
Épistémologie et usages de la
modélisation et des systèmes
multi-agents en géographie

Introduction

« L’homme se découvre quand il se mesure avec l’obstacle. Mais, pour l’atteindre, il lui faut un outil. Il lui faut un rabet, ou une charrue. Le paysan, dans son labour, arrache peu à peu quelques secrets à la nature, et la vérité qu’il dégage est universelle. »

SAINT-EXUPÉRY (1939, p.9)

Nous avons consacré le chapitre 1 à la délimitation de notre travail dans le cadre d’une géographie de la viticulture de montagne et de fortes pentes, et ce à la fois d’un point de vue théorique avec la construction d’une ontologie, mais également d’un point de vue pratique en ancrant nos territoires d’étude dans cette ontologie. Dans ce chapitre 2, nous allons nous intéresser à un autre pan de notre travail : la modélisation et la simulation à base d’agents en géographie.

Si le travail dans le champ de la géographie viticole nous place à l’interface entre plusieurs disciplines, pouvant aller de l’agronomie à l’écologie en passant par la sociologie et l’économie, notre positionnement dans le champ de la modélisation et de la simulation à base d’agents nécessite également un recadrage épistémologique.

Si l’on considère la géographie comme une jeune science, nous pouvons noter qu’elle s’est appropriée très tôt dans son histoire la notion de modèle et d’approche systémique. Cette appropriation s’est accélérée dans les années 1970 grâce aux partisans de la *new geography* (PUMAIN 1998). Parmi ces géographes, un effort de systémisation a été proposé par AURIAC (1979) qui en plus d’utiliser la Théorie du Système Général (TSG) pour construire son référentiel, propose une nouvelle approche de la géographie viticole en théorisant le « vignoble-système ». La modélisation systémique en géographie s’est largement inspirée des autres champs disciplinaires, comme la physique ou plus tard l’écologie, pour s’en approprier les outils. BRIAN et BERRY (1964, p.3) vont jusqu’à proposer de considérer les travaux des géographes comme des activités traitant de l’écosystème mondial dans lequel l’homme occupe une place prépondérante :

« Geography’s integrating concepts and process concern the worldwide ecosystem of which man is the dominant part »

L’intégration disciplinaire des démarches de modélisation systémique conduit naturellement certains protagonistes de l’époque à pousser l’utilisation des modèles jusqu’aux pratiques de simulations.

La simulation, qui consiste à plonger le modèle dans le temps (COQUILLARD et HILL 1997), a petit à petit été mobilisée pour résoudre des problèmes insaisissables par une

méthode analytique traditionnelle. Le temps est pris en compte sous forme itérative permettant d'accéder à certains états de variable en résolvant des configurations dépendant des conditions initiales. En tant que discipline, la géographie a été sensible aux nouvelles théories et aux travaux issus de la physique, de l'Intelligence Artificielle (IA), ou encore de l'écologie ou l'économie, et à remobiliser certaines de ces approches dans son champ disciplinaire.

La modélisation à base d'agent est une discipline issue de la croisée entre l'informatique (programmation orientée objet, système distribué) et l'intelligence artificielle distribuée¹ (vie artificielle, robotique, sciences cognitives) qui émerge dans les années 1980. Elle trouve rapidement des relais dans la communauté des géographes appartenant au courant de la « nouvelle géographie » (SANDERS 1984).

Dans ce chapitre, nous aborderons l'évolution épistémologique des pratiques de modélisation et de simulation, et leur appropriation par les géographes, afin de situer l'émergence des théories de la complexité et de leur mobilisation disciplinaire. Après cette description des différents mouvements épistémologiques, nous y inscrirons notre réflexion et nos pratiques. Si nous revenons en détail sur les approches et les procédés dans les chapitres suivants, nous insisterons ici sur les méthodologies mobilisées pour explorer la durabilité des territoires viticoles de fortes pentes.

2.1 La démarche de modélisation

La notion de modèle est presque inséparable de la démarche scientifique. Le modèle est une représentation simplifiée qui permet de penser le monde à partir d'hypothèses. Par exemple, le modèle héliocentrique de COPERNIC (1473-1543) révolutionna le modèle géocentrique. Le modèle microbiologique de L. PASTEUR (1822-1895), quant à lui, révolutionna le modèle basé sur la génération spontanée. Un modèle n'est pas fait pour être immuable, mais permet de construire des raisonnements accessibles au plus grand nombre.

Dans cette partie, nous positionnerons l'usage des pratiques de modélisation dans les différents champs qui les mobilisent pour comprendre, à la lumière des différentes controverses, comment la géographie s'en est accommodées pour les faire évoluer sur son propre terrain disciplinaire.

1. Par opposition aux travaux autour de l'intelligence artificielle classique dans les années 1980, l'intelligence artificielle distribuée propose de faire reposer les comportements du modèle sur une multitude de petites entités plutôt que sur un processus centralisé c.f. FERBER (1995)

2.1.1 Qu'est-ce que modéliser ?

2.1.1.1 Du système au modèle vers une tentative de théorisation du monde

La notion de modèle est intimement liée à la pensée scientifique en tant que *construit formel* (COQUILLARD et HILL 1997), bien que VARENNE (2010) propose de délimiter la mobilisation de ce terme au *tournant des modèles formels* du XX^e siècle. Si nous pouvons faire remonter la notion de modèle à la Grèce Antique (MITCHELL 2009), il nous apparaît intéressant de commencer à réfléchir sur cette notion de modélisation telle qu'elle est envisagée au XVII^e siècle quand DESCARTES (1637) propose

« de diviser chacune des difficultés que j'examinerai en autant de parcelles qu'il se pourra, et qu'il sera requis pour mieux les résoudre. »

Depuis DESCARTES ou NEWTON, la formalisation des modèles a bien changé, mais le *construit formel* poursuit le même but ; il vise à faciliter une représentation, un calcul, une expérience en s'installant comme outil de médiation entre les chercheurs (VARENNE 2010).

La notion de système, elle aussi, est intimement liée à la notion de modélisation, mais la formalisation en tant que système est une démarche plus récente. En s'appuyant sur la méthode de DESCARTES pour résoudre les problèmes, on commence pourtant à distinguer une approche systémique. En effet, en se référant à COQUILLARD et HILL (1997, p.3), « un système est une collection d'objets en interaction ». Nous comprenons que ces objets en interaction sont les parcelles du problème de DESCARTES. Dans l'étude des systèmes complexes² (que peuvent être les sociosystèmes, les écosystèmes, etc.), nous aurons du mal à imaginer des systèmes indépendants les uns des autres (isolés au sens thermodynamique), et nous ne nous attaquerons donc *de facto* qu'à des sous-systèmes. Réfléchir sur des systèmes fermés constitue une approximation qui, si elle est abusive, est suffisamment féconde pour être régulièrement utilisée dans toutes les disciplines en lien avec la modélisation (*ibid.*). Si en médecine la circulation sanguine est considérée comme un système propre, en biologie c'est la cellule qui fait système. Tout dépend de l'échelle de réflexion à laquelle nous nous situons.

L'approche systémique est à rapprocher de l'ambition des diverses disciplines scientifiques à vouloir théoriser. Pour PUMAIN (2003, p.27),

« Théoriser c'est d'abord tenter d'échapper aux apories d'une "science du concret", et surtout dépasser l'irréductible unicité des lieux, chercher à construire un point de vue nomothétique sur la discipline ».

Se proposer d'entrer dans une approche systémique n'est donc pas neutre et consiste à s'éloigner du « concret » pour proposer une généralisation théorique transposable sur

2. Nous reviendrons sur la notion de complexité dans la partie 2.1.2.

différentes réalités. On considère alors le système comme une collection de sous-systèmes. La difficulté majeure consiste à définir la granularité des sous-systèmes qui nous offrent la possibilité d'explorer la/les question(s) qui nous intéressent. Cette démarche s'inscrit donc dans une dialectique entre le chercheur et le système réel étudié, qui va par itération tenter d'en définir les contours. Le système n'existe donc que parce qu'il est observé³.

La notion de modèle aujourd'hui « oscille entre deux significations : l'objet matériel et la norme abstraite » (BOMMEL 2009). Nous utiliserons ici la définition proposée par COQUILLARD et HILL (1997, p.7) :

« le terme de modèle a la même signification que celui de concept ou d'hypothèse ou d'analogie [...], un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié [...] pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent les problématiques du modèle. »

Ici encore on retrouve cette dialectique avec l'observateur que nous venons de souligner pour l'approche systémique. On pourrait penser la notion de modèle comme recouvrant la notion de système. Il se trouve que la distinction entre les deux est importante. En effet, la systématique va permettre de poser un premier niveau d'abstraction sur le réel, et le modèle peut alors être considéré comme le bras armé de la définition du système, s'imposant comme une manière de tester les hypothèses formelles définies par le système. Cela signifie qu'il sera possible de théoriser des systèmes sans avoir recours à la modélisation, mais le corollaire inverse est beaucoup plus difficile. Le construit formel qui en découle peut ensuite être confronté à l'expérimentation, ce qui signifie que, par essence, l'expérimentation ne peut conduire seule à un progrès (THOM 2009), et

« la théorisation [...] est liée à la possibilité de plonger le réel dans un virtuel imaginaire, doté de propriétés génératives, qui permettent de faire des prévisions. » (ibid., p.91)

Nous voilà donc devant un ensemble d'interactions entre la théorisation \Leftrightarrow le système \Leftrightarrow le modèle \Leftrightarrow l'expérimentation, allant de la complexité du réel vers le simplifié du modèle et alimentant le complexe par rétroaction.

Cette rapide définition des notions et des implications de la modélisation nécessite d'approcher l'arrivée de la théorisation et donc de l'abstraction dans la pensée scientifique et plus particulièrement dans les sciences humaines et sociales.

2.1.1.2 Un nécessaire besoin de théorisation

Ce besoin de s'abstraire des formes « concrètes » du monde pour ne pas se limiter à des descriptions⁴ et entrer dans des *construits formels*, s'est fait sentir avec le *tournant*

3. Ce qui nous renvoie à l'expérience du *chat de Schrödinger*, qui illustre le paradoxe de l'état du système comme lié à l'observateur.

4. Ce que PUMAIN (1998) pour la géographie appelle une géographie de *mise à jour*.

formel des modèles scientifiques au XX^e siècle. Il pose des questions sur la nécessité de la théorisation émergeant dans toutes les disciplines scientifiques.

Les chercheurs (en tant qu'observateurs) doivent changer de point de vue et se concentrer sur les phénomènes générateurs des formes ou les objets décrits. Or à THOM (*ibid.*, p.93) de questionner cette position d'observateur :

« Peut-on, dans un paysage de phénomènes, reconnaître un objet ou une chose si l'on n'en a pas au préalable le concept ? C'est aussi simple que ça. Si l'on n'a pas le concept d'un objet, on ne le reconnaîtra pas. [...] La possibilité de reconnaître un être en général, une entité dans un paysage empirique, est toujours à mon avis subordonnée à une conceptualisation »

En géographie cette recherche de forme et ce mouvement vers une plus grande abstraction se sont annoncés au XIX^e siècle avec, par exemple, les travaux de Johann Heinrich VON THÜNEN, mais ils ont réellement pris un tournant décisif dans les années 1950 avec les tenants de la *nouvelle géographie* (CLAVAL 1977) qui s'est développée conjointement à la diffusion d'une forme de scientification des sciences sociales (PUMAIN et ROBIC 2002). Le changement de perspective qui s'opère fait passer la géographie des disciplines qui jusqu'alors était limitée à *l'observation pure* vers une discipline de *l'expérience* au sens de THOM (1989, p.9). Ce mouvement, cause ou conséquence de l'introduction des mathématiques conjointement aux innovations techniques qui avaient lieu à la même période (informatique, imagerie satellitaire, etc.) a permis la structuration et la constitution du *construit formel*. À la fin des années 1970 *construit formel* déboucha sur les théories des systèmes auto-organisés, plutôt issus de la physique, mais qui inspireront un grand nombre de disciplines comme l'informatique (MINSKY 1997), l'économie et la géographie (SCHELLING 1971) et les conduiront vers l'étude des systèmes complexes (c.f. partie 2.1.2)

« Il n'y a de sciences que dans la mesure où l'on plonge le réel dans un virtuel contrôlé. Et c'est par extension du réel dans un virtuel plus grand que l'on étudie ensuite les contraintes qui définissent la propagation du réel au sein de ce virtuel. » THOM (2009, p.122)

Cette articulation entre la conceptualisation et la reconnaissance de formes nécessite, pour rester dans la logique déductive de POPPER (1998), de procéder de manière itérative en confrontant des hypothèses à l'expérimentation, et en procédant par réfutation et acceptation de celles-ci.

2.1.1.3 Validation de modèle : la guerre et la paix

Tout travail de modélisation place le modélisateur dans une situation d'inconfort, et ce quelle qu'en soit la discipline. Il est toujours aisé d'accuser un modèle d'incomplétude ou de défaut de validation, car, par nature, la modélisation (et peut-être encore

plus la modélisation géographique) fait intervenir des disciplines variées mêlant théorisation, simulation et analyse de données. Ces pratiques relèvent d'une épistémologie très différente des sciences théorico-expérimentales classiques (STENGERS 2010). Les modèles intègrent des théories issues de la physique (processus de diffusion), des représentations simplifiées de processus complexes, des observations directes de terrain. La validation est souvent indirecte et nécessite des aller-retour entre le modèle et le réel. Il y a donc une vraie nouveauté épistémologique de ces modélisations vis-à-vis de l'histoire des approches classiques. Ceci bien sûr interroge le géographe modélisateur sur la nature de la science produite.

POPPER (1998, p.297) propose de considérer que :

« Le but de la science est de découvrir des *explications satisfaisantes* de tout ce qui nous étonne et paraît nécessiter une explication. »

Or, et c'est ce qui lui permet de différencier le *sens subjectif* du *sens objectif*⁵, arrive inévitablement, quand on parle de modélisation, le moment délicat de la validation du modèle et donc de la confrontation des hypothèses par rapport aux données et à la discussion critique.

Il est communément admis que la validation consiste à confronter des observations issues du monde réel avec les résultats générés par l'abstraction du modèle.

« *Validation is the determination that the conceptual model is an accurate representation of the real system. Can the model be substituted for the real system for the purposes of experimentation?* »BANKS (1999) dans BOMMEL (2009, p.23)

Or si cette conception de la validation est largement partagée, elle véhicule d'après BOMMEL (*ibid.*) une « idée inquiétante », celle de vérité. Or ce concept de vérité diffère largement de la découverte des *explications satisfaisantes* que nous évoquions précédemment. Si pour des disciplines comme les mathématiques, la physique ou peut-être dans une moindre mesure la chimie, cette notion est concevable, en géographie qui malgré la révolution de la *nouvelle géographie* reste une discipline empirique, la vérité nous semble tout aussi inquiétante.

Cette réserve permet à BOMMEL (*ibid.*) de distinguer la vérité et la vraisemblance, et de proposer de distinguer deux types de validation :

— *la validation forte* : qui découle de la certitude, et où la distance qui sépare les résultats du modèle et le système représenté est très faible.

5. Pour POPPER (1998, p.126), « (1) il existe une connaissance au sens subjectif, qui est faite de dispositions et d'attentes. (2) Mais il existe aussi une connaissance au sens objectif, la connaissance humaine, qui est faite d'attentes formulées dans un langage et soumises à la discussion critique. (3) La théorie du sens commun ne parvient pas à voir que la différence entre (1) et (2) est de la plus grande importance. La connaissance subjective n'est pas sujette à la critique. »

- *La validation faible* : qui propose une explication juste et vraisemblable, bien qu'éloignée de la réalité. Cette distance pouvant être aussi bien le fait d'un éloignement des résultats de modélisation aux données observées que de l'éloignement du modèle ayant subi une simplification forte et donc *de facto* produisant des résultats éloignés du réel.

Cette distinction fait écho à la différenciation que propose THOM (2009) considérant lui aussi deux types de modèles conçus soit pour *prédire*, soit pour *expliquer* (c.f. part. 2.1.3). Ainsi on pourra considérer qu'un modèle à base d'ontologies ou de cartes heuristiques sera construit dans le but de comprendre tandis qu'un modèle météorologique sera plutôt construit pour prédire de manière mathématique le temps qu'il fera. On comprend que nous nous retrouvons une fois encore confrontés à la finalité du modèle, ce qui souligne la limite inhérente à la démarche de modélisation, et donc aux possibilités de validation du modèle.

On pourra donc prendre la précaution de dire que tout modèle est par nature intrinsèquement faux (BOMMEL 2009), mais un modèle reste « satisfaisant s'il fournit une réponse satisfaisante à la question qui a motivé la modélisation » (THOM 1979). Sans tomber dans l'angélisme, l'opposition entre prédiction et explication relève pour partie au moins de conflits de « culture épistémique ». Les modélisations à base d'agents, sur lesquelles nous reviendrons dans la suite de ce travail, constituent ainsi un très bon exemple de ce que FUNTOWICZ et RAVETZ (1993, p.750) considèrent comme des sciences « post-normales » qui deviennent nécessaires

« when uncertainties are either of the epistemological or ethical kind, or when decision stakes reflect conflicting purposes among stakeholders ».

Cette première approche de la modélisation nous a donné la possibilité de dresser à grands traits le mouvement des sciences s'efforçant d'explorer et d'expliquer le monde qui les entoure au travers de modèles. Nous retiendrons de cette première analyse le besoin de théorisation des objets réels et le fait que ce processus de définition d'un système fonctionne par des cycles itératifs entre modélisation et observation. Cette approche nous amènera, par l'intermédiaire des travaux de modélisation proposés dans cette thèse, à retrouver une succession de modèles indépendants et complémentaires plutôt que de chercher à produire un unique modèle intégratif.

2.1.2 La controverse du réductionnisme et du holisme : une 3^{me} voie, la *complexité*

L'évocation de ces deux termes, *réductionnisme* et *holisme*, fait immédiatement apparaître des fractures encore vives aujourd'hui entre les tenants de chacune de ces concep-

tions⁶. La controverse surgit entre les tenants d'une conception *réductionniste* où l'on considère que la complexité des comportements observés à un niveau donné est à rechercher au niveau sous-jacent. Par exemple, pour OPPENHEIM et PUTNAM (1958, p.7) :

« It's not absurd to suppose that psychological laws may eventually be explained in terms of the behavior of individual neurons of the brain ; that the behavior of individual cells - including neurons - may eventually be explained in terms of their biochemical construction ».

Tandis que pour les partisans d'une approche *holiste* comme MILL (1865), les propriétés à un niveau donné ne peuvent pas être comprises comme le résultat des niveaux sous-jacents :

« the chemical combination of two substances produces, as well know, a third substance with propertie different from those of either of two substances separately or of both of them taken together ».

Si 150 ans après MILL (*ibid.*) cette vision a quelque peu évolué avec les avancées scientifiques⁷, elle a l'avantage d'illustrer assez bien les fondements du holisme.

Dans les sciences sociales, c'est COMTE (1830) qui est l'un des fervents défenseurs du holisme et du positivisme⁸ et refuse l'idée que l'on puisse « décomposer l'humanité en individus », soutenant que l'existence sociale ne fait pas sens au niveau individuel.

Aujourd'hui le holisme est toujours largement mobilisé en physique, en biologie et en sciences cognitives. On pourra, par exemple, s'intéresser aux travaux de WOLFRAM (2002) qui travaille depuis plus de 20 ans sur des comportements et des formes complexes issus de programmes informatiques simples :

« I took a sequence of simple programs and then sistematically ran them to see how they behaved. [...] was that despite the simplicity of their rules, the behavior of the programs was often far from simple. Indeed, even some of the very simplest programs that I looked at had behavior that was as complex as anything I had ever seen » (*ibid.*, p.2).

L'exemple de la figure 2.1 est réalisé avec un programme constitué de 8 règles de comportement cellulaire⁹. On observe des formes régulières ponctuelles sous forme de triangles

6. Pour se persuader de cette actualité, nous pouvons observer le nombre de publications qui se revendiquent encore de l'une ou de l'autre, et ce en particulier dans les champs de la médecine, de la biologie et de la physique.

7. notamment en chimie c.f. MILL (1865).

8. Le positivisme de COMTE soutient que « la généralisation d'un phénomène n'est pas la preuve qu'il donne accès à une quelconque essence objective intégrale et sous-jacente ni donc à une connaissance principielle de laquelle dépendraient ensuite toutes les autres » (VARENNE 2011, p.32).

9. L'espace des automates proposé par WOLFRAM (2002) est une grille cellule carré de taille infinie. Chaque cellule peut prendre deux états (sur la figure 2.1, l'état noir et l'état blanc). À un intervalle de temps défini, toutes les cellules changent spontanément d'état en fonction d'un groupe de règles de voisinage. On retrouvera les règles sur la page Wikipédia consacrée à la règle n°30. http://en.wikipedia.org/wiki/Rule_30.

blancs (fig. 2.1 n° 1), mais aussi des régularités spatiales à plus grande échelle dans la partie inférieure de la figure (n° 2). Au fur et à mesure des itérations, la partie régulière se réduit pour laisser place à des configurations aléatoires. L'aspect particulièrement intéressant pour le géographe dans cette approche est que, même de manière intuitive, ces règles simples permettent de générer plusieurs niveaux de complexité (à l'échelle spatiale comme à l'échelle temporelle) impossibles à discerner à partir des règles de base. Nous sommes donc face à un système *auto-organisé*, c'est-à-dire un système dont les configurations ne sont pas contrôlées de manière centralisée, mais qui aboutissent à des organisations « ordonnées » (au moins localement).

La construction de cette notion qu'est l'auto-organisation doit beaucoup aux travaux issus de la cybernétique dans les années 1960 montrant qu'un système a tendance à s'organiser quand il est soumis à des perturbations aléatoires (VON FOERSTER 2003). Cela incitera PRIGOGINE et NICOLIS (1977) et PRIGOGINE et STENGERS (1984) à travailler sur des questionnements issus de la thermodynamique, et en particulier le paradoxe du démon de Maxwell (1871)¹⁰, et aux *structures dissipatives*. Pour revenir à des préoccupations plus géographiques, ce qu'il faut conserver de ces digressions interdisciplinaires¹¹, concerne les questions d'échelles de réflexion et consiste à dire qu'une configuration macroscopique du système étudié peut provenir de plusieurs types de micro-systèmes.

Pour ANDERSEN (2001), c'est l'approche holiste qui, en évoluant, a permis de déboucher sur le concept d'*émergence*¹². Ce concept, parfaitement illustré par la figure 2.1, est défini de la sorte :

« *emergence occurs when interaction among objects at one level give rise to different types of objects at another level. More precisely, a phenomenon is emergent if it requires new categories to describe it which are not required to describe the behaviour of underlying components.* » (N. GILBERT et TROITZSCH 2005, p.11)

Dans cette définition on retrouve toutes les composantes d'un système auto-organisé auxquelles sont ajoutées et formalisées les questions de description et d'échelle. Si les aspects d'organisation ne sont pas au cœur des questionnements de N. GILBERT et TROITZSCH (*ibid.*) dans cette définition, elles restent néanmoins sous-jacentes dans la

wikipedia.org/wiki/Rule_30, site consulté le 2 avril 2015

10. L'expérience du démon de Maxwell a été proposée par James Clerk MAXWELL en 1871. C'est une expérience de la pensée qui suggérait des limites à la seconde loi de la thermodynamique. Cette seconde loi augure de l'irréversibilité des phénomènes physiques à cause d'une augmentation du désordre : *l'entropie*. Toute tentative de retour à un état d'ordre nécessite de dépenser de l'énergie. L'expérience du démon de Maxwell propose d'imaginer un démon capable de trier des molécules de gaz contenues dans deux pièces contiguës en ouvrant la porte au moment opportun grâce à une connaissance poussée du système.

11. qui évoluent parfois vers des indisciplines (BESNIER et PERRIAULT 2013).

12. Selon ANDERSEN (2001). Le concept d'émergence est à attribuer à LEWES (1874) même si on en trouve les prémices chez MILL (1865) sous le vocable *heteropathic*.

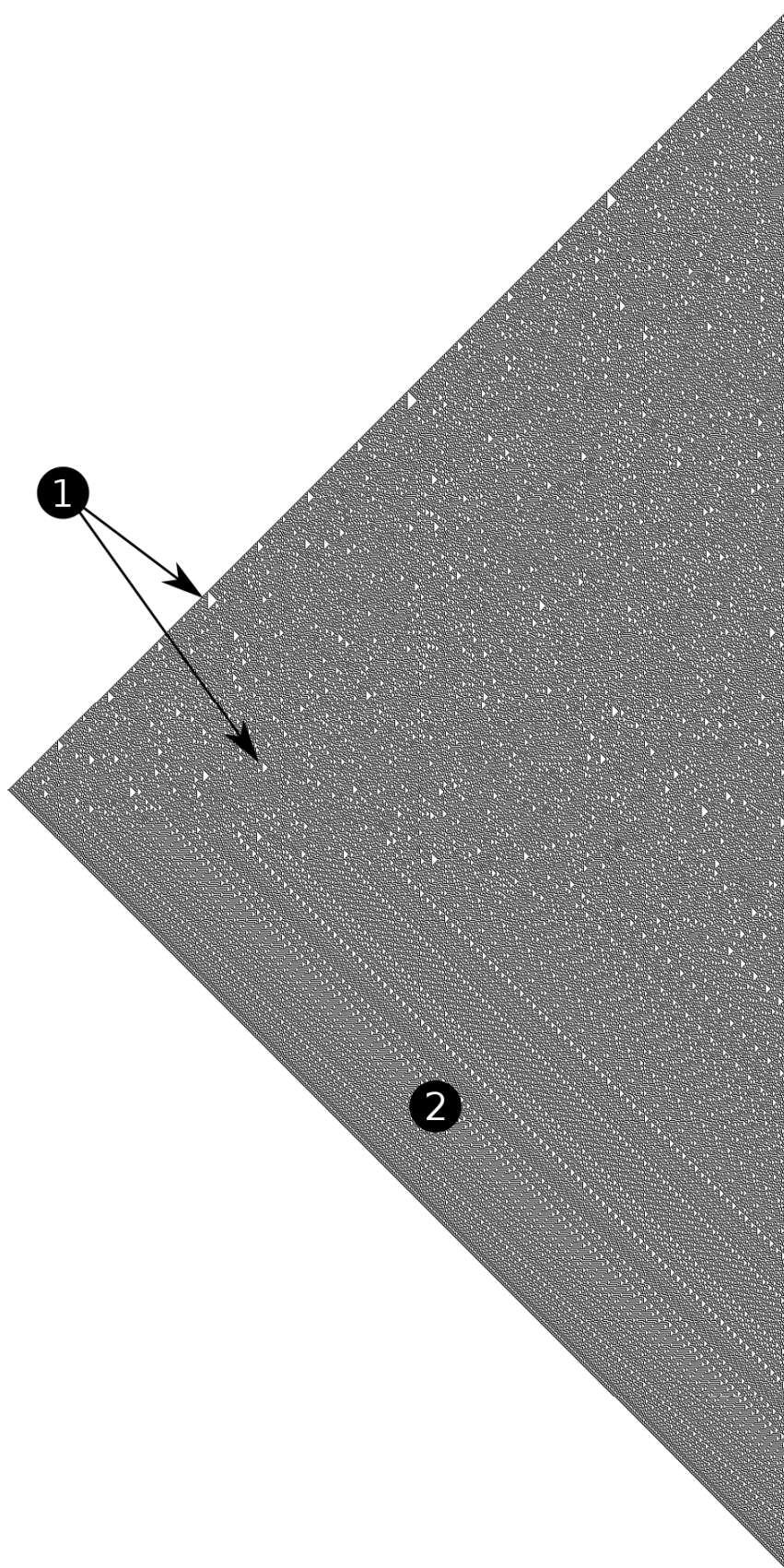


FIGURE 2.1 – Forme produite par la règle 30 après 1000 itérations (WOLFRAM 2002, p.30). La première itération est située à gauche et l’itération n° 1000 à droite.

mesure où pour la description du phénomène, l'observateur doit pouvoir identifier des motifs¹³. Or pour observer des phénomènes émergents, il faut être confronté à des phénomènes dynamiques. Si N. GILBERT et TROITZSCH (2005) proposent une bonne définition de l'émergence, la question de la survenue de cette organisation reste floue. MORIN (2013, p.51) propose que :

« pour qu'il y ait organisation, il faut qu'il y ait interactions : pour qu'il y ait interactions, il faut qu'il y ait rencontres, pour qu'il y ait rencontres il faut qu'il y ait désordre (agitation, turbulence). »

Ce qui veut dire entropie et désordre. L'intérêt de cette observation de MORIN (*ibid.*) ne réside pas seulement dans ces questions autour du désordre comme source d'organisation, mais vient également de l'introduction de la notion d'interaction. Pour qu'on puisse parler d'interaction, il faut définir des objets élémentaires qui puissent entrer en interaction, ce qui n'est pas sans rappeler les conceptions *réductionnistes* (OPPENHEIM et PUTNAM 1958). Les ensembles ne sont donc pas forcément aussi imperméables que nous pourrions le penser de prime abord.

Dans ce sens d'ailleurs THOM (1989) propose de réfléchir à une position *médiale* considérant le réductionnisme à la manière de PUMAIN (1998), comme un travail de mise à jour mais qui nécessite un changement d'échelle pour en comprendre les implications.

« Tôt ou tard les savants sont contraints de passer de l'explication réductionniste à un autre type d'explication, que j'appellerai "structurale". [...] La tendance structurale a pour but d'en simplifier la description en fournissant un nombre de règles combinatoires relatives à certaines morphologies élémentaires et qui permettent de reconstruire la morphologie en question » (THOM 1989, p.11).

On ne résoudra pas ici l'opposition entre *réductionnisme* et *holisme*,

« Cela n'implique pas que l'on prenne définitivement parti pour le holisme (VALADE 2001), contre l'individualisme méthodologique (BOUDON 2004), mais cela implique qu'on garde l'un et l'autre en mémoire comme gardes fous de l'autre » (PUMAIN 2003, p.26)

Nous percevons, dans ces différentes contractions épistémologiques, l'importance que prend la modélisation et les simulations qui suivront dans le rôle qui sera dévolu aux modèles. Si dans ce travail nous naviguerons dans une sorte de voie médiane en fonction des objectifs de modélisations et des niveaux d'organisation dont ont besoin nos systèmes pour être explorés et étudiés. Cela souligne encore une fois la nécessité de définir la place qui sera donnée au modèle et le positionnement du modélisateur qui ne sera en rien anodine. Cela va nous amener à considérer différents rôles que peut jouer la modélisation.

13. On pourra aussi utiliser le mot *pattern*.

2.1.3 Rôles et statuts du modèle

On retrouve en filigrane de la partie précédente deux conceptions de la place du modèle qui ont marqué l'histoire des sciences écartelées entre holisme et réductionnisme. Ce qui nous conduit donc à interroger la place du modèle dans notre travail. Nous pourrions détailler toutes les fonctions qu'il remplit, mais nous avons choisi de nous concentrer sur trois formes qui occupent selon nous une place importante dans la conception contemporaine des modèles : les modèles pour prédire, les modèles pour comprendre, les modèles pour prospectiver. Il s'agit de concentrer notre attention sur leur source et leurs objectifs pour mettre en lumière les questions et les postures de modélisation qu'ils impliquent.

2.1.3.1 Modéliser pour prédire

Le XIX^e siècle a vu le triomphe des sciences expérimentales et du positivisme, augurant qu'il n'existerait qu'une seule vérité vers laquelle le scientifique et la société avec lui sont entraînés.

« Le but de la science est de prévoir, et non comme on l'a souvent dit, de comprendre » LECOMTE DU NOUY (1948)

On s'inscrit alors dans la lignée du cartésianisme proposé par le *Discours sur la méthode*. L'un des travaux les plus représentatifs de cette période est pour LEGAY (1997) l'*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* de BERNARD et DAGOGNET (1865). On y retrouve en particulier un certain nombre d'obligations que doivent remplir les sciences (LEGAY 1997) :

- La mise en place explicite d'hypothèses
- L'organisation d'expériences cruciales
- La comparaison des traités et témoins (état de l'art)
- La répétition comme gage de la sûreté des résultats.

Pour LEGAY (*ibid.*, p.14), cette volonté explicite de généralisation est largement contextuelle, et les avancées et les résultats scientifiques radicaux qui sont faits à ces époques sont d'une très grande généralité. Ils doivent donc être vérifiables « en tout lieu et en tout temps. La localisation géographique était sans objet, le local était hors de la science ». Le travail du scientifique est de construire les binômes *cause* \Rightarrow *effet/conséquence*.

L'approche se complexifie quand se développent des outils permettant l'analyse d'objets plus complexes (par exemple d'origine multi-causales) et en particulier la démarche statistique telle qu'elle est proposée en agronomie. On pourra retenir les travaux de FISHER (1925) qui développent une série d'outils statistiques¹⁴ pour répondre à des questionnements multifactoriels de l'incidence d'intrants sur la production agricole (VARENNE

14. C'est par exemple à Fisher qu'on doit l'ANOVA (Analyse de la variance) ou du maximum de vraisemblance.

2010).

Mais nous restons dans une conception particulièrement déterministe du monde, où l'objet des interrogations scientifiques peut être considéré au même titre qu'une boîte noire. On s'intéresse alors aux entrées et aux sorties, mais le fonctionnement interne n'a pas besoin d'être explicité (THOM 1989). Pour rester avec FISHER, ce dernier considère qu'il est nécessaire de recourir aux lois mathématiques hypothétiques plutôt que de recourir à des mécanismes plus descriptifs (VARENNE 2010, p.58).

2.1.3.2 Modéliser pour comprendre

Modéliser pour comprendre consiste à ouvrir la *boîte noire* de THOM (1989, p.60) pour formaliser les mécanismes qui sont à l'œuvre à l'intérieur. Cette conception est dans la lignée de BOLTZMANN (1902)¹⁵ qui propose « que toute pensée ou connaissance [...] repose sur la faculté de construction d'images » (VARENNE 2010, p.59). Pour lui, en physique, les équations différentielles ne sont pas de bonnes vectrices de modèles, car elles ne sont pas assez descriptives. Dans ses travaux, il essaie de faire durer le plus longtemps possible l'accès intellectuel à des images (et ce qui l'oppose à FISHER dont il est contemporain). Du côté des sciences sociales, DILTHEY (1942) s'inscrit à l'opposé de la démarche positive de COMTE (1830) et MILL (1865). Pour lui, les sciences sociales ne peuvent pas s'inspirer des *sciences naturelles*¹⁶ qui ne peuvent révéler qu'une partie des sentiments :

« les actes de volonté, grâce à une dépense d'énergie et à des sacrifices [...] finissent par produire du nouveau et leur action entraîne une évolution tant de la personne que de l'humanité » (DILTHEY 1942, p.15).

Quand les sciences naturelles ont besoin d'adopter une démarche proactive pour mettre en place des expériences afin de valider des idées, les sciences sociales n'ont besoin d'aucun artifice puisque les faits sont directement disponibles pour notre intellect. Ainsi « la compréhension s'oppose à l'explication comme une imitation de la vie » (VARENNE 2011, p.66). Nous constatons donc que, pour les sciences sociales, l'enjeu de la compréhension face à la prédiction n'occupe pas le même terrain, et constitue toujours aujourd'hui une ligne de fracture entre les partisans d'une approche de type *individualisme méthodologique* et de type *holiste* de l'autre (BOUDON et FILLIEULE 2012).

« le fait que les hommes dans leurs vies courantes comprennent les activités d'autres individus est une condition ontologique de l'existence sociale en même temps que la méthode appropriée des sciences humaines » (WATIER 2002, p.26).

15. C'est également BOLTZMANN qui a repositionné le second principe de la thermodynamique vis-à-vis de l'ordre et de l'organisation au sein du système.

16. Mots employés par W. DILTHEY pour désigner les sciences expérimentales.

La méthode d'exploration et d'intervention en sciences sociales se justifie donc d'elle-même. Pour BOMMEL (2009, p.48), qui est partisan de la compréhension, le modèle est un « filtre conditionné par nos connaissances, nos vérités et nos capteurs ». Il est donc largement marqué par le point de vue et les capacités de perception du modélisateur, et ses capacités à entrer dans les différents niveaux de réalité (WATZLAWICK 1984). Il propose donc une voie médiane entre les tenants de la compréhension en *sciences naturelles* et ceux de la compréhension en *sciences sociales*.

2.1.3.3 Modéliser pour faire de la prospective

La notion de prospective a été proposée par G. BERGER (1967). Cela consiste à :

« considérer l'avenir non comme une chose déjà décidée et qui petit à petit se découvrirait à nous, mais comme une chose à faire dont la nature dépendra à la fois de nos forces, de notre habileté, de notre courage, et d'un certain nombre de circonstances que nous ne pourrons jamais prévoir dans tous leurs détails.

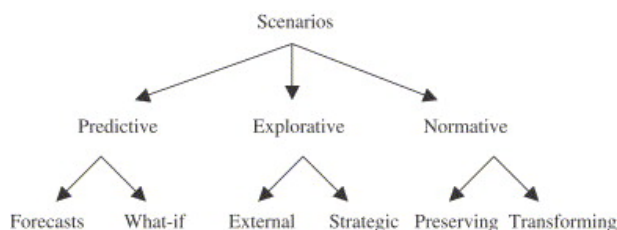
La prospective ne prétend pas nous donner le moyen de supprimer tous les risques et de donner à nos actions une structure parfaitement rationnelle. Elle se contente de nous inviter à des actes aussi raisonnables que possible » (*ibid.*, p.33).

La prospective procède donc d'un double mouvement i) d'analyse des signaux visibles aujourd'hui et pouvant nous renseigner sur une évolution probable, ii) pour adopter une démarche proactive dans le but d'orienter ou tout au moins préparer le futur sous forme de différents *scenarii*. Elle se base sur deux sous-concepts pour proposer une planification (GODET 1985, p.30) :

- la projection qui est le prolongement dans le futur d'une évolution sous certaines hypothèses
- la prévision qui est une projection associée à un certain degré de confiance (une probabilité de réalisation)

On constate donc que la démarche prospective nécessite de se tourner vers le passé, pour en extraire des projections futures, ce qui bien évidemment éveille des possibilités de modélisation et de simulation. Or un modèle qui est capable d'expliquer des successions d'événements passés n'est pas forcément le meilleur candidat pour se lancer dans la prospective. En effet, la construction et l'exploration de *scenarii* (parfois sous contrainte) n'est pas forcément compatible avec l'approche historique. L'usage de *scenarii* pour explorer les possibles conjonctions de projection est une démarche assez naturelle. Pour l'école française de prospective, GODET (*ibid.*, p.53) propose deux types de *scenario* :

- Le *scenario* tendanciel qui consiste à choisir le cheminement le plus probable à tous

FIGURE 2.2 – Six types de *scénario* proposés par BÖRJESON *et al.* (2006)

les instants où un choix devra être fait en tenant compte des tendances actuelles

— Le *scénario* contrasté qui consiste à explorer des situations extrêmes

BÖRJESON *et al.* (2006) suggère de revisiter cette classification en définissant des sous-classes de scénario (c.f. fig 2.2 au nombre de 6). Si la proposition de normalisation est plus fine que celle proposée par GODET (1985), on se rend bien compte que les deux *scenarii* de 1985 sont encore présents (sous forme de famille ou *meta-scenarii*).

La démarche prospective est particulièrement intéressante pour nous, car elle alimente une bonne partie des questionnements autour des évolutions possibles des territoires de fortes pentes. Nous y reviendrons plus en détail par la suite, mais nous pouvons d’ores et déjà tracer des parallèles entre les formalismes prospectivistes et les préceptes de la modélisation COMMOD. Les deux approches considèrent leurs objets d’étude trop complexes pour être laissés aux seuls chercheurs. Les objectifs pouvant se recouvrir dans bien des cas, la réelle différence réside sans doute dans le *medium* utilisé pour proposer l’immersion des participants dans des futurs possibles (c.f. chap. 6).

Nous avons vu dans cette partie la genèse de la modélisation et la manière dont elle a pénétré les disciplines scientifiques pour expliciter des processus et mécanismes difficilement assimilables en l’état. Si la modélisation peut être définie comme une fin en soi, elle peut aussi être considérée comme la première étape dans un processus de simulation. C’est le choix que nous avons fait ; opter pour une approche de modélisation se combinant avec des simulations informatiques.

2.2 Modélisation et simulation, auto-organisation et émergence la prise en compte de l’espace

Jusqu’à présent nous envisageons les modèles comme le résultat d’une formalisation. Si une partie de ces derniers est construite pour exister en tant qu’objets (VARENNE 2008), d’autres formalisations appellent à pousser le processus jusqu’à la production d’une simulation.

Pour COQUILLARD et HILL (1997, p.11),

« La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions ».

Si la modélisation est aujourd'hui bien ancrée dans les pratiques géographiques, les pratiques de simulations, quant à elles, ne se sont pas enracinées de la même manière dans le champ disciplinaire. En effet, les géographes travaillant sur les villes et leurs organisations se sont très vite saisis de ces pratiques, tandis qu'elle a été plus longue à s'implanter chez les géographes ruralistes. Paradoxalement les pratiques de simulation spatiale pour les systèmes ruraux se sont assez bien développées chez les agronomes, ainsi qu'en écologie.

Dans cette section, nous aborderons l'épistémologie des pratiques de simulation en géographie pour comprendre comment la discipline s'est hybridée grâce aux concepts apportés par la théorie des systèmes complexes. Toutefois cette hybridation ne fait pas perdre de vue les anciennes pratiques. Nous verrons ensuite comment l'empirisme reste présent dans les pratiques de simulation géographique, alors que ce n'est pas toujours le cas dans les autres disciplines. En hydrologie, par exemple, il est possible de travailler sur des modèles pluie-débit pendant des années sans jamais sortir du laboratoire.

2.2.1 La genèse des modèles et des simulations en géographie

Bien que ces considérations aient été abordées précédemment (c.f. 2.1.1.2) avec l'introduction de la notion de système, il nous apparaît ici nécessaire de replacer la modélisation et l'approche par simulation dans la genèse de l'utilisation des modèles en géographie. BANOS et SANDERS (2013) identifient quatre phases dans l'appropriation de la modélisation en géographie.

La *première phase* consiste en une prise en compte de la modélisation en temps qu'appropriation du système de manière abstraite de l'ensemble des composants en interaction. DURAND-DASTÈS (2003) parle d'une *systémogénèse* par laquelle passe la géographie d'après-guerre. En effet, si dans les premiers temps de la géographie celle-ci se voulait descriptive à la manière d'E. RECLUS (VINCENT 2010), elle a glissé vers une recherche des causalités (DURAND-DASTÈS 2003).

Cette recherche de causalité systémique, nous la retrouvons dans les travaux de VIDAL DE LA BLACHE (1902) et de ses héritiers BLANCHARD (1930) et JULES (1950), notamment. Si l'approche systémique est présente, la recherche de causalité se fait essentiellement en mettant en perspective le fait social et les facteurs naturels.

La prise en considération d'une chaîne causale plus complexe commence pourtant à voir le jour dans les mêmes périodes avec les travaux très innovants de DION (1959). La géographie utilisera l'histoire (et la société) pour expliquer la persistance ou la disparition des

vignobles français. La causalité multiple, une fois acceptée, permettra aux géographes de s'intéresser aux questions d'interactions spatiales (BRUNET 1980) et/ou socio-économiques (AURIAC 2000) au sein du système. Cela conduira AURIAC (*ibid.*) à imaginer le concept de « vignoble-système » qui rompt avec l'approche de la géographie viticole de DION en ce qu'il déplace l'enjeu de la recherche et les horizons d'analyses possibles en ne considérant plus l'objet vignoble par ses singularités régionales, mais comme un système explicable par l'ensemble des processus et interactions qu'il abrite.

La *seconde* et la *troisième phase* naissent du besoin de formaliser ces interactions de manière quantitative. En la matière, les travaux de FORRESTER (1969) sur les dynamiques urbaines vont marquer la pensée d'une génération de géographes français (PUMAIN 2003 ; PROVITOLLO 2006). On introduit dans l'étude de ces dynamiques des outils de gestions de flux et d'hydraulique (BANOS et SANDERS 2013). Les dynamiques et les évolutions sont approchées et reproduites par des fonctions mathématiques et la géographie entre alors dans un holisme proche de celui défendu par FISHER (1925). La distance à la représentation des processus est forte, mais les résultats sont conformes aux attentes des géographes par rapport à la réalité.

La *quatrième phase* est identifiée par BANOS et SANDERS (2013) comme celle qui verra l'apparition et l'appropriation pour les sciences humaines des théories issues des systèmes complexes. C'est l'introduction des automates cellulaires et des systèmes multi-agents dans la recherche en sciences sociales. Ces deux types d'approche sont expérimentés dans les années 1950-1960, mais se développent réellement avec l'avènement de l'informatique.

N. GILBERT et TROITZSCH (2005, p.1-14) proposent un rapide historique des simulations en sciences sociales que l'on retrouve sur la figure 2.3. Cette chronologie met en évidence l'histoire de l'adoption des modèles simulés par les sciences humaines et sociales. On y retrouve un grand nombre d'outils, dont ceux que nous avons largement mobilisés au cours de ce travail, à savoir : les automates cellulaires (AC) et les systèmes multi-agents (SMA). Nous nous concentrerons donc sur ceux-là dans la partie suivante, en orientant leur description sur les notions intéressant les géographes.

2.2.2 Modélisation des systèmes complexes : les automates cellulaires et les systèmes multi-agents

Parmi l'ensemble des outils et paradigmes de modélisation répertorié par N. GILBERT et TROITZSCH (*ibid.*) comme étant mobilisé dans l'épistémologie des sciences humaines et sociales (c.f. fig. 2.3), nous proposons d'en présenter deux. Nous nous attacherons à les replacer dans les mouvements historiques, pour en souligner les héritages et les conditions de mobilisation.

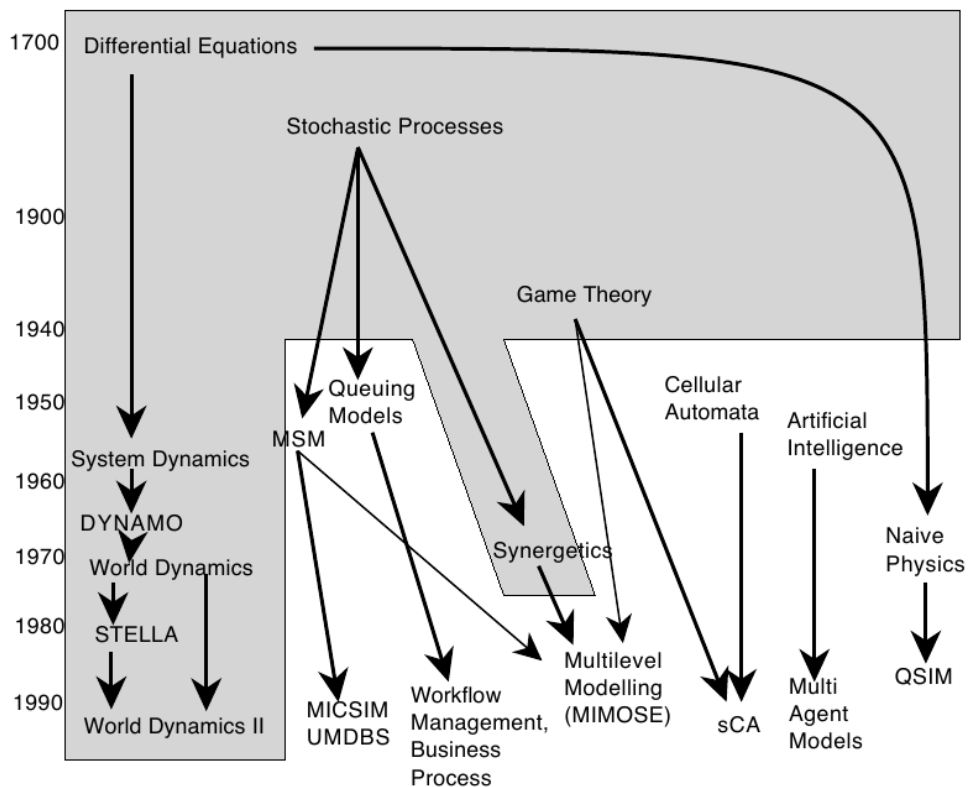


FIGURE 2.3 – Le développement de l’approche de simulation contemporaine en sciences sociales (d’après TROITZSCH 1997 dans N. GILBERT et TROITZSCH (2005, p.7)). La partie grise représente les modèles à base d’équation, la partie blanche les modèles à base d’objets, d’événements, ou d’agents. sCA veut dire *automate cellulaire utilisé pour les simulations* en sciences sociales.

2.2.2.1 Les systèmes complexes

Partiellement issue de la théorie des systèmes¹⁷ (BERTALANFFY 2012 ; PHELAN 1999), la théorie des systèmes complexes a été développée pour tenter de résoudre des problèmes de complexité désordonnée (*disorganized complexity*) relativement insolubles. Pour WEAVER (1947), c'est grâce à un changement radical de point de vue, et donc d'outils pour l'étudier, que les chercheurs se sont intéressés à la complexité organisée (*organized complexity*). À l'origine questionnée dans les champs disciplinaires comme celui de la physique, de la génétique, ou encore de l'informatique, elle a depuis une vingtaine d'années pénétré un grand nombre d'autres champs disciplinaires (MITCHELL 2009) et en particulier les sciences sociales (PHELAN 1999 ; MILLER et PAGE 2007 ; VARENNE et SILBERSTEIN 2013) et la géographie (PUMAIN 2003 ; AN 2012).

Ce champ de recherche interdisciplinaire se concentre sur la compréhension des systèmes complexes (ou des « *complex adaptive systems* » (MILLER et PAGE 2007)), ce qui comprend l'étude de systèmes et sous-systèmes hétérogènes et/ou d'entités autonomes ; lesquels ont souvent des relations non linéaires et multiples entre eux (R. AXELROD et COHEN 2001 ; AN 2012).

PHELAN (1999, p.239) d'après YALES (1978) met en évidence les apports des systèmes complexes par rapport à la théorie des systèmes comme :

« One of the basic premises of complexity theory is that much of the apparently complex aggregate behavior in any system arises from the relatively simple and localized activities of agents. Systems theory, on the other hand defines complexity as arising from a high number of parts (agents) in interactions ».

L'étude de la théorie des systèmes complexes, comme la théorie des systèmes, aborde des notions telles que : l'émergence ou l'auto-organisation, et généralement se caractérise par une grande difficulté à résoudre les problèmes posés de manière analytique (BANOS et SANDERS 2013). Cela signifie que nous ne pouvons pas prévoir le comportement du système à n'importe quel instant, car celui-là est dépendant de l'état qui le précède. Autrement dit, ce que PHELAN (1999) souligne ici consiste à considérer les comportements des systèmes complexes comme largement tributaires de phénomènes localisés. Nous comprenons donc mieux pourquoi la géographie s'est rapidement saisie des notions qu'il véhicule.

La maturité d'un champ disciplinaire se jugeant à l'aune des outils que les disciplines se forgent pour l'explorer (THOM 2009), nous pouvons remarquer aujourd'hui que l'émergence et l'adoption des théories des systèmes complexes sont allées de pair avec les avancées des capacités de calcul informatique (BANOS 2013). Ainsi ont pu se développer deux types d'outils : les Automates Cellulaires (AC) et les systèmes multi-agents (SMA), tirant

17. PHELAN (1999), explique assez bien les similitudes et les différences entre la théorie des systèmes et les systèmes complexes.

avantageusement parti de l'augmentation de la puissance de calcul et des lois de MOORE¹⁸

2.2.2.2 Les automates cellulaires

Un automate cellulaire (AC) est un réseau de cellules dans lequel chaque cellule va être dotée :

- d'un état (sous forme d'attribut) ;
- d'un nombre d'états fini ;
- d'un ensemble de règles de changement d'état.

Pour faire un peu d'histoire, les AC se sont développés à partir de 1940 (principalement en biologie et en chimie) à la suite des travaux de S. ULAM et J. VON NEUMANN ; le premier travaillant sur la croissance des cristaux en les modélisant sur une grille, et le second sur les systèmes auto replicatifs. Sur les conseils de S. ULAM, J. VON NEUMANN proposera le premier automate cellulaire de l'histoire, basé sur une grille en deux dimensions (*lattice*) où chaque cellule pourra prendre 29 états différents (J. v. NEUMANN et BURKS 1966).

Si la paternité des AC est attribuée à J. VON NEUMANN, le plus connu reste le « jeu de la vie » inventé par J. H. CONWAY en 1970 (GARDNER 1970). Cet AC est lui aussi constitué d'une grille en deux dimensions. Chaque cellule dispose de deux états : vivant et mort, et d'un comportement régi par deux règles¹⁹ :

- Si la cellule est entourée par deux ou trois cellules vivantes, elle reste vivante à la génération suivante, sinon elle meurt ;
- Si la cellule est morte et entourée par exactement trois cellules vivantes, elle naît à la génération suivante.

Ces deux règles simples permettent de générer des comportements complexes. Tout l'enjeu de l'expérience est de trouver des micros zones (donc localisées) dans lesquelles les cellules ont trouvé une stabilité (qui peut être dynamique). La figure 2.4 nous permet de visualiser à la fois la complexité issue d'une distribution aléatoire des cellules « vivantes » et « mortes », mais également au fur et à mesure de la simulation la définition de microzones stables (c.f. entre 120 et 121 itérations sur la figure 2.4). Autrement dit, nous observons l'émergence d'objets ayant une identité propre et n'étant défini par aucune des conditions ou règles du modèle.

Enfin, WOLFRAM (2002), dont nous avons déjà parlé (c.f. fig. 2.1), propose de résoudre

18. Les lois de MOORE sont des lois empiriques. La première loi de MOORE exprimée en 1965 dans « *Electronics Magazine* » postule, qu'à coût constant, la complexité des processeurs en entrée de gamme, et donc dans une certaine mesure leur puissance, doublerait tous les ans. Cette loi s'est révélée étonnamment exacte de 1971 à 2001. C.f. http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Moore, site consulté le 10 février 2015.

19. Description issue de Wikipédia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Automate_cellulaire#Le_jeu_de_la_vie, site consulté le 4 janvier 2015

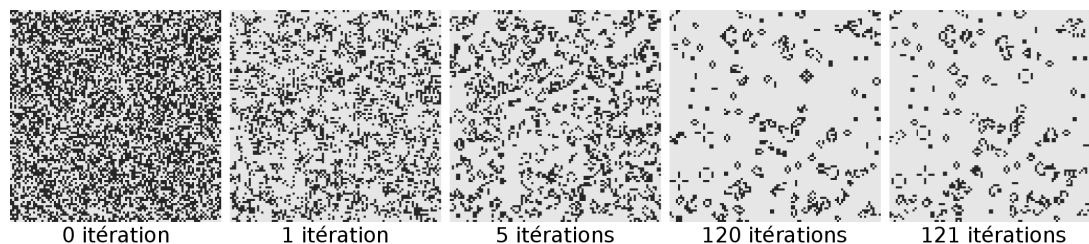


FIGURE 2.4 – Le « jeu de la vie » de J. H. CONWAY, à plusieurs instants.

un très grand nombre de problèmes qui se posent en informatique, en biologie, ou encore en mathématiques ou en sociologie par l'intermédiaire d'AC aux règles plus ou moins complexes.

On peut considérer l'utilisation des AC particulièrement intéressante pour les sciences humaines et sociales, car ils permettent : 1) de formaliser des règles de changement d'état qui peuvent être proches des phénomènes étudiés, 2) d'utiliser des notions de voisinages et donc d'introduire l'espace par l'intermédiaire de la grille. L'AC du « jeu de la vie » est particulièrement représentatif de cette prise en compte de l'espace.

D'un point de vue des sciences humaines et sociales, nous pourrions davantage nous intéresser au modèle proposé par SCHELLING (1971). Ce dernier invite à explorer des « modèles dynamiques de ségrégation » au travers du phénomène de ségrégation raciale spatiale qui se manifeste à l'insu des acteurs²⁰. Sur une grille en deux dimensions, T. SCHELLING dispose des individus noirs et des individus blancs (une cellule est un individu). Il ajoute ensuite plusieurs cas de figure avec des individus plus ou moins tolérants à la différence. Si le seuil de tolérance à la différence est dépassé, l'individu change de cellule pour une autre cellule inoccupée disposant de caractéristiques meilleures que la précédente. Les simulations montraient qu'après un grand nombre d'itérations, des agrégats se formaient, et cela même quand le racisme appliqué au système est faible (c.f. configuration a) fig. 2.5).

Ce type de modèle peut également être pensé comme la première étape dans un processus de réflexion à des échelles spatiales connues. E. DELAY, REULIER *et al.* (2014) se servent d'un automate cellulaire pour tester des mécanismes à un niveau micro (infra régional pour la France). L'idée est de proposer des *scenarii* prospectifs à des échelles plus larges dans le but de mener des politiques publiques à l'échelle régionale ou nationale.

Dans ce type de simulation, les configurations stylisées permettent malgré tout de garder le sens des résultats en sortie de modèle, ce qui permet de mobiliser facilement

20. Nous pourrions lire une analyse critique du modèle de ségrégation de T. SCHELLING par DAUDÉ et LANGLOIS (2007). Il est montré en particulier que la densité des cellules « actives » joue un rôle important. En effet, s'il y a trop d'espace entre elles, les problèmes de ségrégations sont moins prenants. Vient alors la question de la validité du modèle en monde rural.

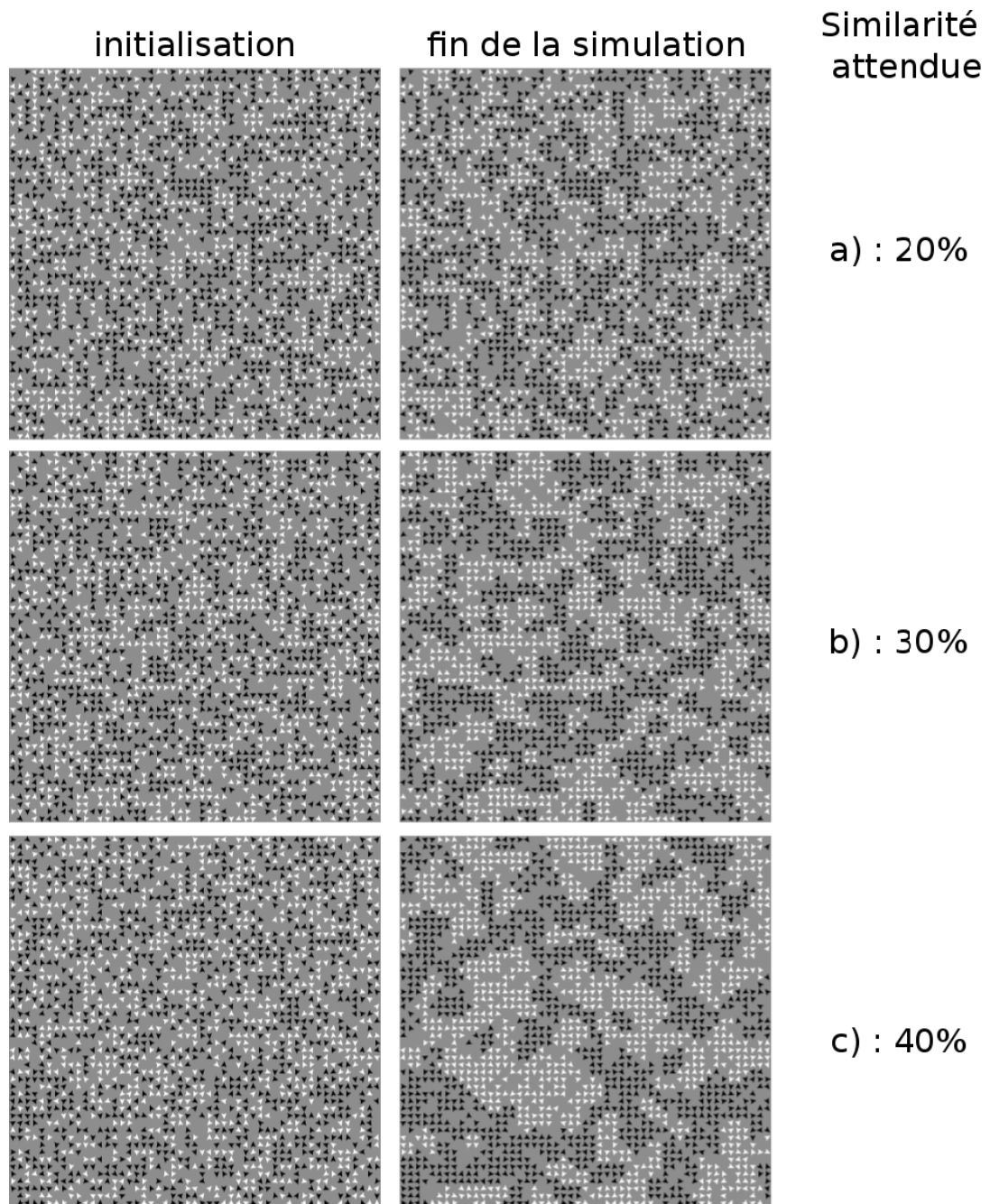


FIGURE 2.5 – Le « Processus de ségrégation raciale » par l'espace mis en évidence par SCHELLING (1971)

ce type d'outils. Cependant, une objection de taille est souvent opposée à ce type d'approche : « la sous détermination des modèles par les faits » (VARENNE 2011, p.179), ce qui est particulièrement vrai quand on s'arrête à des constatations de forme. Dans le cas de la figure 2.5 il faudrait également suggérer des évolutions d'indicateurs (indice de fragmentation, distance moyenne ,etc.).

2.2.2.3 Systèmes multi-agents

Les paradigmes qui sous-tendent la modélisation à base d'agents sont directement issus des critiques retenues contre les AC. En effet, ces derniers nécessitent un haut niveau d'abstraction des phénomènes étudiés, rendant leur interprétation parfois hasardeuse²¹. Dans les années 1990, un groupe de chercheurs en sciences humaines et sociales a initié un travail sur de nouveaux outils permettant de modéliser et de simuler des comportements de manière moins stylisée que ce qui était alors permis dans les AC (G. N. GILBERT et CONTE 1995 ; N. GILBERT 1995b ; FERBER 1995 ; DROGOUL et COLLINOT 1997 ; CONTE 2000). La modélisation à base d'agents représente alors une manière plus complexe et plus souple de modéliser et de simuler les systèmes complexes. L'entité de base est constituée d'agents qui peuvent être une multitude de choses différentes. FERBER (1995, p.13) définit les agents comme :

"[...] une entité physique ou virtuelle :

1. qui est capable d'agir dans un environnement ;
2. qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
3. qui est mue par un ensemble de tendances (sous forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
4. qui possède des ressources propres ;
5. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;
6. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
7. qui possède des compétences et offre des services ;
8. qui peut éventuellement se reproduire ;
9. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception et des communications qu'elle reçoit".

21. On notera par exemple le « principe de raison suffisante ». Cela peut amener à des conclusions spécieuses vis-à-vis des résultats du modèle de SCHELING (VARENNE 2011).

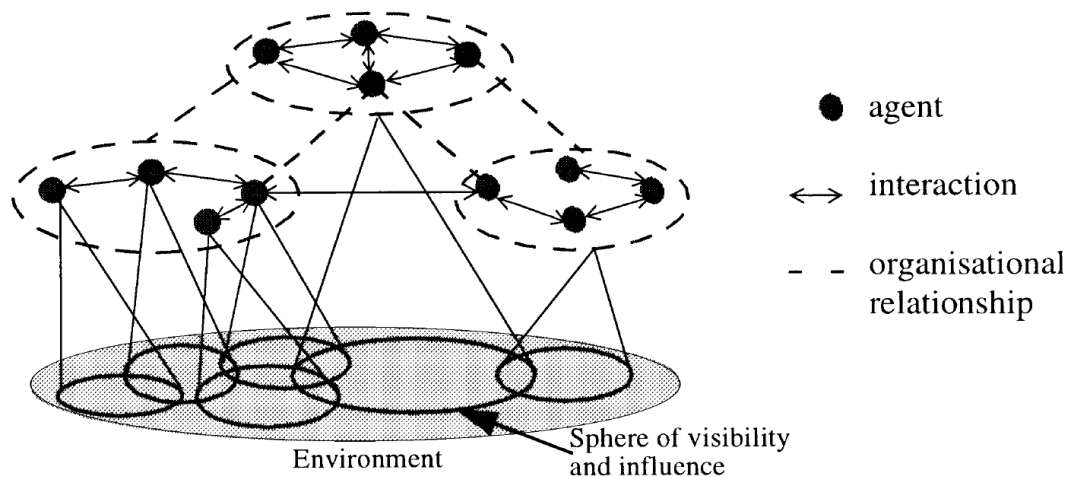


FIGURE 2.6 – Forme canonique d’un système multi-agents proposé par JENNINGS (2000, p.281)

Si cette définition est très large, elle apporte néanmoins des précisions sur la nature des agents et lève le voile sur leur fonctionnement. Nous soulignons ici qu’ils peuvent être des entités « physiques, » c’est-à-dire existantes physiquement et pouvant dès lors avoir une action dans le monde réel (typiquement des individus, mais cela peut aussi être un avion, une voiture, etc.), ou « virtuelles », c’est-à-dire n’existant pas physiquement (typiquement des entités abstraites comme des organisations d’individus).

Le second point sur lequel nous souhaitons revenir dans cette définition est la place de l’autonomie et de l’environnement. En effet, chaque agent va se voir doter d’un comportement autonome (ce qui simplifie largement la conception du contrôle passablement complexe dans les configurations de simulation plus traditionnelles), et va réagir à des stimulations qui lui sont propres. On retrouve donc dans ce type de modélisation ce qui faisait l’intérêt des automates cellulaires pour les géographes en termes de résolution des problèmes locaux. Nous sommes donc face à une intelligence artificielle distribuée (entre les agents). Sur la figure 2.6, JENNINGS (2000) schématise bien à la fois les interactions que peuvent avoir les agents entre eux (flèches), mais aussi leur influence locale sur leur environnement (cercles).

Ce qui différencie vraiment les automates cellulaires des systèmes multi-agents est l’hétérogénéité des agents en présence (CONTE 2000). En effet, pour les AC, chaque cellule de la grille représente le même type d’agent qui aurait un comportement variant en fonction des caractéristiques locales. Dans le cas d’un SMA, la diversité des agents explose littéralement (JANSSEN et OSTROM 2006).

Or cette explosion n’est pas sans poser d’autres problèmes. En particulier se pose la question de la formalisation des interactions. Deux écoles de pensées se matérialisent.

La première se compose des partisans d'une modélisation et de simulations **KISS** pour « *Keep It Simple and Stupid* », comme R. M. AXELROD (1997) qui propose d'opter pour des pratiques de modélisation parcimonieuses du point de vue des hypothèses. Pour lui, ce sont les résultats qui sont complexes, pas les hypothèses. De ce point de vue, les travaux de EPSTEIN et R. AXTELL (1996) sont particulièrement connus. Ces derniers proposent, à partir de leur expérience du *sugarscape*²², un « paysage » artificiel dans lequel évolue une « société » d'agents sur laquelle les auteurs vont expérimenter l'introduction de grandes caractéristiques génériques comme le commerce, la maladie, la culture et les conflits au travers de l'introduction d'un nombre très limité de paramètres.

La seconde approche a été développée par EDMONDS et MOSS (2005) et se nomme **KIDS** pour *Keep It Descriptive, Stupid!*. Elle se concentre sur les mécanismes sous-jacents du système afin d'en produire une représentation plus descriptive. Cette approche requiert, à notre avis, une meilleure connaissance formelle des situations simulées et autorise beaucoup moins de flexibilité aux modélisateurs. Nous nous éloignerons de la démarche **KIDS** à partir du moment où nous nous intéresserons à ce que SIMON (1996) appelle des « *poorly understood systems* ». En effet, là où **KISS** permet de prendre des raccourcis dans le formalisme, en ne prêtant attention qu'aux résultats et en les confrontant aux observations, avec **KIDS**, la manière de formaliser les interactions est centrale. Les modèles sont beaucoup plus guidés par les données expérimentales (BANOS et SANDERS 2013), ce qui rend cette méthode moins généralisable, mais beaucoup plus propice à éclairer une situation bien délimitée.

Cela dit, de l'aveu même de EDMONDS et MOSS (2005), aucun modèle n'est tout à fait **KISS** et complètement **KIDS**. La proportion des deux varie en fonction des situations modélisées et de la connaissance empirique qu'en ont les modélisateurs/observateurs. Pour JANSSEN et OSTROM (2006, p.7) « the best model balance the goodness of fit and the ability to generalize ».

On constate donc ici la multitude de cas où la modélisation à base d'agents peut s'avérer un outils propice au développement de théories, ce qui explique l'engouement croissant autour de ces méthodes d'exploration. D'un point de vue disciplinaire, la géographie et les sciences qui s'intéressent à l'espace ne sont pas en reste. Nous proposons de procéder à une rapide revue de leurs pratiques.

2.2.2.4 Systèmes multi-agents et utilisation de l'espace

Le passage des AC au SMA a introduit une plus grande flexibilité à la fois dans la pratique de modélisation et dans la diversité des processus modélisables. On comprend

22. *Sugarscape* provient du fait qu'ils ont imaginé un monde composé de sucre « This is simply a spatial distribution, or topography, of "sugar", a generalized resource that agents must eat to survive » (EPSTEIN et R. AXTELL 1996).

donc l'intérêt que porte une part croissante de géographes pour ce type d'outils qui ouvre la voie à une approche computationnelle des problématiques traitées en géographie humaine (OPENSHAW 1994 ; OPENSHAW 1998). Une partie de la littérature sur la modélisation à base d'agents en géographie traite de problématiques autour de l'usage des sols et du couvert végétal par les sociétés.

Les SMA examinant les dynamiques spatiales de l'usage des sols (*Land-use and Land-cover change*) tirent avantage de la diversité des agents modélisables et combinent généralement deux composants :

« *The first component is a cellular model that represents the landscape over which actors make decisions. The second component is an agent-based model that describes the decision-making architecture of the key actor in the system under study. These two components are integrated through specification of interdependencies and feedbacks between the agents and their environment.* » (PARKER, MANSON *et al.* 2003, p.314)

Ce type de modélisation comble donc l'écart important qui pouvait perdurer entre l'analyse descriptive des liens entre les facteurs socio-économiques et les dynamiques paysagères issues de l'utilisation des sols. La grande force de leur utilisation dans ce contexte réside dans leur composant spatialement explicite. Cela offre aux modélisateurs la possibilité d'intégrer des quantités définies d'agents dans des espaces prédéterminés, mais surtout, à la différence des modèles aspatiaux, de mesurer la réponse des agents sur l'environnement lui même. (PARKER et MERETSKY 2004).

Ces modèles servent alors de laboratoire social virtuel (AMBLARD 2010) dans lesquels il devient possible d'explorer les liens entre les comportements d'usage des sols et le résultat paysager (PARKER, MANSON *et al.* 2003), d'explorer des intuitions à propos de *patterns* observés sur les territoires, de créer des *scenarii* de développement du paysage sous contrainte ou encore de tester les effets de politiques d'aménagement sur le comportement de ce dernier (VELDKAMP et LAMBIN 2001 ; ROBINSON *et al.* 2007).

Les questions abordées par la modélisation spatialement explicite, et ce quelque soit l'orientation conceptuelle donnée au modèle, nous laissent entrevoir le changement qui s'opère dans le positionnement du modèle vis-à-vis de la démarche de recherche. En effet, dès lors que sont prises en compte la complexité spatiale et la complexité sociale des interactions, les questions abordées par la modélisation ont tendance à se positionner dans le champ des sciences « post-normales » proposé par FUNTOWICZ et RAVETZ (1993). Ces derniers identifient une rupture dans la manière de construire et de concevoir la science, au moment où les questions auxquelles elles tentent de répondre nécessitent de faire face à de grandes d'incertitudes et intégrant plus volontiers l'influence des humanités.

Plutôt que d'ignorer l'inconnue ou la complexité inhérente aux comportements humains, les sciences post-normales l'associent en essayant de la circonscrire en utilisant comme centre de résolution des problèmes une communauté de pairs. Le scientifique doit sortir de l'isolement de la recherche pour laisser la société être co-acteur de ses réflexions²³.

Ce déplacement de la place du chercheur n'est pas sans rappeler la place de la construction des hypothèses dans les approches empiriques, plus particulièrement dans celles de la théorie ancrée (*grounded theory*) (PAILLÉ 1994). Même si les domaines d'utilisation ne se recouvrent pas, ce type d'approche est soluble dans la démarche de modélisation « bottom-up » de l'approche COMMOD (BARRETEAU 2003a). Il est alors nécessaire de considérer les hypothèses de recherche non plus comme présupposées mais comme émergent du travail et des données de terrain.

2.2.3 L'empirisme dans la modélisation à base d'agents

La question de l'empirisme se dessine en filigrane de ce début de chapitre. En effet, quand nous évoluons dans l'univers des sciences humaines et sociales, il est souvent difficile d'avoir accès à des données quantitatives, et les données qualitatives sont souvent vues comme des données « non scientifiques », subjectives, biaisées, etc. (EDMONDS 2015 ; GHORBANI *et al.* 2015). Si ces critiques peuvent être dans certains cas fondées, les données quantitatives ne sont pas non plus dépourvues de biais. Les inconvénients des premières ne justifient pas de ne pas s'y intéresser. Or la modélisation à base d'agents procure de nouveaux outils aux sciences humaines et sociales permettant de tester des situations d'interactions sociales et spatiales de manière informatique. Par là, elles accèdent aux construits formels et, de ce fait, participent au développement commun des sciences :

« formal models are essential to science, not because they are more "true" than other kinds of model, but that they facilitate a collective and progressive development of knowledge between researchers » EDMONDS (2015, §1.2)

Le modèle produit par simulation des résultats pouvant être confrontés aux observations, ce qui permet aux chercheurs d'évaluer la distance symbolique entre modèle et réalité avant de replonger dans un cycle de modélisation/simulation.

2.2.3.1 Du besoin de formalisation des hypothèses

Dans tous les cas, les simulations produisent des résultats qui doivent être ensuite interprétés à différents niveaux. Pour AMBLARD (2010, p.72),

23. « *The researchers' choice of problems and evaluations of solution are equally subjected to critical scrutiny, and their priority disputes are similarly dragged out into the public arena* » (FUNTOWICZ et RAVETZ 1993, p.753)

« il s’agit [...] ici de mettre en place une interprétation à deux niveaux de ses résultats. Tout d’abord au niveau du modèle lui-même, la simulation étant [...] un mécanisme à produire des résultats, il s’agit de l’identifier clairement, de construire une théorie du comportement du modèle avant de réaliser une mise en perspective de cette théorie par rapport au phénomène réel étudié. Cette dernière comparaison étant celle qui porte clairement l’intérêt de la démarche [...]. »

Or les résultats des simulations ne sont intéressants qu’à l’aune des hypothèses qui ont permis la construction du modèle. Un travail conséquent a été fait dans ce sens par GRIMM, U. BERGER, BASTIANSEN *et al.* (2006), GRIMM, U. BERGER, DEANGELIS *et al.* (2010) et RAILSBACK et GRIMM (2011) pour proposer une formalisation dans la description des modèles à base d’agents. Cette description est basée sur trois axes : *Overview*, *Design* et *Details* (couramment appelée *ODD*), et offre une description unifiée des modèles pour en faciliter la diffusion.

Ce formalisme de description propose de séparer d’un côté la description du modèle indépendamment des choix d’implémentation (*Overview* et *Design*) et de l’autre les *Details* expliquant clairement les interactions pour permettre plus facilement aux lecteurs la reproduction des résultats. Cette structuration sépare les considérations littéraires des descriptions d’organisation mathématiques et/ou informatiques, et ainsi permet d’entrer de manière graduelle dans la complexité du modèle. Le lecteur passe un à un les différents cercles concentriques qui le mèneront à saisir l’ensemble des détails de l’implémentation et donc à comprendre la portée des résultats.

Au protocole *ODD*, développé originalement pour l’écologie, s’ajoute également une extension *ODD+D* proposée par B. MÜLLER *et al.* (2013) visant à ajouter des étapes de description de formalismes plus spécifiques aux processus de décisions humaines.

Pour qu’un SMA soit acceptable, voire accepté par la société scientifique, il importe donc de s’inscrire dans une grande rigueur du point de vue de la description du modèle et des processus en jeu (ce qui est facilité par l’*ODD*). Or entrer dans une description fine des relations et processus en jeu a soulevé et soulève encore de grandes interrogations pour les chercheurs partisans d’approches empiriques (JANSSEN et OSTROM 2006; ROBINSON *et al.* 2007; SMAJGL, BROWN *et al.* 2011; SMAJGL et BARRETEAU 2013a; EDMONDS 2015), et en particulier concernant la prise en compte des micro-processus et de leurs influences sur le système (M. NEUMANN 2015).

Si l’intérêt de la démarche d’explicitation des hypothèses est largement plébiscité (JANSSEN et OSTROM 2006) pour ce qu’elle fait gagner en crédibilité aux sciences humaines et sociales, il reste important de bien identifier les forces et faiblesses des différents types de données empiriquement acquis, comme nous pourrions le faire pour un modèle statistique,

à partir de la capacité des simulations à s’approcher du « réel »²⁴. Mais dans une approche empirique de modélisation, le processus de construction du modèle ne peut pas être séparé du test des hypothèses, ce qui est largement plébiscité dans l’approche classique de test d’hypothèses. Du fait même d’une approche *bottom-up*, la construction de modèle se fait par d’incessants aller-retour entre le modèle et le réel simulé (BARRETEAU 2003b).

2.2.3.2 De la nécessité de l’analyse de sensibilité dans la validation de processus empiriques

Dans les approches empiriques de modélisation, un grand nombre de paramètres sont approchés ou déduits du travail de terrain et des entretiens avec les acteurs, mais il y a toujours des variables dont la paramétrisation reste inconnue ou sujet même du questionnement du modèle. L’observateur ou modélisateur passe donc par une phase de calibration du modèle. Ce travail peut se faire de manière continue, durant la construction et l’ajout des nouveaux processus au modèle, par une dialectique essai-erreur entre le modèle et la représentation que s’en fait le modélisateur (SCHMITT *et al.* 2014).

Malgré la place prise par l’utilisation des SMA en sciences sociales, aucune solution n’a encore, à proprement parler, émergé en tant que technique de description des phases de calibration et validation de modèle, ou, en tout cas, rien de comparable à ce que GRIMM, U. BERGER, DEANGELIS *et al.* (2010) ont proposé pour la description des modèles. Pour l’illustrer, THIELE *et al.* (2014) ont évalué, à partir des publications dans *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* et *Ecological Modelling*, le nombre d’articles qui exposent dans leur déroulé les paramètres utilisés lors de la calibration. Ils ont compté respectivement 14% et 37% des articles recensés qui définissent les paramètres de calibration, et respectivement 12% et 24% qui intègrent une analyse de sensibilité de leur modèle.

THIELE *et al.* (*ibid.*) définissent l’analyse de sensibilité comme :

« Sensitivity analysis helps identify those parameters that have a strong influence on model output, which indicates which processes in the model are most important. Moreover, if inputs of the model are uncertain, which is usually the case, sensitivity analysis helps assess the importance of these uncertainties. If the model is robust against variations in the uncertain parameters, i.e., model output does not vary strongly when the parameter values are varied, the uncertainties are of low importance. »

C’est toute la force des SMA d’inclure une très grande variété d’interactions (sociale, économique, etc.) entre agents (localisés), et c’est de cette interaction qu’émergent des

24. Avec toute la subjectivité qu’implique l’accès au réel. C.f l’école du Palo-Alto et en particulier les travaux de WATZLAWICK (1984).

dynamiques complexes. Cependant, le fait d’avoir une multitude d’agents, et donc une multitude d’interactions, peut engendrer, sous certaines contraintes, des comportements inattendus. C’est pour comprendre finement l’étendue des variations de comportements du modèle que les analyses de sensibilité sont incontournables. Sans elles, la compréhension du modèle ne reste que superficielle.

Or, considérant le sondage de THIELE *et al.* (2014), dans plus des 2/3 des articles aucune garantie n’est donnée que l’analyse de sensibilité a été effectuée, ce qui laisse planer des doutes sur la validité des résultats publiés et encore plus sur leur reproductibilité (c.f. controverse entre R. L. AXTELL *et al.* (2002) et JANSSEN (2009) sur le champ de validité des résultats du modèle Anasazi).

Pourtant les outils de calibration et d’analyse de sensibilité existent dans la majorité des situations et des *frameworks* de modélisation²⁵, mais les pratiques de modélisation en écologie ou en sciences sociales font figure « d’amateurisme » au regard des pratiques en informatique, et surtout du point de vue du *design* d’expérience (LORSCHIED *et al.* 2012).

L’une des raisons qui peut expliquer la difficile pénétration de ces pratiques dans les approches de modélisation à base d’agents est peut-être liée aux limites informatiques qui avaient lieu quelques années auparavant²⁶. En effet, une analyse de sensibilité nécessite de produire un certain nombre de répliques du modèle dans un jeu de paramètres donnés, avant de tester une autre configuration. Suivant la taille de l’espace des paramètres qu’on voudra explorer, on s’exposera à une augmentation exponentielle du nombre de simulations de chaque paramétrisation à faire fonctionner. Or si aujourd’hui il est possible sur des ordinateurs de bureau de paralléliser 8 à 10 simulations, il n’est pas loin le temps où nos processeurs n’étaient dotés que d’un seul cœur. Parallèlement le nombre d’équipements de calcul intensif s’est largement démultiplié ces dernières années, que ce soit sur des clusters universitaires²⁷, ou les VO (*Virtual Organization*²⁸); qui lancent de manière coopérative des calculs plus lourds.

Dans cette section, nous avons esquissé les contours de l’évolution des pratiques de modélisation et de simulation de manière générale en proposant aussi souvent que possible, les pratiques géographiques. Nous sommes donc revenus sur les rôles de la simulation et ses

25. Le *behavior space* (TISUE et WILENSKY 2004) et le *behavior search* (STONEDAHL et WILENSKY 2011), pour netlogo par exemple, mais des équivalents existent pour GAMA-plateforme (GRIGNARD *et al.* 2013), CORMAS (BOUSQUET *et al.* 1998), ou encore MASON (LUKE *et al.* 2003). Par ailleurs, on peut aussi souligner l’existence d’outils génériques comme OpenMOLE (*Open MOdeL Experiment*) qui encapsulent une grande variété d’outils (REUILLON, LECLAIRE *et al.* 2013).

26. À BANOS (2013, p.31) de poser la question : « Et si le vrai luxe c’était le calcul ? ».

27. Comme le cluster CALI (CALcul en LIMousin), de l’Université de Limoges, financé par la région Limousin, les instituts XLIM, IPAM, GEIST, ou l’Université de Limoges, qui comptabilisent 500 cœurs.

28. Comme *The Complex Systems VO*, qui est une grappe de clusters comptabilisant plus de 10000 cœurs.

implications dans la théorie des systèmes complexes. Nous avons souligné les contraintes épistémologiques qui ont poussé la communauté scientifique à changer de paradigme de modélisation par simulation en passant des Automates Cellulaires (AC) aux Systèmes Multi-Agents (SMA) en intégrant plusieurs niveaux de représentation et ainsi lever les contraintes conceptuelles liées aux AC.

Si la modélisation était l’apanage des sciences expérimentales, nous avons également souligné la manière donc les sciences empiriques mobilisent les outils pour aborder leurs questions disciplinaires sous un angle nouveau.

Cela nous a également amené à considérer le lot de contraintes inhérentes aux systèmes à base d’agents et en particulier celles de la formalisation de la description et des résultats au travers de l’ODD et de l’analyse de sensibilité. Fort de cette contextualisation, nous pouvons maintenant entrer plus spécifiquement dans nos problématiques. C’est ce que nous ferons dans la section suivante.

2.3 Caractériser notre pratique de modélisation et ses implications géographiques

Nous avons besoin de cette longue introduction théorique aux pratiques de modélisation en général et au paradigme de la modélisation à base d’agents pour pouvoir sereinement nous engager dans la description de notre méthodologie de travail et à la présentation des différents modèles que nous avons développés.

Notre travail s’inscrit dans la théorie ancrée (PAILLÉ 1994 ; M. NEUMANN 2015). En effet, l’ensemble des questions que nous abordons ici a émergé des observations directes effectuées sur nos deux terrains d’étude (c.f. part 1.2), des interactions locales avec les acteurs, ou des questions animant la communauté scientifique.

Le recours à l’ontologie que nous avons développée dans le chapitre 1 (c.f. 1.1.1) nous a permis d’identifier les concepts clefs et les relations qu’ils entretiennent avec le domaine de recherche (M. NEUMANN 2015), et ainsi augmenter la transparence dans la construction des théories et dans les possibilités de transportabilité des résultats (LIVET *et al.* 2010 ; J.-P. MÜLLER et AUBERT 2011).

L’ontologie qui nous permet d’aligner terroir et territoire (fig. 1.4) nous a offert la possibilité de formaliser les spécificités de la viticulture de montagne et de fortes pentes, cette dernière ayant comme particularité de mobiliser toute l’ontologie, mais avec une très forte prégnance de la topologie influençant les autres concepts. Cela nous a amenés à expérimenter ce que M. NEUMANN (2015) appelle *theoretical coding*, qui consiste à identifier des catégories ou des mots clefs à partir du travail de terrain pour ensuite augmenter le niveau d’abstraction issu de ces mots clefs pour aboutir à un niveau théorique plus

généralisable.

Au milieu des lignes de force qui traversent l'histoire des sciences, et en suivant ce précepte, nous avons opté et exploré plusieurs types de postures méthodologiques en nous inscrivant parfois comme partisans d'une approche holiste, optant plus souvent pour un individualisme méthodologique (c.f. part 2.3.2). Nous avons construit une constellation de modèles à base d'agents pour, à chaque fois, tenter d'explorer certaines composantes du vignoble-système. Ces questionnements ont tous été identifiés par les acteurs locaux ou par la communauté technique et scientifique qui gravite autour de nos territoires d'étude. Dans tous les cas, nous essaierons de nous inscrire à la suite de la voie tracée par les géographes dans l'exploration des systèmes complexes (PORTUGALI 1997; PUMAIN 2003; BANOS 2013), tout en essayant, comme le suggère PUMAIN (2003) et EDMONDS et MOSS (2005) ou encore SMAJGL et BARRETEAU (2013b), de trouver une voie entre réductionnisme et holisme, *KISS* et *KIDS*, et les approches empiriques.

Dans la section 2.3.1, nous expliciterons notre méthode et nos positions, puis nous introduirons les différents modèles qui seront détaillés dans les chapitres suivants en les positionnant dans le paysage des SMA décrit au début de ce chapitre. Cela permettra de parcourir les différentes échelles spatiales et les différentes questions de modélisation abordées de manière individuelle.

Puis dans la section 2.3.2, nous positionnerons les modèles produits vis-à-vis de l'ontologie du système viticole de montagne et de fortes pentes, afin de comprendre les concepts recouverts par les différents modèles et donc les différentes questions identifiées dans notre ontologie (c.f. chapitre 1). Enfin nous montrerons comment chaque modèle se positionne par rapport aux autres en fonction des paradigmes de modélisation qui les sous-tendent (stylisé, particulier, *KIDS-KISS*).

2.3.1 Notre positionnement face aux pratiques de modélisation

Dans cette partie nous nous appliquerons à définir les méthodes d'acquisition de données que nous avons mobilisées pour ce travail et nous les situerons dans la littérature propre aux systèmes multi-agents et aux recherches empiriques menées dans le domaine. Ce qui nous conduira ensuite à décrire succinctement les différents modèles que nous retrouverons ensuite de manière plus détaillée dans les chapitres 3, 4 et 5. Enfin nous positionnerons ces modèles les uns par rapport aux autres pour comprendre les domaines théoriques mobilisés.

2.3.1.1 Positionnement des empiristes dans la complexité

Le monde empirique pouvant faire face à une multitude de situations, le nombre de méthodes d'acquisition de données pour la paramétrisation des modèles de simulations

n'a cessé d'augmenter. Ainsi quand JANSSEN et OSTROM (2006) proposent de différencier quatre méthodes d'acquisition, ROBINSON *et al.* (2007) en analysent et en proposent cinq. SMAJGL et BARRETEAU (2013b) en relèvent quant à eux 15 types pouvant se recouvrir partiellement. Parmi ceux-ci nous compterons : l'observation participative, les sondages, les *focus groups*, le « dire d'expert », les *Field or Lab Experiments* .

Dans l'optique de comprendre les effets des différents types de modélisations, ROBINSON *et al.* (2007) proposent d'étudier comparativement les cinq types d'approches empiriques qu'ils ont relevés, ce qui les conduit à les positionner les uns par rapport aux autres sur quatre graphiques en fonction des différents types d'informations qu'ils véhiculent (c.f. fig. 2.7). Nous visualisons alors très bien les forces et les faiblesses des différentes approches et nous en déduisons leurs cas d'utilisation.

Ainsi, comme nous le verrons rapidement en nous basant sur la figure 2.7, nous avons utilisé principalement deux des cinq approches : EXP (*Field or Laboratory Experiment*) et CM (*companion Modeling*). Mais comme le souligne SMAJGL et BARRETEAU (2013b, p.8), « *the majority of cases require a combination of data elicitation methods* ». Ainsi dans nos travaux, nous avons cherché à multiplier l'emploi de différentes méthodes afin de parvenir à une acquisition de données de qualité (c.f. chap. 3, 4 et 5). Nous avons en particulier fait appel à :

- des entretiens (*interviews*) avec les viticulteurs, les techniciens, et les habitants. Dans ces entretiens nous avons notamment cherché à acquérir des données sur les motivations des pratiques culturelles et culturelles ;
- de la mise en situation (ce que SMAJGL et BARRETEAU (*ibid.*) appellent *knowledge engineering methods*), qui consiste à mettre des acteurs face à des objets pour favoriser leurs retours (BECU, PEREZ *et al.* 2003 ; BECU, RAIMOND *et al.* 2014). Une approche que nous avons largement mobilisée ;
- le « dire d'expert » ou *expert knowledge* qui consiste à se baser sur un ensemble de sources formelles ou informelles. Dans certains cas il peut se rapprocher du *knowledge engineering methods* quand les experts valident ou invalident des résultats des modèles, mais cela peut aussi prendre la forme de paramétrisation en s'appuyant sur la littérature ;
- dans quelques cas, nous nous sommes également retrouvés dans une approche de type *field experiment* (HARRISON et LIST 2004). Ce type d'approche est proche des *knowledge engineering methods*, mais vise à faire manipuler le modèle à des personnes extérieures.

TUBARO et A. A. CASILLI (2010) et A. CASILLI *et al.* (2014) décrivent les chemins que prend la démarche scientifique en sciences sociales (fig. 2.8). On y différencie dans le cadre de gauche les étapes de la recherche qualitative, et dans le cadre de droites, les étapes de la recherche purement basée sur les SMA. Pour TUBARO et A. A. CASILLI (2010),

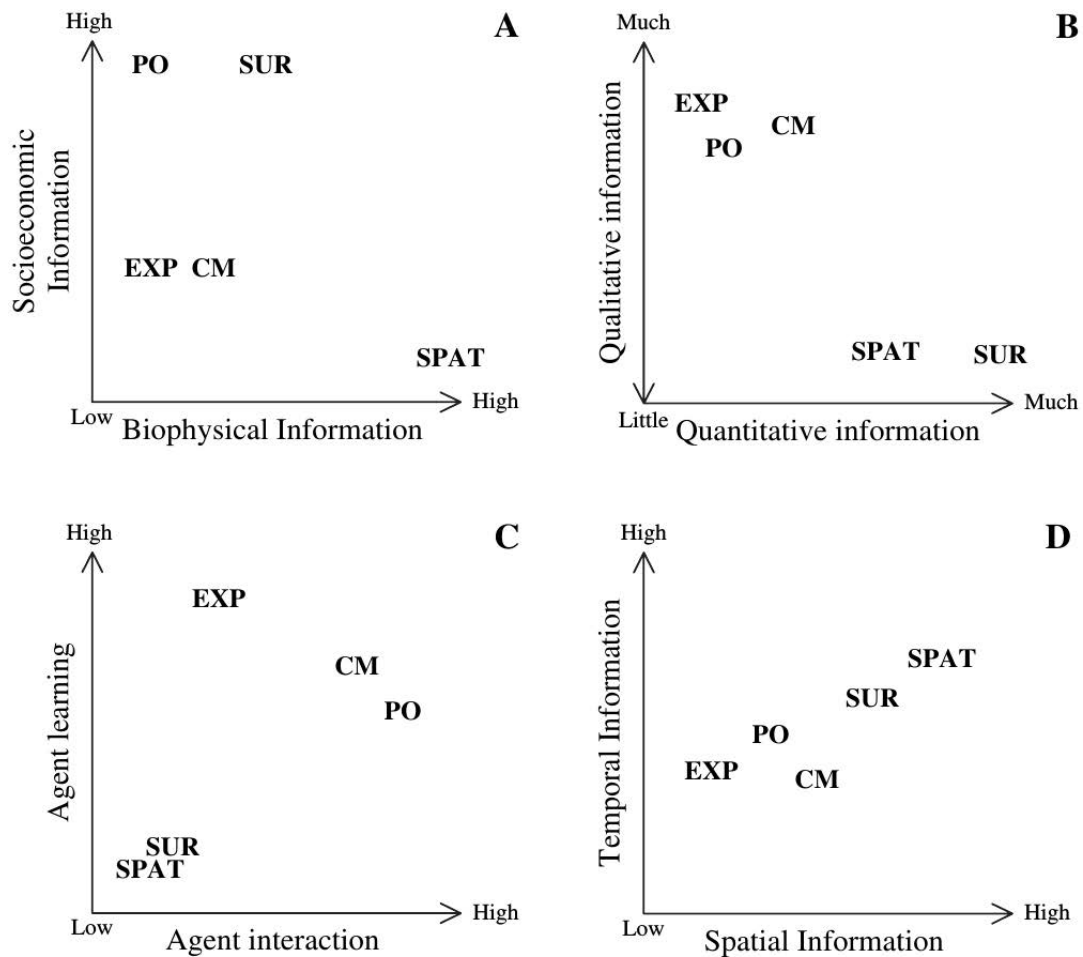


FIGURE 2.7 – Comparaison de cinq approches empiriques de modélisation issues de l'article de ROBINSON *et al.* (2007). Pour légende : SUR pour *Survey*, PO pour *Participant Observation*, EXP pour *Field or Laboratory Experiments*, CM pour *companion Modeling* et SPAT pour *GIS and Sensed Spatial Data*. Les graphes permettent de comparer les différentes approches empiriques vis-à-vis de (A) leur capacité à révéler l'hétérogénéité spatiale et sociale, (B) leur capacité à révéler les interactions entre agents par rapport aux capacités d'apprentissage de ceux-ci, (C) leur capacité à produire des données quantitatives ou qualitatives à propos des agents et enfin, (D) la spatio-temporalité des données fournies.

la forme caractéristique de papillon montre comment les deux types d’approche peuvent tirer avantageusement partie les unes des autres.

En intégrant ce schéma, l’hétérogénéité des données recueillies sur le terrain (A sur la fig. 2.8) et le besoin d’abstraction de la réalité « pure » livrée par les acteurs passent ensuite par le filtre de la formalisation des hypothèses pour identifier ce qui est « donné » afin de construire une théorie (B) et de la modéliser. C’est ce cheminement de l’information et de formalisation des processus que nous présentons ensuite.

2.3.1.2 Une constellation de modèles

Pour approcher une réalité de la viticulture de montagne, nous avons procédé à l’exploration de manière explicite à travers un double filtre (c.f. fig 2.9) (BOMMEL 2009, p.46).

Le premier filtre est celui de l’approche ontologique (n° 3 fig. 2.9) sur les objets conceptuels que nous avons présentés dans le chapitre 1 (part. 1.1.1). Il nous a permis d’isoler, à partir de la littérature (n° 1 fig. 2.9) et des comportements et stratégies d’acteurs (n° 2), les concepts qui sont mobilisés dans l’approche « terroir » et « territoire ». La construction de l’ontologie et sa complexification itérative par l’enrichissement de notre pratique de modélisation (n° 4) participent de ce premier filtre.

Le second consiste à utiliser nos interactions avec les acteurs pour nourrir notre pratique de modélisation. Ainsi à partir d’entretiens (*interviews*), de mises en situation (*knowledge engineering methods*), ou à dire d’expert (*expert knowledge*), nos modèles se sont singularisés et enrichis (n° 5 et n° 6) pour constituer un ensemble de systèmes multi-agents. L’approche inductive, liée à la fois à la nécessité de parcimonie dans la pratique de modélisation informatique et aux découvertes des préoccupations actuelles des acteurs, nous a poussés à proposer un « écosystème » de modèles (c’est-à-dire un ensemble de modèles complémentaires), les réponses apportées par les uns faisant germer d’autres questionnements nécessitant alors la construction d’autres modèles. Pour saisir cela, il faut avoir en tête la chronologie des modélisations successives que nous avons suivie. C’est ce que nous verrons dans la section suivante.

2.3.1.3 Une chronohistoire de notre modélisation

Maintenant que nous avons évoqué la chronologie de modélisation, il nous faut lever le voile sur les 6 modèles que nous avons développés. Nous avons fait le choix méthodologique de nous investir dans plusieurs modèles fonctionnant en constellation, mais découplés les uns des autres. Ce choix a été guidé par deux facteurs majeurs :

1. Nous avons refusé d’imaginer un modèle monolithique qui aurait nécessité la prise en compte d’un très grand nombre de paramètres, pas nécessairement accessible, et

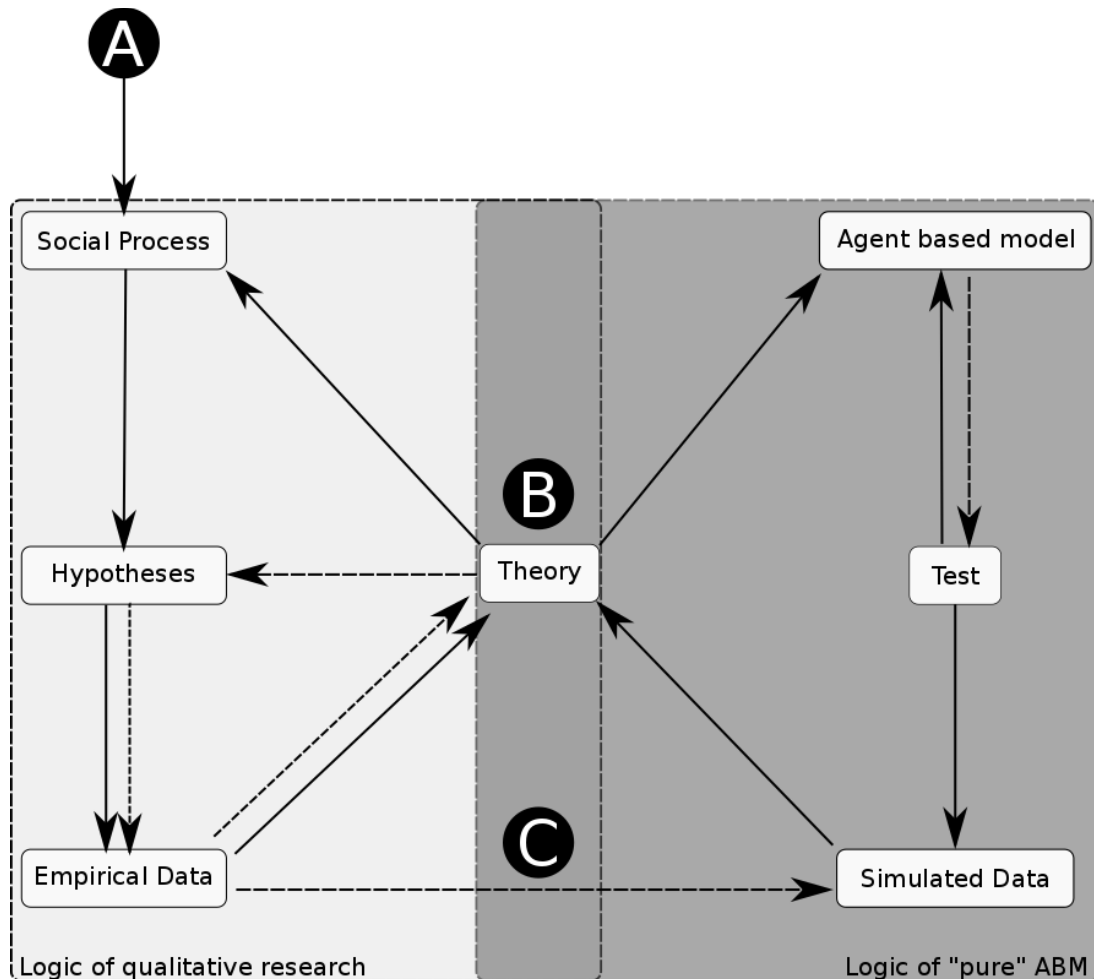


FIGURE 2.8 – Cadre méthodologique de la logique de la recherche qualitative couplée aux SMA selon TUBARO et A. A. CASILLI (2010) et la révision proposée par A. CASILLI *et al.* (2014). (A) représente le point de départ du processus de recherche. Une fois les hypothèses de recherche et les premiers résultats empiriques formulés, une théorie peut émerger (B). Un système à base d'agents peut alors être formalisé comme *proof of concept*, testé et corrigé. Des étapes supplémentaires peuvent être ajoutées pour intégrer des validations empiriques des données.

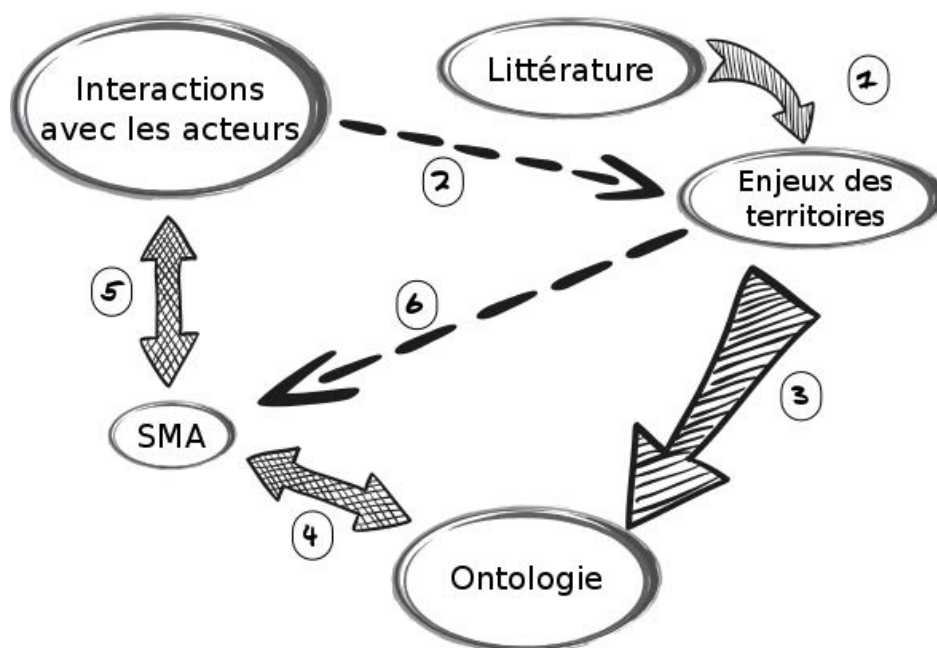


FIGURE 2.9 – Interaction entre le travail de terrain, la modélisation ontologique et les systèmes multi-agents

une validation plus qu'hasardeuse. Ce type de modèle ne se prête pas forcément à une implémentation dans Netlogo (WILENSKY 1999) ;

2. Au fur et à mesure du travail de terrain, différentes questions émanant du territoire se sont concrétisées. Les premières ont été formulées plutôt par les techniciens intervenant sur les AOC Banyuls et Collioure, puis d'autres ont émané des viticulteurs. Toutefois, ces deux types de questionnement n'impliquaient pas la même échelle de réflexion.

Ces six modèles et leur temporalité sont représentés sur la figure 2.10. Il y a évidemment une certaine filiation entre certains de ces modèles : i) d'un point de vue théorique quand les questionnements de l'un font émerger un autre questionnement connexe, mais nécessitant un nouveau cadre d'interaction et donc de programmation, ii) d'un point de vue formel dans la manière dont les interactions ont été « codées ». Ce second point reflète mon apprentissage au fil de l'eau des différents langages de programmation R (TEAM 2014), Netlogo (WILENSKY 1999), openMoLE (REUILLON, LECLAIRE *et al.* 2013) utilisés pour effectuer ce travail.

En comprend alors que la temporalité de la modélisation et de l'apprentissage technique est allée de pair avec la complexification et l'intégration de données. Sur la figure 2.11, nous avons projeté sur l'axe des abscisses la complexité des volumes des données quantitatives mobilisées pour la construction des modèles et en ordonnée la complexité des données quantitatives. Se dégagent alors deux groupes largement liés *a posteriori* à la temporalité

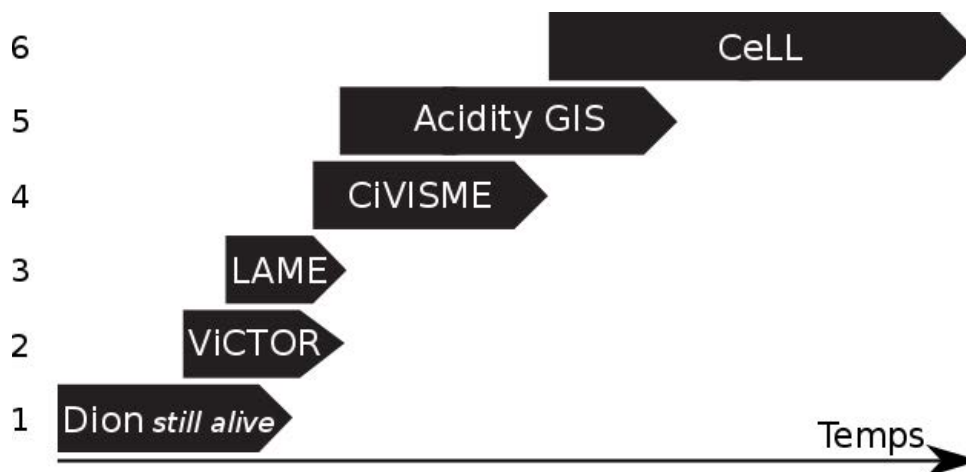


FIGURE 2.10 – Temporalité de la construction des six modèles présentés ici, ramenée au temps de la thèse

de ce travail. Les premiers modèles réalisés en début de thèse se sont basés sur un volume faible de données quantitatives et un nombre d'observations limité, alors que ceux réalisés en fin de thèse mobilisent des données plus complexes tant qualitatives que quantitatives. Nous allons maintenant décrire succinctement les différents modèles présents sur la figure 2.10.

L'influence du marché sur le territoire

*Dion still alive*²⁹. Ce modèle reflète l'une de nos premières préoccupations. En effet, il nous est apparu très tôt dans ce travail de thèse, en participant à des ateliers interdisciplinaires sur la vigne et le vin, que les travaux de R. DION étaient souvent remis en question. Nous avons donc considéré qu'il serait intéressant d'un point de vue épistémologique, de réinterroger ces écrits par l'intermédiaire des SMA, à la manière des travaux de BANOS, MORENO *et al.* (2011) sur Christaller. Notre objectif est d'identifier et de clarifier les insuffisances de ce modèle historique.

Le modèle *Dion still alive* a été développé pour représenter des comportements à l'échelle d'une région (le quart Sud-Ouest de la France par exemple). Il met en relation 2 types d'agents : un marché extérieur au territoire faisant peser une demande sur un réseau de marché intérieur. Dans ce modèle, nous nous sommes intéressés à l'influence de la demande sur la structuration de la qualité, ce qui nous a amenés à revalider expérimenta-

29. Le nom de ce modèle fait directement référence aux travaux de BANOS, MORENO *et al.* (2011) qui proposent, suite à une « disqualification abrupte de travaux classiques de la théorie géographique », de revisiter « de manière renouvelée ces travaux fondateurs de leur discipline ». Le modèle, qui permet aux auteurs ce travail disciplinaire introspectif a été développé lors de la session 3 du réseau MAPS (c.f. <http://maps.hypotheses.org/> site consulté le 10 janvier 2015), est intitulé *Christaller still alive*. Il a été développé avec Marius CHEVALLIER et a donné lieu à plusieurs publications (E. DELAY, CHEVALLIER *et al.* 2014 ; E. DELAY et CHEVALLIER 2015)

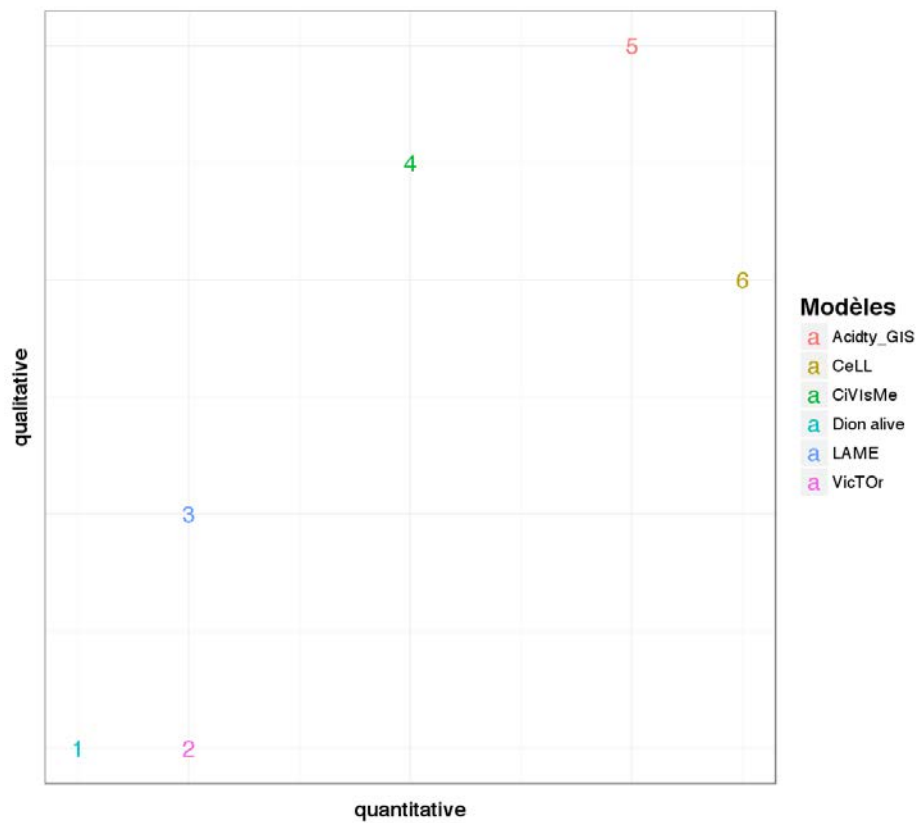


FIGURE 2.11 – Positionnement des six modèles à base d’agents par rapport aux données qualitatives et quantitatives qu’ils mobilisent (en s’inspirant du graphe B de ROBINSON *et al.* (2007)). La numérotation de 1 à 5 correspond à la chronologie de construction des modèles

lement les hypothèses de DION (1952). Mais le modèle permet également d'aller au-delà des hypothèses formulées au XX^e siècle, par le fait qu'il interroge le modélisateur sur le comportement formel de la notion de qualité sur le temps long, en disqualifiant une vision fixiste de la qualité pour lui préférer une forme en constante évolution et donc infinie.

*ViCTOR*³⁰. Ce modèle hérite des questions laissées en suspend par le modèle *Dion still alive* et est largement enrichi par les questionnements issus des travaux de S. LETRUCQ et X. RODIER. Si son prédécesseur permettait d'encren la réflexion à l'échelle de la région, *ViCTOR*, quant à lui, questionne quelques communes, mais en considérant toujours les effets du marché. On mobilise ici des villes/villages qui vont utiliser des ressources agricoles sous forme d'environnement et un marché extérieur. Dans ce modèle nous ne parlons pas de qualité, mais nous nous intéressons cette fois à des cultures en concurrence : i) céréaliculture ii) viticulture. L'objectif est de tester les effets de l'hétérogénéité locale sur la structuration des types d'agriculture sur le territoire. Nous nous demandons également quel type de formalisme peut s'appliquer au marché des productions agricoles pour comprendre comment ce dernier influence ou non la structure territoriale.

Dans ces deux modèles, les territoires de montagne ou de fortes pentes entre en considération en tant qu'espaces attractifs pour la viticulture. Cette hypothèse est largement basée sur les travaux de DION (*ibid.*), (1959) ou encore MAILLARD (1998), MESSIEZ (2002) et PAUL (2008) au regard de leurs approches historiques de différentes régions françaises.

Les dynamiques de paysage à mezo échelle

*LAME*³¹. Il diffère des deux précédents, car il a été construit sur une problématique issue des territoires. En effet, quand nous nous interrogeons sur les formes que peuvent prendre les îlots de culture dans le paysage, arrive rapidement la question des mécanismes socio-spatiaux qui les sous-tendent. Ce modèle se concentre donc sur les dynamiques foncières et sur les échanges parcellaires. Les agents en présence sont les viticulteurs qui vont tenter d'optimiser leur parcellaire, et le village représente la place de marché pour s'échanger des parcelles.

C'est un modèle pensé à l'échelle de quelques communes, mettant en lumière les aspirations individuelles qui guident les dynamiques paysagères. Nous nous sommes particulièrement intéressés au poids que peut prendre l'accessibilité ou la pente moyenne des parcelles dans les processus de choix des viticulteurs à investir ou abandonner/revendre une parcelle.

*CiVISME*³². Ce modèle hérite des résultats du précédent modèle auquel nous avons

30. Pour Viticulture en Touraine, développée lors d'un séjour au LAT (Laboratoire Archéologie et Territoires qui fait partie de l'UMR CNRS 7324 CITERES) avec Samuel LETURCQ et Xavier RODIER.

31. Pour *LAandscape & Mountain Economics* dont la première version a été développée lors de l'Agent-Based Model Summer School 2012 (<http://cormas.cirad.fr/en/formati/september2012.htm> site consulté le 10 janvier 2015) avec Jeremy Bourgoïn (CIRAD) et Sylvie MORARDET (IRSTEA). Il s'agit d'un modèle que nous avons remobilisé pour travailler sur le Trentino dans ZOTTELE et E. DELAY (2015)

32. Pour *Cooperative & Viticulture in Mountain Economie* développée avec Marius CHEVALLIER et Éric

cherché à ajouter une composante coopérative qui autorise les viticulteurs à réduire leurs coûts de production en intégrant une coopérative. Nous sommes donc dans une configuration avec des agents viticulteurs, une coopérative et un village. Ce modèle nous permet de tester l'impact de la coopération par rapport à un environnement où la coopération n'est pas possible.

En travaillant entre les contextes conjoints de la côte vermeille et du *val di Cembra*, nous sont apparues deux perceptions différentes de la coopération par les viticulteurs. Dans le premier cas, sur les AOC de Banyuls et Collioure, la coopération est vécue relativement négativement tandis que pour le *val di Cembra*, la question ne se pose pas (c.f. part 1.3). Cette distinction nous a amenés à introduire une variable « proxi », symbolisant cette vision du territoire pour pouvoir considérer différents résultats de simulation et proposer une lecture des formes socio-spatiales produites.

Les préoccupations à petite échelle

Les modèles présentés ici ont été construits dans une démarche *bottom-up* à partir de préoccupations glanées sur les territoires.

*Acidity GIS*³³. Ce modèle est orienté vers la compréhension et l'anticipation des contraintes liées au changement climatique. Ces préoccupations ne sont pas directement issues des viticulteurs qui constatent le changement climatique par intermittence lors d'épisodes climatiques inhabituels (accidents climatiques). Les techniciens des coopératives ou des organismes techniques sont, pour leur part, sensibles à ces problématiques. Ce modèle a été construit à partir de leurs différentes remarques, en essayant de convertir en avantages les contraintes imposées par la pente dans le cadre du changement climatique. Ce modèle est composé de viticulteurs et d'une coopérative. La coopérative est l'agent qui a conscience du changement climatique. Elle va essayer d'orienter la dynamique du territoire par la mise en place de paiements différenciés. Dans ce modèle, on teste donc la pertinence de l'utilisation de la coopérative comme agent agrégé des viticulteurs pour adapter le territoire au changement climatique. Nous sommes également capables de tester l'effet de différents *scenarii* de paiements différenciés et leurs effets sur la structure spatiale de la viticulture.

*CeLL*³⁴ Ce modèle émane des préoccupations des viticulteurs qui, sur nos deux territoires, doivent faire face à des problèmes de parasitisme de la vigne et se questionnent sur les processus de diffusion des maladies/parasites. Les problèmes phytosanitaires sont l'une des principales préoccupations des viticulteurs. Le choix du parasite a été guidé par trois facteurs : i) le parasite est présent dans les deux territoires d'étude

ROUVELLAC (GEOLAB) et Fabio ZOTTELE (Fondazion E.MACH).

33. Pas de sens caché ici, un modèle développé avec Cyril PIOUS (CIRAD) et Hervé QUÉNOL (Laboratoire LETG-Rennes-COSTEL)

34. Pour *Confusion Landscape* & *Lobesia* développé avec Amelia CAFFARRA (SupAgro Montpellier).

et donc susceptible d'éveiller l'intérêt d'un grand nombre de viticulteurs, ii) le GDA du cru Banyuls et des Albères effectuée depuis 1999 des comptages de vols de *Lobesia botrana* grâce à des pièges à phéromones placés sur des parcelles témoins sur le cru, iii) *L. botrana* est un insecte largement thermosensible. Or grâce aux enregistrements des capteurs TERVICLIM, nous avons accès à des données thermiques aux échelles spatiales et temporelles qui nous intéressent. Ce modèle a plusieurs intérêts : i) il doit être considéré comme *proof of concept* de l'intérêt du portage d'un modèle statistique a-spatial vers un modèle multi-agents, ii) il permet de proposer un outil pédagogique à destination des viticulteurs pour comprendre l'intérêt de la lutte intégrée iii) il permet, par des méthodes de résolution computationnelle, d'approcher des comportements individuels du papillon, lesquels sont encore obscurs et difficiles à expérimenter en laboratoire ou en plein champ.

Cette partie a été l'occasion d'expliquer la démarche de modélisation poursuivie pour répondre à la problématique et pour positionner nos modèles dans le mouvement de modélisation empirique largement influencé par les théories ancrées. Nous avons choisi une approche de modélisation basée sur une constellation de simulations en fonction des interrogations. La complexité de cette approche réside dans la difficile lisibilité de la problématique générale de notre travail.

En effet, de manière convenue, la recherche de solutions à une problématique est orientée dans une direction. En s'inscrivant dans une approche scientifique *post-normale*, les questions soulevées ne pouvaient se résumer dans un seul modèle. Aussi nous apparaît-il important ici de proposer différents outils intellectuels au lecteur pour lui permettre de se représenter les domaines de « validité » des différents modèles. Aussi, avant de plonger à proprement parler dans leur description, nous proposons, dans un souci de transparence, d'explicitier leur construction et leur positionnement vis-à-vis des courants épistémologiques de la modélisation à base d'agents, mais aussi des concepts mobilisés par les sciences de la vigne et du vin (c.f. chapitre 1).

2.3.2 Une modélisation azimutée

La flexibilité apportée par la modélisation orientée agents peut être problématique, si le modélisateur ne fait l'effort de pédagogie et de transparence de sa méthodologie. Dans notre travail, la question est centrale dans la mesure où nous avons fait le choix d'une constellation de modèles. Cette partie propose donc au lecteur de replacer les différents modèles vis-à-vis du domaine de l'ontologie terroir \Leftrightarrow territoire de la figure 1.4.

Une fois le domaine ontologique de chaque modèle mieux identifié, nous inscrirons ces mêmes modèles dans un espace conceptuel proposé par BANOS et SANDERS (2013) pour pouvoir mieux identifier les différences et les points communs qui les sous-tendent.

2.3.2.1 L'ontologie pour orienter les systèmes multi-agents

Ces dernières années, l'utilisation d'un modèle d'ontologies comme précurseur de modèles à base d'agents se développe. Ainsi LIVET *et al.* (2010) proposent de les utiliser pour définir les domaines empiriques, conceptuels, ou encore le domaine du modèle ; cela dans un souci de transparence et de conformité entre les différents domaines ontologiques utilisés par la démarche empirique.

M. NEUMANN (2015) suggère l'utilisation d'ontologies pour orienter et guider dans la pratique de modélisation et lever le maximum d'ambiguïtés quant aux notions intégrées dans le modèle. Ainsi, les différents modèles que nous avons présentés précédemment (c.f. 2.3.1.3) ont été confrontés à l'ontologie liant le terroir et le territoire (c.f. fig. 1.4) proposée dans la partie 1.1.1.

Cette ontologie organise les concepts qui entrent en jeu dans l'étude des systèmes viticoles. Nous avons identifié sur celle-ci les domaines de nos modèles, ce qui met en lumière des constances difficilement identifiables de manière individuelle. Le fait d'avoir identifié et surligné sur le diagramme de l'ontologie les concepts qui sont mobilisés dans les différents modèles produits nous permet de montrer la spécificité de chacun d'eux par rapport à l'analyse d'ensemble du système.

On constate en premier lieu la nette prédominance de l'espace, et ce quelque soit la distance aux territoires. Cette « centralité » du concept tient au fait que l'espace peut être pensé comme une projection au sol des rapports sociaux concernant la chose viticole (identifiable dans les trois figures : 2.12, 2.13 et 2.14) (AURIAC 2000, p.174).

Les modèles *Dion still alive* et *VIcTOR* (c.f. fig. 2.12) recouvrent des concepts sur la partie « territoire » de l'ontologie. Dans ces deux modèles, on s'intéressera au système viticole à une petite échelle (régionale ou nationale), et plus particulièrement aux conséquences du marché sur l'organisation spatiale des territoires. Cette structuration du territoire sera la conséquence de facteurs locaux (*environmental component* telle que l'hétérogénéité de la topologie ou de l'espace) combinés avec des facteurs sociaux (*social component*) qui eux-mêmes influencent la construction territoriale (régionale ou nationale). Nos agents réflexifs sont des agents agrégés à l'échelle des villes.

Les modèles *LAME* et *CiVIsMe* se jouent à meso échelle (2 ou 3 communes) (c.f. fig. 2.13). Dans ces simulations, on explore les conséquences de l'économie sur la structuration du paysage viticole³⁵. Dans ces cas de figures, les agents sont des viticulteurs qui vont essayer d'optimiser leur parcellaire en fonction des contraintes qui pèsent sur eux. On observe donc bien le changement d'échelle sur l'ontologie du « territoire » avec l'inté-

35. Il existe de multiples définitions du mot paysage. On considérera ici le paysage tel que « l'ensemble des composantes du milieu dont on étudie l'organisation spatiale : types d'unités, dissémination de ces unités sur le territoire étudié, répartition spatiale, liens avec le voisinage, hiérarchisation entre elles » (M.-C. GIRARD et C.-M. GIRARD 2010).

Dion et Victor

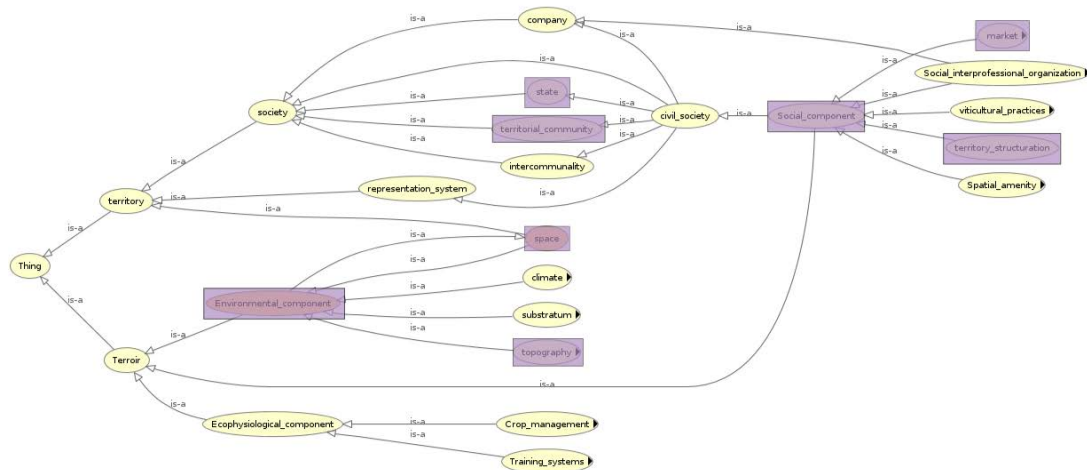


FIGURE 2.12 – Conversion de l'ontologie conceptuelle par rapport aux modèles à petite échelle

gration des échelons territoriaux et communaux, mais également sur celle du « terroir » sur laquelle ces modèles vont permettre de s'intéresser aux formes des exploitations dans l'espace en tant que valeur *proxi* des aménités spatiales que cela laisse imaginer d'un point de vue paysager.

Enfin la figure 2.14 souligne les concepts mobilisés par les modèles acidityGIS et CeLL. Ces modèles sont résolus à grande échelle (infracommunale). Comme nous l'avons déjà évoqué, ils sont le fruit d'une demande mieux identifiée sur le territoire, et nous voyons qu'ils vont mobiliser plus de sous-concepts de l'ontologie « terroir » que les autres modèles. Dans acidityGIS, les agents sont les viticulteurs comme dans les deux modèles précédents, mais pour CeLL, les agents sont un parasite de la vigne (*L. botrana*). Les viticulteurs n'ont d'existence qu'à l'échelle de leurs parcelles, en décidant s'ils s'associent ou non au groupe des méthodes de lutte intégrée.

Le rapprochement des modèles avec l'ontologie terroir \Leftrightarrow territoire de la figure 1.4 met en lumière les différents domaines recouverts par nos modèles. Si certaines parties se recouvrent, d'autres sont propres à chaque groupe. Le recouvrement nous laisse voir la filiation certaine qui les unit, mais on comprend également les difficultés de les rassembler.

2.3.2.2 La grille de lecture du fer à cheval : observation holiste des modèles

Les domaines d'intérêt des différents modèles ayant été évalués dans la partie précédente, il est apparu nécessaire après la description des pratiques de modélisation (c.f. 2.1 et 2.2) de situer nos modèles dans le paysage scientifique des SMA. Il semble donc assez naturel d'essayer de positionner nos modèles avec les outils développés pour la discipline.

LAME et CiViSME

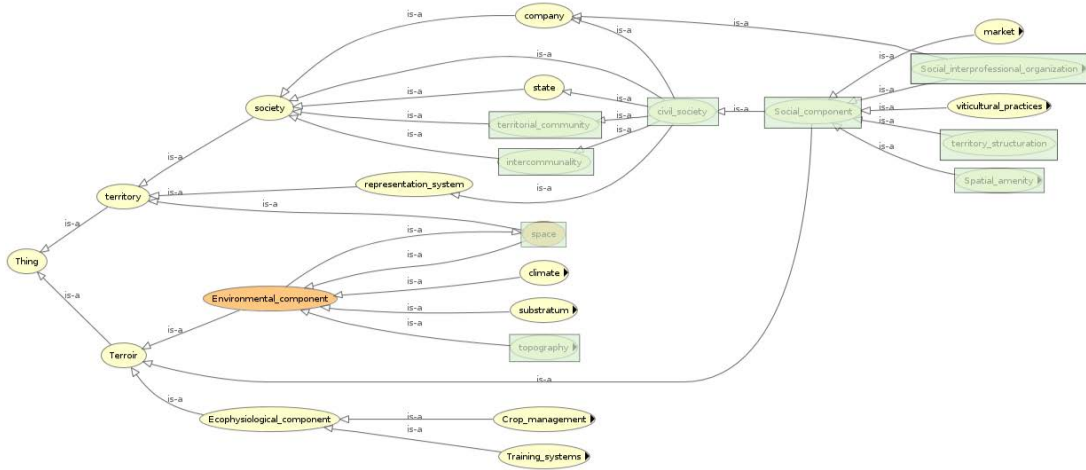


FIGURE 2.13 – Conversion de l'ontologie conceptuelle par rapport aux modèles à meso échelle

AcidityGIS et CeLL

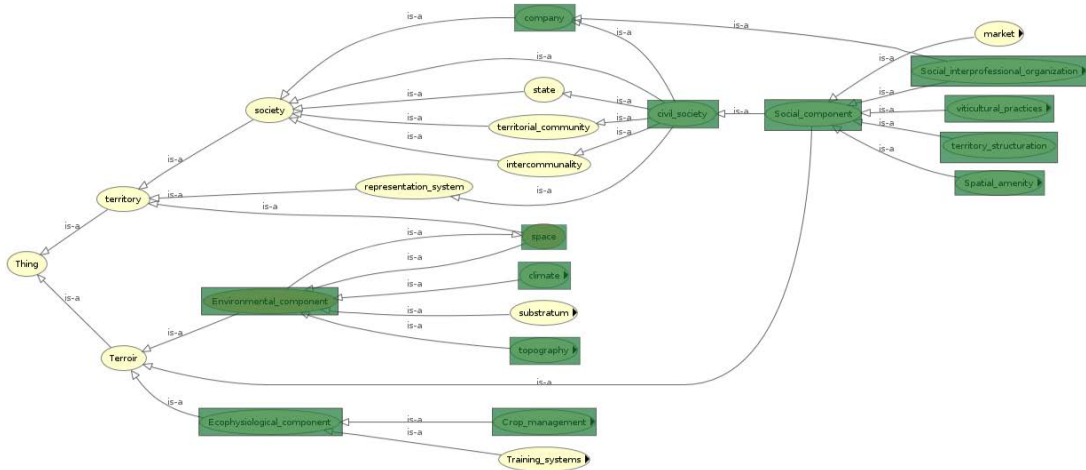


FIGURE 2.14 – Conversion de l'ontologie conceptuelle par rapport aux modèles à grande échelle

BANOS (2013) et BANOS et SANDERS (2013) ont développé, ces dernières années, une grille de lecture en « fer à cheval ». Cette grille de lecture, qui poursuit les travaux de compréhension des modèles émis par BOMMEL (2009, p.229) s’inspirant des propositions de EDMONDS (2007), vise à caractériser un modèle par des graphiques en radar autour de 2 axes : simplicité – absence d’erreur et spécificité – généralité. Si ces derniers visaient à exprimer les différentes composantes intrinsèques au modèle, BANOS et SANDERS (2013) proposent d’utiliser cet espace pour comparer des approches de modélisation. La grille de lecture du « fer à cheval » prétend donc positionner des modèles vis-à-vis de leur niveau d’abstraction et de leur degré de parcimonie.

Le niveau d’abstraction est largement lié au phénomène sur lequel nous travaillons et à la question à laquelle nous tentons de répondre avec ce modèle. En guise d’exemple BANOS et SANDERS (*ibid.*, p.848) proposent de s’intéresser à la ségrégation socio spatiale de l’espace résidentiel.

« Si l’on s’intéresse à une ville donnée, la question pourra être formulée de façon différente : (1) pourquoi la répartition de la population favorisée et défavorisée dans une ville donnée s’organise-t-elle en fonction d’une opposition d’est en ouest ? (2) [...] [en s’abstrayant de la ville] pourquoi observerons nous une organisation centre périphérie dans les villes nord-américaines (3) ou encore, avec un degré d’abstraction plus poussé : pourquoi y a-t-il dans la plupart des villes une forte auto corrélation spatiale dans la répartition de la population en fonction de ses revenus ».

On comprend bien que dans le cas (1) nous serons face à un modèle assez peu stylisé, alors que cette abstraction augmentera avec les questions (2) et (3).

Le degré de parcimonie, quant à lui, concerne l’orientation des processus modélisés par rapport aux préceptes de *KISS* et *KIDS*, en se souvenant néanmoins que tout modèle ne peut être entièrement l’un ou l’autre (EDMONDS et MOSS 2005).

Nous avons appliqué cette grille de lecture (c.f. fig. 2.15) aux six modèles décrits en 2.3.1.3 et sur lesquels nous reviendrons dans les 3, 4 et 5. Elle permet au modélisateur/observateur de pouvoir positionner des modèles les uns par rapport aux autres. Il faut garder à l’esprit que l’exercice a des limites, considérant que ce positionnement n’a de sens que pour un observateur donné et ne fournit pas une information quantitative, mais procède à l’effort de transparence nécessaire pour comprendre les implications que le modélisateur a cherché à explorer au travers de ses modèles.

La première constatation est que le cadre D est vide. Les cadres A, B et C contiennent chacun deux modèles. Le **cadre A** avec les modèles *Dion still alive* et *VIcTOR*, caractérise des modèles relativement génériques qui interrogent les territoires (ici à deux échelles différentes) sur la place de l’économie et du marché dans la structuration de l’espace. Ils sont peu ancrés territorialement et procèdent d’un haut niveau d’abstraction aussi bien

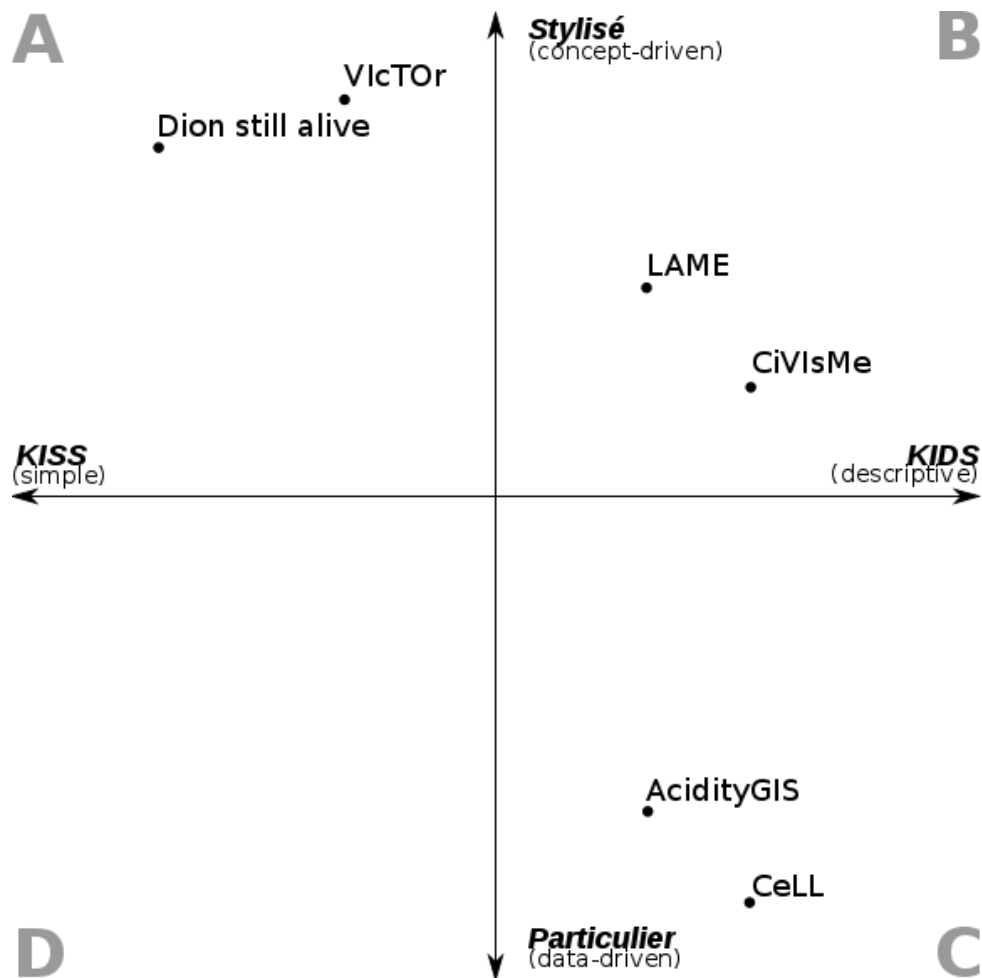


FIGURE 2.15 – Grille de lecture du « fer à cheval » (BANOS et SANDERS 2013) positionnant les différents modèles de cette thèse

territorial que du point de vue des mécanismes mobilisés. Ce type de modèle pousse donc l'observateur (i.e. le scientifique) à réfléchir sur les formes et les dynamiques spatiales transposables à un très grand nombre de vignobles.

Le **cadre B** avec les modèles LAME et CiViSME sont pour nous des modèles intermédiaires dans le mouvement du cadre A au cadre C observable sur la figure 2.15. Ils reprennent de manière plus descriptive des comportements identifiés sur le terrain ainsi que certains paramètres économiques, car ils ont été bâtis sur la base des entretiens et des observations, mais ils restent encore stylisés. En effet, nous nous sommes efforcés de les construire de manière suffisamment générique pour penser à la fois le vignoble de la côte vermeille et celui du *val di Cembra*. Si l'espace joue un rôle important, attendu que nous les avons construits de manière à polariser notre attention de manière explicite sur l'effet de la pente sur le système, ils n'ont pas besoin d'être ancrés territorialement pour apporter des informations. On ne peut donc pas encore les faire entrer dans la catégorie des modèles guidés par les données (*data-driven*).

Enfin le **cadre C** contenant les modèles AcidityGIS et CeLL regroupe des modèles largement construits sur la donnée (*data-driven*) et intégrant des processus qui essaient d'être le plus descriptif possible. Si l'exercice est très intéressant, les questionnements liés aux modèles émanant directement de questionnements des acteurs locaux, les résultats doivent être interprétés avec précaution. En effet JANSSEN (2009) met en garde sur les limites des modèles *data-driven* en revenant sur l'étude³⁶ de R. L. AXTELL *et al.* (2002) sur l'évolution des populations dans la *Long House Valley*³⁷ sur le temps long.

C'est cette dernière catégorie de modèles qui trouve l'écho le plus important chez les acteurs des territoires, car il donne l'impression aux observateurs de proposer des solutions mobilisables (voire transposables) assez rapidement dans la réalité. En tant que tels ils sont donc à notre avis les plus compliqués en termes de médiation à restituer aux acteurs. Quand BANOS (2013, p.38) propose de :

« Postuler que l'on peut étudier les sociétés à la manière d'un éthologue étudiant une fourmilière ne signifie nullement que les premières se réduisent à la seconde. Bien au contraire, les limites de l'analogie naturaliste permettent à mon sens de mieux appréhender la spécificité des phénomènes sociaux. Au-delà, une telle mise en parallèle ouvre la voie à des horizons méthodologiques renouvelés[...] »

Il nous semble particulièrement important d'insister sur les notions de méthodologies renouvelées, mais de rester critique sur les résultats des simulations.

Nous avons positionné la constellation de modèles que nous avons développée par rap-

36. Ce retour de JANSSEN (2009) sur l'étude de R. L. AXTELL *et al.* (2002) montre que si la rigueur de description et les résultats de l'article restent valides, ils sont largement liés à la calibration du modèle.

37. la *Long House Valley* est une vallée de la zone de *Black Mesa* au Nord-Est de l'Arizona.

port aux concepts propres aux disciplines travaillant sur la viti-viniculture. Cela nous a permis de mettre en lumière les domaines des différents modèles. Nous avons ensuite confronté ces mêmes modèles à la grille proposée par BANOS et SANDERS (2013), soulignant ainsi leurs prérogatives. Il nous paraît important de souligner quelques points : le premier est lié à l'approche géographique qui a guidé notre travail. Nous avons plus spécifiquement travaillé à l'évaluation des implications des composantes environnementales de notre ontologie. Cette composante du terroir permet d'établir un lien clair avec l'ontologie du territoire.

Le second est lié à la question de l'échelle de réflexion du modèle. Dans notre contexte, on pourrait presque tracer un axe supplémentaire à la figure 2.15 liant le cadre A et le C ce qui représenterait l'échelle spatiale de réflexion entre les modèles et soulignerait assez bien la plongée chronologique vers les spécificités qui s'est opérée dans ce travail (c.f. fig 2.11).

Conclusion

Ce chapitre épistémologique et méthodologique a présenté les usages faits de la modélisation de manière générale en science, son appropriation par les sciences humaines et sociales et par la géographie en particulier. Ce besoin de simplifier, formaliser et théoriser perdure quand on passe de la modélisation à la simulation en introduisant le temps pour expliciter un phénomène dynamique.

L'ancrage épistémologique dans la modélisation et la simulation nous a ensuite permis de saisir les objectifs théoriques qui ont favorisé l'émergence de la théorie des systèmes complexes. Ce nouveau champ de recherche qui, au fur et à mesure de sa structuration, s'est doté d'outils tels que les automates cellulaires et plus tard les systèmes multi-agents, a offert à la géographie des théories, des concepts et des outils nouveaux. Ce chapitre détaille également notre méthodologie et nos choix de modélisation en approchant la complexité des systèmes étudiés par une constellation de modèles plutôt que d'opter pour une approche monolithique. La structure de cette constellation a également été réfléchi. Ainsi est-elle formée de modèles tantôt *KISS*, tantôt *KIDS*; tantôt stylisés, tantôt dédiés à un cas particulier. La constellation dans sa globalité recouvre largement l'ensemble du domaine de notre ontologie, mais chacun s'attèle à en analyser une partie.

C'est pourquoi la description de la logique d'ensemble de cette constellation de modèle permet d'entrer plus sereinement, aux chapitres suivants, dans les détails d'implémentation, les résultats de simulation et les implications pour la compréhension des dynamiques réelles. Cette exploration des différents modèles se fera en suivant un mouvement allant des échelles les plus grandes aux échelles les plus petites, du chapitre 3 au chapitre 5.