par son degré d'abstraction et de logique, elle est bien adaptée pour répondre au comment, prédire un effet, une action réalisée par des objets particuliers dans des situations bien déterminées. Ses modèles sont en général normatifs et/ou prescriptifs. Elle permet de clarifier la nature des hypothèses et d'être reproductible par d'autres. En revanche, elle ne permet pas d'explorer le pourquoi des choses et modélise difficilement les comportements, les actions d'individus, leurs interactions avec leur environnement. Son approche globale tend à nier l'hétérogénéité des individus (à l'instar de l'homme rationnel et de la fonction d'utilité utilisés par les modélisations en économie) et privilégie une vision globale. La complexité des modèles varie en fonction du nombre de variables et de formules nécessaires. Certains phénomènes isolés peuvent être relativement aisés à modéliser tandis que la complexité d'une situation réelle et l'interaction entre ses différents phénomènes peuvent amener à une simplification intéressante mais parfois trop pauvre.

Nombre de modèles utilisés dans les sciences sociales s'inspirent des modèles utilisés en sciences dures en raisonnant par analogie entre certains phénomènes physiques et sociaux. Par exemple, le **modèle gravitaire utilisé en géographie des flux** a été formulé par analogie avec la loi de la gravitation universelle de Newton (deux corps s'attirent en raison directe de leur masse et en raison inverse de la distance qui les sépare) par W.J. Reilly en 1931. Ce dernier s'intéressait à l'impact de l'augmentation du nombre de propriétaires de voitures sur les modes de consommation dans les villes texanes. Ce modèle montre ainsi que les échanges entre deux espaces (régions, villes, etc.) varient selon leur éloignement et leur taille. Ce modèle a ensuite été utilisé pour étudier de nombreuses formes d'interactions spatiales (migration, communication, transport...). Pour la géographe Denise Pumain, *« le modèle gravitaire résume bien en général l'essentiel des mouvements qui se produisent dans un milieu où la mobilité et l'accessibilité sont relativement homogènes. Il prédit par exemple assez bien l'ampleur des flux de déplacements domicile-travail dans un bassin d'emploi urbain, à partir de la répartition des zones de résidence et des zones d'emploi, ou encore le dessin des migrations interrégionales ou interurbaines de population à moyen terme dans un pays donné. Bien que d'une grande utilité pratique, le modèle gravitaire est un modèle pauvre sur le plan théorique ; en outre, c'est un modèle statique, qui ne prend pas en compte l'évolution de la configuration, en particulier celle engendrée par les flux. » (Pumain, 2014).*

## POURQUOI LA RECHERCHE INDIVIDUELLE DU BONHEUR NE FAIT-ELLE PAS LE BONHEUR DE TOUS ?

Christopher Thron, mathématicien à l'université A&M du Texas, s'est intéressé à l'impact des décisions individuelles en matière de bien-être sur le bien-être global de la société. Pourquoi dans les sociétés connaissant une forte croissance économique et technologique, comme la Chine ou les USA, le sentiment de bien-être chez les individus diminue tandis qu'émergent des phénomènes sociaux néfastes comme la hausse de la criminalité, l'instabilité familiale, l'obésité, etc. ? S'appuyant sur des travaux économiques et sociologiques, l'auteur cherche à montrer les synergies entre facteurs socio-économiques, décisions individuelles et leur impact social afin de faire émerger des stratégies possibles pour contrecarrer ces effets pervers ou renforcer les positifs.

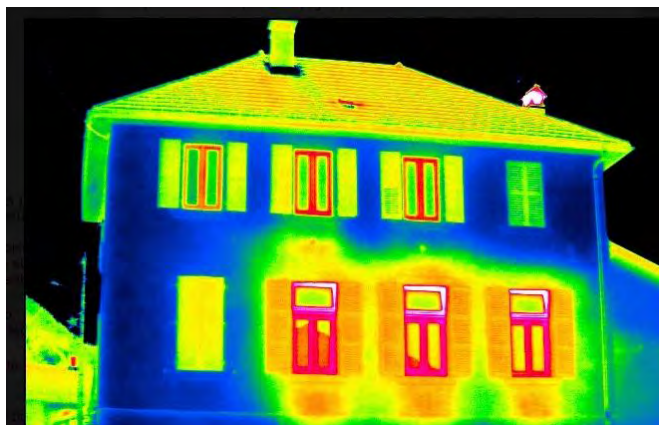
La modélisation repose sur un modèle mathématique qui se veut plus qualitatif que quantitatif et sur une simulation agent. Les agents sont soit des individus isolés décidant pour eux-mêmes, soit un couple, un-e chef-fe de famille, etc. À chaque pas de temps, ici valant un an, un certain nombre d'agents a la possibilité d'opter pour un changement dans son mode de vie. Les agents sont réputés rationnels et donc opter pour la nouvelle situation s'ils pensent que leur bonheur s'en trouvera augmenté. Les choix de vie sont le reflet du compromis entre deux types de déterminants : les visibles, à l'instar des « signes extérieurs de richesse » qui donnent de la visibilité sociale (communautés religieuses, sportives, consommation de produits de luxe, évolution de carrière...) et les invisibles qui se mesurent en termes de capital social et culturel, d'épanouissement personnel, de qualité de vie et d'environnement (sécurité, paix...). Les recherches ont montré que, dans les sociétés de marché, le bien-être tend à être défini par ses composantes matérielles et que les individus tendent à surestimer les effets positifs des éléments visibles. Les facteurs les plus visibles tendent aussi à avoir davantage d'inconvénients invisibles (accepter de l'avancement dans sa carrière peut se faire au détriment de sa vie familiale, etc.) et ce type de choix peut avoir des effets négatifs sur l'ensemble de la population (acheter une grosse cylindrée peut impacter le trafic ou la pollution...).

Plusieurs scénarii sont testés montrant, entre autres résultats, (1) la domination des déterminants visibles dans le bien-être des agents même si leur plus-value est parfois totalement contrebalancée par les pertes d'aspects plus subtils de la qualité de vie ; (2) la hausse d'effets sociaux négatifs en partie due à la faible considération du rôle des déterminants psychologiques et sociaux dans le bien-être ; (3) dans certaines conditions, le gain à court-terme d'une minorité d'individus s'accompagne d'une perte pour le reste de la société. Pour conclure, Christopher Thron identifie 4 indicateurs alarmants du déclin du bien-être dans une société (la forte surévaluation du potentiel de « bonheur » des déterminants visibles, cette dernière masquant les compromis entre les deux types de déterminants, un marché de l'emploi et de la consommation indifférents au bien-être « invisible », une part non négligeable de la population confrontée à des revers de nature économique ou personnelle). Face à cela, il préconise différentes actions dont la promotion des aspects invisibles du bien-être et des activités jugées non productives mais personnellement enrichissantes (art, littérature, etc.), ou encore la taxation et/ou la réglementation des comportements socialement néfastes comme la consommation excessive, le travail effréné... (Thron, 2016)



## Le langage informatique au service de la complexité

Le développement de l'informatique a révolutionné les démarches de modélisation et simulation sur plusieurs aspects. **Premièrement par l'accroissement des capacités de calcul et l'essor de la simulation numérique** (série d'opérations effectuées sur un ordinateur et reproduisant un phénomène comme dans la réalité). Initialement, cette simulation est venue au secours de modèles mathématiques dont la complexité interdisait leur résolution analytique (temps de calculs trop longs, paramètres trop nombreux...).



Simulation des flux de chaleur

© <http://imath16.cnam.fr/~wilk/EDP-mathj>

L'ordinateur résout alors les équations les unes après les autres par une simulation pas à pas du modèle. Dans ce cas, il y a élaboration d'un premier

modèle « théorique », puis d'un modèle « numérique » sous forme d'un algorithme<sup>5</sup>. Le mathématicien vérifie que les résultats de la simulation du modèle numérique sont proches des résultats théoriques, connus ou pressentis, du modèle mathématique, tandis que le modélisateur confronte ces calculs à la réalité pour confirmer ou infirmer le modèle numérique. Les premières simulations numériques massivement assistées par ordinateur ont été effectuées en physique nucléaire, à Los Alamos. Depuis, elles sont utilisées massivement, notamment pour reproduire des phénomènes physiques complexes comme la modélisation de l'écoulement de l'air ou de l'eau autour d'un véhicule, les flux de chaleur dans le bâti, etc.

**Deuxièmement par l'émergence de nouveaux modèles utilisant le langage informatique, son architecture et ses représentations spécifiques**<sup>6</sup>. L'avantage de ce langage est de pouvoir reproduire la complexité d'un objet et d'en déterminer le fonctionnement sans pour autant devoir en isoler chaque composant. Parmi ces modèles, **la modélisation orientée objet**<sup>7</sup> est particulièrement adaptée à la modélisation du réel et aux systèmes complexes : elle crée une représentation informatique des éléments du monde réel sous forme d'ensembles cohérents appelés objets, ainsi que leurs interactions. Ces objets peuvent être des concepts, des idées, des entités physiques (humain, vélo, bâtiment, etc.). Chaque objet a ses propres caractéristiques et comportements et peut communiquer avec d'autres objets<sup>8</sup>. Dans ce cadre, la modélisation va donner la priorité aux interrelations entre les objets (et non plus aux caractéristiques des objets) et isoler celles qui sont les plus pertinentes pour répondre à la question posée. Elle va se focaliser davantage sur les processus, les changements d'états que les comportements en eux-mêmes. Comme le pointe, le chercheur

5. Un algorithme est une suite finie et non ambiguë d'opérations ou d'instructions permettant de résoudre un problème ou d'obtenir un résultat.

6. Via les langages de programmation, même si le langage mathématique est toujours présent comme substrat de ces langages informatiques.

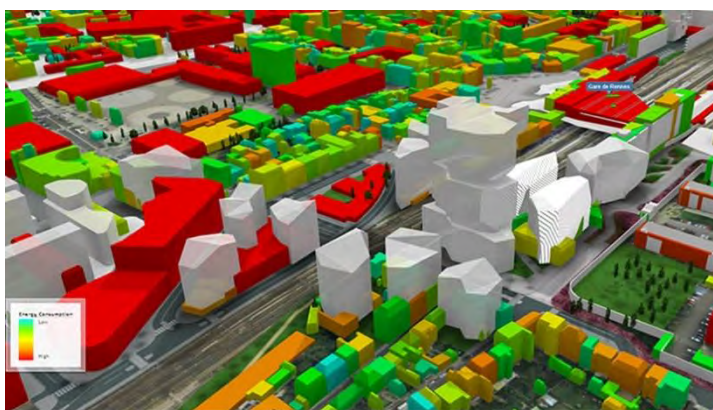
7. La programmation orientée objet diffère donc de la programmation traditionnelle dans laquelle les programmes sont constitués d'un ensemble d'instructions qui s'exécutent les unes à la suite des autres.

8. Unified Modeling Language (UML), Objective C, SmallTalk, C++, Python, Ruby, Java sont des langages de programmation orientée objet parmi les plus répandus.

en intelligence artificielle Alain Cardon, l'informatique permet d'aborder la complexité organisationnelle : pourquoi globalement et localement tel objet organisé l'est comme cela et pas autrement ? (Cardon, 2005). C'est bien à sa capacité à appréhender et reproduire un système complexe que la simulation computationnelle doit son succès.

Par ailleurs, ce langage permet la simulation de phénomène pour lesquels rechercher une solution précise n'est pas possible. En partant, d'une valeur estimée grossièrement, la simulation donne des approximations successives convergeant vers les caractéristiques du phénomène observé. **Ce qui est simulé, ce n'est donc plus un modèle à proprement parler, mais directement le réel ou l'objet visé par la simulation.** Par exemple dans les simulations de trafic, les conducteurs ou piétons sont dotés de règles de comportements le plus similaires possibles aux comportements réels. Ces simulations algorithmiques se sont considérablement développées dans les sciences sociales puisque l'interaction d'une multitude d'objets et d'agents informatiques hétérogènes peut être simulée.

**Troisièmement, l'interaction entre modèles.** Les simulations informatiques pluri formalisées permettent de faire coexister et interagir des modèles ou sous-modèles aux formalismes incompatibles et dont les interactions ne peuvent donner lieu à des formulations mathématiques. Développées à partir des années 90 suite à la programmation orientée objet, ces simulations recourent alors au seul langage informatique pour simuler les comportements locaux de chacun des différents sous-modèles dans l'espace et le temps, avant de les recombina pas à pas. Une plateforme peut servir de support à ces différents modèles ou faire interagir différentes échelles, à l'instar de ce qui se développe dans les projets de modélisations de villes comme à Rennes et la plateforme 3D Experience.



Projet Rennes Metropolis.  
Plateforme 3DEXPERIENCE - Dassault Systèmes  
<http://3dexperienlab.3ds.com/>

## FACILITER L'ÉTUDE DES INTERACTIONS DES DIMENSIONS SOCIALES ET TECHNIQUES DES QUESTIONS ÉNERGÉTIQUES

Les interactions entre les dimensions techniques et sociales des réseaux électriques sont au cœur de la transition énergétique. Toute recherche en la matière se doit donc d'articuler ces dimensions mais se pose alors le problème de la compatibilité des modèles. À cette fin, une équipe de scientifiques suisses et néerlandais propose l'outil « MatpowerConnect » permettant de relier la plateforme Netlogo, très souvent utilisée pour les simulations sociales, et Matpower, un outil commun de modélisation des flux d'énergie. Cet outil ouvre de nouvelles pistes de modélisation, notamment pour les chercheurs en sciences sociales travaillant sur le secteur de l'énergie et vise à faciliter la collaboration entre sociologues et ingénieurs. (Bollingera, Van Blijswijkb, Djikemac, & Nikolicb, 2016)

De la même manière que le développement de modèles non assis sur des théories a suscité de fortes critiques, l'essor de cette simulation computationnelle s'accompagne d'avertissement sur les risques de déconnexion avec le réel, de faible qualité scientifique d'outils qui ne s'appuient plus sur un modèle validé et une théorie scientifique éprouvée. La crainte est d'aller au visible, à l'apparence, au détriment d'un travail de compréhension des causes. Dans les années 1990, beaucoup de modélisateurs utilisant l'outil mathématique se sont élevés contre la pratique des simulations informatiques, notamment en biométrie ou en agronomie. C'est actuellement le cas en sciences sociales qui a largement adopté l'outil mathématique pour théoriser et modéliser ses observations empiriques et peine encore à sauter le pas de la simulation computationnelle. Mais comme le rappelle Franck Varenne, l'idée de supériorité des modélisations mathématiques sur les simulations informatiques se nourrit « *d'une vieille hypothèse d'origine aristotélicienne qui voudrait que la cause soit plus réelle que ce qu'elle cause, car plus éminente et virtuellement capable de plus* » (Varenne, Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances, 2008). Utilisant l'image, les simulations informatiques ravivent la peur de l'image trompeuse, superficielle qui peut figer la pensée et l'imagination. C'est donc une posture épistémologique particulière que certaines simulations ont contribué à bousculer.

Par exemple, les simulations algorithmiques de Thomas Schelling (1978) ont obligé à repenser les théories sociologiques sur la ségrégation « raciale » dans les villes américaines. S'intéressant à la ségrégation spatiale entre populations blanche et noire, il a montré en image que ce processus de ségrégation peut être le fait de préférences jouant légèrement au-dessus de l'indifférence totale à la couleur de peau du voisin mais sans pour autant impliquer des postures racistes ou d'un entre-soi poussé. Le réalisme et l'accessibilité de sa simulation par rapport aux modèles mathématiques ont fortement contribué à sa validation scientifique) et généré un nombre important de travaux à sa suite<sup>9</sup>.

---

9. Voir infra, p 38 -§ sur les automates cellulaires. Pour une application sur la ville polycentrique et le territoire lyonnais, voir (Lemoy, Raux, & Jensen, 2012)

## Quelques traits distinctifs

Quel que soit le formalisme adopté, les modèles se distinguent par un certain nombre de caractéristiques. Il n'y a pas de consensus autour d'une typologie des modèles mais plutôt sur des grandes catégories particulièrement significatives sur l'approche du modèle.

### Approches analytique versus systémique

L'approche analytique classique, découpant les phénomènes en entités indépendantes et cherchant les relations de causalité linéaires, a été bousculée par l'essor de l'approche systémique. En effet, face à la complexité organisationnelle de certains objets, un tel découpage en entités indépendantes leur fait perdre leur identité.

*UN SYSTÈME COMPLEXE...  
n'est pas un système compliqué*

#### **MAIS SE CARACTÉRISE PAR**

- un tout qui est plus que la somme des parties
- un tout qui est moins que la somme des parties
- des parties inséparables du tout et qui deviennent dans le tout plus qu'elles-mêmes
- **l'interdépendance et l'interaction** entre les éléments
- **l'émergence** : apparition de qualités imprévisibles, indéductibles qui affectent le tout mais aussi les parties

#### **IL EST CONSTITUÉ :**

- D'éléments, d'entités sociales (individus, groupes) et leurs produits (relations, idées, normes, textes, etc.)
- D'interrelations
- De sous-systèmes
- De boucles de rétroaction positives ou négatives
- D'une organisation : agencement des relations entre les éléments qui confère au système des qualités inconnues au niveau des éléments, équilibre de forces antagonistes
- D'objectifs et de finalités

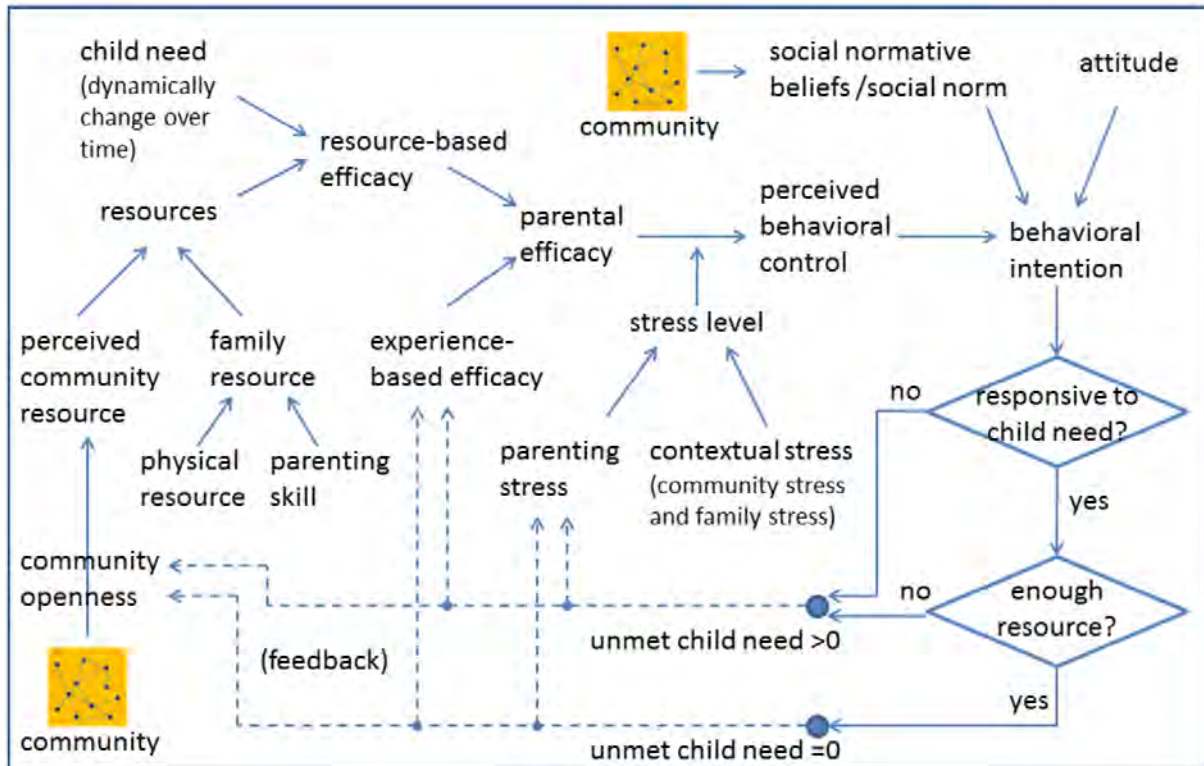
S'érigeant contre les méfaits d'une approche rationnelle de l'urbanisme et d'une planification descendante, l'écrivaine et activiste américaine Jane Jacobs fut la première à proposer de considérer la ville dans ses dimensions complexes et chaotiques dans son ouvrage ***The Death and Life of Great American Cities*** (1961). La ville commence alors à être envisagée comme un système complexe spatialement organisé. Comme le souligne Michel Morvan, spécialiste de la modélisation des systèmes complexes<sup>10</sup>, la forme est une émergence : la forme urbaine résulte ainsi de l'interaction entre les différents systèmes qui la composent (transports, voirie, énergie, etc.). De plus, la ville est un système ouvert. Ce type de système est « *composé de nombreux éléments en interaction, il cherche en général à maintenir son fonctionnement en s'adaptant aux évolutions externes (les éléments qui composent son environnement extérieur) et internes (les éléments qui composent le système). La complexité tient aux multiples interactions possibles entre tous ces éléments (externes et internes) : la modification d'un élément (dans le système ou dans son environnement) peut avoir des impacts sur les autres éléments et sur le système en entier. Et cette modification du système peut également influencer en retour son environnement...* » (Boutaud, 2015) Différents travaux montrent que le développement d'une ville oscille, en fonction de son environnement et des dynamiques internes, entre un mode fractal d'expansion, lorsque le milieu est positif, riche en ressources, ou au contraire un mode cristal de condensation lorsque le milieu est hostile, pauvre en apports externes. Modéliser la ville permet de mieux comprendre son fonctionnement. Cela permet d'observer le phénomène global à partir des interactions entre les sous-systèmes qui la composent et d'en révéler les dynamiques sous-jacentes.

### UNE SIMULATION AU SERVICE DE LA PRÉVENTION DE LA MALTRAITANCE INFANTILE

Le professeur en sciences computationnelles Xiaolin Hu de l'université de Géorgie et le doctorant en informatique Richard Puddy proposent une approche systémique de la maltraitance infantile et de sa prévention. Ce domaine se prêtant difficilement aux expérimentations de terrain, la simulation agent représente une alternative intéressante et encore peu explorée. **La simulation cherche à reproduire les dynamiques de la maltraitance et l'impact de différentes stratégies de prévention. Il s'appuie sur un modèle écologique de la violence familiale et une approche multifactorielle** (modélisation des interactions entre la multitude d'acteurs (parents, enfants, voisinage, écoles, services de santé, sociaux...) et les facteurs multi-échelles les affectant (facteurs psychologiques, sociaux, etc.)). L'accent est mis sur les facteurs individuels, les relations sociales et la communauté locale (voisins, amis...). Les auteurs adressent davantage la négligence des besoins de l'enfant que la maltraitance physique ou mentale. Deux communautés de 100 familles sont modélisées : l'une avec une forte pression sociale et l'autre avec une faible pour mesure l'impact du stress social sur la maltraitance. La simulation se fait sur 1000 pas de temps équivalant ici à un jour. À chaque pas de temps, certains parents sont confrontés à des demandes soit de leurs enfants, soit des voisins qui n'arrivent pas à répondre aux besoins de leur propre enfant. La négligence est constituée lorsqu'un agent « parent » est défaillant plus de 350 fois. Chaque agent a des capacités comportementales et cognitives en lien avec les processus et mécanismes sous-jacents de la maltraitance infantile, identifiés par les travaux en sciences cognitives et en psychologie sur le sujet (notamment la théorie de l'auto-efficacité de Bandura, les modèles de stress parental de Belsky, Hillson & Kuiper et la théorie du comportement planifié d'Icek Ajzen). Le modèle intègre trois boucles de rétroaction impactant

10. Qu'est-ce que les systèmes complexes ? Intervention lors de la Journée d'échanges scientifiques Modélisation Urbaine de Gerland, 14 avril 2016, Lyon

la réponse parentale : l'influence sur le stress parental du degré d'utilisation des ressources familiales (au sens large), le sentiment d'efficacité personnel basé sur les expériences passées d'avoir bien répondu aux besoins de l'enfant, et les relations avec la communauté locale (aide obtenue des voisins...).



Le modèle teste trois pistes d'action en matière de prévention : le soutien aux familles par les centres d'action sociale locaux (le modèle peut intégrer les limites de capacité du centre, ainsi que l'impact des choix de priorisation des familles sur l'ensemble de la politique), le développement de lien social au sein de la communauté et l'action sur l'environnement local pour diminuer le stress social (diminuer l'insécurité locale par exemple).

La simulation souligne notamment qu'être bien entouré, avoir une bonne première expérience éducative et renforcer les aptitudes parentales ont des effets d'autant plus positifs sur la prise en charge des enfants que la famille évolue dans une communauté au stress social faible. Dans le cas contraire, les parents n'osent pas se tourner vers l'extérieur pour demander de l'aide, aggravant les risques de négligence. Sur les actions de prévention, l'action sociale de proximité démontre son efficacité, de même que les actions visant à diminuer le stress social pour que les relations sociales puissent jouer à plein. Ce modèle conceptuel a vocation à se développer en intégrant des données réelles. (Hu & Keller, 2015)

## Approches sectorielles versus intégrées<sup>11</sup>

Les démarches de modélisation se sont longtemps concentrées sur une approche sectorielle (qui peut être analytique ou systémique)<sup>12</sup>. En plein développement, les modèles intégrés essaient de prendre de la hauteur et d'observer le comportement d'ensemble du phénomène. Par exemple, sur la qualité de l'environnement sonore en milieu urbain, « *la tendance des approches est à la globalisation et à la généralisation, à savoir le développement d'outils couplant des modèles météorologiques, des modèles dynamiques de trafic, des modèles temporels de propagation acoustique, l'ensemble permettant soit de produire des indicateurs acoustiques corrélés aux notions de qualité de l'environnement sonore ou de gêne, soit de simuler l'environnement sonore.* » (Picaut, Guillaume, & Dutilleux, 2012).

Ces modèles intégrés sont « *capables de déployer des raisonnements complexes, faisant communiquer des données issues de registres variés pour faire apparaître les influences mutuelles de plusieurs phénomènes* » (ADEME, 2016).

### LES VILLES ONT LEUR DOPPELGÄNGER...



Le projet de R&D « Modélisation urbaine Gerland » vise à reconstituer une ville virtuelle, ici un territoire lyonnais. L'objectif est de développer un nouvel outil d'aide à la décision permettant de visualiser l'existant et des projets en 3D. Il s'intéresse aux dimensions structurantes qui font la dynamique du territoire (usage du sol,

transports, population avec sa composition et sa répartition sur le territoire, emploi, déchets, biens de consommation, énergies, qualité de vie, gestion de l'eau, immobilier, activités économiques, etc.), et à leurs interactions mutuelles à différentes échelles de temps et d'espace. Porté par un consortium privé composé de Veolia, EDF, The CoSMo Company, ForCity et soutenu par la Métropole de Lyon et la CDC, la plate-forme numérique permettra d'étudier les conséquences de tel ou tel choix d'aménagement, en intégrant de multiples facteurs, dont l'impact environnemental. MUG ambitionne de couvrir la totalité des thématiques urbaines et d'agréger l'ensemble des données disponibles sur un même territoire.

<http://www.lyon-gerland.com/le-projet-urbain/modelisation-urbaine-de-gerland-mug/>

11. Pour un historique du développement de cette approche intégrée dans la modélisation de la ville, voir (Saujot, Criqui, Lefèvre, & Menanteau, 2012) et pour des exemples (Commissariat Général au Développement Durable).

12. Sur les modèles sectoriels urbains et un historique, voir plus spécifiquement (Leurent, 2012)

## Approches micro versus macro

Très schématiquement, deux grandes approches se sont longtemps opposées pour rendre compte des phénomènes sociaux : partir des individus ou des structures sociales (groupes, normes, réseaux...) ?

**L'individualisme méthodologique, ou approche « bottom-up », postule que les structures et processus sociaux résultent de l'interaction des individus, de l'addition de leurs conduites et représentations.** C'est une approche positiviste inspiré du mécanisme des sciences physiques (ex : sociologie positiviste d'Auguste Comte, Weber, Boudon). Critiquée pour s'appuyer sur un individu rationnel et utilitariste, cette approche s'est complexifiée en intégrant une rationalité limitée, puis les motivations (sens et valeurs donnés à son action par l'individu), suivies des processus cognitifs des individus et de leurs capacités d'apprentissage et d'anticipation et enfin la dimension émotionnelle. **Cette approche a contribué à mettre en avant l'idée que des actions individuelles microscopiques ont des effets d'émergence à l'échelle macroscopique.** Elle permet d'élaborer des modèles explicatifs de paradoxes de l'action collective qualifiés d'effets pervers par le sociologue Raymond Boudon : l'addition d'actions individuelles rationnelles produit des effets inattendus et contraires aux intentions de chacun. La simulation individu-centrée s'inscrit dans la lignée de cet individualisme.

**L'holisme, ou approche « top-down »,** explique les faits sociaux par d'autres faits sociaux, par leurs relations avec le groupe ou la société dans son ensemble. Cette approche s'intéresse aux motivations et aux pratiques sociales des individus pris d'une manière collective. À son extrême, les individus ne sont que des vecteurs passifs, leurs comportements sont socialement déterminés par la contrainte sociale dont ils ont intériorisé les normes. **Le libre arbitre individuel n'est pas pour autant totalement éliminé, mais statistiquement ce qu'un individu choisit de ne pas faire, un autre le fera, pour un résultat social identique.** La démarche holiste cherche à identifier les grandes structures qui régissent ainsi la société. C'est une approche plutôt influencée par les sciences naturelles (ex : l'approche organique de Durkheim, les habitus de Bourdieu). Les modèles macroscopiques utilisant des variables agrégées peu représentatives des dynamiques individuelles relèvent de cette catégorie. Ils modélisent un humain moyen qui n'existe pas ou l'agrège dans des catégories englobantes (la ménagère de plus 50 ans, l'étudiant...). Cette approche est utile pour modéliser des phénomènes uniformes, prévisibles mais pas des comportements individuels dont les mécanismes de décision sont très complexes et aléatoires.

Cependant, la complexité des phénomènes étudiés ne peut se réduire à une partition aussi tranchée. Des postures médianes émergent travaillant sur les interactions entre ces échelles en intégrant l'échelle méso et enrichissent les modèles purement micro et macro en regardant les individus dans leur contexte social<sup>13</sup>. Ainsi, de nombreuses modélisations, notamment de milieu urbain, couplent une modélisation macro, comme un modèle d'interaction entre usage des sols et transports (Land Use Transport Interaction-LUTI) à une approche individu-centrée.

---

13. Sur le plan théorique voir l'individualisme méthodologique complexe du philosophe et épistémologue Jean-Pierre Dupuy, l'individualisme institutionnel du philosophe Joseph Agassi, le courant de l'économie des conventions (une convention collective étant à la fois le résultat d'actions individuelles et un cadre contraignant les individus), ou l'holisme émergentiste de Mario Bunge



## COMMENT PRÉDIRE ET CONTRÔLER LE COMPORTEMENT D'UNE FOULE ?

Cette question intéresse fortement les pouvoirs publics pour prévoir des dispositifs de sécurité, l'organisation d'événements culturels, politiques, faire face à des mouvements collectifs (manifestation...). La modélisation-simulation du comportement d'une foule est un champ très dynamique quoique relativement récent. Les travaux abordent la foule sous des angles très différents. Ainsi, la taille des foules détermine l'approche choisie. Bien souvent, si la foule est grande, elle va être considérée comme un tout, son mouvement assimilé à un flux et le modèle se centrera sur sa dynamique globale. C'est le cas du modèle simulant le carnaval de Notting Hill à Londres dont l'objectif est de trouver le meilleur parcours.

L'approche micro est utilisée pour une foule de taille restreinte et permet une simulation plus détaillée, intégrant la variété des comportements possibles. Les modèles intègrent à la fois des facteurs physiques, sociaux et psychologiques puisque le comportement d'un individu peut changer fortement dans ce contexte collectif. Certains modèles observent plutôt les caractéristiques externes (forme, mouvement, répartition spatiale des individus, organisation des groupes, etc.), d'autres se focalisent sur l'évolution du comportement social de la foule sur la durée.

Pour une revue synthétique des travaux sur cette question, voir (Zhou, S. et. al., 2010)

## Approches dynamiques versus statiques

**Le modèle statique donne une image du phénomène à un instant figé ou d'équilibre. Il fait en quelque sorte abstraction du temps.** Il est adapté à un phénomène qui évolue de manière linéaire ou répétitive. Il permet de comparer des situations différentes en fonction de la variation d'un ou plusieurs paramètres mais ne permet pas de décrire le passage d'un état à un autre. Ce type de modèle a longtemps été le modèle prépondérant utilisé en sciences sociales, notamment en géographie ou en aménagement. Les modèles descriptifs relèvent aussi en général de cette catégorie.

Développé par Jay W. Forrester, dans les années 60, **le modèle dynamique est adapté aux systèmes dont l'étude nécessite de tenir compte de ses valeurs passées et présentes** ainsi que de ses variables internes (variables d'état). Contrairement à un système statique, connaître les variables d'entrée est insuffisant pour déterminer de manière univoque celles de sortie. Ce modèle permet de rendre compte des relations d'engendrement entre variables ayant des temps différents ou aux comportements évolutifs. Différents outils mathématiques permettent de considérer soit un temps continu (la variable d'état change d'une manière continue le long du temps, par exemple pour modéliser le niveau d'un fleuve), soit un temps « discret », c'est-à-dire découpé en période de temps (dénombrables) qui peuvent se succéder selon une fréquence connue ou de manière aléatoire (ex : usagers se rendant dans un Centre communal d'action sociale...). Il y a deux manières de construire le modèle :

- soit les lois de comportement des composants du système sont connues et le modèle transcrit ces lois (modèle de connaissance),
- soit elles sont méconnues et un temps d'observation du système réel ou d'une simulation (physique ou numérique) permet de réaliser des mesures pour rapprocher

ce système d'un modèle connu (modèle de comportement). Dans ce cas, cela suppose de connaître le comportement de quelques modèles élémentaires (Bontempi, 2015)

**Les modèles dynamiques intègrent des ruptures, une dimension chaotique, des phénomènes d'émergence. Ils sont donc particulièrement adaptés aux systèmes complexes.** Dans ce cas, le modèle dynamique intègre différents sous-systèmes qu'il va interconnecter (en cascade, en parallèle (partager une même entrée), ou via des boucles de rétroaction (la sortie d'un premier sous-système agit comme entrée d'un second sous-système dont la sortie agit de nouveau sur le premier système). Cette rétroaction peut venir contrarier les changements du premier sous-système ou au contraire agir comme amplificateur).

Ce modèle permet d'intégrer à la fois des paramètres externes (par exemple une baisse de la population ou bien une récession économique ou des catastrophes écologiques / naturelles etc.), des critères politiques (contrôle du foncier, décision des infrastructures de transport, énergétiques, urbaines etc.) et leur temporalité, puis d'observer leurs interactions (ex : synergie entre politiques). Il est souvent utilisé pour la résolution de problèmes stratégiques à long terme. La plupart des modèles explicatifs et prédictifs sont dynamiques.

Pour explorer les interactions urbaines, ce modèle peut être couplé avec une approche micro via une modélisation multi-agents : le système dynamique formalise les relations entre un grand nombre de variables et leur évolution dans le temps tandis que le modèle agents modélise les changements d'échelle entre l'individu (ou le ménage) et le territoire simulé.

## OÙ IMPLANTER LES SERVICES POUR LES JAPONAIS ÂGÉS DE KANAZAWA EN 2030 ?

Le Japon connaît un très fort vieillissement de sa population. Or les personnes âgées sont « *une entité importante des systèmes urbains complexes. Les interactions entre leurs comportements spatiaux et la planification urbaine justifient que des recherches soient menées* ». Quel impact le vieillissement aura-t-il sur la répartition de la population, la mobilité, les transports, la demande et la localisation des services sanitaires et sociaux ? Le projet, mené par des chercheurs, architectes et designer en environnement des universités de Fuzhou (Chine) et de Kanazawa (Japon), vise à renforcer la connaissance qu'ont les aménageurs et les pouvoirs publics des évolutions démographiques et sanitaires de leur territoire à l'aune 2030 tant sur un plan quantitatif que qualitatif, et de les aider à planifier la localisation de nouveaux services dédiés aux personnes âgées ainsi que la nature de ces services (en fonction des évolutions des pathologies, des modes de vie et attentes...). Le processus repose sur une collaboration étroite entre les chercheurs, les pouvoirs publics en charge de la politique vieillesse et de la planification, les professionnels et gestionnaires des centres. Trois équipes ont été constituées pour travailler sur le paramétrage du modèle : une équipe en charge des aspects techniques de la simulation, une équipe sur la question des personnes âgées (caractéristiques socio-économiques, modes de vie, comportements de mobilité, évolution du nombre de personnes bénéficiant d'une aide à l'autonomie (type APA...) et une équipe sur les centres de jour (type de services, localisation...). L'implication de toutes les parties prenantes était au cœur du modèle afin d'éviter au maximum un effet boîte noire lors de la simulation mais aussi pour favoriser l'acculturation des pouvoirs publics et des professionnels à ce type d'approche et leur confiance dans le modèle. La simulation se déroule entre 2000 et 2030. Chaque simulation équivaut à une année et nécessite 45 heures de calcul. Au final, la simulation montre la tendance générale en termes de nombre de personnes âgées, de leur degré de dépendance et donc du niveau de soins, ainsi que les zones où les centres devraient être implantés et le nombre nécessaire pour répondre aux besoins. Au final, la simulation montre la tendance générale en termes de nombre de personnes âgées, de leur degré de dépendance et donc du niveau de soins, ainsi que les zones où les centres devraient être implantés et le nombre nécessaire pour répondre aux besoins.

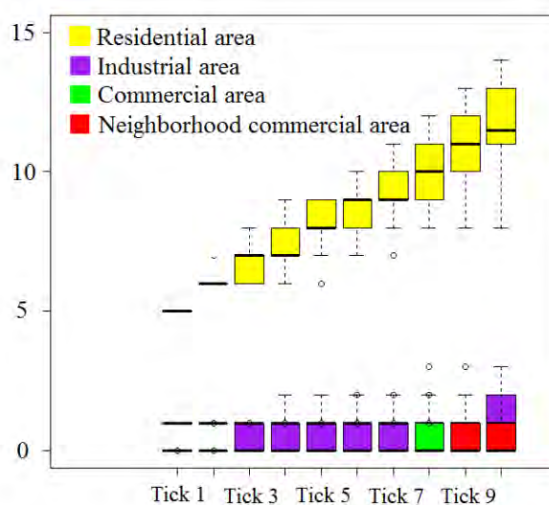


Figure 15: Changes in the number of DC centers in different land use zones throughout the 30 experiments

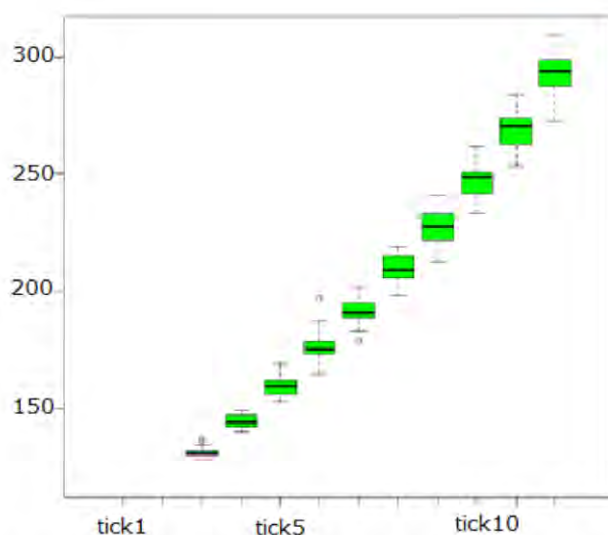


Figure 16: Changes in the number of elderly persons who attended DC centers throughout the 30 experiments

Une des voies d'amélioration du modèle serait de pouvoir y intégrer des bases de données fiables et fournies sur l'état de santé de la population. Les auteurs soulignent aussi que cette démarche aura permis aux participants de prendre conscience du nombre de variables, et donc de la complexité, affectant la demande en services publics pour les personnes âgées. (Ma, Shen, & Nguyen, 2016).

## Approches territoriales et a-territoriales

Un certain nombre de modélisations s'intéressant aux phénomènes sociaux ne prennent pas en compte l'espace géographique mais un espace uniforme. C'est le cas notamment des premiers modèles travaillant sur l'émergence de structures collectives à partir de comportements individuels dotés de règles simples (vols d'oiseaux, émergence d'un trajet optimal des fourmis cherchant le plus court chemin entre leur nid et de la nourriture) ou de modèles étudiant des flux (voitures, foules, diffusion, etc.).

### SUGARSCAPE D'EPSTEIN ET AXTELL (1996) : NAISSANCE DES INÉGALITÉS DE DISTRIBUTION DES RICHESSES DANS UNE POPULATION

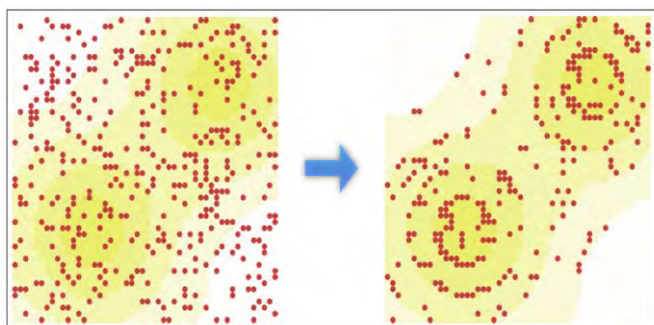


FIG. 2.1 – La répartition des agents sur les montagnes de sucre de SugarScape

Une population d'individus autonomes (agents) aux capacités différentes (champ de vision, consommation énergétique, déplacements...) évolue dans un environnement dans lequel pousse une ressource, ici du sucre, de manière continue et spontanée mais suivant une répartition spatiale hétérogène. À chaque

pas de temps, les agents collectent le sucre qu'ils peuvent et en consomment pour leur survie. Rapidement certains agents amassent du sucre, les plus riches combinant une vision large et un métabolisme lent. Ceux qui ont un métabolisme lent et un champ de vision restreint restent au pied des montagnes sans voir les ressources plus éloignées. Par la suite, une deuxième version du modèle enrichit les activités des agents (reproduction sexuée, héritage, échanges culturels, commerce, combats, épidémies, etc.) et montre à quelles conditions se renforce cette dynamique de répartition inégalitaire des richesses. Ce modèle a été repris dans de nombreux travaux sur la formation des normes sociales via la culture et sa diffusion ou encore l'émergence de comportements de communication et coopération dans des sociétés artificielles.

<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/1/6/appendixB/EpsteinAxtell1996.html>

Pour une adaptation de ce modèle à la distribution de la richesse dans une population, voir

<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WealthDistribution>

**Plusieurs facteurs ont fortement contribué à la prise en compte de l'espace dans les modèles : le développement de l'analyse spatiale<sup>14</sup> en tant que cadre théorique dans lequel l'espace (position, voisinage, concurrence) a un rôle central pour comprendre les interactions espace-société, la disponibilité de plus en plus forte de données spatialisées<sup>15</sup>, territorialisées<sup>16</sup>, voire géolocalisées et le développement d'outils informatiques permettant d'organiser et d'intégrer une multiplicité de données (Systèmes d'Information Géographiques, base de données multidimensionnelles..), de prendre en compte des dimensions continues (altitude, température...), de collecter automatiquement les données dans certains cas... L'approche géomatique permet ainsi de mettre en relation les différentes couches d'information liées à différents aspects du phénomène et de mettre en évidence des régularités spatiales. Couplé avec approche centrée sur les comportements individuels, un SIG donne un nouvel espace d'exploration et d'expérimentation in silico, mais dans un environnement proche du réel, de situations difficiles à observer in situ. On peut ainsi reconstruire, par simulation, les processus susceptibles de générer les structures socio-spatiales observées. Ces Environnements Géographiques Virtuels (EGVs) apparaissent comme une nouvelle génération d'outils d'analyses géographiques, d'aménagements et de prospective. Ils permettent une visualisation multidimensionnelle, une simulation dynamique de phénomènes géographiques et la participation collaborative pluridisciplinaire. En leur sein, les Environnements Virtuels Urbains pour la Géosimulation (EVUG) sont notamment déployés dans des villes américaines en tant qu'outil de dialogue et de co-élaboration de l'espace urbain avec les habitants et la société civile.**

### COMMENT LES INDIENS ANASAZIS (8<sup>ÈME</sup> – 13<sup>ÈME</sup> SIÈCLE, SUD-OUEST DES ETATS-UNIS) ÉTAIENT-ILS ORGANISÉS SOCIALEMENT ET FAMILIALEMENT ?

En l'absence de trace écrite, les chercheurs et modélisateurs sont partis de l'organisation spatiale connue de cette population (ainsi que des vagues successives d'implantation) pour reconstruire les usages sociaux ayant conduit à cette structuration. Des relevés sur le terrain de données spatiales et/ou temporelles (données topographiques, hydrologiques, géologiques, archéologiques, botaniques ou encore archéobotaniques) ont permis le paramétrage d'un SIG temporel très réaliste reproduisant l'environnement de vie et d'évolution spatiale des Anasazis. Puis ce SIG a été enrichi par une modélisation agent insérant des agents humains virtuels représentant des individus possibles du passé. Ces individus étaient dotés de divers modèles sociaux et de règles d'interaction avec leurs semblables (endogamie, exogamie, coopération faible ou forte, hiérarchisation sociale faible ou forte...) et leur environnement (tendance à la déforestation faible ou forte, à la culture du maïs exclusive ou non, dispersée ou non...). L'objectif était de pouvoir comparer l'évolution des implantations humaines simulées avec celle des implantations réelles (lieux d'implantation des nouveaux foyers concentrés ou au contraire dispersés, plus ou moins grande déforestation ou surexploitation des sols, etc.) en fonction des hypothèses comportementales faites. Cette modélisation-simulation a permis de montrer la plausibilité d'un type d'organisation sociale qui aurait effectivement conduit aux données spatiales retrouvées (Tim Kohler, Mark D. Varien (dir.), 2012).

14. L'analyse spatiale s'intéresse aux principes d'organisation de l'espace, aux logiques de localisation, aux formes des interactions spatiales et à leur rôle dans la dynamique de l'espace.

15. L'information géographique localise l'objet ou le phénomène dans l'espace à un moment précis.

16. La spatialisation désigne le fait de produire une donnée relative à un espace donné tandis que la territorialisation implique de fournir au travers ou en complément de la donnée des éléments de contexte et de compréhension de la nature des facteurs qui interviennent dans la réalité observée du territoire. (ADEME, 2016)

## Des modèles de données aux modèles de société virtuelles

Les démarches de modélisation se sont développées dans deux directions opposées : d'un côté, des modèles qui partent des données, de l'autre, la modélisation de sociétés artificielles assises sur une approche qualitative ou conceptuelle<sup>17</sup>. Si au départ ces modèles reposaient plutôt sur des règles simples ou se focalisaient sur un secteur ou un phénomène particulier (trafic routier, épidémies, production, consommation énergétique, etc.), la tendance est à la complexification et à une approche globale, multisectorielle et/ou multi-échelle. Du côté des données, le modèle extrême est celui issu du big data tentant de faire émerger du sens de la mise en commun de données disparates, non structurées mais potentiellement significatives.

Le recours à un monde artificiel s'apparente à une expérimentation sociale. Si le modèle fait émerger des règles, des phénomènes complexes présents dans la société réelle alors ce peut être une piste pour expliciter ce phénomène<sup>18</sup>. Toutefois, les positions divergent sur la transférabilité de ces résultats au réel. Le mathématicien Arbesman a ainsi étudié Simcity et observé que la complexité d'une ville croissait de manière linéaire en fonction de la population et, dans le cas du jeu, pour chaque nouveau citoyen simulé. Mais les facteurs de complexité d'une ville s'accroissent différemment ; par exemple, l'usage de l'énergie croît de manière sous-linéaire tandis que l'innovation elle a une courbe plutôt exponentielle. Pour autant, sans études complémentaires, il ne peut dire si ce constat se vérifie dans le réel ou est un effet de jeu. Plutôt que d'analyser le jeu, Vincent Ocasla a cherché à trouver la forme d'une ville durable de 6 millions d'habitants, c'est-à-dire qui ne connaît ni criminalité, ni pollution, ni congestion de trafic, et dans laquelle la densité est optimale et aucun logement n'est vacant. Horizon a priori souhaitable, Magnasanti s'est révélé être un Etat policier pratiquant une surveillance généralisée dans lequel les citoyens vivent dans des espaces confinés et extrêmement ordonnés.

La difficulté d'utiliser des variables qualitatives est bien souvent avancées par les modélisateurs pour se replier sur des indicateurs quantitatifs. Il semblerait que les pratiques de modélisation du social et de l'urbain se croisent assez peu : les modélisateurs urbains privilégient une approche circonscrite des phénomènes sociaux, assise sur les données disponibles et quantitatives tandis que la modélisation de dynamiques purement sociales s'intéresse peu à l'espace. Heureusement, certains modèles intègrent avec succès des variables qualitatives.

Ainsi, des chercheurs néerlandais ont travaillé sur l'intégration dans un modèle multi-agent de résultats issus d'enquêtes ethnographiques (entretiens, analyse documentaire et enquête de terrains) afin de proposer une méthodologie générale (Ghorbani, Dijkema, & Schrauwen, 2015). De leur côté, des chercheurs de l'École d'Architecture de Nantes ont travaillé sur la qualité des ambiances architecturales et urbaines de trois grands ensembles nantais via une approche pluridisciplinaire relevant des sciences humaines et sociales pour les enquêtes de perception et de vécu, de la physique pour les simulations microclimatiques et enfin de l'architecture pour l'approche d'analyse architecturale (Ammar Malik, Crooks, Root, & Swartz, 2015).

17. Sur une histoire et une présentation détaillées de ces modèles de sociétés virtuelles, voir (Banos & Sanders, 2012)

18. Sur une histoire et une présentation détaillées de ces modèles de sociétés virtuelles, voir (Banos & Sanders, 2012) En Australie, un modèle a été créé pour simuler les comportements des consommateurs d'amphétamines dans le but d'améliorer leur accès aux thérapies.

## LA DISTANCE SOCIALE POUR RÉFLÉCHIR AUX VIOLENCES À JÉRUSALEM

Travaillant sur les causes des conflits, des chercheurs suisses et israéliens ont développé un modèle informatique permettant de mieux comprendre les sources de violence dans les zones urbaines et notamment à Jérusalem. Disposant de données sur la population des 77 quartiers de la ville, et d'autres sur les violences observées dans ces différentes zones depuis 2001, ils ont intégré la notion de distance sociale comme cause centrale des conflits. Cette distance peut être religieuse, ethnique ou idéologique, sexuelle ou économique et chaque facteur a un poids différent selon les contextes. Ainsi, les risques de violences sont plus élevés dans un quartier où se côtoient des Israéliens riches et laïques et des Palestiniens pauvres et religieux que dans un quartier où se côtoient des Israéliens pauvres et religieux et des Palestiniens pauvres et religieux. Deux hypothèses comportementales étaient testées : intégrer davantage les différents groupes de population au sein de la ville permettra-t-elle de réduire les violences et de dépasser les préjugés des uns et des autres ou aggravera-t-elle les risques de violence ? Les simulations sur les événements passés ont permis de tester la robustesse du modèle et d'envisager différents scénarii pour le futur de la ville en fonction des options politiques possibles et leurs conséquences sur le niveau de violence. (Chadefaux & Donnay, 2011), (Leridon, 2013).

## QUAND LA TARIFICATION DE L'EAU IMPACTE LES STRUCTURES SOCIALES TRADITIONNELLES

*La sociologue Aude Sturma, dans le cadre de sa thèse sur « les défis de l'assainissement à Mayotte : Dynamiques de changement social et effets pervers de l'action publique » (Université Toulouse Jean-Jaurès) a **observé les interactions entre gestion de l'eau et structures sociales**. Mayotte se caractérisait par un système traditionnel d'entraide entre riches et pauvres : les plus riches payent l'eau pour les plus pauvres et reçoivent en échange différents services (jardinage, garde d'enfants...). La mise en place d'un système de traitement de l'eau et d'une facturation individualisée à la charge des usagers a bouleversé cette coopération informelle. Comme les plus riches qui soutenaient les communautés ne pouvaient pas payer pour tout le monde, il n'y avait plus de raison de coopérer avec eux. Cela a provoqué un repli sur des solutions de gestion individuelle et une mise en danger du lien social. Pour traiter cette question, Aude Sturma a choisi une triple approche : qualitative classique, quantitative avec des questionnaires et de modélisation pour montrer les impacts de la variation du prix de l'eau sur le lien social. Pour élaborer son modèle, elle a fait des choix sur la manière de représenter et modéliser le lien social, choix qui peuvent (et ont été) critiqués. Questionner les choix est fondamental. [...] Quels que soient les choix faits, la modélisation permet de lever les ambiguïtés. Ce qui est implémenté est vérifiable et il n'y a plus de pirouettes rhétoriques possibles, une posture qu'affectionnent assez souvent, les sociologues pour prouver ce qu'ils avancent. (Amblard, Modélisation agent : atouts et limites de la simulation agents, 2016).*

## II. Atouts et limites d'une démarche de modélisation

« *Morale : tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles* » disait le mathématicien Boris Andreianov. Sans reprendre les avantages et limites précités des modèles, nous essayons ici de synthétiser les atouts et limites d'une démarche de modélisation. Les points listés sont issus de la littérature académique et d'entretiens avec des chercheurs modélisateurs travaillant dans le champ social et/ou urbain : Pablo Jensen (IXXI-Lyon), Frédéric Amblard (Toulouse), Franck Varenne (Rouen), Maxime Frémond (géographe indépendant), et Arthur Lefèvre (Paris 8).

### Des atouts originaux

#### La richesse d'exploration

Modélisation et simulation permettent une exploration de la complexité que les outils classiques ne peuvent proposer notamment grâce à la simplification des phénomènes et la possibilité de faire varier les paramètres. Dans une utilisation prédictive, le modèle peut faciliter la mise à plat des enjeux et efforts nécessaires à l'atteinte des objectifs. Il peut aider à hiérarchiser l'action en évaluant la sensibilité des scénarios aux différentes hypothèses ainsi que leur pertinence par rapport aux objectifs et aux moyens envisagés, révéler des évolutions non souhaitables, des effets contre-intuitifs ou indirects, ou au contraire des synergies.

*L'idée de ce type de modélisation est vraiment de jeter des pavés dans la mare, d'être quasiment le plus caricaturale possible, avec des résultats vraiment marqués et non pas des différences minimes. Il faut avoir des démarches un peu radicales pour justement secouer les idées reçues, les positions intangibles, alerter ou interpeller les élus d'un territoire sur une évolution probable, sinon rien ne change. [...] Je prêche pour que chaque territoire s'engage dans une démarche de modélisation de son territoire et pour l'adoption d'une démarche normative d'aménagement, c'est-à-dire de proposer de nouvelles normes d'aménagement en fonction d'un objectif donné. La France devrait développer ces démarches prospectives notamment en matière d'urbanisme. C'est vraiment important de poser la question des conséquences des aménagements dès le départ. Une démarche de modélisation est longue, compliquée, coûteuse en temps et en argent mais sur le long terme, l'investissement s'avère largement rentable et peut éviter des choix désastreux. (Frémond, 2016)*

#### Un travail collectif de structuration de la connaissance

Une modélisation implique un travail de synthèse des connaissances du phénomène modélisé ainsi qu'un effort de schématisation nécessitant de préciser les éléments et processus considérés comme indispensable à sa compréhension.

*Outil de structuration de la pensée et d'organisation des savoirs, la modélisation agent permet de mener une réflexion collective sur des problématiques du territoire, de projeter des modèles de décision au niveau collectif ou encore de confronter différents modèles de décision. (Amblard, Modélisation agent : atouts et limites de la simulation agents, 2016)*

Ce travail peut être mené de manière collective et interactive afin d'intégrer aussi les savoirs des profanes (l'expérience du territoire) et ne pas rester aux mains des experts et décideurs.



## Un outil de démocratie participative

*La modélisation urbaine pourrait s'inscrire dans une démarche de démocratie participative en intégrant des structures de gouvernance, les habitants et la participation locale dans la construction de scénarios d'aménagement, voire le paramétrage du modèle si on veut une démarche volontariste forte. Ce serait très intéressant en termes d'acceptabilité sociale ou même simplement de communication. (Frémond, 2016)*

*Cet outil permet de mener une réflexion collective sur des problématiques du territoire. Dans une visée prospective, il peut donner à voir des évolutions collectives, donner une idée des futurs possibles. La phase d'élaboration permet de choisir collectivement les hypothèses à retenir, de simuler les jeux d'acteurs, de présenter différemment les connaissances empiriques. La simulation peut s'accompagner de jeux de rôle pouvant intervenir à différentes étapes de la modélisation et permettant des allers-retours avec le modèle. (Amblard, Modélisation agent : atouts et limites de la simulation agents, 2016)*

## La facilité d'appropriation

En fonction du mode d'expression des résultats et de leur visualisation, le modèle peut être très proche de l'image « cognitive » qu'ont les acteurs de l'objet modélisé. L'échange, la structuration et la convergence des points de vue s'en trouvent facilitées.

*La construction d'un objet unique s'accompagne de l'élaboration d'un langage et d'un espace de discussion communs, lieu de partage des points de vue conflictuels. (Lefèvre, 2016)*

## Une pluralité de méthodes pour répondre à la variété des besoins

Lydie Laigle, directrice de recherche au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - Université Paris Est) et spécialiste des dynamiques de transition écologique, rappelle que les différentes méthodes de simulation permettent de répondre à des questions distinctes et font preuve d'une grande souplesse en se combinant entre elles selon les besoins : (Laigle, 2009) :

- « Que pourrait-il arriver ? » dans le cas de la modélisation bayésienne (méthode d'inférence permettant de déduire la probabilité d'un événement à partir de celles d'autres événements déjà évalués, elle est largement utilisée en data mining),
- « Que dois-je faire pour atteindre un état voulu ? » dans le cas des logiciels de rétro planification ou back-casting<sup>19</sup>;
- « Quel résultat serait le meilleur dans un contexte donné ? » dans le cas des logiciels d'optimisation (adapté pour étudier les changements de contexte) ;
- « Que se passe-t-il si ? » dans le cas des modèles en systèmes multi-agents (SMA) et systèmes dynamiques (SD) ;
- « Quelle alternative est la meilleure/la préférée ? » dans le cas des modèles multicritères.

<sup>19</sup> Ils sont rétroactifs et considèrent les interactions entre les politiques (synergie), les effets sur d'autres secteurs, les effets entre échelles. Ces modèles sont davantage normatifs que descriptifs dans le sens où ils fournissent la meilleure solution au problème posé.

## Points de vigilance et limites

### Une vision partielle, partielle et simplifiée

Un modèle n'est qu'une représentation simplifiée, relative, incomplète et temporaire d'une partie du réel ou d'un phénomène. Ce n'est jamais ni le réel, ni le phénomène étudié mais bien la représentation qu'en a le modélisateur, le commanditaire, l'observateur qui relève les données ou analyse les résultats (quel sens donne-t-il à ce qu'il voit ou croit voir ?).

« Ces présupposés sous-tendent le modèle sans le dire. Ce sont des éléments cachés, que seul le code permet d'identifier. [...] L'important est d'avoir un débat sociologique sur le modèle abstrait et pas seulement un débat technique sur le bon rendu du modèle dans le code. La simulation est un discours sur le réel même si elle a des apparences de nouvelle technologie éblouissante d'objectivité technique ! » (Lefèvre, 2016)

### Chaque modèle est adapté à ce qu'il modélise

Au-delà des grandes fonctions des différents modèles, chaque modèle doit être conçu et adapté à la démarche en fonction de :

- **L'objectif de la modélisation** : comprendre un phénomène, stimuler l'imagination, structurer la réflexion collective, anticiper des évolutions, produire des informations à intégrer dans un autre modèle, etc.
- **La problématique précise à laquelle on souhaite répondre et l'angle de questionnement choisi**. Élaborer un modèle sans avoir de questions préalables est une des causes fréquentes d'échec, de même, qu'un découpage de la formation sociale en sous-systèmes trop abstraits et généraux, globaux.
- **La représentation partagée de la problématique et de ses enjeux**. Cela peut nécessiter un travail en amont entre les acteurs (utilisateurs, modélisateurs, « entités » modélisées...). Une démarche de modélisation d'accompagnement peut aider à cette prise de recul, de même que l'élaboration d'autres outils comme des scénarios prospectifs ou des visions partagées comme la production d'imaginaires collectifs<sup>20</sup>.
- **La contingence du modèle**. Patrick Bonnel du Laboratoire d'Économie des Transport (Lyon 2) pointe par exemple une telle limite des modèles LUTI et de leur capacité de prédiction à une échelle territoriale fine. Malgré l'universalisme de certaines relations (par exemple l'arbitrage entre coût de transport et coût de l'immobilier et ses conséquences en termes de densités urbaines), il existe des exceptions et des spécificités géographiques et temporelles qui entraînent des résultats différents selon les villes étudiées<sup>21</sup>.

20. Par exemple, la démarche « 2040, Rives du Futur, Syndicat Mixte des Rives du Rhône ».

21. <https://cybergeog.revues.org/25892>

## Connaissance et disponibilité de l'information

La première difficulté est l'assise scientifique du modèle : quelle connaissance empirique a-t-on de ce qu'on cherche à modéliser ? Il ne faut pas non plus oublier que le modèle ou la simulation, aussi réelle semble-t-elle, n'utilise que les données paramétrées. Ainsi, dans une simulation agent, les agents n'auront que les comportements implémentés et pas la richesse des comportements réels. En revanche, leurs interactions pourront faire émerger des phénomènes inattendus, que la recherche classique ne peut anticiper. Autre difficulté, celle des données nécessaires et disponibles<sup>22</sup> : leur nature (quantitative, qualitative, symbolique...), leurs échelles spatiales et temporelles, et leur évolution dans le temps. Pour autant, un certain nombre de modélisateurs soulignent que la modélisation ne doit pas partir des données disponibles mais bien de la problématique. Les données pouvant être construites pour la modélisation.

*Le premier verrou est celui des données. D'une part, il faut que les études permettent d'isoler ces dimensions comportementales pour pouvoir les transformer en variable informatique, un X ou un Y pour paramétrer l'équation. D'autre part, les modèles désagrégés reposent sur des populations synthétiques, c'est à dire une population qui a les mêmes caractéristiques sociodémographiques et socio-économiques que la population existante sauf qu'elle est créée virtuellement, numériquement avec des outils de démographie et des modèles probabilistes. Nous recréons cette population à partir du niveau le plus fin auquel on puisse obtenir la donnée. En France, la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL) n'autorise pas à stocker et recenser des données individuelles. Les données disponibles sont les données carroyées qui découpent le territoire en carré de 250 mètres de côté. Mais, si en ville, cela permet de préserver l'anonymat, ce n'est pas forcément le cas en zones rurales. Pour préserver ce secret statistique, ce carré est élargi à plusieurs kilomètres ou l'information est supprimée. Cela pose des vraies questions. (Frémond, 2016)*

## Faciliter sans appauvrir

Pour modéliser une problématique sociale, il est nécessaire d'identifier ses éléments essentiels, leurs échelles spatiales et temporelles respectives, leurs caractéristiques les plus représentatives et les interactions et variables les plus pertinentes. Si la modélisation ne s'appuie pas sur des données quantitatives, il faut mettre en algorithmes la donnée qualitative, discursive, symbolique. Tout choix de représentation du social a des conséquences sur le résultat de la simulation. Il est alors important de se questionner sur ce que devient le social une fois modélisé et ne pas trop appauvrir la simulation par le choix de certaines interactions plus facilement modélisables mais moins pertinentes. Par ailleurs, il peut être difficile de clarifier les formes de causalité (linéaire, interactionnelles, rétro actionnelles...). Les écueils sont nombreux quel que soit l'outil (insuffisance du nombre des paramètres, défaut de validation, défaut de fondement empirique dans des échantillons mesurés ou des modèles de données, défaut de robustesse, etc.).

22. Sur la question des données, voir rapport ADEME

## Travailler en commun

La modélisation doit croiser plusieurs types d'expertise (modélisation, Sciences Humaines et Sociales, expertise empirique de la problématique traitée, acteurs décisionnels). Cela nécessite un travail interdisciplinaire et la capacité de chacun à élaborer un langage commun. Pour le moment, peu de chercheurs en SHS pratiquent la modélisation (au-delà de l'outil statistique) et peu de modélisateurs ont une connaissance des questions sociales alors qu'il est nécessaire que tous aient une connaissance minimale de leur domaine respectif, de ses contraintes spécifiques. Les connaissances et les méthodes sont encore très segmentées selon les champs disciplinaires. Par ailleurs, l'analyse de la problématique et la construction du modèle ne doivent pas se faire sans la participation de l'ensemble des acteurs concernés par la modélisation. Or les démarches de modélisation participative se révèlent très solides pour des zones spatialement délimitées mais se heurtent aux limites de toute démarche participative à grande échelle (représentativité des habitants, multiplicité des acteurs concernés...).

## Trouver le bon périmètre

L'équilibre doit être trouvé entre une approche très ciblée et trop réductrice et une approche globale qui peut devenir aussi complexe que la réalité modélisée et perdre sa fonction explicative et/ou prédictive. Bien que la réalité soit difficilement segmentable, cette réduction du périmètre peut être une des conditions de la réussite du modèle, comme pour les modèles de trafic : l'espace des possibles des différentes entités du modèle est faible et connu. Pour aller d'un endroit à un autre, un piéton ou une voiture obéit à une certaine rationalité et des trajectoires qu'il est plus aisé d'anticiper (il y a peu de chances d'aller d'Oullins à Perrache en passant par Villeurbanne). En revanche, le risque est de modéliser des rationalités banales et d'avoir des prévisions peu intéressantes. Une autre piste est d'isoler des phénomènes qui ne sont pas trop dépendants de variables extérieures.

*Réaliser un modèle large d'un territoire sans problématique ciblée rend son utilisation très complexe. En effet, il est alors très difficile de déterminer quelles sont les interactions significatives. (Amblard, Modélisation agent : atouts et limites de la simulation agents, 2016)*

## Une apparence trompeuse

Malgré ses imperfections, la modélisation peut être facilement trompeuse et donner l'illusion du réel et d'un réel « objectif » (idéalisation de l'outil mathématique, interface léchée...) <sup>23</sup>. Le risque est alors que ce résultat se substitue à la réflexion et nuise à une utilisation critique du modèle. Les modèles sont porteurs d'une idéologie qui peut être consciente ou impensée. La construction d'un modèle, les choix opérés, sont le reflet de la posture de ceux qui ont contribué à son élaboration, voire l'expression de leurs rapports sociaux. D'où la nécessité d'un retour au réel permanent que ce soit par une confrontation avec le terrain ou avec les travaux conduits en SHS. Quand le modèle est facilement accessible et sert d'outil à la décision, il peut entraîner des modifications de comportements qui n'auront pas été anticipées, les individus se comportant en fonction du modèle et non plus du réel.

23. Sur l'impact des modalités de représentations de l'espace pour un profane, voir le travail de l'architecte Anne Van De Vreken « *Perception et représentation dans l'espace architectural* » (Université de Liège, 2008).

Le modèle devient auto-réalisateur et s'effondre à l'instar des modèles financiers et de la crise de 2008, appelée par certains « crise des modèles ». Ainsi, un modèle largement partagé sur un territoire par une multiplicité d'acteurs pourrait orienter leurs décisions en fonction des résultats des simulations qu'ils font.

« Il faut avoir l'esprit critique et garder en tête que la partie intéressante, ce n'est pas la 3D, mais bien le modèle informatique, son code et ses présupposés. » (Lefèvre, 2016)

## L'instabilité des phénomènes sociaux

Les variables et comportements paramétrés à un moment donné peuvent évoluer suite à de nombreux événements imprévisibles. Cette instabilité peut rendre la modélisation caduque pour une utilisation prédictive. Les scientifiques interrogés semblent plutôt sceptiques sur cette capacité de prédiction. Ainsi, les modèles d'épidémiologie qui sont des modèles causaux bien plus simples qu'une modélisation urbaine peinent à être prédictifs au-delà de quelques semaines, notamment parce que l'épidémie change les comportements des individus et qu'il reste très difficile de modéliser cela.

## Big Data<sup>24</sup>

La modélisation de données digitales peut être intéressantes pour favoriser la coopération et le partage d'informations entre acteurs, mais semble peu adaptée à une modélisation sociale et à des prédictions sur le long-terme. L'essor des big data a permis l'apparition de modélisations ne s'appuyant plus sur des hypothèses mais seulement sur des données. Ces données semblent peu opérantes pour modéliser et prédire des comportements.

*Depuis quelques années, ce phénomène a suscité beaucoup d'espoir. Les modèles se nourrissent de plus en plus fréquemment de données. La quantité de données disponibles, par le web notamment, a laissé croire que les données pourraient se substituer aux hypothèses comportementales. Il me semble que l'engouement s'estompe un peu pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la qualité des données est pauvre, particulièrement celle des données des réseaux sociaux (Facebook, twitter, etc.). De plus, les données disponibles se révèlent insuffisantes pour comprendre les motivations des individus. Par exemple, sur les dynamiques d'opinions, il est difficile de faire coller les données avec ce qu'on voudrait mettre dans nos modèles concernant par exemple la révision des croyances et la mise à jour des opinions. Ensuite, il y a la question du couplage des données entre elles. Comment interagissent-elles ? Les données sectorielles, thématiques sur les transports, l'énergie sont disponibles mais leurs interactions restent largement méconnues. Les hypothèses de couplage sont donc souvent un peu sorties du chapeau... Ceci dit, si le big data s'avère peu probant pour les comportements individuels, il est très porteur pour les données environnementales et les comportements collectifs. Pouvoir intégrer des données réelles et des dynamiques sur les données, même sans en connaître les processus, permet de simuler des phénomènes intéressants. Ainsi, un modèle peut simuler des pics de pollution de l'air, soit en simulant un processus soit en utilisant une série réelle, et observer comment la population réagit, comment elle adapte ses comportements de déplacement. (Amblard, Modélisation agent : atouts et limites de la simulation agents, 2016)*

24. Sur les relations Big data et sciences sociales, voir (Chabanel, 2016)

### III. Les principaux modèles utilisés

Nous présentons ici quelques modèles particulièrement mis en avant dans les modélisations urbaines et les simulations sociales.

#### Les outils de modélisation individus-centrés

**Ces outils relèvent d'une approche microscopique. Automates cellulaires et systèmes multi-agents sont issus de l'intelligence artificielle. Cette approche permet (1) de tester des comportements collectifs et de rendre visible des phénomènes d'émergence impossibles à se représenter autrement ; (2) de s'extraire des données quantitatives pour aller vers des variables qualitatives et symboliques et donc de modéliser plus fidèlement le social en optant pour le descripteur le plus pertinent ; (3) de projeter des hypothèses dans le temps ; (4) de travailler sur des processus et des interactions plutôt que sur des états figés (indicateurs). Dans une approche qualitative, elle permet ainsi de regarder les interactions entre groupes qui peuvent être difficiles à formaliser autrement.**

#### La micro-simulation

La micro-simulation est utilisée pour analyser les effets d'un changement de contexte à l'échelle macro sur l'échelle individuelle. Elle est utilisée dans l'analyse des effets des politiques économiques, notamment pour évaluer les effets redistributifs des politiques fiscales et politiques sociales. Ces modèles s'appuient sur les données réelles et peuvent donc modéliser des populations de manière très réaliste. En revanche, ils ne peuvent pas simuler des interactions entre les individus. Ces modèles sont « *fondés sur la représentation analytique des contraintes économiques et institutionnelles spécifiques auxquelles est confronté un agent et, si possible, sa façon d'adapter son comportement à des modifications de ces contraintes. La simulation d'une réforme de politique économique consiste à évaluer les effets du changement qu'elle induit sur les contraintes auxquelles est soumis un échantillon représentatif d'agents et sur un certain nombre d'indicateurs de leur activité et de leur bien-être. [...] D'une part, les techniques de microsimulation permettent d'identifier, le cas échéant, les gagnants et les perdants d'une réforme et donc d'examiner l'économie politique de cette réforme. [...] D'autre part, l'analyse désagrégée des effets d'une réforme du système redistributif permet d'évaluer les coûts et bénéfices de cette réforme en termes de bien-être social et donc d'intégrer à l'évaluation des considérations d'équité et de justice sociale.* »<sup>25</sup>

#### L'automate cellulaire (AC)

L'automate cellulaire représente l'espace comme un réseau de cellules sur une grille. À chaque cellule sont associés des caractéristiques (de milieu, d'habitat, de population...) et un grand nombre de variables d'état associées à des règles d'évolution. Cet état varie au cours du temps en fonction de ces règles et du voisinage de la cellule considérée. Les aléas sont introduits par les interactions entre éléments. À chaque nouvelle unité de temps simulé, les mêmes règles sont appliquées pour toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle génération de cellules dépendant entièrement de la génération précédente. Il n'y a a priori pas de nouvelles entrées bien que certains AC actuels intègrent des données extérieures pour être plus réalistes (par exemples des nouveaux arrivants dans l'espace modélisé).

Le premier automate cellulaire est celui de l'économiste T.C. Schelling. Il modélise un comportement simple : des individus restent sur leur lieu de vie ou déménagent en fonction de leur désir d'être entourés de semblables. Une cellule ne peut représenter qu'un individu à la fois. Le modèle tourne jusqu'à que tout le monde soit satisfait. Les simulations ci-dessous sont extraites de la plateforme NetLogo<sup>26</sup> qui met à disposition des modèles qu'il est possible de paramétrer. Elles montrent le processus de ségrégation spatiale dans un environnement de densité égale (près de ¾ des cases sont occupées) avec, dans le premier cas, une demande d'entre-soi de 15%, dans le second cas de moins de 27% et enfin de plus de 50%.

### Demande de similarité sociale de 15%



### Demande de similarité sociale de 27%



26. <http://www.netlogoweb.org/>

## Demande de similarité sociale de 54%



Il apparaît que même si la demande d'entre-soi est faible, le processus de ségrégation se produit. Cette ségrégation ne reflète donc pas forcément le degré d'intolérance de chaque individu mais plutôt un phénomène émergent collectif. De nombreux travaux ultérieurs et contemporains développent ce travail en l'enrichissant<sup>27</sup>.

Des AC multicouches géographiques ont été développés par exemple pour observer la croissance urbaine de Rouen (Plateforme SpaCelle) (Langlois, Simulation Géographique, 2010), et de nombreuses villes se sont dotées de ce type de modèles pour mieux comprendre leur organisation (Rome, Ottawa, San Fransisco...). Ce modèle est aussi utilisé pour travailler sur les formes d'occupation de l'espace (activité industrielle, commerciale, occupation résidentielle) et la diffusion de dynamiques spatiales (la propagation de la pollution par exemple).

Plus rustique que le modèle agent, l'AC est assez peu consommateur en termes de puissance de calcul. Il a l'avantage de reposer sur des principes simplifiant beaucoup la réalité sans recourir à une mise en équation complexe du phénomène. Autre atout, il permet une modélisation de données qualitatives. Enfin, comme dit précédemment, il se partage très facilement avec les non-spécialistes qui peuvent aisément rejouer le modèle en changeant sur les variables.

En revanche, il n'est pas adapté pour observer le comportement complexe d'individus, ni les forces économiques, politiques, culturelles ou sociales agissant à une échelle macro sur les dynamiques urbaines. Il ne peut pas gérer des objets mobiles ou des actions à distance. Ce sont d'abord des outils pour comprendre plus que pour décider.

27. Par exemple, la thèse de Laetitia Gauvin « modélisation de systèmes socio-économiques à l'aide des outils de physique statistique » (2011) qui rajoute notamment au modèle de Schelling, une série d'autres indicateurs tels que le prix des loyers, les phénomènes migratoires...



## GRANDES THÉMATIQUES SOCIALES ABORDÉES EN MODÉLISATION-SIMULATION

**L'urbain** : populations (démographie) et leur organisation spatiale (phénomènes de ségrégation, choix résidentiels, densité), environnement construit (usage des sols, bâtiments, infrastructures et écoconstruction, réseaux techniques, physique urbaine), économie urbaine (prix du foncier, localisation des activités), mobilité et transports, représentations et dynamiques spatiales (morphologies urbaines, transports et mobilité...), nature et vivant en ville (impact des projets d'aménagement), questions sociales (qualité de vie, perception du milieu urbain, ergonomie et accessibilité physique, pénibilité, mobilité, phénomènes d'intégration ou d'exclusion, etc.). De nouveaux domaines se développent comme la modélisation des flux entrants et sortants de la ville, ou des îlots de chaleur.

**L'écologie** (gestion des ressources naturelles renouvelables, climat, transition énergétique...)

**La gestion de crises** (épidémiologie, propagation de virus, catastrophes...)

**Les évolutions du langage** (usages langagiers et sociaux)

**La coopération entre agents** (dilemme du prisonnier, ethnocentrisme) et les interactions au sein de collectifs de travail.

La dynamique de concertation et **les conflits** (guerre et combats militaires)

**Les phénomènes économiques** (accumulation et répartition des richesses, marché boursier...)

**L'apparition de normes et conventions**

**Les populations** (migrations, épidémies...) et leur capacité d'adaptations culturelle et comportementale à tous les milieux terrestres

**La santé publique** : consommation de drogues ou de tabac, maladies cardiovasculaires, diabète, santé mentale...

**L'émergence d'organisation sociale** au niveau méso (classes, firmes) ou macro (émergence des sociétés (anthropologie, archéologie)) et leur organisation (organisation des firmes, processus de management...)

**Les processus de décision et les comportements** (marketing, psychologie sociale)

**Les processus d'émergence et de diffusion de l'innovation**

**La gestion des ressources** (eau, sols, forêt, agriculture, élevage, biodiversité...)

**Les réseaux d'influence et la formation d'opinion**

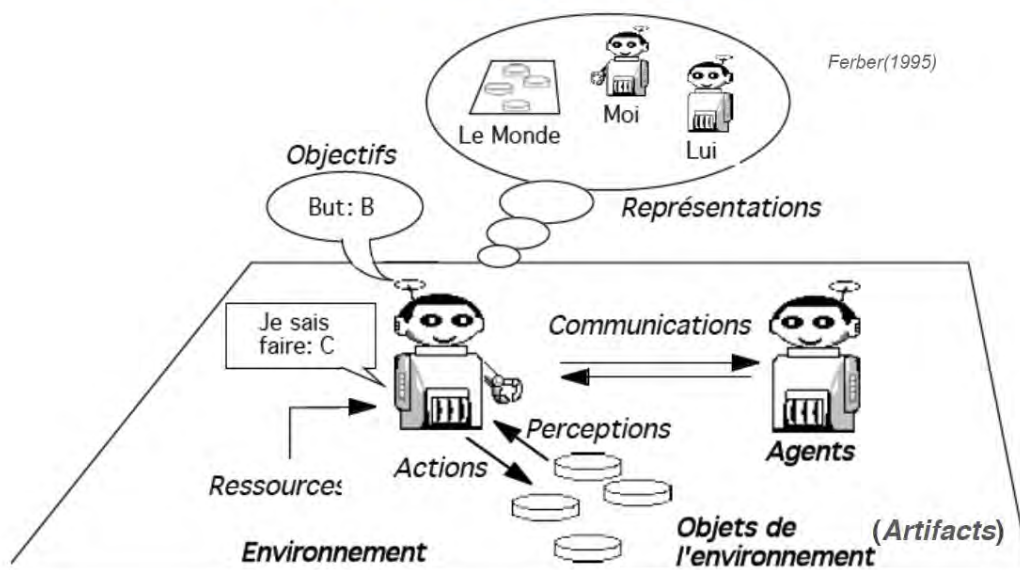
**Le comportement des foules**

**L'organisation sociale animale** (fourmis, bancs de poissons...)

## Les systèmes multi-agents (SMA)

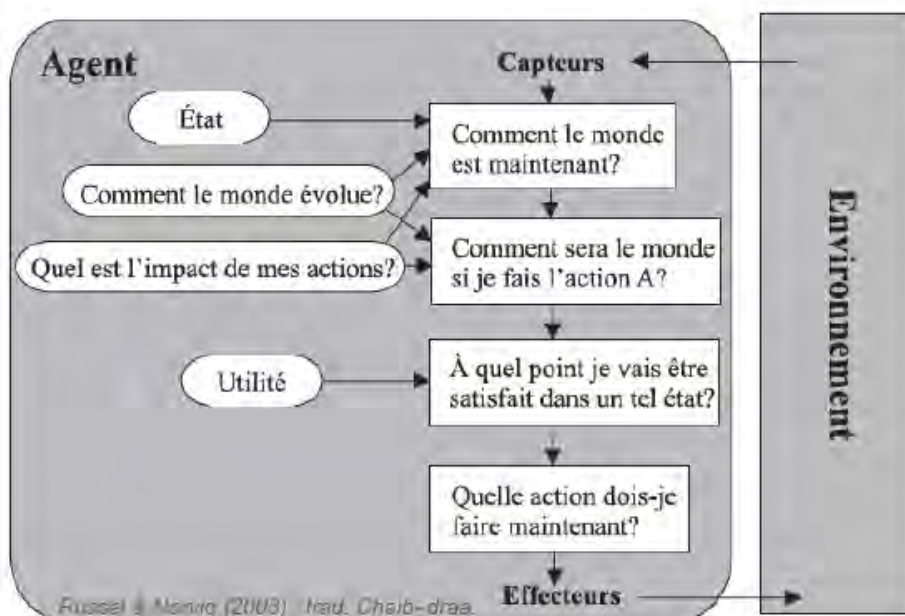
Un SMA permet d'observer l'émergence de phénomènes complexes non déductibles des interactions locales ou individuelles, comme l'organisation d'une ville à travers les comportements de ses usagers. Il est constitué d'un ensemble d'agents en interaction entre eux et avec leur environnement. Un agent est une entité autonome capable de percevoir et d'agir. Ce peut être des agents réels type individus, entreprises, groupes sociaux ou bien représentatifs de différentes caractéristiques d'un objet, de l'espace<sup>28</sup>... L'agent a une connaissance limitée de son environnement et est capable de communiquer et/ou d'interagir avec ses voisins pour collaborer et atteindre un objectif commun. Il a divers degrés de complexité en fonction de son degré d'autonomie et de ses capacités. Si les agents réactifs réagissent seulement à un stimulus, les agents cognitifs cherchent à réaliser des objectifs explicites et sont capables de planifier leurs actions pour les atteindre. Ils sont caractérisés par des notions mentales comme le désir, les croyances, les intentions, intègrent leurs expériences passées et peuvent même être dotés de capacité d'apprentissage (par exemple via l'implémentation d'un réseau bayésien (réseau de neurones)). Cette forme de système multi-agents cherche à reproduire des comportements sociaux d'un petit groupe d'individus. À contrario, les systèmes multi-agents basés sur des agents réactifs mettent l'accent sur la capacité d'auto-organisation du système et la manière dont des êtres « simples » résolvent efficacement des problèmes complexes (intelligence collective des fourmilières, bancs de poisson, oiseaux, etc.).<sup>29</sup>

### Schéma générique



28. Sur les différentes manières de modéliser l'espace, voir (Bousquet & Gautier)

29. [http://www.applis.univ-tours.fr/theses/2012/jean-baptiste.buguellou\\_2417.pdf](http://www.applis.univ-tours.fr/theses/2012/jean-baptiste.buguellou_2417.pdf)



L'avantage d'un SMA réside dans sa capacité à simuler des situations impliquant des populations très hétérogènes (en termes de localisation, savoirs, richesse, relations sociales, expériences, motivation, préférences, valeurs, processus cognitifs...), des phénomènes sociaux ne relevant pas d'une logique linéaire et des réseaux sociaux structurés<sup>30</sup>. Si les agents ne sont pas très nombreux ou si la plupart d'entre eux interagissent au hasard, d'autres formalisations sont plus pertinentes (équations différentielles, modèles de systèmes dynamiques). Il permet aussi de tester différents processus cognitifs et décisionnels. Il permet la prise en compte d'un espace défini, des interactions verticales aux différentes échelles, et horizontales (entre agents, entre agents et environnement), et favorise l'analyse des phénomènes d'adaptation et d'auto-organisation. L'avantage des SMA, par rapport aux automates cellulaires, est de prendre en compte explicitement un espace différencié et hiérarchisé, ainsi que les trajectoires de chaque individu ou groupe (Badariotti & Weber, 2002)

« Décider, selon le schéma classique de Herbert Simon, c'est se renseigner, concevoir, choisir et agir. Et pour la décision publique, aucun acteur n'est isolé dans sa décision. À chacune de ces phases, les approches multi-agents peuvent contribuer : se renseigner, ou encore se construire une représentation, c'est, à partir des données et informations disponibles, élaborer son modèle d'un projet. Les modèles multi-agents sont pertinents car respectueux de la complexité et des formes de modèles utilisés par les acteurs. Les simulations afférentes peuvent permettre d'explorer des scénarios assez complexes, à la condition de contrôler la validité à partir de données complémentaires. Concevoir, c'est définir des options acceptables, ou encore rechercher quelques possibilités à l'intérieur d'un système de contraintes. La résolution distribuée de problèmes peut nous y aider, en particulier pour les problèmes spatialisés, hétérogènes, avec des contraintes multi échelles. Choisir et agir, c'est actualiser des options à l'intérieur d'un processus de négociation, et dans une réalité évolutive et complexe. Les systèmes d'information collaboratifs sont un support privilégié pour ce type de processus, avant la mise en œuvre, mais aussi après, lorsqu'on est confronté à la gestion des conflits d'exploitation. » (Laigle, 2009)

30. Pour l'utilisation d'un SMA afin d'explorer l'évolution d'une ville polycentrique et la ségrégation spatiale, voir (Lemoy, Raux, & Jensen, 2012)

Paramétrer un SMA demande d'avoir une forte assise empirique, des bases de données fiables, de préférence à un niveau micro (pour paramétrer les agents) et de faibles contraintes méthodologiques. Il peut être une alternative face à l'échec d'un modèle formel. De nombreux modélisateurs et équipes ont mis à disposition des plateformes en accès libre (Swarm, Starlogo, Netlogo, Mason, Cormas, Repast, Mimoso, etc.) permettant l'accès aux modèles avec leur code source, l'interface graphique... Le SMA se prête bien à une utilisation dans le cadre d'une modélisation participative (eau). En revanche, il reste difficile de comprendre la manière dont les résultats émergent.

## Les modèles spécifiques aux systèmes urbains

---

**Nous reprenons ici le tableau<sup>31</sup> de l'urbaniste John D. Landis et son analyse des modèles utilisés plus spécifiquement en matière de planification urbaine, hors modèles environnementaux. (Landis, 2012). Ce sont ces modèles que les plateformes de modélisation urbaine intègrent dans une même approche.**

---

31. Traduction de l'auteur. Se reporter à l'article pour une description précise des modèles, de leurs avantages et limites.

| <b>Modèles</b>                                                                                                                        | <b>Échelle spatiale</b> | <b>Décrire et expliquer</b>                                                                                                                                                                                        | <b>Prédire</b>                                                                    | <b>Simuler et construire des scénarios</b>         | <b>Évaluer</b> | <b>Atout et limite</b>                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Modèles démographiques</b>                                                                                                         | Du local au national    | Oui par décomposition des évolutions démographiques selon naissances, décès, migrations                                                                                                                            | Oui par projection des tendances actuelles                                        | Oui par la variation des variables                 | Non            |                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Modèle économique de base<br/>(Lie le nombre et la localisation des services et emploi de base aux services et emplois locaux)</b> | Du local au régional    | Oui pour les relations entre secteurs de base et services locaux                                                                                                                                                   | Non                                                                               | Oui en appliquant des coefficients multiplicateurs | Oui en amont   | Utile pour comprendre la manière dont les revenus entrent et circulent dans l'économie locale<br>Interactions entre économie locale et globale évoluant très rapidement (modèles un peu obsolètes) |
| <b>Modèles de densité, modèles de prix du foncier et de l'immobilier</b>                                                              | Aire métropolitaine     | Oui<br>Explique l'impact des coûts du transport et des préférences résidentielles sur la densité, les prix du foncier et des logements ainsi que les schémas d'usage des sols en fonction de la distance au centre | Dans la mesure où les préférences passées ou actuelles sont stables dans le futur | Non                                                | Ça dépend      | Éclaire les variables impactant l'évolution des formes urbaines                                                                                                                                    |

|                                                                                                                                      |                                   |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                          |                 |                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Modèles hédoniques de prix (Relie le prix des biens immobiliers à sa localisation, son accessibilité, et sa structure)</b></p> | <p>Du local à l'intercommunal</p> | <p>Oui<br/>                     identifier les structures clés et les facteurs de localisation affectant les prix du foncier</p>              | <p>Non</p>                                                                                                                                                                  | <p>ça dépend.<br/>                     Peut stimuler les effets des politiques publiques et des investissements sur les prix immobiliers et fonciers</p> | <p>Non</p>      | <p>Utilisé pour fixer le montant de taxe et construire des indices de prix<br/>                     Modèle de court-terme</p>                                                |
| <p><b>Modèles de localisation (étudie les facteurs de choix de localisation des ménages, des entreprises...)</b></p>                 | <p>Aire métropolitaine</p>        | <p>Oui<br/>                     Identifie les variables clés pour les décisions de localisation (logement, services publics, entreprises)</p> | <p>Parfois dans la mesure où les préférences passées ou actuelles sont stables dans le futur<br/>                     Faible prise en compte des phénomènes de synergie</p> | <p>Oui par la simulation des effets des politiques publiques et des investissements sur la localisation des logements et des entreprises</p>             | <p>En amont</p> | <p>Beaucoup de modèles sous licence<br/>                     Pouvoir prédictif faible<br/>                     Faible développement des modèles sur les services publics</p> |
| <p><b>Modèles de mobilité</b></p>                                                                                                    | <p>Aire métropolitaine</p>        | <p>Oui<br/>                     Identifie les variables des comportements de mobilité et schémas de mobilité</p>                              | <p>Oui par projection des comportements présents</p>                                                                                                                        | <p>Oui par la simulation des effets des politiques publiques et des investissements sur les comportements de mobilité et la performance du système</p>   | <p>En aval</p>  | <p>Modèles robustes<br/>                     Plus faibles sur les mobilités non motorisées et les phénomènes de congestion</p>                                               |

|                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |                                                                                                                                                                                 |                                                       |                                                                                                                          |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Modèles LUTI<sup>32</sup></b><br/> <b>Modéliser les interactions entre les systèmes de transports et les comportements de mobilité et l'occupation des sols (Étalement urbain, localisation des activités...)</b><br/>         .</p> | <p>Ville ou aire métropolitaine</p> | <p>Oui<br/>         Modèles reliant les interactions entre l'offre et la demande de transports, l'offre et la demande de biens immobiliers et la question de l'usage du sol</p> | <p>Oui par projections des comportements présents</p> | <p>Oui par la simulation des effets des politiques publiques et des investissements sur les schémas d'usage des sols</p> | <p>En aval</p> | <p>Grande diversité des utilisations et des modèles (planification, étude d'impact, évaluation, modèles empiriques et macroscopiques, ou microscopiques avec choix discrets)</p> <p>Couplage fréquent entre l'approche très agrégée des processus spatiaux et une approche individus-centrée (AT, SMA...)</p> <p>Modèles complexes à mettre en œuvre</p> <p>Nombreuses difficultés théoriques et pratiques (disponibilité de données standardisées, modèle intégré ou approche modulaire, faisabilité</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

<sup>32</sup> Pour une présentation détaillée des LUTI, voir (Leurent, 2012) et (Frémond, 2016)

|                                                                                                                                                                                                         |                                     |                                                                                                                                                |     |                                                 |     |                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                         |                                     |                                                                                                                                                |     |                                                 |     | technique)).<br>Pouvoir prédictif non prouvé                                                                                                                         |
| <b>Modèles de ségrégation spatiale</b><br><b>S'intéresse aux facteurs de ségrégation spatiale ou de distribution spatiale des groupes en fonction de critères démographiques, ethniques, financiers</b> | Du quartier à l'aire métropolitaine | Oui. Décrit et explique les mouvements des ménages en fonction de l'environnement et des typologies de logement<br>Ou la distribution spatiale | Non | Limité. Peut identifier des zones d'instabilité | Non | Instructif sur l'organisation de la complexité spatiale dans un système urbain<br><br>Vision simplifiée du monde<br><br>Utilisation plutôt académique pour le moment |



## IV. Références

---

- (s.d.). Récupéré sur [www.netlogoweb.org](http://www.netlogoweb.org).
- ADEME. (2016). *Approche intégrée et multicritères de la modélisation territoriale. Eléments de cadrage pour la gestion des données territoriales*. ADEME.
- ADEME. (2016). *Approche intégrée et multicritères de la modélisation territoriale. Eléments de cadrage pour la gestion des données territoriales*.
- Agent-Based Simulation to Inform Planning Strategies for Welfare Facilities for the Elderly: Day Care Center Development in a Japanese City. (s.d.).
- Amblard, F. (2016, 09). Modélisation agent : atouts et limites de la simulation agents. (S. Mauris-Demourieux, Intervieweur)
- Amblard, F., & Phan, D. (2005). *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les sciences de l'homme et de la société*. Paris: Lavoisier.
- Ammar Malik, Crooks, A., Root, H., & Swartz, M. (2015). Exploring Creativity and Urban Development with Agent-Based Modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(2).
- Andreianov, B. (2013). Une petite présentation sur la modélisation mathématique pour l'environnement. Lons le Saunier.
- Atelier de chrono-chorématique du CNAU. (2010 ). *Une frise-modèle du temps long urbain*. Récupéré sur M@ppemonde (100): <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num28/articles/art10402.html>
- Badariotti, D., & Weber, C. (2002, 2). La mobilité résidentielle en ville. Modélisation par automates cellulaires et système multi-agents à Bogota. *L'Espace géographique*, 31, pp. 97-108.
- Banos, A., & Sanders, L. (2012). Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes. Dans C. G. Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet* (pp. 52--64). Paris.
- Bensalma, A., Musy, M., & Simonnot, N. (2012). Caractérisation des ambiances dans les grands ensembles : entre modélisation architecturale, sensible et physique. Dans .. Commissariat Général au Développement Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet* (pp. 254--255).
- Bollinger, L. A., Van Blijswijk, M., Djikemac, G., & Nikolic, I. (2016, 1). An Energy Systems Modelling Tool for the Social Simulation Community. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(1).
- Bontempi, G. (2015). *Cours de modélisation et simulation*. Récupéré sur [http://www.ulb.ac.be/di/map/gbonte/modsim/modsim\\_2\\_3.pdf](http://www.ulb.ac.be/di/map/gbonte/modsim/modsim_2_3.pdf)
- Bousquet, F., & Gautier, D. (s.d.). Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs". *Cybergeo : European Journal of Geography [Online], Systems, Modelling, Geostatistics*. Récupéré sur <http://cybergeo.revues.org/2389>
- Boutaud, A. (2015). *l'approche systémique peut-elle aider à appréhender la complexité de l'évaluation des politiques publiques ?* Millénaire 3, Grand Lyon Métropole.
- Cardon, A. (2005). *La complexité organisée*. Paris: Lavoisier.
- Chabanel, B. (2016). *Big Data et sciences sociales*. Millénaire 3, Grand Lyon Métropole.

- Chadefaux, T., & Donnay, K. (2011). *Modeling Conflict*. Zurich: Institut Fédéral Suisse de Technologie.
- Commissariat Général au Développement Durable. (2012). *Modélisation urbaine : de la représentation au projet*. Paris.
- eau, M. e. (s.d.).
- Frémond, M. (2016, 12). La France devrait développer ces démarches prospectives notamment en matière d'urbanisme. C'est vraiment important de poser la question des conséquences des aménagements dès le départ . (S. Mauris-Demourieux, Intervieweur)
- Friend, Z. (2013, avril 9). *Predictive Policing using Technology to Reduce Crime* . Récupéré sur [//leb.fbi.gov](http://leb.fbi.gov).
- Ghorbani, A., Dijkema, G., & Schrauwen, N. (2015, 2). Structuring Qualitative Data for Agent-Based Modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(1).
- Grawitz, M. (2001). *Méthodes des sciences sociales*. Paris: Dalloz.
- Guermond, Y. (. (2005). *Modélisations en géographie*. Paris: Lavoisier.
- Hu, X., & Keller, N. (2015, 6). Agent-Based Modeling and Simulation of Child Maltreatment and Child Maltreatment Prevention. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(3). Récupéré sur <http://jass.soc.surrey.ac.uk/18/3/6.html>
- Korsu, E., Massot, M.-H., Orfeuill, J.-P., & Proulhac, L. (2012). Simuler pour évaluer l'espace des possibles : applications aux stratégies résidentielles et aux politiques de mobilité. Dans .. Commissariat Général au Développement Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet* (pp. 121--132). Paris.
- Laigle, L. (2009). *Etat de l'art en Europe : apports et limites des Plans Climat-Energie Territoriaux à l'aune des connaissances scientifiques Apports et limites des modélisations existantes « usage des sols – transports » et des outils d'évaluation utilisés pour en mesurer. l'impact sur les GES.*: CCST-ANR.
- Lamy, F., Quinn, B., Dwyer, R., Thomson, N., Moore, D., & Dietze, P. (2016, 3). TreatMethHarm: An Agent-Based Simulation of How People Who Use Methamphetamine Access Treatment' in Volume 19(2) <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/19/2/3.html>. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(2). Récupéré sur <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/19/2/3.html>
- Landis, J. D. (2012). Modeling Urban Systems. Dans R. Weber, & R. Crane, *The Oxford handbook of Urban Planning* (pp. 323--350). Oxford: Oxford University Press.
- Langlois, P. (2010). Simulation Géographique. *8ième séminaire de l'observation urbaine CERTU-INSEE*. Marne-la-Vallée .
- Langlois, P., Blanpain, B., & Daudé, E. (2015, octobre 2). MAGéo, une plateforme de modélisation et de simulation multi-agent pour les sciences humaines. *Cybergeog : European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeog.27236
- Lefèvre, A. (2016, 01). La simulation est un discours sur le réel même si elle a des apparences de nouvelle technologie éblouissante d'objectivité technique ! . (S. Mauris-Demourieux, Intervieweur)
- Lemoy, R., Raux, C., & Jensen, P. (2012). Explorer la ville polycentrique avec un modèle multi-agents . Dans C. G. Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet*. Paris.
- Leridon, M. (2013, 07 17). *Un modèle informatique de la violence urbaine pour prédire le futur de Jérusalem*. Récupéré sur Slate: [www.slate.fr](http://www.slate.fr)

- Leurent, F. (2012). Les modèles d'usage du sol et transport : où la géographie et l'économie se rejoignent . Dans C. G. Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet* (pp. 156--173). Paris.
- Lugan, J.-C. (2009). *La systémique sociale*. Paris: PUF.
- Ma, Y., Shen, Z., & Nguyen, D. (2016, 5). Agent-Based Simulation to Inform Planning Strategies for Welfare Facilities for the Elderly: Day Care Center Development in a Japanese City. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(4). Récupéré sur <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/19/4/5.html>
- Pereira Dos Santos, F., Adamatti, D., Rodrigues, H., Dimuro, G., De Manuel Jerez, E., & Pereira Dimuro, G. (2016, 12). Social Production and Management Processes of Urban Ecosystems : A Case Study of San Jeronimo Vegetable Garden - Seville, Spain . *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(3).
- Picaut, J., Guillaume, G., & Dutilleul, G. (2012). Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment. Dans C. Commissariat Général au Développement Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet* (pp. 34-50). Paris.
- Pumain, D. (2014). *Modèle gravitaire*. Récupéré sur Hypergeo: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article76>
- Ruas, A. (2012). Saisies et représentations de l'espace urbain . Dans C. g. durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet*. Paris.
- Sanders, L. (. (2001). *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Lavoisier.
- Saujot, M., Criqui, P., Lefèvre, B., & Menanteau, P. (2012). La modélisation urbaine au service de l'analyse économique des politiques climatiques locales. Dans .. Commissariat Général au Développement Durable, *Modélisation urbaine : de la représentation au projet* (pp. 108--120). Paris.
- Théry, H. (2008, 7). *Claude Lévi-Strauss, Pierre Monbeig et Roger Brunet* . Consulté le Janvier 27, 2017, sur EchoGéo [Online: <http://echogeo.revues.org/9503>
- Thron, C. (2016, 5). Lifestyle Tradeoffs and the Decline of Societal Well-Being : An Agent-Based Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(2).
- Tim Kohler, Mark D. Varien (dir.). (2012). *Emergence and Collapse of Early Villages - Models of Central Mesa Verde Archaeology*. Berkeley: University of California Press.
- Vannier, P. (2014, avril 10). Entretien avec Philippe Vannier - Propos recueillis par Th. de Jaegher et R. Loukil. *L'usine nouvelle. Supplément : Les champions de la simulation*(3372).
- Varenne, F. (2008). Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances. *Les modèles : possibilités et limites*.
- Varenne, F. (2011). *Modéliser le social. Méthodes fondatrices et évolutions récentes*. Paris: Dunod.
- Wikipedia. (2016, 11 03). *Systémique*. Récupéré sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A9mique>
- Zhou, S. et. al. (2010). Crowd modeling and simulation technologies. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 20(4). Récupéré sur <http://hdl.handle.net/10149/118022>

Base de données de modèles : [www.netlogoweb.org](http://www.netlogoweb.org), [www.openabm.org](http://www.openabm.org)

---

WWW.  
MILLENAIRE3.  
COM

RETROUVEZ  
TOUTES LES ÉTUDES SUR

MÉTROPOLE DE LYON  
DIRECTION DE LA PROSPECTIVE  
ET DU DIALOGUE PUBLIC  
CS 33569  
20 RUE DU LAC - 69505 LYON CÉDEX 03