

L'économie comme un système complexe

Understanding the nature of the behavior through time of economic forces may someday become synonymous with being able to program and simulate the processes determining the behavior of these variables.

Cohen (1960)

Nous avons pour projet la construction d'un modèle d'économie de marché, dans lequel nous ne souhaitons introduire aucun rapport causal entre variables macro-économiques. Nous voulons au contraire placer les rapports de causalité au niveau des agents eux-mêmes : chaque agent n'obéissant qu'aux règles définissant son comportement poursuivrait son but propre, en fonction de son état individuel et de sa perception de son environnement proche, sans se préoccuper le moins du monde de l'équilibre général du système. La caractéristique première du modèle que nous voulons construire est donc une *décentralisation radicale*.

Dans la section 2.1, nous montrons que notre façon d'aborder la modélisation des économies de marché nous renvoie aux notions de *système complexe* et de *comportement émergent*. Nous nous intéressons alors aux *modèles à base d'agents multiples*, technique venue de la recherche en intelligence artificielle. Nous montrons que ces modèles sont conçus pour rendre compte de la dynamique de systèmes complexes formés de grands nombres d'agents autonomes et hétérogènes et que leur application

à la macroéconomie paraît prometteuse même si elle n'en est qu'à ses débuts.

Dans la section 2.2, nous nous intéressons à la question de la modélisation du comportement des agents économiques dans des modèles dynamiques complexes. Dans un système complexe, l'incertitude est telle que les calculs d'optimisation propres à la microéconomie néoclassique sont inopérants. Nous devons donc nous tourner vers une autre représentation du comportement des agents économiques, basée sur la notion de *rationalité procédurale*.

Dans la section 2.3, nous nous interrogeons sur le rôle de l'outil informatique dans le développement des modèles à base d'agents multiples. Si l'accroissement toujours plus rapide de la puissance de calcul des ordinateurs a joué un rôle essentiel, le développement de tels modèles n'aurait pas été possible sans l'apparition d'une nouvelle classe de langages de programmation, spécialement conçus pour la modélisation, la simulation et la gestion des systèmes dynamiques complexes. Nous montrons alors que les questions de développement logiciel qui se posent lors de la phase de développement du modèle ne sont pas seulement techniques, mais s'adressent directement à l'économiste.

2.1 Des modèles peuplés d'agents multiples

La complexité des économies de marché est une évidence, cependant la notion même de système complexe nécessite d'être explicitée. Un système complexe peut difficilement être simplifié sans qu'on lui fasse perdre certaines de ses propriétés émergentes ; c'est le principal reproche que l'on peut adresser à l'approche réductionniste sur laquelle sont construits les modèles macroéconomiques couramment utilisés aujourd'hui. Dans cette section, nous verrons comment le développement de l'approche multi-agents permet d'envisager la construction d'une nouvelle classe de modèles macroéconomiques, respectueux de la complexité des systèmes observés, et orientés vers la prévision et l'aide à la décision.

2.1.1 Complexité des économies de marché

La décentralisation de l'activité des agents économiques est un des caractères essentiels des économies de marché. Depuis Adam Smith ¹, on s'étonne de voir l'activité

1. « Contrary to what is usually thought, the very idea that the economy is a (complex) self-organizing system is not a new entry in the toolbox of economists got mixed up in complexity, but it is the key message conveyed in 1776 by the founding father of the discipline, the Scottish moral philosopher Adam Smith [...] » (Gaffeo, Catalano, Clementi, Delli Gatti, Gallegati, et Russo 2008, p. 3)

désordonnée d'une multitude d'agents poursuivant chacun ses buts propres déboucher sur un système capable de se reproduire dans le temps en présentant certaines régularités fortes, comme si des forces invisibles intervenaient pour assurer le retour à un certain « équilibre » après chaque perturbation.

Homéostasie

Cependant la notion d'équilibre, si elle est réduite à l'intersection de deux courbes sur un graphe, paraît un peu trop mécanique pour s'appliquer à la complexité des dynamiques des systèmes économiques réels, dont les capacités d'adaptation rappellent plutôt la capacité des organismes vivants à maintenir leur intégrité physique dans un processus dynamique. Cannon (1932) nomme *homéostasie* cette stabilité de l'organisme des êtres vivants, maintenue par des processus physiologiques coordonnés particulièrement complexes, notion qui n'implique pas l'idée d'immobilité et de stagnation propre aux états d'équilibres physico-chimiques dans lesquels un ensemble de forces connues s'équilibrent. Cannon, qui est un physiologiste, pense que toutes sortes d'organisations complexes — y compris de type économique — sont susceptibles d'abriter des mécanismes d'auto-ajustement homéostatiques semblables à ceux des organismes biologiques.

« It seems not impossible that the means employed by the more highly evolved animals for preserving uniform and stable their internal economy (*i.e.*, for preserving homeostasis) may present some general principles for the establishment, regulation and control of steady states, that would be suggestive for other kinds of organization — even social and industrial — which suffer from distressing perturbations. » (Cannon 1932, p. 24-25)

Canon suggère qu'une étude comparative pourrait montrer que toute organisation complexe comporte de tels mécanismes automatiques d'ajustement (« self-righting adjustments ») destinés à préserver son intégrité.

Complexité

Cependant, comme le note Cannon, les éléments qui composent un organisme vivant « travaillent coopérativement » au maintien de son équilibre dynamique. En revanche, les économies de marché se caractérisent par le comportement concurrent des éléments qui les composent et par l'absence de tout mécanisme supérieur de régulation et de contrôle. Comment est-il possible que de tels systèmes économiques parviennent à maintenir leur équilibre dynamique et à se prémunir contre leur propre désintégration ?

« Why have particular global regularities evolved and persisted in real-world decentralized market economies, despite the absence of top-down planning and control? How, specifically, have these global regularities been generated from the bottom up, through the repeated local interactions of autonomous interacting agents? » (Tsfatsion 2003, p. 2)

Les économies de marchés semblent disposer de propriétés permettant la coordination des actions des agents multiples et concurrents qui la composent, sans que l'analyse permette d'identifier d'organe particulier en mesure d'assurer la coordination observée ; comme si l'ensemble était « supérieur » à la somme des parties. Cette description renvoie à la notion de *système complexe* :

« Roughly, by a complex system I mean one made up of a large number of parts that interact in a nonsimple way. In such systems, the whole is more than the sum of the parts, not in an ultimate, metaphysical sense, but in the important pragmatic sense that, given the properties of the parts and the laws of their interaction, it is not a trivial matter to infer the properties of the whole. » (Simon 1962, p. 468)

Une économie de marché est un système complexe, composé d'un grand nombre de parties (ménages, entreprises...) en interactions directes et décentralisées. Ni l'individualisme qui caractérise ces composants ni les lois de la concurrence qui gouvernent leurs interactions ne nous permettent d'inférer de façon triviale les capacités de ce système à se reproduire de période en période avec une certaine stabilité.

Emergence

On appelle « propriétés émergentes » les propriétés d'un système qui ne sont pas directement déductibles de l'observation des éléments qui le composent (Tsfatsion 2006, Farmer et Geanakoplos 2009).

« Formally, emergence is a central property of dynamic systems based upon interacting autonomous agents. The knowledge of entities' attributes and rules is not sufficient to predict the behaviour of the whole system. » (Phan 2003, p. 14)

Epstein (1999) nous met cependant en garde contre la notion d'émergence, non seulement parce qu'il la juge comme imprécise, mais surtout parce qu'elle se révèle historiquement et idéologiquement marquée, associée à l'« émergentisme classique » britannique apparu dans les années 1920.

« There is an unmistakably anti-scientific — even deistic — flavor to this movement, which claimed *absolute unexplainability* for emergent phenom-

ena. In view of these authors, emergent phenomena are unexplainable in principle. » (Epstein 1999, p. 53)

Pour Epstein, l'émergentisme classique s'efforce de préserver le « vide mystérieux » qui sépare le niveau microéconomique du niveau macroéconomique, alors qu'il s'agit au contraire de le « démystifier en identifiant les micro-spécifications qui sont suffisantes pour générer — de façon robuste et répliquable — le niveau macro (l'ensemble) » (Epstein 1999, p. 55). Comme nous y invitait Simon à propos de la notion de système complexe, on doit donc se garder de toute interprétation absolue ou métaphysique de la notion de propriété émergente².

« Emergence is not an ontological trait inherent in some phenomena; rather it is indicative of the scope of our knowledge at a given time; thus it has no absolute, but a relative character; and what is emergent with respect to the theories available today may lose its emergent status tomorrow. » (Hempel et Oppenheim 1948, p. 263, cité par Epstein 1999, p. 54)

Modéliser les économies complexes

Résumons-nous : nous voyons l'économie de marché comme un système formé d'un grand nombre d'agents autonomes en interactions. Les propriétés homéostatiques de ce système sont des propriétés émergentes, dans la mesure où nous ne pouvons les déduire simplement ou directement du comportement des agents, caractérisé comme non coopératif. L'économie de marché apparaît donc comme un système complexe. Comment alors modéliser une telle économie ?

Modélisation réductionniste : Une première voie, la plus largement empruntée, consiste à tenter de réduire la complexité du réel — et en particulier le caractère décentralisé des interactions entre les agents — de façon à disposer d'un système simplifié auquel on peut appliquer les outils mathématiques dont on dispose. C'est cette solution qui est utilisée par tous les modèles d'équilibre général.

« The general equilibrium theory of Arrow and Debreu can be regarded as an attempt to cut through the complexity of individual interactions and

2. Gloria-Palermo (2011) rapproche la notion de propriété émergente du concept hayekien d'« ordre spontané ». Elle remarque que l'idée de propriété émergente est plus générale que celle d'ordre spontané car pour Hayek l'ordre spontané — celui qui émerge de la libre concurrence — est supposé efficient. En revanche, les propriétés émergentes d'un système complexe n'ont pas d'orientation particulière : elles peuvent tout aussi bien se manifester comme effets pervers ou vertueux.

reduce the invisible hand to a tractable mathematical form. » (Farmer et Geanakoplos 2009, p. 34)

Les simplifications radicales sur lesquels reposent ces modèles sont présentées comme nécessaires et suffisantes pour permettre de reproduire les régularités macroéconomiques observées, dans l’objectif de pouvoir fournir, sinon des prévisions, du moins des indications de politique économique.

Solow, qui prend garde de se définir lui-même comme un économiste néoclassique assez traditionnel (« a quite traditional mainstream economist »), accepte évidemment le principe de simplification à la base de tout effort théorique.

« Economic theory is always and inevitably too simple; that can not be helped. » (Solow 2010, p. 2)

Néanmoins, il met en garde contre le caractère abusif des simplifications sur lesquelles reposent les modèles d’équilibre général les plus avancés, les modèles dynamiques stochastiques d’équilibre général (modèles DSGE) utilisés notamment par les banques centrales comme modèles de décision et de prévision. En particulier, il fait remarquer que ces modèles reposent sur un agent représentatif unique, à la fois « travailleur–propriétaire–consommateur–et ainsi de suite », ce qui conduit nécessairement à représenter l’économie comme un système dans lequel il n’y a pas de conflits d’intérêts, pas d’incompatibilité des anticipations, pas de déceptions. Toute l’économie est traitée comme un individu unique qui essaie consciencieusement et rationnellement de servir au mieux les intérêts de l’agent représentatif, en fonction des circonstances. Pour Solow, des modèles construits sur de telles bases ne peuvent constituer une description satisfaisante d’une économie dont il est évident qu’elle ne poursuit aucun but cohérent ; il est donc parfaitement déraisonnable de suivre les préconisations de politique économique issues de ces modèles.

« A thoughtful person, faced with the thought that economic policy was being pursued on this basis, might reasonably wonder what planet he or she is on. » (Solow 2010, p. 2)

Modélisation constructiviste : Il existe une autre voie qui s’attache d’abord à la compréhension des mécanismes qui relient les comportements individuels au comportement macroéconomique. Parce que ces mécanismes sont complexes, il est très difficile de les réduire à des mécanismes simples sans les fausser. Il s’agit alors, plutôt que de chercher à simplifier ces mécanismes, de tenter de les reconstruire selon ce qu’Epstein appelle une approche « générative »³.

3. Epstein (1999, p. 55) souligne qu’en un sens, cette approche est aussi une forme de réductionnisme, puisqu’elle se propose de rechercher des explications à des phénomènes supposés inexplicables.

« To the generativist — concerned with formation dynamics — it does not suffice to establish that, if deposited in some macroconfiguration, the system will stay there. Rather, the generativist wants an account of the configuration's *attainment by a decentralized system of heterogeneous autonomous agents*. Thus, the motto of *generative social science*, if you will, is: If you didn't grow it, you didn't explain its emergence. » (Epstein 1999, p. 42–43)

Cette recherche d'explications par la reconstruction constitue le premier objectif des *modèles multi-agents*⁴ (Tsfatsion 2003, p. 2). Les modèles multi-agents se distinguent radicalement des modèles classiques. Ce sont par nature des modèles informatiques décentralisés. Ils ne sont pas constitués d'un système d'équations reliant des grandeurs macroéconomiques, système qu'il s'agirait de résoudre pour atteindre le bouclage du modèle. Ils sont constitués d'un grand nombre d'agents en interactions directes et décentralisées, sortes d'automates logiciels relativement simples représentant chacun un acteur du système modélisé, et poursuivant chacun leur but propre.

« An agent-based model is a computerized simulation of a number of decision-makers (agents) and institutions, which interact through prescribed rules. The agents can be as diverse as needed [...] Such models do not rely on the assumption that the economy will move towards a predetermined equilibrium state, as other models do. Instead, at any given time, each agent acts according to its current situation, the state of the world around it and the rules governing its behaviour. » (Farmer et Foley 2009, p. 685)

Rapprochons la définition des modèles multi-agents donnée par Farmer et Foley du projet de « modèle causal » de Robinson⁵. Les deux approches se correspondent étroitement, presque mot pour mot :

- les règles de comportement des agents constituent le point de départ ;
- les agents sont considérés au niveau individuel ;

cables. Pour Colander (2008, p. 4), l'approche de la complexité met aussi en oeuvre des processus de simplification, tout en affirmant qu'il y a des situations où l'on ne peut atteindre la « simplicité structurelle » mais où la science a néanmoins « quelque chose à dire » ; cette approche a ainsi valeur heuristique.

4. En anglais « agent-based models ». Nous verrons (page 53) que ces modèles ne sont en fin de compte pas tant « basés » sur les agents qu'ils en ont l'air. Aussi, nous pensons qu'il vaudrait mieux parler de *modèles peuplés d'agents multiples*. On parle aussi d'« agent-based computational economics », ou *ACE*, pour désigner le mouvement des chercheurs qui développent ce type de modèles dans le champ des sciences économiques.

5. Voir Robinson (1962), citée en introduction, page 14.

- il existe différents types d’agents ;
- les agents sont en interactions directes et décentralisées ;
- les actions des agents ne sont pas soumises à des objectifs supérieurs ;
- il n’y a pas d’équilibre prédéterminé du système.

Si l’on se refuse à considérer les économies de marché comme nécessairement et naturellement équilibrées, on doit s’interroger sur les conditions qui permettent l’apparition éventuelle de l’équilibre, de son maintien et de sa disparition. Les techniques de modélisation à base d’agents multiples apparaissent dès lors indispensables.

« Agent-based computational methods provide the only way in which the self-regulatory capabilities of complex dynamic models can be explored so as to advance our understanding of the adaptive dynamics of actual economies. » (Leijonhufvud 2006, p. 1626)

2.1.2 L’origine des modèles peuplés d’agents multiples

A l’origine, les systèmes multi-agents apparaissent dans le domaine des sciences informatiques, comme un objet de recherche dans le champ de l’intelligence artificielle distribuée. Leur application à la modélisation économique se développe progressivement depuis les années 1980 à partir d’initiatives individuelles et dispersées mais qui gagnent progressivement en force et cohésion, jusqu’à se constituer en « mouvement ».

« Over the last twenty years a different way of doing economics has been slowly emerging. It goes by several labels: complexity economics, computational modeling, agent-based modeling, adaptive economics, research on artificial economies, generative social science — each of these with its own peculiarities, its own followers, and its own nuances. Whatever the label, what is happening, I believe, is more than just the accumulation of computer-based or agent-based studies. It is a movement in economics. » (Arthur 2006, p. 1553)

Ces premières initiatives s’appuyaient sur une série de travaux précurseurs qui doivent être mentionnés⁶.

Le groupe de l’université de Carnegie Mellon

Quoi qu’en dise Axtell (2006, p. 142), nous voyons dans le groupe des chercheurs de l’université de Carnegie Mellon les véritables précurseurs de l’approche multi-

6. Je remercie Leigh Testfatsion pour ses conseils de lecture qui ont orienté mes recherches pour la rédaction de cette section.

agents (Simon 1961, Simon 1955, Simon 1959, Cohen 1960, Cohen et Cyert 1961, Simon 1962, Cyert et March 1963). Il est vrai que ces chercheurs n'ont construit aucun modèle peuplé d'agents multiples. Cependant, leurs travaux dans le domaine de la *rationalité limitée* et de la *rationalité procédurale* ont conduit à des avancées très importantes à la fois d'un point de vue technique (intelligence artificielle) et sociologique (comportement de l'entreprise). Ils sont toujours d'actualité pour modéliser le comportement des agents qui peuplent les modèles *ACE*⁷.

De plus, ils sont les véritables introducteurs de la programmation informatique en économie, non seulement d'un point de vue technique (pour l'implémentation des modèles et la simulation) mais aussi en tant que « langage théorique naturel » pour la description des processus à l'oeuvre au sein des systèmes économiques complexes⁸.

Enfin, selon nous, c'est un membre de leur groupe (Cohen 1960) qui donne la première description d'un projet de modèle macroéconomique multi-agents⁹ :

« *Implications for Aggregate Economic Models*: Even for those economists who are not fundamentally interested in the internal operations of firms, it is quite possible that a much more intensive study of individual entrepreneurial behavior may furnish a very useful basis on which to formulate aggregate models of the economic system which could provide better forecasts of over-all economic behavior than we are now able to produce. » (Cohen 1960, p. 536)

Cohen envisage explicitement la construction d'un modèle agrégé du système économique, orienté vers la prévision macroéconomique. Ce modèle serait lui-même formé d'un grand nombre de modèles hétérogènes.

« In such an approach to macroeconomic forecasting, we would first have to formulate a variety of models at a microeconomic level which explain the individual actions of specific firms in the economy. In order to obtain adequate descriptions of the behavior of individual firms, it might conceivably be necessary to have as many models as there are firms; i.e., a special model for each firm. We doubt that this will be the case, however. Probably a relatively small number of basic models, perhaps something

7. Nous reviendrons sur cette question dans la section consacrée aux problèmes théoriques posés par la modélisation du comportement d'agents autonomes dans un environnement dynamique et complexe (page 35 et suivantes).

8. Nous reviendrons sur cette idée dans la section consacrée à la question logicielle (page 42).

9. L'article de Cohen est cependant totalement méconnu. Leigh Tesfatsion, à qui nous l'avons signalé, partage notre enthousiasme pour ce lointain précurseur : « What prevision Cohen had! Although he did not himself attempt any actual "agent-based" modeling in this paper, he correctly anticipated many of the challenges that would arise. » (Tesfatsion, correspondance).

in the order of a dozen, will adequately describe the relevant aspects of each individual firm's actions. » (Cohen 1960, p. 536–537)

Le comportement macroéconomique du modèle projeté serait le résultat des interactions entre les entreprises qui le composent, chacune agissant sur une base individuelle.

« All of these basic models of individual firms' behavior can then be incorporated into an over-all computer model. This complete model can simulate the actions of each firm (or at least of a sufficiently large number of firms) and the interactions among firms which comprise the behavior of industry variables. » (Cohen 1960, p. 537)

Si 50 ans plus tard, le projet de Cohen semble enfin à portée de main, c'est en grande partie grâce aux progrès théoriques intervenus entre temps.

Thomas C. Schelling

Bien que Shelling n'ait pas utilisé d'ordinateur pour ses premières simulations, son modèle de ségrégation spatiale (Schelling 1971) tient une place très importante dans la littérature des « agent-based computational economics » en tant que modèle pédagogique. Un effet, ce modèle permet d'illustrer à la fois concrètement (la ségrégation spatiale est un fait social) et théoriquement (le modèle est d'une grande simplicité) les notions de système complexe (ici un espace urbain avec une population hétérogène) et d'émergence (ici la formation de quartiers de population homogène, malgré un comportement individuel peu ségrégationniste).

Avec son modèle, Schelling entend montrer à l'oeuvre des mécanismes qui convertissent le comportement d'individus inorganisés en un résultat collectif qui n'a pas de contrepartie identifiable au niveau individuel. Parmi les autres exemples de tels mécanismes, Schelling cite les « activités libres de marché » dont il souligne que les résultats ne correspondent « à aucun choix collectif conscient » (Schelling 1971, p. 145).

John H. Holland

C'est dans le domaine plus abstrait de l'intelligence artificielle que se situe l'apport de Holland (1975), avec l'invention des *algorithmes génétiques*. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur la métaphore de la génétique et de l'évolution naturelle. Ils intéressent à double titre les constructeurs de modèles multi-agents :

- Dans leur principe : Un algorithme génétique s’appuie sur une population d’individus répartis dans l’espace de recherche. Cette population, soumise à des opérations réitérées de sélection, de croisement et de mutation, va progressivement converger vers une solution du problème modélisé comme une fonction à optimiser (Osman et Kelly 1996, Alliot et Durand 2005, Chinneck 2006). Le principe des algorithmes génétiques est donc proche de celui des systèmes multi-agents.
- Dans leurs applications : Les algorithmes génétiques sont une des principales techniques utilisées pour modéliser les capacités d’apprentissage individuelles et collectives dans les modèles à base d’agents multiples (Arifovic 2000, Vallée et Yildizoglu 2004, Brenner 2006).

Nous reviendrons sur la question des algorithmes génétiques à la fin de notre travail ¹⁰, lorsque nous intégrerons à notre modèle un algorithme évolutionnaire dérivé de ces algorithmes pour renforcer l’autonomie de certains des agents.

Robert Axelrod et William D. Hamilton

Dans un champ voisin, Axelrod et Hamilton se sont intéressés à l’*évolution de la coopération* (Axelrod et Hamilton 1981, Axelrod 1984). Comment est-il possible, puisque les lois de l’évolution sont dominées par le principe de la sélection naturelle des individus, que des stratégies de coopération soient apparues et se soient maintenues ? Pour étudier cette question, les auteurs ont utilisé la situation classique du jeu du prisonnier pour faire s’affronter dans des tournois répétés différentes stratégies coopératives et non coopératives. Les auteurs montrent comment un petit groupe de stratégies bienveillantes peut ainsi progressivement s’imposer comme stratégie dominante et même résister aux tentatives d’invasion de stratégies plus agressives.

Comme dans les algorithmes génétiques de Holland, les travaux d’Axelrod et Hamilton s’appuient sur la compétition entre un grand nombre d’individus en interactions directes et décentralisées. Comme dans le modèle de ségrégation spatiale de Schelling, ils permettent d’observer l’émergence d’un comportement macroscopique non déductible des propriétés microscopiques du système.

Christopher Langton

Enfin, le concept de *vie artificielle* développé par Langton (1986) vient compléter le dispositif théorique. En utilisant la métaphore de la chimie de synthèse, Langton défend l’idée de la possibilité de synthétiser la vie, d’abord (mais pas seulement) sous

10. Voir chapitre 11, page 286.

la forme d'automates cellulaires résidant dans l'espace abstrait de la mémoire d'un ordinateur. Les « automates virtuels » de Langton se rapprochent encore plus de la notion d'agent autonome, par exemple lorsque Langton les utilise pour modéliser des sociétés d'insectes électroniques.

Il est donc possible de « mettre en culture » dans l'espace virtuel de la mémoire de l'ordinateur des sociétés artificielles peuplées d'automates multiples — représentant des cellules ou des insectes — un peu comme on met en culture des colonies de cellules dans une boîte de Pétri. Pourquoi alors ne pas tenter de faire de même avec des sociétés d'agents économiques ? Avec des macroéconomies ?

2.1.3 Macroéconomie et modèles multi-agents

Un courant critique

Les premiers modèles multi-agents développés dans le champ des sciences économiques étaient utilisés pour relâcher une hypothèse isolée des modèles néoclassiques conventionnels. Cependant, on ne peut tirer tous les avantages de la modélisation à base d'agents multiples si on reste respectueux du cadre théorique du *mainstream* (Axtell 2004, p. 3–4). En effet, alors que dans la plupart des disciplines les modèles multi-agents se sont intégrés comme des compléments des formalismes classiques (Phan 2006), dans le domaine économique, et surtout dans le domaine de la macroéconomie, la plupart des auteurs partisans de l'approche multi-agents expriment de sévères critiques vis-à-vis de l'approche dominante et de sa traduction la plus avancée en matière de modèles de prévision et de décision — les modèles DSGE.

« [...] there can be little doubt today that the current generation of models is so badly misspecified and inappropriately solved that they are little more than caricatures of any real economy. » (Axtell 2004, p. 16)

L'agent représentatif : Parmi les hypothèses théoriques sur lesquelles reposent les modèles d'équilibre général, la notion d'*agent représentatif* focalise les critiques des partisans de la complexité (Kirman 1992, Gallegati et Kirman 1999, Colander, Howitt, Kirman, Leijonhufvud, et Mehrling 2008, Stiglitz et Gallegati 2011)¹¹. Cette

11. Leurs critiques sont proches de la critique des robinsonades macroéconomiques par Tobin (1991) :

« Real Business Cycle models concern Robinson Crusoe economies. A single representative individual is making choices for the whole economy. This simplification enables the model-builder to derive behavior explicitly from rational optimization subject only to constraints of resource availabilities and technology » (Tobin 1991, p. 14)

notion, développée pour contourner les infranchissables difficultés posées par la question de l'agrégation des comportements individuels (Colander *et al.* 2008, p. 236), consiste à réduire le comportement du système économique au comportement d'un seul agent.

« In short, the [representative agent] framework of the DSGE models adopts the most extreme form of conceptual reductionism in which macroeconomics and the financial network are reduced to the behavior of an individual agent. The [representative agent] in economics tantamount to saying that “macroeconomics equals microeconomics.” » (Stiglitz et Gallegati 2011)

L'usage de la notion d'agent représentatif permet de faire abstraction des interactions entre les agents. A partir du moment où l'on considère que l'économie n'est plus peuplée que d'un seul agent, la question des conditions de coordination des actions des agents est évacuée ; la coordination est postulée (Axtell 2004, p. 10).

L'« équilibre » macroéconomique : Le « marché » ne peut être invoqué comme organisme permettant la coordination des agents, parce qu'il est lui aussi modélisé de façon très irréaliste. Là encore, la coordination est postulée : après avoir émis les hypothèses nécessaires à l'existence d'un équilibre unique, on calcule les conditions de cet équilibre, et ce n'est qu'à cet instant que les transactions peuvent avoir lieu.

« For if the model does not allow people to act without knowing the equilibrium value of some variable, then someone must have computed that equilibrium value a priori. In such a model there is no way to describe out-of-equilibrium behavior, and the problem of reconciling peoples' independently conceived plans is assumed to be solved by some unspecified mechanism that uses no scarce resources. » (Howitt 2008, p. 158)

Comme le font remarquer Colander *et al.* (2008), les modèles d'équilibre général ne sont pas complexes, mais les calculs pour les résoudre sont très compliqués. Axtell (2005) montre que, malgré les simplifications radicales des hypothèses de comportement des agents sur le marché, la « complexité de l'échange walrasien » est telle que le calcul des prix d'équilibre sera extrêmement difficile pour l'hypothétique commissaire-priseur chargé de coordonner l'offre et la demande.

« Arrow-Debreu equilibria are sufficiently difficult to compute that the Walrasian picture of market behaviour is simply not plausible. » (Axtell 2005, p. 197)

Les crises : Selon Stiglitz et Gallegati (2011), la crise économique actuelle est l'un des nombreux facteurs qui conduisent à s'interroger sur la solidité et sur les limites de l'approche du « mainstream ». Les auteurs favorables à une approche constructive de la macroéconomie remarquent que les modèles construits sur les bases théoriques de l'équilibre général sont incapables de rendre compte des changements brutaux de régimes et des crises qui affectent de façon imprévisible les économies de marché.

« The best models [policy-makers] have are of two types, both with fatal flaws. Type one is econometric: empirical statistical models that are fitted to past data. These successfully forecast a few quarters ahead as long as things stay more or less the same, but fail in the face of great change. Type two goes by the name of “dynamic stochastic general equilibrium”. These models assume a perfect world, and by their very nature rule out crises of the type we are experiencing now. » (Farmer et Foley 2009, p. 685)

Or, ce n'est pas parce que des événements sont imprévisibles qu'ils sont inexplicables. Ainsi, bien que les chercheurs soient incapables de prévoir avec précision les tremblements de terre, la théorie de la tectonique des plaques ne les laisse pas inexplicables (Epstein 1999, p. 55). La crise économique et financière actuelle n'a pas seulement révélé le besoin de repenser fondamentalement la façon de réguler les systèmes financiers ; elle a aussi fait éclater au grand jour la faillite collective des économistes (Colander, Föllmer, Haas, Goldberg, Juselius, Kirman, Lux, et Sloth 2009, p. 2).

Pour une macroéconomie multi-agents

Pour nous, cependant, les partisans d'une approche centrée sur la complexité des économies de marchés ne devraient pas passer trop de temps à critiquer les modèles d'équilibre général, dont les limites sont bien connues, y compris de leurs partisans. L'important est de construire des modèles peuplés d'agents multiples constituant une alternative valable aux modèles existants, en particulier pour la décision et la prévision.

Bien sûr, les plus chauds partisans de l'approche multi-agents se projettent dans l'avenir et voient dans leurs modèles les prémisses d'un grand bouleversement théorique (Axtell 2004, Arthur 2006, Gaffeo, Catalano, Clementi, Delli Gatti, Gallegati, et Russo 2008, Farmer et Foley 2009, Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010).

« [...] this movement is not a minor adjunct to neoclassical economics; it is something more than this. It is a shift from looking at economic problems at equilibrium to looking at such problems out of equilibrium,

a shift to a more general economics — an out-of-equilibrium economics. »
(Arthur 2006, p. 1553)

Sur la base de ce mouvement théorique, on peut imaginer des modèles massivement multi-agents et ultra-réalistes, capables d’explorer quantitativement les réactions probables des systèmes économiques selon différents scénarios. Ces modèles pourraient contester aux modèles DSGE la place de modèles de décision et de prévision auprès des décideurs économiques.

« In principle it might even be possible to create an agent-based economic model capable of making useful forecasts of the real economy, although this is ambitious. » (Farmer et Foley 2009, p. 686)

Nous en sommes encore loin. Malgré des tentatives sans cesse plus nombreuses et plus audacieuses, les modèles macroéconomiques multi-agents restent des modèles de recherche et ne peuvent *pour le moment* aucunement prétendre pouvoir fournir des préconisations de politique économique.

« At present, [agent-based models] are still far too simple to bring directly to policy; they are, at best, suggestive. Thus, researchers must be careful about drawing anything other than suggestive inferences about macro policy from the models. » (Colander, Howitt, Kirman, Leijonhufvud, et Mehrling 2008, p. 239)

Des modèles peuplés de modèles

Mais qu’est-ce qu’un *agent* ? Selon la définition de Franklin et Graesser (1996), un *agent autonome* est « un système situé dans un environnement tout en en faisant partie, qui perçoit cet environnement et qui agit sur lui, dans le temps, en poursuivant ses propres objectifs, afin de modifier ce qu’il percevra dans le futur ».

Un agent n’est donc pas nécessairement un objet informatique : une entreprise, un ménage du monde réel sont des agents. Inversement, un objet informatique peut être un agent informatique, situé dans un environnement informatique. Moins un agent informatique sera capable d’agir de sa propre initiative, moins il pourra être considéré comme autonome et se rapprochera de la notion de simple automate informatique. Par facilité, nous utiliserons généralement le terme d’*agent* pour désigner un agent électronique autonome, c’est-à-dire un automate informatique doué d’une certaine capacité d’agir sur son environnement, de sa propre initiative, et selon des objectifs qui lui sont propres.

Un agent est un système. Pour qu’il soit doué d’une certaine autonomie, il ne peut être tout à fait simple — sans pour autant être nécessairement complexe, puisqu’un thermostat, d’après Franklin et Graesser (1996, p. 5), est un agent autonome. Un

modèle multi-agents est donc un système complexe peuplé d'un grand nombre de systèmes plus ou moins simples. Mais un modèle multi-agents est aussi le modèle d'un système complexe réel, peuplé d'agents réels. Les agents du modèle sont donc aussi des modèles des agents du monde réel. Un modèle macroéconomique multi-agents est donc *un modèle peuplé de modèles*, eux aussi à construire.

2.2 Des agents autonomes dans un environnement complexe

L'autonomie des agents est un élément très important du modèle que nous voulons construire, puisqu'elle est la propriété individuelle qui correspond au caractère décentralisé des économies de marchés. D'après la définition de Franklin et Graesser (1996), un agent autonome doit agir aujourd'hui sur son environnement dans l'objectif d'obtenir certains retours de l'*environnement futur*¹². Or, le modèle que nous voulons construire est celui d'un système dynamique complexe. Il est peuplé d'agents concurrents, agissant en parallèle. Les agents sont placés dans une situation d'*incertitude stratégique*, et cette incertitude est endogène au modèle.

« In a complex economy, since the consequences of individual choices depend on what all the others are autonomously doing, people take actions into an environment characterized by radical or endogenous uncertainty. »
(Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010, p. 15)

La présente section a pour objet de montrer comment le principe de *rationalité procédurale*, développé par les chercheurs de l'université de Carnegie Mellon, est utile pour modéliser le comportement d'agents autonomes dans le contexte d'incertitude propre aux systèmes complexes.

2.2.1 Des anticipations rationnelles à la rationalité limitée

Dans le contexte d'une économie dynamique et complexe, les calculs traditionnels de maximisation sont inopérants et les agents ne peuvent former d'« anticipations rationnelles » au sens néoclassique du terme¹³. La microéconomie néoclassique ne

12. Cette section reprend en grande partie une discussion développée dans Seppecher (2010b).

13. Sargent souligne que la théorie des anticipations rationnelles repose sur l'hypothèse d'une cohérence absolue des représentations des agents : « The idea of rational expectations has two components : first, that each person's behavior can be described as the outcome of maximizing an objective function subject to perceived constraints ; and second, that the constraints perceived by everybody in the system are mutually consistent. The first part restricts individual behavior to

peut être mobilisée pour modéliser le comportement des agents. Simon (1986, p. 223) recommande d'ailleurs de cesser de débattre de la pertinence de la théorie de la « rationalité substantive » et de la notion de maximisation de fonctions d'utilité : pour Simon, il est évident qu'elles ne permettent pas d'expliquer ni de prévoir le comportement économique.

Il faut donc construire un modèle de rationalité alternatif. Selon Farmer et Geanakoplos (2009), l'une des principales difficultés d'une telle construction réside dans la multiplicité des modèles possibles¹⁴.

« While perfect rationality defines a unique or nearly unique model of the world, there are an infinite number of boundedly rational models. To paraphrase Christopher Sims, once we depart from perfect rationality, there are so many possible models it is easy to become lost in the wilderness of bounded rationality. » (Farmer et Geanakoplos 2009, p. 17)

Selon Farmer et Geanakoplos, le modélisateur se trouve alors placé devant l'alternative suivante :

- soit doter les agents d'un ensemble de règles de réaction simples,
- soit doter les agents de capacités d'apprentissage.

2.2.2 De la rationalité limitée à la rationalité procédurale

La première des solutions proposée par Farmer et Geanakoplos — la modélisation du comportement des agents par l'introduction d'un ensemble de règles simples définies par le modélisateur — est la plus facile à mettre en oeuvre, et c'est sur elle que nous allons nous appuyer pour construire le modèle. La seconde des solutions — l'introduction d'un modèle d'apprentissage — sera discutée dans la troisième partie de ce travail¹⁵.

On classe habituellement dans le champ de la « rationalité limitée », l'ensemble des théories de la décision économique qui ne font pas appel au calcul de probabilité

be optimal according to some perceived constraints, while the second imposes consistency of those perceptions across people. In an economic system, the decisions of one person form parts of the constraints upon others, so that consistency, at least implicitly, requires people to be forming beliefs about others' decisions, about their decision processes, and even about their beliefs. » (Sargent 1993, p. 6)

14. Voir aussi Sargent : « The commitment to equilibrium theorizing made many choices for him by requiring that people be modelled as optimal decision-makers within a commonly understood environment. When we withdraw the assumption of a commonly understood environment, we have to replace it with *something*, and there are so many plausible possibilities ». (Sargent 1993, p. 2)

15. Chapitre 11, page 286.

ni à la maximisation d'une fonction d'utilité (Simon 1997, p. 291). Toutefois, la notion de *rationalité limitée* développée par Simon par opposition à ce qu'il appelle la *rationalité substantive* propre à la microéconomie néoclassique semble impliquer une limitation des capacités cognitives des agents, ce qui n'est pas notre sujet. C'est pourquoi nous préférons nous référer à la notion de *rationalité procédurale*, plus précise et qui correspond mieux au comportement d'agents rationnels placé dans un contexte d'incertitude radicale (Simon 1996, pp. 26–27). Cette *rationalité procédurale* consiste à élaborer et mettre en oeuvre des *heuristiques*, c'est-à-dire des méthodes approximatives de recherche de solution à des problèmes complexes¹⁶.

« Heuristic methods provide an especially powerful problem-solving and decision-making tool for humans who are unassisted by any computer other than their own minds, hence must make radical simplifications to find even approximate solutions. [...] In the face of real-world complexity, the business firm turns to procedure that find good enough answers to questions whose best answers are unknowable. » (Simon 1996, p. 28)

D'ailleurs, selon Cyert et March (1963), les entreprises utilisent *effectivement* des procédures routinières qui permettent de réduire la complexité et l'incertitude.

« In most of the firms we have studied, price and output decisions were almost as routinized as production line decisions. Although the procedures changed over time and the rules were frequently contingent on external feedback, price and output were fixed by recourse to a number of simple operating rules. What was apparently a complex decision problem involving considerable uncertainty was reduced to a rather simple problem with a minimum of uncertainty. » (Cyert et March 1963, p. 104–105)

Parce qu'elle est un moyen rationnel d'affronter l'incertitude, l'utilisation de ces procédures simples et efficaces (« rules of thumb ») n'est pas incompatible avec la définition d'agents intelligents (Howitt 2008, p. 160).

2.2.3 L'ajustement comme principe directeur

Puisque dans un environnement dynamique et complexe, les anticipations sont sans cesse déjouées, les agents doivent sans cesse ajuster leur comportement en fonction des résultats obtenus.

16. « A heuristic is a method that is not guaranteed to find the optimum, but usually gives a very good solution, though it cannot guarantee to do even that every time. Heuristics are “quick and dirty” methods, generally relatively fast and relatively good. » (Chinneck 2006, p. 1)

« The organization seeks to avoid uncertainty by following regular procedures and a policy of reacting to feedback rather than forecasting the environment [...] The organization uses standard operating procedures and rules of thumb to make and implement choices. In the short run these procedures dominate the decisions made. » (Cyert et March 1963, p. 113)

Pour gouverner le comportement des agents, le principe cybernétique de rétroaction (« feedback ») constitue une alternative simple à la formation d'anticipations exactes.

« Dans les cas simples, l'incertitude venant d'événements exogènes peut être maîtrisée en estimant les probabilités de ces événements, comme le font les compagnies d'assurance, mais habituellement à un coût plus important en terme de complexité computationnelle et de collecte d'information. Une autre solution est d'utiliser des *feedbacks* pour corriger les effets d'événements inattendus ou incorrectement prévus. Même si l'anticipation des événements est imparfaite et si la réponse qu'on leur fait est imprécise, les systèmes adaptatifs peuvent rester stables face à des secousses importantes : les *feedbacks* les ramenant continuellement sur la trajectoire programmée après chaque choc qui les a déplacé. » (Simon 2004, p. 79)

Selon Simon, les systèmes adaptatifs combinent généralement les mécanismes de *feedback* avec des mécanismes homéostatiques¹⁷ basés sur la maintenance de stocks de ressources destinés à amortir les chocs inattendus :

« Peu de systèmes adaptatifs ayant été forgés par l'évolution ou façonnés par l'homme dépendent de la prédiction comme moyen principal pour faire face au futur. Deux mécanismes complémentaires pour traiter les changements de l'environnement externe sont souvent plus efficaces que la prédiction : les mécanismes homéostatiques qui rendent le système relativement insensible à l'environnement et l'ajustement par *feedback* rétrospectif aux variations de cet environnement. Ainsi un stock de produits finis permet à l'usine de fonctionner sans s'inquiéter des fluctuations à très court terme dans les commandes [...] Les mécanismes homéostatiques sont spécialement utiles pour traiter les fluctuations à court terme dans l'environnement, et de ce fait, rendent la prédiction inutile à courte échéance. Les mécanismes de *feedback*, par ailleurs, en répondant continuellement aux écarts existants entre les états réels et désirés

17. Voir la définition de l'homéostasie par Cannon (1932, cité page 22), noter la proximité du principe de « feedback » des cybernéticiens avec celui de « self-righting adjustment » de Cannon.

d'un système, adaptent sans prévisions celui-ci aux fluctuations à longue échéance de l'environnement : quelles que soient les directions dans lesquelles il change, l'ajustement par *feedback* les suit, avec, bien sûr, un certain délai. » (Simon 2004, p. 265-266)

2.2.4 Agrégation ou désagrégation ?

La complexité place dans la même situation d'incertitude stratégique les agents économiques du monde réel et les agents artificiels des modèles.

« The real economic world almost certainly shares much more in common with computational worlds of boundedly rational agents co-evolving with one another than it does to worlds of fully rational agents in fixed-point-equilibrium configurations. This is so because no agent ever knows enough to figure out how it should behave from here to eternity, whether a human or a software agent. » (Axtell 2007, p. 114)

Face à cette incertitude, les agents du monde réel ne cherchent pas à optimiser, ils utilisent des procédures d'ajustement jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant. Pour modéliser le comportement des agents artificiels qui peuplent les modèles complexes, on est conduit à s'inspirer plus étroitement du comportement des agents du monde réel (Cohen 1960, p. 536).

La question qui se pose alors est : « comment allons-nous agréger tout ça ? » (Simon 1992, p. 20). Pour Simon, la construction d'un modèle agrégé peuplé d'agents réalistes pose des difficultés considérables.

« At the micro level, we already have most of the components we need to substitute a realistic theory of the firm for the fictitious theory that now occupies the textbooks. More work will be needed before these results can be aggregated confidently to the macro level. » (Simon 1992, p. 4)

Cohen, lui, a compris que dans un modèle peuplé d'agents multiples, il n'y a plus aucun problème d'agrégation.

« [...] such an approach would not involve any of the traditional "pitfalls of aggregation", for the aggregation process would consist in a straightforward summation of the values of the variables pertaining to each individual firm [...] » (Cohen 1960, p. 537)

Les problèmes qui se posent sont plutôt des problèmes de « désagrégation » : comment simuler les interactions directes de milliers d'agents autonomes dans un seul modèle ?

Cela n'est possible qu'avec des moyens informatiques beaucoup plus puissants que ceux que Cohen avait à sa disposition dans les années 1960¹⁸.

2.3 L'ordinateur émancipateur

Cohen est sans doute le premier auteur à avoir formulé un projet de modèle macroéconomique peuplé d'agents multiples¹⁹. Il est aussi l'un des tous premiers auteurs à avoir compris le rôle que les ordinateurs pouvaient jouer dans la libération de la pensée économique en dépassant les limitations imposées par le cadre analytique traditionnel.

« The main advantage of using computer simulation as a tool in economics is to provide a concrete procedure for formulating and testing hypotheses. A frequent objection raised against traditional mathematical models of economic systems is that these models are too unrealistic for their intended purposes. This is often true, because adding realism requires adding complexity as well. Since traditional mathematical models are intended for analytical solution, their complexity and realism must be severely limited. Computer models, however, can be made as complex and realistic as our theories permit, for analytical solutions to these models are unnecessary. No matter how complicated the formulation of the model, simulation techniques enable us to trace the consequences inherent in it. Hence, microeconomic theories can be cast into precise models without distortion of the meaning embodied in these theories, and the description of the world implied by such theories can be readily determined. » (Cohen 1960, p. 2)

Si Cohen pouvait déjà percevoir au tout début des années 1960 l'importance des simulations informatiques pour la science économique, pourquoi a-t-il fallu attendre les années 1990 pour voir apparaître les premiers modèles « agent based computational economics » ? Pourquoi aujourd'hui encore l'idée d'utiliser des modèles macroéconomiques peuplés d'agents multiples pour la prévision et la décision paraît-elle relever de la science fiction (Buchanan 2009) ?

18. Cohen en était parfaitement conscient : « This approach to aggregate economic model-building would be hopelessly impractical without the use of electronic digital computers possessing high operating speeds and large memory capacities. » (Cohen 1960, p. 537)

19. Voir page 28.

2.3.1 La question matérielle

On a vu qu'un modèle multi-agents est un modèle composé de modèles nombreux²⁰. Exécuter une simulation dans un modèle multi-agents, c'est donc exécuter simultanément autant de simulations de modèles individuels que le modèle « agrégé » compte d'agents. Plus le modèle est complexe, c'est-à-dire plus il compte d'agents et plus ces agents sont eux mêmes compliqués — parfois même complexes — plus le nombre de calculs à effectuer pour l'exécution d'une simulation est important. De plus, nous verrons dans la deuxième partie de ce travail que l'exploration d'un modèle multi-agents réclame l'exécution d'un grand nombre, voire d'un très grand nombre de simulations.

Les modèles multi-agents sont donc très exigeants en puissance de calcul. Tant que les chercheurs n'ont pu disposer d'ordinateurs suffisamment puissants, les applications de l'approche dite « de la complexité » sont donc restées virtuelles.

« [...] until recently, the high-powered computers and mathematics to explore the alternative complexity simplification path did not exist, so the complexity approach was not viable. » (Colander 2008, p. 9)

Cependant, comme le remarque Axtell, avec la croissance exponentielle de la puissance des machines, les partisans des modèles multi-agents ont « l'histoire dans leur camp ». Axtell nous emporte alors dans son enthousiasme :

« While models having 100 – 1000 agents were state-of-the-art at the end of the 20th Century, models of 10K – 100K agents are relatively easy to create and manipulate today. Over the next few years models on the scale of 1 million – 10 million agents will become commonplace. Such models call out for application to macroeconomics ! » (Axtell 2004, p. 12)

Mais Axtell nous ramène aussitôt au réel : la question de la puissance est secondaire, et la difficulté essentielle est d'ordre logiciel.

« However, the main impediment to fully implementing the [multi-agent systems] macro research program is not hardware but software. » (Axtell 2004, p. 12)

2.3.2 La question logicielle

La puissance d'un ordinateur n'est rien sans les logiciels capables d'en tirer parti. Or, même si on observe de plus en plus de tentatives de développement de plateformes logicielles dédiées à la modélisation multi-agents, il n'existe pas de logiciel universel

20. Section 2.1.3, page 34.

de simulation dans lequel il suffirait de rentrer les spécifications d'un modèle original avant de le laisser s'exécuter. De nos jours — et nous le croyons, pour longtemps encore — construire un modèle multi-agents original réclame nécessairement un effort important de programmation.

Bien sûr, il n'est pas nécessaire qu'un économiste sache programmer pour qu'il puisse se lancer dans la construction d'un modèle basé sur des agents multiples ; il peut très bien s'associer à un programmeur chargé de la réalisation de la partie informatique du modèle — ce qu'on appelle l'*implémentation*. Pourtant, à notre avis, les économistes auraient tort de considérer les questions d'implémentation et de programmation comme purement techniques.

Un langage théorique naturel

Les économies de marché sont des systèmes dynamiques et complexes. Dans la modélisation de ces systèmes, les notions de processus et d'interactions prennent le pas sur celle d'équilibre.

« [...] we are starting to study the economy out of equilibrium. This way of doing economics calls for an algorithmic approach. » (Arthur 2006, p. 1063)

La structure d'un programme informatique est algorithmique, c'est pourquoi l'outil informatique est particulièrement adapté à la modélisation des systèmes dynamiques complexes.

« The basic advantage of computer models is that they provide a language within complex dynamic models can be constructed. » (Cyert et March 1963, p. 234)

Néanmoins, un modèle informatique doit être considéré comme un modèle mathématique, mais d'un genre très différent des modèles habituels.

« A computer program is also literally a system of difference equations — albeit of a rather unorthodox kind. » (Simon 1992, p. 100)

Un programme informatique n'est pas la partie technique d'un modèle, il en est la version complète, la mieux formalisée.

« (...) an ACE model is a model as much as a more traditional mathematical economics model is. That is, the computer program in itself is the (possible) explanation of some real phenomena. » (Vriend 2006, p. 1050)

C'est pour cela que la programmation fait partie entière de la modélisation et que l'on peut trouver dans un langage de programmation le *langage théorique naturel* pour la description et la modélisation des processus économiques et sociaux complexes²¹.

« The quasi resolution of conflict, uncertainty avoidance, problemistic search, and organizational learning are central phenomena with which our models must deal. On our judgment, the natural theoretical language for describing a process involving these phenomena is the language of a computer program. » (Cyert et March 1963, p. 125)

L'économiste intéressé par les phénomènes complexes aurait donc tort de se désintéresser des questions d'implémentation et de programmation qui le conduisent à aborder de façon plus concrète l'objet de son étude, en l'amenant à se poser les bonnes questions et en libérant sa pensée des limites de l'analyse formelle. Pour Tesfatsion, l'enseignement d'un langage de programmation devrait faire partie des cursus économiques.

« [...] programming frees us to adapt the tool to the problem rather than the problem to the tool. Every graduate economics program should incorporate general programming language requirements. It is time. » (Tesfatsion 2006, p. 866)

La programmation orientée objet

Si les chercheurs de l'université de Carnegie Mellon ont très tôt identifié l'importance théorique des langages de programmation informatiques, ils ont aussi ressenti le besoin de langages supérieurs, plus adaptés à leurs projets de modélisation des systèmes complexes.

« The final problem limiting further work with computer models is the need to develop more suitable programming languages. Our ability to work flexibly and rapidly with computer models is currently hampered by the state of the programming art. Once a computer model has been fully specified in flow chart form, the task of programming and running the model should be almost automatic. Some of the various algebraic compilers now available for digital computers are reasonably suitable, but they can be considerably improved to facilitate work with computer models. » (Cohen 1960, p. 540)

21. « In computer programming languages, I found tools that classical mathematical languages had not provided for exploring the processes of human thinking and for attaining accuracy and rigor in the behavioral and social sciences. » (Simon 1991, p. 214)

En effet, le développement de la modélisation de systèmes complexes est resté longtemps limité par les premiers langages de programmation. Ce n'est qu'avec le développement des langages de *programmation orientée objet* dans les années 1980 (*Smalltalk*, *Objective C*, *C++*) et 1990 (*Java*) que les chercheurs ont enfin pu disposer de langages vraiment adaptés à la modélisation des systèmes peuplés d'agents multiples (Axtell 2006, p. 142).

L'histoire de la programmation orientée objet est intimement liée à celle de la simulation informatique des systèmes dynamiques complexes. *Simula*, le premier des langages informatiques qui avança les notions essentielles du paradigme orienté objet dans les années 1960, était conçu pour la *simulation à événements discrets*. Les langages modernes qui en descendent obéissent tous au même principe général, exposé par Wegner (1990), de décomposition des problèmes complexes en un système coopératif de sous-problèmes plus simples.

« Splitting a large task into components is a time-honored method of managing complexity, variously referred to as “divide and conquer” and “separation of concerns”. » (Wegner 1990, p. 13)

La structure d'un programme orienté objet est une structure hiérarchique, à l'image de la plupart des systèmes complexes. Mais cette structure est modulaire, ce qui permet une grande souplesse dans la conception du programme et lors de son évolution ultérieure.

La notion d'*objet* est à la base de la modularité de ces langages de programmation. Au sens informatique, un objet est une unité intégrée de données (les *propriétés*) et de procédures (les *méthodes*) qui permettent d'agir sur ces données. Données et procédures peuvent être *encapsulées* dans l'objet : la structure interne de l'objet est alors cachée aux autres objets, seuls les méthodes de l'objet lui-même peuvent directement manipuler ses propriétés. Comme un objet peut être lui-même composé d'objets, on peut facilement construire des objets complexes à partir d'objets simples, selon une *démarche ascendante* (« bottom up »). Au plus haut niveau de la hiérarchie, le programme lui-même est « une collection d'objets en interactions » (Wegner 1990, p. 21). Enfin, on peut doter un objet des procédures destinées à agir sur le milieu extérieur dans le but de maintenir une certaine stabilité de son milieu intérieur, et l'objet devient *agent autonome*.

Un laboratoire virtuel

Un avantage remarquable des modèles informatiques est leur malléabilité. Avant même l'apparition des premiers langages de programmation orientée objet, Cohen vantait déjà la souplesse des modèles informatiques.

« A further advantage of computer models is the ease of modifying the assumptions of the theory. When suitable programming languages become available, relations can be inserted, deleted, or changed in the model, and only local changes, which can be quickly made, will be required in the computer program. » (Cohen 1960, p. 536)

Le modèle peut facilement être modifié, enrichi ou simplifié, et les conséquences de ces modifications peuvent être immédiatement testées : « Le modélisateur se transforme ainsi progressivement en expérimentateur, réalisant des mesures dans des conditions expérimentales sur un objet virtuel. » (Amblard, Rouchier, et Bommel 2006, p. 85)

On a vu comment Langton, avec le concept de *vie artificielle*, avait ouvert la voie à une « recreation » *in silico* de sociétés d'organismes vivants²². Les modèles multi-agents permettent d'étendre cette idée à n'importe quel système naturel ou artificiel composé d'agents autonomes, y compris aux sociétés humaines.

« Once one has devised a computer program that mimics the desired characteristics of the system in question one can then use the program as a “culture dish” in which to perform experiments. » (Howitt 2008, p. 157)

Le modèle devient alors un véritable « laboratoire virtuel » grâce auquel le chercheur va pouvoir se livrer des expériences qui sont hors de sa portée dans le monde réel.

Ferber (2006, p. 16) distingue deux temps dans la réalisation d'un modèle multi-agents :

- dans un premier temps on réalise un laboratoire virtuel qui reprend en miniature les caractéristiques du « système cible » ;
- dans un deuxième temps, on pratique des expérimentations, déplaçant des individus, changeant leur comportement, modifiant les conditions environnementales.

Dans la pratique, les deux temps distingués par Ferber sont intimement liés et cet aller et retour dialectique entre modélisation et exploration est très fécond. Ferber souligne que la compréhension du système cible s'élabore progressivement, au fur et à mesure de sa reconstruction. Cette vision n'est pas issue d'une « abstraction du monde réel », mais d'une « recreation d'un monde artificiel ». Avec ce type de modèle, le chercheur élabore des hypothèses et peut les tester « in vitro » en utilisant les mêmes types d'observation que dans le monde réel, en appliquant aux données obtenues les mêmes traitements statistiques afin de vérifier les hypothèses émises²³.

22. Voir la section consacrée à Christopher Langton, page 30.

23. Cette démarche, peu habituelle en économie, est de plus en plus répandue dans de nombreux domaines des sciences expérimentales : « [...] agent-based models are the social-science analogue of the computational simulations now routinely used elsewhere in science to explore complex nonlinear processes such as the global climate. » (Buchanan 2009, p. 680)

« Ainsi, à la différence des approches classiques, un [système multi-agents] n'est pas une boîte noire, et la simulation multi-agents ne se réduit pas à l'implémentation d'un modèle et à l'analyse de sa réponse en fonction des paramètres d'entrées, mais participe au processus de recherche de modèles. » (Ferber 2006, p. 16)

2.3.3 Questions d'implémentation

Les questions d'implémentation sont aussi des questions de modélisation, c'est-à-dire des questions qui intéressent l'économiste. Pour le montrer, nous avons dressé une liste organisée des questions qui se sont présentées à nous lors de l'implémentation du modèle. Cette liste n'est pas complète, mais elle permet de se faire une représentation des problèmes concrets qui se posent au programmeur-modélisateur.

Il faudrait en théorie avoir pu répondre à toutes ces questions avant de commencer à programmer le modèle. Dans les faits, c'est en programmant que les questions surgissent et conduisent le modélisateur à retourner à la théorie économique et à l'observation du monde réel pour trouver une réponse. Nous verrons cependant que ni la théorie économique (souvent trop abstraite) ni la réalité (souvent trop complexe) ne permettent de répondre à la question du degré de réalisme et de complexité à donner au modèle. Deux principes permettent au modélisateur de se décider :

- écarter les éléments de complexité qui apportent peu au modèle,
- préserver la possibilité d'étendre le modèle aux éléments de complexité dont on a dû faire dans un premier temps abstraction.

Agents

Les premières questions que doit résoudre le modélisateur multi-agents ont bien sûr trait aux agents qui vont peupler son modèle. Qui sont-ils ? Doivent-ils être multiples ? Si oui, dans quelle mesure doivent-ils être hétérogènes ? Quel doit être leur degré d'autonomie ?

Types : Un modèle multi-agents peut être peuplé d'*agents d'un même type*, ou d'*agents de types différents*. Cette question est très importante, car en typant les agents, on donne au modèle une structure particulière qui sera très difficile à remettre en cause ultérieurement.

Différents types d'agents du monde réel doivent être représentés par différents types d'objets. Par exemple, dans un petit modèle de dynamique des populations *proies-prédateurs*, on pourrait modéliser trois types d'agents *loups*, *chèvres* et *choux*

aux propriétés et aux comportements bien différents. Mais si l'on veut modéliser une société capitaliste, doit-on créer un seul type d'agent pour représenter les ménages, ou bien faut-il créer un type *ménage capitaliste*, et un autre type *ménage travailleur* ? D'un côté, distinguer les deux permet de modéliser différemment les deux agents, ne serait-ce par exemple que pour leur donner des comportements d'épargne différents. D'un autre côté, les distinguer en tant que types d'objets différents interdit *structurellement* de pouvoir développer un modèle de mobilité sociale : un ménage *travailleur* ne pourrait jamais devenir *capitaliste*... Bien sûr on pourrait trouver des solutions, en faisant appel à des techniques de programmation avancées ; ces problèmes sont connus de l'ingénierie logicielle et des modèles de solutions (« design patterns ») ont été développés pour y répondre. Mais se poser ces questions, c'est à la fois s'interroger sur le modèle que l'on veut construire et sur la société que l'on cherche à modéliser : la mobilité sociale est-elle un phénomène suffisamment important, *par rapport à l'objet de mon étude*, pour que je fasse l'effort de la prendre en compte ou puis-je me permettre d'en faire abstraction ? Enfin, même si je choisis pour le moment d'en faire abstraction, n'est-il pas intéressant de réserver la possibilité d'en tenir compte plus tard ?

Multiplicité : Un modèle multi-agents est un modèle peuplé d'*un grand nombre d'agents*. Mais, selon le type d'agents, est-ce toujours nécessaire ?

Supposons par exemple un modèle multi-agents d'une économie virtuelle composée de deux types d'agents, ménages et entreprises, présents en grand nombre. Les ménages travaillent et épargnent, les entreprises produisent et ont des besoins de financement. On décide alors de construire un troisième type d'agent, un agent financier, sorte de caisse d'épargne ou banque d'investissement, qui collecterait l'épargne des ménages pour la mettre à disposition des entreprises. Parce que le modèle est *multi-agents*, faut-il pour autant un grand nombre d'établissements financiers ? Rien ne nous y oblige, un seul agent représentatif du secteur financier peut très bien faire le travail. Evidemment, on fait alors abstraction de toutes les interactions internes au secteur financier, mais si ces interactions ne sont pas l'objet de notre étude, cela n'est pas gênant. Au contraire, en en faisant abstraction, les comportements dynamiques émergeant des interactions entre ménages et entreprises seront plus faciles à interpréter.

Et puis, si l'on prend soin dès la conception de l'agent financier de penser à préserver les possibilités d'une extension future, on pourra plus tard, si l'envie nous en prend ou si le besoin s'en fait sentir, *désagréger* le secteur financier pour le remplacer par un grand nombre d'agents financiers en interaction — ce qui permettrait, par exemple, d'aborder les questions de fragilité financière. *La complexité est une décision*

(Legay 1997, p. 18), mais cette décision doit être motivée.

Hétérogénéité : Un modèle multi-agents est un modèle peuplé d'agents *hétérogènes*. L'hétérogénéité des agents est un élément très important des modèles multi-agents : à quoi bon peupler un modèle d'un grand nombre d'agents si tous ces agents sont identiques ?

Il doit donc y avoir hétérogénéité au sein même d'une même classe d'agents, c'est-à-dire entre des agents d'un même type. Cette hétérogénéité est une affaire de paramètres (les valeurs des *propriétés* des agents diffèrent) tandis que l'hétérogénéité des types d'agents est une affaire de structure (les *méthodes* des agents diffèrent).

Les propriétés des agents peuvent être classées en trois types :

Les paramètres : variables exogènes, elles sont imposées par le modélisateur généralement au début d'une simulation. Elles peuvent être modifiées d'une simulation à une autre (ces modifications distinguant des *scénarios*) ou au cours de la simulation (ces modifications constituant alors un *choc exogène*). En manipulant les paramètres, le modélisateur peut faire varier l'hétérogénéité des agents à volonté. Par exemple, dans un modèle d'*évolution de coopération*²⁴, on peut attribuer à tous les agents une propension à coopérer identique ou bien des propensions hétérogènes uniformément réparties dans l'espace des paramètres, ou bien encore répartir les agents en deux groupes, l'un tout à fait coopératif et l'autre pas du tout. . .

Les variables d'état : elles constituent en quelque sorte le *milieu intérieur* de l'agent. Elles sont déterminées de façon endogène par les interactions de l'agent avec son milieu extérieur. Elles sont généralement identifiables à des stocks de ressources que l'agent va chercher à accroître ou à maintenir. On peut citer en exemple les réserves nutritives d'une cellule ou d'un organisme, l'épargne d'un ménage, les stocks d'inventaire d'une entreprise. . . Parce qu'elle est endogène, l'hétérogénéité des variables d'état est la plus intéressante des sources d'hétérogénéité des agents.

Les variables de contrôle : elles sont directement déterminées par l'agent et vont agir indirectement sur le milieu (intérieur et extérieur) de l'agent. Le changement de la valeur d'une variable de contrôle fait l'objet d'une *décision* : lorsque l'agent constate un déséquilibre entre une variable d'état et son objectif pour cette variable, il ajuste la valeur de la variable de contrôle *dans l'espoir* de rétablir l'équilibre de la variable d'état. Il n'est pas toujours simple de déterminer ce qui est variable de contrôle et ce qui est variable d'état : par exemple, un

24. Voir la section consacrée à Robert Axelrod, page 30.

ménage cherche-t-il à maintenir son épargne en ajustant sa consommation ou à maintenir sa consommation en ajustant son épargne ?

Autonomie : Un modèle multi-agents est peuplé d'*agents autonomes*²⁵. L'autonomie des agents est l'élément décisif qui distingue ces modèles des modèles les plus simples de vie artificielle, des algorithmes génétiques et autres modèles à base d'automates cellulaires. Les modèles multi-agents sont des sociétés artificielles dans lesquelles tous les agents ne marchent pas d'un même pas. Comment modéliser cette autonomie, et jusqu'où étendre cet effort ?

Il faut d'abord remarquer que l'autonomie d'un agent électronique, si grande soit-elle, est toujours simulée. Un modèle multi-agents n'est jamais qu'un programme informatique, c'est-à-dire un algorithme, une suite d'instructions exécutées par l'ordinateur de façon déterministe. Néanmoins, il est possible, par divers moyens que nous allons examiner (hétérogénéité des états, stochasticité, cognitivité), de faire « comme si » les agents disposaient d'une réelle autonomie par rapport au programme, et donc aussi par rapport au modélisateur.

Hétérogénéité des états : c'est la source primaire d'autonomie des agents. Parce que les agents prennent leur décision par rapport à leur propres variables d'état, et non par rapport à l'état macroscopique du système, les décisions des agents sont différentes. Ainsi, dans le modèle de ségrégation spatiale de Schelling, l'autonomie des agents est très réduite, leur hétérogénéité aussi. Toute leur autonomie réside dans le fait qu'ils ne se préoccupent pas de la mixité moyenne réelle du système, ni de la satisfaction moyenne des autres agents. Leur satisfaction dépend de la mixité ressentie individuellement dans leur voisinage immédiat. S'ils se sentent trop minoritaires, ils ne sont plus satisfaits, et déménagent. C'est l'enchaînement de ces petites insatisfactions locales (ou déséquilibres locaux), chacune entraînant un déménagement (un ajustement local), susceptible de créer deux nouveaux foyers d'insatisfaction (à l'endroit d'où l'agent est parti, et à l'endroit où il arrive) qui conduit au bout du compte à l'émergence d'une ségrégation spatiale massive. Si les agents se prononçaient non pas en fonction de leur état mais en fonction de l'état moyen ou général du système, les résultats seraient très différents : rien n'émergerait — le système ne serait pas complexe. Le modélisateur multi-agents doit donc être très attentif, quand il dessine les fonctions de comportement des agents, à ce que les agents prennent réellement leurs décisions en fonction de leur état individuel, et non en fonction d'informations agrégées par un moyen quelconque. Toute exception à ce principe doit être motivée.

25. Voir la section consacrée aux modèles peuplés de modèles, page 34.

Stochasticité : c'est une source éventuelle d'autonomie des agents. Elle consiste à introduire une part de hasard dans leurs fonctions de réaction. Le comportement des agents n'est alors plus déterministe, mais probabiliste. Par exemple, dans les modèles traditionnels de ségrégation spatiale, les agents réagissent de façon automatique à un dépassement du seuil de tolérance : placés dans les mêmes conditions de voisinage tous réagissent de la même façon. On pourrait imaginer au contraire une fonction de réaction telle que la probabilité d'un déménagement dépendrait de l'excès de voisins « différents » par rapport au seuil de tolérance. Cela ne changerait très certainement pas grand chose aux résultats du modèle de Schelling, dans lequel les agents agissent de façon séquentielle (les uns après les autres) ; en revanche, cette façon d'introduire de l'hétérogénéité dans les réactions des agents peut être utile pour éviter les « mouvements de foule » trop brutaux pour des modèles dynamiques dans lesquels les agents sont réputés agir en parallèle (simultanément).

De plus, parce que l'environnement des agents est un système complexe et que par conséquent l'incertitude y est radicale, si les agents savent généralement dans quelle direction réagir quand ils constatent un déséquilibre, ils ne savent pas pour autant quelle ampleur donner à cet ajustement. Ainsi une entreprise qui constate un excès de stocks d'inventaire par rapport à ses objectifs décidera-t-elle de réduire ses prix, sans savoir quelle ampleur donner à cette baisse. Compte tenu de cette incertitude, il n'y a pas de raison que deux agents placés dans les mêmes conditions réagissent exactement de la même façon. Si l'ampleur de l'ajustement est (au moins en partie) aléatoire, une population d'agents soumis au même déséquilibre réagira par des ajustements d'ampleur variée. Les agents qui retrouvent l'équilibre sont « satisfaits », ils ne cherchent plus à ajuster leur comportement. Les autres continuent leur recherche jusqu'à satisfaction, selon le même processus de *tâtonnement* (« trial and error »).

Cognitivité : c'est la source la plus élevée d'autonomie des agents. Plus l'agent a des capacités cognitives développées, plus il est autonome. A l'autre extrémité de l'axe, la forme la plus simple de l'agent autonome est celle de l'*agent réactif*.

« Un agent réactif n'a pas de représentation de son environnement ou des autres agents. Son comportement est décrit par des boucles sensorimotrices simples, c'est-à-dire par des mécanismes directs associant les perceptions aux réactions. Les agents réactifs ne disposent généralement pas de fonctions cognitives et leur fonction conative se borne à mettre simplement les perceptions en relation avec les tâches qui décrivent la suite des actions à entreprendre. » (Ferber 2006, p. 20)

Par exemple, dans un modèle de marché financier artificiel, un agent investisseur très simple pourrait acheter ou vendre un actif en fonction du prix de l'actif rapporté

à sa valeur fondamentale (« investisseur fondamentaliste »). Un agent à peine plus perfectionné pourrait extrapoler les évolutions des prix observées sur le marché pour prendre ses décisions (« investisseur chartiste »). Mais même si on perfectionne ces procédures (calcul de la valeur fondamentale, calcul de la tendance et anticipation des retournements) tant que les paramètres des fonctions de réaction sont fixés de l'extérieur, ces agents restent des *agents réactifs*.

Un pas supplémentaire dans l'autonomie des agents est franchi lorsqu'on permet à l'agent de définir lui-même son comportement selon un processus d'apprentissage. Par exemple, dans le même modèle de marché financier, un *agent cognitif* très simple pourrait partager la gestion de son portefeuille entre deux comportements, l'un chartiste et l'autre fondamentaliste, en fonction des performances passées de chacun des comportements.

Il existe de très nombreuses méthodes qui permettent de doter les agents de capacités d'apprentissage²⁶. On entre ici dans un domaine particulier, lié à l'intelligence artificielle, qui rajoute un niveau de complexité au système étudié²⁷. Même s'il est évidemment très tentant de s'aventurer dans cette direction — nous nous y laisserons entraîner dans les chapitres 11 et 12 — ce n'est en rien un passage obligé de la modélisation multi-agents, et il peut être pertinent de construire des modèles peuplés avec des *agents à intelligence nulle* (« zero intelligence agents », Gode et Sunder 1993, Farmer, Patelli, et Zovko 2005). Sur cette question, le bon sens doit encore une fois être la règle et la voie de la complexité empruntée seulement si c'est nécessaire par rapport aux objectifs que l'on s'est fixés. Nous partageons entièrement la position défendue par Phan :

« [...] on peut concevoir qu'en réalité virtuelle, ou dans une démarche d'*engineering*, on ait besoin d'agents très autonomes. Par contre, pour la recherche académique, les impératifs de la reproductibilité des expériences, de l'explication et de la compréhension présupposent un degré plus fort de contrôle de l'expérimentateur sur l'expérience. La prise en compte de ce rapport problématique entre le désir de "réalisme", qui pousse à concevoir les agents les plus autonomes possibles et la volonté analytique d'expliquer comme de contrôler les expériences réalisées "in silico", obligent les chercheurs à se positionner clairement d'un point de vue méthodologique sur l'axe qui va de l'automate à l'agent autonome.

26. Les algorithmes génétiques développés par Holland (voir page 29) sont l'une des méthodes les plus fréquemment employées.

27. Un système peuplé d'agents doués de capacités d'adaptation supérieures (capacités d'apprentissage) est un « système adaptatif complexe », susceptible d'évoluer en permanence (Holland 1992, Arthur 1999).

La position défendue ici consiste à avancer progressivement par étapes d'abstraction décroissante successives, en maintenant un lien permanent avec le niveau précédent, et en ne relâchant que pas à pas les hypothèses simplificatrices qui ont servi précédemment, pour éviter d'obtenir des résultats incompréhensibles ou incohérents avec la logique générale des comportements postulés des agents. » (Phan 2006, p. 233)

Pour nous, cette approche d'*abstraction décroissante* est intimement liée à la démarche constructiviste de *complexification croissante*. Elle doit donc s'appliquer non seulement à la modélisation du comportement des agents, mais à tous les aspects du modèle.

Echelle

Les questions d'échelle concernent le nombre d'agents peuplant le modèle et l'unité de temps utilisée.

Nombre d'agents : à partir de quel nombre d'agents un système est-il multi-agents? On ne trouve bien sûr aucune réponse absolue à cette question dans la littérature. Plus le nombre d'agents est grand, plus l'hétérogénéité des agents peut-elle être marquée et, par la loi des grands nombres, plus le comportement du modèle est robuste. L'idéal serait évidemment l'échelle 1 : un agent dans le modèle pour chaque agent du système modélisé. Cependant l'augmentation du nombre d'agents est limitée par la capacité de calcul de l'ordinateur : plus on augmente le nombre d'agents, plus les temps de calcul des simulations s'allongent, et donc se réduit notre capacité d'exploration du modèle.

Le nombre d'agents fera donc l'objet d'un arbitrage, qui dépendra essentiellement de l'objectif principal assigné au modèle. Pour un modèle pédagogique de ségrégation spatiale à la Schelling, il est inutile de mobiliser des millions d'agents pour montrer les mécanismes à l'oeuvre. En revanche, un modèle destiné à la prévision et la décision cherchera à se rapprocher des grandeurs du réel.

Un modèle de recherche académique se situera quelque part entre les deux. Le nombre d'agents étant un paramètre, il peut être facilement ajusté en fonction des difficultés rencontrées. L'important est d'estimer le nombre minimum d'agents requis pour éviter que les résultats du modèle soient brouillés par d'éventuels effets d'échelle et de vérifier que ce nombre minimum est compatible avec une durée d'exécution des simulations suffisamment courte pour permettre une exploration intensive du modèle.

Echelle de temps : comment choisir l'unité de temps ? L'unité minimale de temps correspond à l'exécution de la boucle principale du programme, c'est-à-dire à une suite d'instructions dont la réitération constituera le déroulement de la simulation de période en période.

Là encore, le bon sens doit guider le programmeur. On peut imaginer des unités de temps extrêmement courtes pour un modèle de marché financier, tandis que des durées inférieures au mois n'auraient que peu d'intérêt pour un modèle centré sur les dynamiques industrielles et l'innovation.

Structure

Parce que le programme est conçu de façon modulaire grâce aux techniques de programmation orientée objet, l'existence d'une structure rigide du modèle, imposée aux agents qui composent le modèle, peut facilement passer inaperçue. Les modélisateurs multi-agents ont tendance à mettre en avant ce sur quoi ont porté leurs efforts : l'autonomie des agents, les phénomènes émergents. Cependant, tout autonomes qu'ils soient, les agents n'entrent pas spontanément et librement en contact les uns avec les autres : le modélisateur a choisi le type de leurs interactions, leur chronologie au sein de la période, leurs canaux et leurs vecteurs.

« Any meaningful model of the macro economy must analyze not only the characteristics of the individuals but also the structure of their interactions. » (Colander, Howitt, Kirman, Leijonhufvud, et Mehrling 2008, p. 237)

Comme le font remarquer Farmer et Geanakoplos, la nature des institutions économiques et la façon dont vont s'agréger les interactions des agents individuels pour donner le comportement macroscopique sont des éléments essentiels du modèle.

« (...) strategic interactions are not the only important factor in economic models. Other factors can also be important, such as the nature of economic institutions, and how the interactions of agents aggregate to generate economic phenomena at higher levels. We will call the aspects of a problem that do not depend on strategy its structure. In economics this occurs when equilibrium plays a role that is minor compared to other factors, such as interaction dynamics or budgetary constraints. » (Farmer et Geanakoplos 2009, p. 29)

La principale structure du modèle est exogène. Elle est présente à travers l'implémentation de chacun des objets qui composent le programme. Elle est la traduction en langage informatique de ces « règles » qui caractérisent le type d'économie que l'on veut modéliser. Quelle que soit l'autonomie accordée aux agents, un modèle

multi-agents reste un modèle structuré. Le modélisateur doit en être conscient ; il doit énoncer clairement et motiver ses choix structurels.

Accessibilité

Enfin, il faut penser à pouvoir rendre le modèle facilement explorable et réutilisable. La construction d’une interface graphique qui permet de « piloter » aisément le modèle et de délivrer instantanément les résultats des simulations selon une variété de points de vue est un élément important du modèle (Amblard, Rouchier, et Bommel 2006, p. 91). En rendant le modèle plus accessible, que ce soit pour lui-même ou pour d’autres utilisateurs, le modélisateur permet une exploration plus profonde du système modélisé, y compris par des non spécialistes.

« If we are to make parallel simulations of complex adaptive systems accessible, two criteria must be satisfied. First, the parallel simulation must directly mimic the ongoing parallel interactions of the complex adaptive system. Second, there must be a visual, game-like user interface that provides natural controls for experts not used to exploring systems via computers. » (Holland 1992, p. 26)

En mettant en libre accès sur le web l’application et son code source, on peut assurer une plus large diffusion du modèle en vue de sa vérification comme de sa réutilisation et de son extension²⁸.

2.4 Conclusion

Les économies de marchés sont des économies décentralisées. Elles sont peuplées d’un grand nombre d’agents hétérogènes, autonomes et concurrents, en interactions directes et sans contrôle supérieur. La notion de « main invisible » exprime la contradiction entre d’une part les principes de décentralisation et de concurrence qui gouvernent les interactions entre les agents économiques, et d’autre part la relative sta-

28. « We argue that two ingredients are still missing for a widespread adoption of the new [agent-based] approach inside the [economist] profession : (1) the appearance of a class of manageable benchmark models one can use and re-use interchangeably to address various research questions — for instance, playing the role that the maximization of discounted utility or the principal-agent frameworks have played for mainstream macroeconomics and political economy ; and (2) a clear understanding of how the adaptive complexity approach to economics can be used to design effective policies. The availability of open-code freeware web-based computerized laboratories will help to address point (1). » (Delli Gatti, Gaffeo, et Gallegati 2010, p. 4)

bilité des économies de marché, leur capacité à se reproduire de période en période en préservant leurs équilibres internes.

La coordination macroéconomique apparente de ces économies constitue leur principale propriété émergente. Les économies de marché sont des systèmes complexes, il n’y a pas de façon triviale d’expliquer comment les activités individuelles désordonnées des agents s’agrègent pour donner le comportement macroéconomique observé.

Face à ce « mystère » de l’agrégation, la théorie néoclassique ne propose pas d’explication. Au niveau macroéconomique, la coordination est postulée et prend la forme d’un équilibre unique et général. Au niveau microéconomique, toutes les hypothèses irréalistes nécessaires à la réalisation de cette coordination sont acceptées²⁹.

Nous avons décidé d’emprunter une autre approche, l’approche dite de la complexité. Selon cette approche, la compréhension des phénomènes émergents propres aux systèmes complexes passe par une reconstruction méthodique de ces systèmes. À l’appui de cette approche, les techniques de modélisation multi-agents permettent de construire des sociétés d’agents autonomes dans l’espace virtuel de la mémoire d’un ordinateur. Le chercheur peut alors modifier le modèle à volonté pour tenter d’identifier, selon une véritable démarche expérimentale, les logiques et les mécanismes qui président à l’émergence des dynamiques macroéconomiques du système.

Les agents — multiples, hétérogènes, autonomes, et même concurrents — sont au cœur de ces modèles. Ces agents sont des automates dotés de procédures plus ou moins évoluées qui leur confèrent une certaine autonomie. Ils sont eux-mêmes les modèles des agents réels qui peuplent le système réel ; les règles et les motifs qui gouvernent leur comportement s’inspirent de façon réaliste des règles et des motifs qui gouvernent les agents réels.

Mais l’implémentation des règles et des motifs qui gouvernent le comportement des agents n’est qu’une partie du problème.

« Clearly, the act of computationally constructing a (fully or not) coordinated state — instead of imposing it via the [walrasian auctioneer] — for a decentralized economic system requires a complete description of goal-directed economic agents and their interaction structure. » (Gaffeo, Catalano, Clementi, Delli Gatti, Gallegati, et Russo 2008, p. 8)

L’activité des agents s’inscrit nécessairement dans une structure d’interactions qui leur est extérieure et qui caractérise l’économie modélisée. Comme le souligne Joan Robison³⁰, il faut savoir à quelle économie s’applique le modèle, parce que chaque

29. « According to us, mainstream economics by ignoring interaction and emergence, commits what in philosophy is called “fallacy of division”, i.e. to attribute properties to a different level than where the property is observed » (Delli Gatti, Gaffeo, Gallegati, Giullioni, et Palestrini 2008, p. 2)

30. Voir citation en introduction, page 14.

type d'économie à ses propres règles. Or les règles des économies de marchés font que la structure des interactions entre les agents est à la fois *réelle* et *monétaire*.