

Chapitre 4

Evaluation et validation de modèles multi-agents

4.1. Introduction

Une critique récurrente faite aux modèles multi-agents porte sur leur « validation ». Il est ainsi fréquent, lors de l'exposé d'un modèle, que la question de la validation, qui se veut être *la* question piège dans ce domaine, soit posée, plongeant le conférencier dans un embarras bien visible. Il est alors souvent répondu que le travail présenté est inachevé et que la phase de validation doit être abordée prochainement ou que le modèle est pour l'instant trop abstrait et devrait être raffiné avant que de s'intéresser à la validation (Cette dernière réponse, même si elle n'est pas toujours sincère, est une fuite en avant, si celui qui l'adopte espère atteindre un jour un modèle réduit parfait des phénomènes observés). La meilleure réponse consisterait à retourner la question : « Qu'entendez-vous par validation ? », « Quels sont, selon vous, les critères qui permettraient d'affirmer qu'un modèle multi-agents est validé ? ». Il serait alors régulièrement répondu qu'un modèle est validé lorsque ses valeurs de sortie sont « proches » des données observées, en reprenant une méthode de validation classique des modèles descriptifs, par exemple en économétrie. Certes, la comparaison des résultats de simulation avec des jeux de données empiriques constitue un exercice important qui s'inscrit dans le processus de modélisation. Mais est-ce suffisant pour conclure à la validité d'un modèle ? Sans parler des corrélations accidentelles, un grand nombre de problèmes, logiques, théoriques

ou pratiques, se pose lorsque l'on veut comparer les « prédictions » d'un modèle à des données empiriques. Un modèle peut par exemple exhiber des résultats cohérents avec des données empiriques alors même que son contenu est clairement éloigné des dynamiques qu'il est supposé représenter. De plus, si l'on retient ce critère de validation, la quantité de données nécessaire pour évaluer la validité d'un modèle multi-agents pose problème (voir chapitre 5), et ce, d'autant plus si l'on considère l'application de ces modèles en Sciences Humaines et Sociales, où les expérimentations sont difficiles à réaliser, les données collectées sujettes à caution, et les campagnes de collectes, quand elles sont possibles, extrêmement coûteuses. Mais ces questions liées à la validation s'appliquent autant aux modèles multi-agents qu'aux modèles mathématiques standards. Ainsi, le modèle de Schaefer [SCH 57] qui décrit l'évolution des captures de pêche en fonction de l'état et de la dynamique des stocks de poissons, a montré ses limites [GIL 89] et peut être considéré comme non-valide. Malgré cela, il est utilisé par de nombreux planificateurs pour estimer le niveau optimal d'exploitation [NAT 99] et son extension au modèle de Gordon-Schaefer est utilisée pour décider de mesures conservatoires et de politiques économiques de pêche (quotas de production, taxes sur la production ou sur l'investissement). Les questions concernant la validation des modèles ne devraient pas être dissociées de celles relatives à leurs usages. Conclure à la validité d'un modèle, autorise-t-il sur la base de ce seul modèle à prendre des décisions qui peuvent avoir des conséquences importantes ? Et même l'hypothétique modèle parfait porterait-il en lui une vérité à laquelle se vouer sans défiance ? Son explication juste du monde permettrait-elle de prédire le futur, tel le démon de Laplace ? Si la majorité des scientifiques concède que la portée des modèles est limitée et qu'il n'existe pas de validation parfaite, encore moins définitive, le grand public pourrait ne pas prendre les mêmes précautions face à des résultats produits par un modèle validé (scientifiquement cela va de soit). Dans ce chapitre, nous aborderons donc différents critères mobilisables selon plusieurs aspects, allant de la conception à l'usage du modèle, pour *évaluer*, plutôt que valider, un modèle donné. Une discussion de la question de l'évaluation de la connaissance d'un point de vue épistémologique plus général est proposée dans l'annexe à ce chapitre, qui aborde aussi la question de la simulation comme « expérimentation ».

4.2. Qu'est-ce que modéliser, que sont les modèles ?

4.2.1. Le projet du modélisateur

La première définition que nous retenons pour la notion de modèle est celle qu'en donne Minsky [MIN 65] : « *To an observer B, an object A* is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A* ». Cette définition très simple permet de revenir sur des concepts clés de la modélisation en général, concepts qui sont peu connus ou du moins peu pris en compte dans la modélisation en sciences sociales. A partir d'un domaine regroupant un ensemble

d'entités et de phénomènes empiriques que l'on nomme le « domaine d'objet » ou le « système-cible », Minsky nous invite à définir un cadre et une question que l'on se pose relativement à cet objet. La modélisation correspond alors à une activité d'abstraction compte tenu de la question posée. L'idée est que pour rendre compte de certains phénomènes du système-cible A et répondre à la question posée par B, il est d'étudier une abstraction de A : le modèle A*. Cette vision introduit la notion de « frontière » du modèle : pour répondre à cette question, quelles entités et relations du système-cible doit-on prendre en compte et quelles sont celles considérées comme extérieures ou exogènes au modèle A* ? Cette délimitation concerne également les processus en jeu : lesquels doivent être pris en compte ou mis de côté, pour que le modèle, au moins dans sa première version, soit suffisamment pertinent pour répondre à la question donnée ? La conception d'un modèle en vue de sa simulation implique ainsi de se focaliser sur les processus dynamiques et de réaliser formellement des hypothèses concernant ses changements d'état.

Pour définir une notion opérationnelle de modèle dans le cas des Sciences Humaines et Sociales, nous pouvons ainsi dire de manière synthétique que le modèle auquel nous nous intéressons ici est une *abstraction du domaine d'objet* formalisée à l'aide d'un langage non ambigu. L'abstraction est réalisée en fonction d'un but, d'une question ou d'un aspect particulier du système que l'on cherche à étudier. La modélisation multi-agents peut être définie dans ce cadre comme partant d'un phénomène collectif à étudier ou à comprendre, et sur lequel on émet des hypothèses à l'échelle individuelle et collective. En somme, à partir d'hypothèses et de simplifications que l'on dérive du système-cible, nous essayons de mieux comprendre l'apparition de phénomènes collectifs. Contrairement aux modèles classiques, ces hypothèses sont posées à plusieurs niveaux. Elles sont dérivées en :

- (1) un modèle des entités considérées comme appartenant au système, et une forme de traduction en un modèle comportemental au niveau individuel ;
- (2) un modèle de l'organisation (par exemple sous forme de réseau social) de ces entités et son évolution ;
- (3) un modèle de l'environnement et de son évolution ;
- (4) un modèle des interactions entre ces individus mais également entre ces individus et l'environnement ou entre ces individus et l'organisation ;
- (5) des hypothèses réalisées sur les conditions initiales de la simulation (l'état du système à l'instant t_0 auquel démarre la simulation).

L'ensemble de ces hypothèses traduites en modèles et initialisées (une valeur étant affectée à chaque variable), nous permet de définir précisément une expérience

de simulation. Cette expérience de simulation peut être alors réalisée, c'est-à-dire exécutée ou calculée par un ordinateur. Cette expérience doit de plus être complétée par la définition des observables de la simulation, c'est-à-dire les variables ou attributs dont on souhaite observer l'évolution au cours de la simulation ou des variables agrégées, indicateurs, construits à partir de celles-ci. Le modélisateur se transforme ainsi progressivement en expérimentateur, réalisant des mesures dans des conditions expérimentales sur un objet virtuel. Pour boucler le processus de modélisation, ces observations réalisées au cours de l'expérience de modélisation sont alors rapprochées des hypothèses réalisées initialement ou éventuellement comparées à des données collectées sur le système-cible. L'issue de cette comparaison permet souvent d'entrevoir de nouvelles pistes pour réaliser de nouvelles expériences, pour affiner ou simplifier davantage le modèle, voire pour le remodeler totalement. Véritable démarche d'apprentissage, ce processus entraîne une remise en cause des connaissances et des représentations.

Il nous faut dès maintenant éclaircir un peu la spécificité d'usage des modèles multi-agents par rapport aux modèles classiques. La représentation que l'on a souvent du modèle scientifique est typiquement le modèle de statistique descriptive, c'est-à-dire un modèle construit avant tout pour décrire le plus simplement possible un phénomène sans chercher nécessairement à en proposer une explication. La validation de ces modèles passe donc généralement par la mesure de l'écart qu'il peut y avoir entre le modèle et les données empiriques collectées sur le phénomène par des observations directes ou des expériences. Le modèle de type multi-agents appartient selon nous à une autre catégorie qui regroupe les modèles construits pour expliquer et comprendre. A partir d'hypothèses réalisées sur les mécanismes générateurs [MAN 05] au niveau individuel, le modélisateur cherche à évaluer la portée explicative de ces hypothèses et essaie d'identifier les comportements individuels possibles qui peuvent donner naissance au phénomène collectif considéré. Dans ce cadre, la recherche de *similitudes* avec les données¹, si elle peut être utile, ne peut absolument pas être un critère unique et définitif de validation.

4.2.2. Des modèles dans tous leurs états

A ces différentes finalités viennent s'ajouter différents états du modèle en cours d'élaboration, voire même des modèles qualitativement assez différents. Ainsi, lors de l'élaboration de modèles agents pour la simulation, on peut identifier plusieurs étapes de construction, qui font que plusieurs modèles sont de fait construits au cours du temps.

Une première étape débouche sur un modèle théorique, qui décrit avec une approche agent le système considéré, produisant une description schématique du

¹ Le lecteur trouvera une discussion plus détaillée des différents rapports de similitude (voir chapitre 8).

système. Souvent, on représente ce modèle grâce à la formalisation UML (*Unified Modelling Language*), qui permet de présenter un même modèle sous différents angles appelés « vues ». L'une des plus classiques est le diagramme de classes qui montre les types d'entités du système (agents et objets), leurs caractéristiques et leurs relations. Le déroulement temporel du système est représenté par d'autres vues telles que des diagrammes de séquence, des diagrammes d'états-transition ou des diagrammes d'activités qui permettent par exemple de décrire le comportement des agents. Ce *modèle-papier* doit idéalement contenir toutes les informations concernant les détails de la simulation, afin de rendre possible l'implémentation du modèle dans n'importe quel langage sans avoir besoin de faire de supposition supplémentaire. Dans les faits, les langages de spécification comme UML sont partiellement ambigus (toujours beaucoup moins qu'une forme discursive) mais donnent cependant une bonne description de l'implémentation à réaliser (voir chapitre 1).

Le second modèle que l'on peut considérer est le modèle implémenté, appelé aussi le « code » et exprimé dans un langage de programmation souvent de haut niveau (*SmallTalk*, Java, C++). C'est le programme, traduction du modèle-papier agent, qui est utilisé pour exécuter des simulations. En sus du code du modèle lui-même, il est nécessaire de l'instrumenter pour se donner les moyens de l'observer, par exemple visualiser certaines données de la simulation pour permettre à l'utilisateur de se représenter la dynamique de son système. En effet, une simulation crée un univers dans lequel les agents interagissent selon le modèle implémenté. Ainsi à l'initialisation de la simulation, il y a création d'agents et d'objets, entités informatiques qui contiennent des données et des capacités de calcul. Intervient ensuite un enchaînement de processus qui suivent le déroulement temporel défini, que l'ordinateur calcule sans intervention extérieure et qui occasionnent un changement d'état des agents et des objets. Mais la machine, si elle utilise les données pour ses calculs et si elle en génère, ne fournit à l'utilisateur que celles qu'il lui demande, en particulier sous la forme (souvent agrégée) d'indicateurs qu'il considère comme importants. Il y a donc également nécessité d'avoir un modèle d'observation du système (un système épiphyte selon les termes de [GIR 94]). Cette tâche est facilitée par l'emploi de plate-formes de simulation. La plate-forme Cormas permet par exemple la définition d'indicateurs et fournit des graphes qui aident l'utilisateur à suivre l'évolution de sa simulation ; dans SDML, l'intégralité des informations (interactions entre les agents et états internes de ceux-ci) est conservée en mémoire, ce qui, malgré un ralentissement, permet une compréhension très exhaustive du déroulement de la simulation.

Finalement, on peut considérer que le résultat du travail implique que l'utilisateur du modèle forme un *modèle du modèle*, à savoir une compréhension de son fonctionnement qui s'abstrait de l'exécution particulière d'une expérience et organise la connaissance retenue au cours de la phase d'expérimentation [DEF 03]. C'est cette connaissance qu'il pourra transmettre textuellement à la communauté scientifique, proposant les éléments essentiels du modèle et de son fonctionnement. Mais la connaissance exprimée par le

modèle doit être suffisamment lisible pour s'exposer à la critique et être discutée. Sans même encore parler de mise à l'épreuve empirique, la description du modèle doit être suffisante pour rendre possible la reproduction du modèle informatique par les lecteurs [EDM 03]. On peut dire que cette parfaite explicitation du modèle reste encore un idéal, car de nombreuses expériences de réécriture de modèles se sont soldées par des échecs. Nous attribuons la principale cause de ces échecs à la non-complétude de la description, en particulier concernant les aspects opérationnels, mais également, encore trop souvent, les aspects fonctionnels [HAL 03]. Il s'en suit qu'une bonne spécification du modèle constitue maintenant un critère indispensable d'évaluation, non pas du modèle, mais du travail de modélisation réalisé.

4.2.3. Les différents usages de la modélisation agent

4.2.3.1. *La modélisation est un processus d'apprentissage*

Ce qui caractérise un bon modèle c'est qu'une fois son implémentation réalisée et son comportement étudié, le modélisateur n'en a plus besoin. Telle est, présentée de manière quelque peu provocante, la thèse de Grimm [GRI 99] qui attribue à la modélisation, ou plus exactement, à la phase de construction du modèle, une finalité d'apprentissage. Au-delà de son caractère extrême, Grimm a raison de souligner cette usage essentiel des modèles. Le modélisateur, en construisant un modèle de son objet d'étude, met ainsi en jeu des capacités cognitives en sélectionnant les points essentiels à prendre en compte pour expliquer le phénomène étudié. En construisant son modèle, il pose également des hypothèses qualitatives sur les mécanismes générateurs des observations qu'il porte sur le système-cible. En simulant ce modèle, il peut tester ces hypothèses et les discuter. Il extrait de l'artefact *in silico* les propriétés de son modèle et les conséquences de ses hypothèses. L'ensemble des tâches du processus de modélisation permet ainsi de se construire une représentation du fonctionnement du système-cible qui, pour Grimm, est l'intérêt premier du recours à la modélisation. Un critère d'évaluation de cet apprentissage semble difficile à mettre en place et très subjectif : Comment évaluer le fait que le modélisateur ait appris du modèle ? Malgré cela, c'est un critère qu'il faut prendre en compte et qui recouvre partiellement le critère de connaissance produite de Legay [LEG 73].

4.2.3.2. *Modèle pour prédire, pour comprendre ou pour agir ?*

En pratique, il est possible de poser une distinction entre des modèles construits pour prédire ou pour décrire et les modèles construits pour comprendre. Cette différence de finalité dans l'activité de modélisation ne relève pas de considérations théoriques : on voit mal ce qui empêcherait un modèle construit pour comprendre d'être utilisé à des fins de prédiction. Une différence peut cependant être observée dans

la méthode de construction du modèle. Dans le cadre d'une recherche menant à la description, la reproduction des données observées est mise au premier plan. Il s'agira par exemple dans un cadre de modélisation classique de trouver une fonction décrivant l'évolution du pouvoir d'achat d'une population. Aucun effort explicatif n'est réalisé pour comprendre le pourquoi de cette forme et l'utilisation du modèle construit à des fins de prédiction pourra correspondre à extrapoler les résultats à une échelle de temps raisonnable. La question de la validation pour ce type de modèle peut se réduire à une simple confrontation aux données puisque le but premier est bien de reproduire des séries empiriques. Malheureusement, ce modèle ne peut guère être utilisé pour explorer des situations alternatives sur la base d'une même situation sociale, puisque les facteurs influençant la situation sociale ne sont même pas explicités.

Les modèles construits pour comprendre un phénomène donné ou l'évolution d'un système sont construits sur des hypothèses parmi un ensemble d'hypothèses possibles qui concernent, dans le cas particulier des modèles multi-agents, les comportements individuels, les interactions entre ces individus ou entre les individus et l'environnement. Ce type de finalité correspond en l'occurrence à la majorité des modèles multi-agents développés. Le travail de formalisation puis d'exploration des simulations permet de construire une explication à partir des hypothèses et de leurs implications telles que calculées par la simulation. Dans ce cadre, on voit sans doute plus clairement que la confrontation du modèle aux données, si elle peut apporter beaucoup d'informations et de connaissance pour l'évaluation du modèle, ne peut constituer le critère unique de décision concernant sa validité. Dans ce cadre, il est nécessaire d'évaluer non seulement les résultats qui peuvent être comparés à des données qualitatives extérieures, mais il faut également prendre soin de vérifier les comportements individuels des agents, qui doivent être qualitativement en adéquation avec les connaissances sur le système social, de même que les paramètres influents doivent pouvoir être interprétés dans le cadre du système modélisé.

Une troisième catégorie d'usage des modèles, pour laquelle se distinguent particulièrement les modèles multi-agents, regroupe les modèles construits pour l'action, ou plus exactement, pour aider à la concertation autour de choix de gestion. Dans ce cadre, le modèle est considéré comme un artefact, un support visuel, partagé par tous pour aider à l'élaboration de règles de gestion, par exemple d'une ressource renouvelable. Ce type d'usage est largement abordé ailleurs dans cet ouvrage (voir l'approche *Companion Modelling* dans les chapitres 9 et 10).

4.2.4. Les différentes pratiques de la modélisation

Concernant la pratique de la modélisation multi-agents, ce domaine a vu l'émergence de plusieurs règles « paradigmatiques » de « bonne pratique » pour la conception et l'élaboration de modèles. Ces règles, souvent résumées à un leitmotiv, influencent

fortement la construction des modèles et reprennent des critères assez classiques d'évaluation des modèles. Il nous semble donc important de les présenter brièvement ici.

Un premier courant, qui est une application directe du rasoir d'Occam, aussi appelé « principe de parcimonie », le mouvement KISS (*Keep It Simple, Stupid !*) recommande de construire des modèles qui soient analysables par la suite, suffisamment simples pour être disséqués par un humain qui observe les simulations attentivement [AXE 97]. Le positionnement de ce courant peut se résumer ainsi : rien ne sert de concevoir des modèles dont on ne pourrait étudier sérieusement les propriétés et oublier ainsi la validation interne, définie comme l'existence des bonnes propriétés du modèle dans le cadre formel de ce dernier. La validation externe est comprise également pour des modèles trop importants qui demanderaient soit des données trop volumineuses pour juger de son adéquation au phénomène réel, ou bien qui seraient surdéterminés par rapport aux données disponibles, le nombre de paramètres de tels modèles permettant de s'ajuster à n'importe quelle série de données collectées. L'application systématique du principe de parcimonie présente pour certains des dérives comme celle qui consiste à introduire dans les modèles multi-agents à but explicatif, des éléments de modélisation descriptive (voire analogique) au niveau des comportements individuels. L'utilisation à outrance de lois probabilistes pour modéliser les choix d'un agent en est un exemple ; l'utilisation d'heuristiques comme les algorithmes génétiques pour rendre compte d'un comportement optimisateur (voir chapitre 13) en est un autre. Ces problèmes ont conduit certains concepteurs à proposer l'approche KIDS (*Keep It Descriptive, Stupid!*). Il s'agit alors de conserver autant que possible une approche explicative, et de tâcher de rendre toute partie du modèle isomorphe (similaire de structure) aux phénomènes que l'on cherche à modéliser.

L'approche *Companion Modelling (ComMod)* (voir chapitre 10) ne pose pas de limite systématique de la forme KISS ou KIDS, même si la plupart de ceux qui l'appliquent ont tendance à se tourner vers KISS pour supporter la lecture de la complexité étudiée. Dans cette approche, il n'est pas rare que l'environnement et les relations sociales soient modélisés de façon assez précise, tandis que les relations sociales sont elles aussi précisément décrites. Néanmoins, comme le modèle est en général construit en plusieurs étapes et avec des non-professionnels de la modélisation, on assiste à une simplification des différents modèles au cours du temps, passant d'un modèle de forme KIDS à un modèle de forme KISS, dont la construction démontre en général l'avancée du processus.

4.3. Validations interne et externe pour les simulations multi-agents

Il est classique de différencier deux étapes dans la validation : *interne* et *externe*. La phase de vérification ou validation interne comprend d'abord une vérification de conformité entre les spécifications et le programme implémenté et pose la question :

est-ce que le modèle implémenté est bien celui que je voulais implémenter ? (en particulier dans le cas où le modélisateur n'est pas celui qui a développé le modèle [MEU 01]). Ensuite, la validation interne concerne la recherche et l'identification des propriétés du modèle. Dans le cas des simulations multi-agents, des preuves logiques ne peuvent être obtenues et se pose alors la question : est-ce que mon modèle possède les propriétés attendues ? Parmi ces bonnes propriétés, on considère par exemple la robustesse (voir chapitre 12) ou des études de sensibilité pour vérifier si les réponses sont bien différenciées sur l'espace des paramètres. Cette phase de validation interne concerne de fait une validation dans le contexte ou la logique propre du modèle. La deuxième phase de validation, la *validation externe*, correspond à l'évaluation de l'adéquation entre le modèle et le phénomène réel dont il est censé rendre compte. Pour cette dernière phase, la comparaison aux données empiriques ou le fait que le modèle soit capable d'exhiber des faits stylisés identifiés sur le système modélisé sont des critères clés. Ainsi, ce qui est étudié au travers des simulations, ce sont tout d'abord les propriétés systémiques (structurelles et dynamiques) du modèle, les formes qui peuvent apparaître du fait des hypothèses posées (validation interne) ; ensuite est évaluée la pertinence du modèle vis-à-vis de situations que l'on souhaite représenter ou prévoir (validation externe). Ces deux étapes peuvent boucler itérativement entre elles. Elles demandent une certaine forme de lisibilité dans la description du modèle, afin que les différentes méthodes d'évaluation puissent être appliquées.

4.3.1. Prérequis à la validation

Avant même d'entrer dans le détail de la validation des modèles, il apparaît essentiel que le modèle soit en quelque sorte *validable*, c'est-à-dire qu'il ait été construit en respectant un certain nombre de critères qui assurent au minimum la reproductibilité des expériences qui ont été conduites. Une modélisation conduite dans un cadre où les expériences de simulation ne sont pas reproductibles ne peut pas être considérée sérieusement. Cela reviendrait à accorder une confiance aveugle en la parole donnée, ce qui est contraire aux principes de base d'une démarche scientifique. De manière à s'assurer de la reproductibilité des expériences ou *a minima* des résultats d'expériences, il faut donc s'assurer que le modèle est décrit formellement avec les détails suffisants qui en permettent la réplique. En particulier, il est important de mentionner très explicitement les points sur lesquels il pourrait y avoir une ambiguïté et donc le risque d'une implémentation avec des propriétés qui peuvent être très différentes (c'est par exemple le cas de la méthode de mise à jour, synchrone ou asynchrone, dans les simulations à temps discret). Comme nous le verrons plus loin, une méthode pour bien identifier ces points peut être de faire reprogrammer le modèle par une autre personne.

On peut distinguer les expériences qui sont répliquables statistiquement des expériences répliquables unitairement. Les expériences réalisées dans les sciences expérimentales sont reproductibles statistiquement au sens où une expérience singulière ne peut être répliquée exactement mais où statistiquement si l'on se place dans les mêmes conditions expérimentales les résultats sont similaires. Pour s'assurer de la répliquabilité unitaire de ces expériences, qui est possible dans le cadre des simulations (l'algorithme exécuté étant au final déterministe), il faut prendre certaines précautions : le fait de choisir un langage multi plate-forme (Java ou *SmallTalk*) dont l'exécution des programmes ne dépend pas de la machine sur laquelle on l'exécute ; le fait de contrôler dans la simulation l'ordre d'exécution des différents processus ; et enfin le fait de pouvoir bloquer la graine du générateur de nombres pseudo-aléatoire (Il est donc important de spécifier le type de générateur utilisé). Cet ensemble de critères permet de s'assurer que quiconque peut reproduire exactement la même expérience et ainsi tester ou simplement visualiser des éléments singuliers du modèle qui sont propres à une expérience particulière : « pourquoi à l'itération 15, l'agent n°134 décide d'acheter 120 actions de l'entreprise 28 ? ». Les simulations multi-agents revêtant parfois cette forme de processus historique *in silico* [AXE 97], le fait de pouvoir reproduire à volonté le même processus à l'identique et par exemple changer le type de mesures réalisées peut aider grandement à la compréhension d'un phénomène.

4.3.2. *Validation interne*

Comme nous l'avons précisé en introduction à cette partie, la première étape identifiée dans la validation interne se scinde en deux points : la délimitation des propriétés du modèle dans sa dynamique et la vérification du travail d'implémentation. La vérification est un travail habituel en informatique, dès lors qu'un système formel est transformé en programme, on vérifie que le programme exécute effectivement le modèle théorique tel qu'il a été décrit - les algorithmes de décision, l'enchaînement des communications, les évolutions internes des objets et agents. Outre la correction d'erreurs d'implémentation pour lesquelles des outils de vérification (méthode B ou méthode Z) peuvent être sollicités (mais le sont peu en pratique), il existe clairement des erreurs qui ne peuvent être déterminées qu'à l'exécution, lors par exemple de l'identification et de l'analyse en détail de comportements inattendus dans le modèle. Dans ce cas, c'est par l'étude de la cohérence logique que l'on peut savoir si des erreurs ont été introduites dans le code, ce qui implique une bonne connaissance du modèle et une seconde étape d'observation.

La deuxième étape, essentielle dans la validation interne, tout autant que dans la connaissance et la communication de la structure dynamique du modèle, consiste en l'identification des propriétés du modèle dans le seul contexte de sa logique propre. Certaines de ces propriétés, comme la possibilité de parcourir tous les états ou l'identification de phénomènes d'interblocage dans les processus parallèles, sont

étudiées par des méthodes de vérification formelle comme les réseaux de Petri mais sont assez peu utilisées en simulation multi-agents [BAK 03], souvent en raison du coût important de mise en place de ces techniques sur de gros programmes comme le sont les modèles multi-agents. Les propriétés liées à la robustesse des modèles, évaluées en général par l'utilisation d'*analyses de sensibilité* (voir chapitres 3 et 12), sont en pratique plus souvent réalisées. Cela tient sans doute au fait qu'une des premières utilités des analyses de sensibilité consiste à identifier les paramètres qui jouent le plus sur la dynamique d'un modèle, ce qui permet de faire un tri raisonnable et de focaliser son attention sur les paramètres importants du modèle multi-agents où l'on doit évaluer un grand nombre de paramètres. Les analyses de sensibilité permettent de plus de qualifier la *qualité de filtre du modèle*, critère que l'on retrouve dans [LEG 73]. Ainsi, une propriété intéressante d'un modèle est sa qualité classificatoire ou discriminatoire des éléments qu'il reçoit en entrée (les paramètres) en éléments de sortie différents. Un modèle, même construit avec des hypothèses comportementales raisonnables et qui sur des variations des paramètres en entrée du modèle aurait un comportement des variables de sortie qui serait assimilable à celui d'un générateur aléatoire, n'aurait au final que peu d'utilité. Cette capacité à discriminer une entrée donnée du modèle doit cependant être relativisée au regard de la variable de sortie retenue, cette variable étant souvent un indicateur construit par le modélisateur. Le fait d'observer un bruit important sur cette variable en sortie peut remettre en cause certes le modèle lui-même, mais également l'indicateur retenu. L'analyse de sensibilité, si elle peut s'appliquer pour tester la robustesse des résultats d'un modèle, peut également être utilisée pour tester la robustesse de la structure du modèle. En modifiant les hypothèses réalisées dans le modèle, par exemple en modifiant les structures organisationnelles, le modélisateur obtient des indices relatifs à la stabilité de son modèle et de ses hypothèses. Ces indices lui permettent précisément de jauger l'importance du choix d'une hypothèse et l'influence de son remplacement par une autre sur un aspect particulier du modèle.

Une autre propriété importante qu'il s'agit d'étudier au cours de cette étape de validation interne, concerne les classes de comportements produites par le modèle. Les simulations multi-agents produisent ce qui est assez communément appelé des « comportements émergents » (voir chapitres 14, 16 et 17), c'est-à-dire des comportements qui ne sont pas exprimables en utilisant uniquement les hypothèses réalisées sur les comportements individuels. Si l'on prend pour exemple le modèle de dynamique d'opinion de [DEF 02], les trois classes qualitatives en présence d'extrémistes de ce modèle sont la convergence centrale (le fait que tous les individus convergent au centre de la distribution d'opinion), la convergence vers les deux extrêmes de la distribution d'opinions et la convergence vers un seul des deux extrêmes. L'identification de ces classes résulte bien évidemment d'un certain nombre d'expérimentations réalisées sur le modèle. Nous verrons dans la partie suivante comment l'identification de ces classes de comportements à des faits stylisés est un type de validation externe très utilisé pour les simulations multi-agents.

Une fois l'identification des classes de comportements réalisée, un dernier point à soulever concerne l'identification de leurs conditions de survenance ; à savoir essayer d'identifier sous quelles conditions et pour quelles valeurs de paramètres telle ou telle forme émergente tend à apparaître. Cette étape, ajoutée à l'étude plus poussée des mécanismes générateurs des formes émergentes (qu'est-ce qui fait dans le programme qu'en choisissant telle valeur de paramètre en entrée j'obtienne telle autre en sortie ?) est sans aucun doute une des étapes les plus difficiles à mettre en place concernant les modèles multi-agents. Mais c'est une étape indispensable car contrôler son modèle, c'est pouvoir expliquer les raisons de chaque phénomène révélé par la simulation. Plusieurs tentatives pour rendre cette étape opérationnelle ont été proposées et sont en cours d'élaboration, soit sous forme d'outils et de méthodes assistant cette recherche [AMB 03a], [AMB 03b], soit sous forme d'outils permettant une détection automatique des règles de production de comportements émergents identifiés [YAH 05].

Parmi toutes ces données sur la robustesse du système, un ensemble important doit être fourni avec la description du système, afin que la contre-vérification puisse être faite par un autre programmeur. C'est en effet sur la base de la description du modèle et d'un ensemble conséquent de connaissances sur ses propriétés dynamiques et les émergences pertinentes produites que sera rendu possible le travail de réplication [AXE 97]. Cet exercice de validation supplémentaire est en passe de devenir un exercice de base pour établir la validité des modèles (et peut même constituer un exercice simple dans le contexte de l'enseignement universitaire [BIG 05]). Pour répliquer un modèle, on écrit une nouvelle fois le code en partant du modèle théorique d'origine, en général avec un autre logiciel, afin de vérifier que les résultats structureaux décrits plus haut ne sont pas des biais dus à l'implémentation mais bien des résultats fiables qui sont effectivement la conséquence directe des hypothèses théoriques. Cet exercice a été pratiqué abondamment lors des ateliers M2M ("*Model to model*", dont nous reparlons plus loin) et a permis de démontrer que de nombreux articles ne fournissaient pas d'informations suffisantes pour que le modèle soit répliqué (et donc pour que leur dynamique propre soit vérifiée) [ROU 03] et que parfois les résultats avancés étaient impossibles à reproduire [EDM 03].

4.3.3. *Validation externe*

La validation externe, seconde phase de la validation, pose en revanche la question de l'adéquation entre le modèle et le système représenté compte-tenu des finalités ou de l'usage du modèle. Le but de cette phase consiste donc à mettre en parallèle le modèle et ses résultats avec des observations ou des expériences réalisées sur le système-cible. La vision, certes un peu réductrice, qui consisterait à assimiler cette étape à la seule comparaison quantitative à des données empiriques, donne cependant une vision des méthodes qui sont usuellement sollicitées dans ce cadre. Comme nous

l'avons souligné en introduction, c'est souvent ce qui est désigné lorsque l'on évoque la validation de modèles (voir les discussions sur les inférences inductives et le falsificationnisme en annexe de ce chapitre).

Une méthode employée dans le cadre des simulations multi-agents consiste à rapprocher les *classes de comportements* (identifiées lors de la validation interne) à des comportements saillants du système-cible : *les faits stylisés*. Ce rapprochement, s'il peut être fait avec des faits stylisés identifiés *a posteriori* (permettant par exemple de découvrir dans les phénomènes empiriques, des comportements stylisés qui auraient pu passer inaperçus), possède, on le sent bien, plus de force lorsque les faits stylisés sont déterminés avant même la modélisation comme des comportements que l'on cherche à reproduire par le modèle ou dont on se servira comme un critère de validation parmi d'autres (rétrodiction). Cette capacité de production de faits stylisés, souvent au niveau macroscopique ou global, par émergence à partir d'hypothèses individuelles, est une des caractéristiques, et il faut le dire une des principales motivations du recours à l'approche multi-agents. Une question qui peut se poser ici, et que l'on discutera un peu plus loin, est de se demander si ce n'est pas le seul mode de validation externe envisageable pour ce type de modèle, compte tenu des difficultés liées à la comparaison quantitative à des données empiriques. Ainsi, ce mode qualitatif de comparaison entre les sorties, les productions du modèle et le système-cible, aussi insatisfaisant soit-il pour le modélisateur, permet malgré tout de se rendre compte que le modèle produit qualitativement des effets proches de ceux que l'on cherche à obtenir. Ce critère d'adéquation empirique, s'il est loin d'être définitif, permet néanmoins de poser que la structure du modèle possède certaines propriétés, sous ces hypothèses, qui engagent le modélisateur à conserver ces dernières là où d'autres hypothèses qui ne reproduiraient pas de manière aussi adéquate ces comportements qualitatifs pourraient être écartées². Néanmoins, on pourrait reprocher la faillibilité de cette méthode : c'est par observation humaine que l'on rapproche deux faits stylisés l'un produit par le modèle, l'autre tiré des phénomènes empiriques. Et cette porte ouverte à la faillibilité de l'observateur ajoutée à la seule comparaison qualitative aux données, est souvent reprochée à une telle démarche. Cependant, cette observation est de plus en plus fréquemment assistée par l'utilisation d'indicateurs sur le système-cible comme sur le modèle qui sont comparables. Il est clair que cette seconde étape de validation nécessite, pour être sérieusement menée, une bonne expertise du domaine par celui qui manipule le modèle. En effet, la pertinence des indicateurs pour caractériser la situation de façon significative, doit montrer la similarité fonctionnelle entre le modèle et le terrain. Pour certains, la création des indicateurs et ce qui les rend satisfaisants et suffisants, est en soi un travail très complexe et fondamental à justifier dans le travail de modélisation [ROU 00], [DEF 03]. On voit de moins en moins d'interprétations de modèles qui se traduisent par des histoires qui pourraient être plausibles et rappellent

² Voir le critère d'adéquation structurel de Poincaré en annexe, par exemple.

souvent le système-cible modélisé et de plus en plus de comparaison de formes entre les sorties du système virtuel et les données de l'observation empirique.

La comparaison quantitative aux données ne doit pas pour autant être abandonnée, d'une part parce que le courant mentionné juste au-dessus tend à glisser doucement vers le quantitatif, et d'autre part, parce que le modélisateur qui aurait collecté des données sur son terrain peut vouloir, avec raison, les comparer aux sorties de son modèle. Cependant, il nous faut souligner que cette tâche est délicate, au moins pour deux points principaux. Le premier concerne le manque de données ou l'impossibilité de répéter de nombreuses fois des expériences de terrain. Le second qui est lié, concerne la surdétermination des données par les paramètres du modèle³. A propos de cette comparaison, nous pouvons identifier plusieurs critères pour la qualifier, notamment le niveau de l'organisation à laquelle la comparaison a lieu et le fait qu'elle soit temporelle ou pas. Concernant le niveau d'organisation, nous pouvons ainsi vouloir comparer des données collectées à des indicateurs du modèle définis au niveau individuel (il s'agira par exemple de comparer des trajectoires individuelles dans le modèle à des données individuelles du système), ou définis au niveau macroscopique (on cherchera alors à comparer un indicateur global comme la taille de la population à un indicateur global du système considéré), voire à des niveaux intermédiaires [JEA 03] (à l'échelle d'une cohorte ou d'un petit groupe d'individus par exemple). Le fait que les données collectées soient des séries temporelles ou des données collectées à un temps donné permet également de cerner le type de comparaison réalisable ; inutile par exemple de comparer des trajectoires individuelles du modèle si l'on n'a pas de données collectées dans le temps sur des individus particuliers. Cependant, il faut se satisfaire dans ce cadre de comparaisons partielles aux données, les données en sciences sociales étant difficiles et coûteuses à obtenir, et le lien entre ces données et les variables du modèle n'étant pas toujours aussi automatique qu'il y paraît. Pour évaluer le saut quantitatif qui existe entre le modèle et les données, considérons un modèle où mille agents ont initialement une opinion, codée sous forme continue, et une incertitude. Ces individus sont situés sur un réseau social et changent d'opinion en fonction de leur état et de l'état de leurs voisins. Idéalement, il nous faudrait posséder des données concernant l'évolution de l'opinion de ces mille individus dans le temps, des données permettant de déterminer l'état du réseau social au départ et concernant le lien aux données. Il faudrait pouvoir, de manière aussi fiable que possible, relier les opinions collectées à une valeur réelle comprise entre -1 et 1. Il faut ainsi renoncer à obtenir les données suffisantes qui correspondraient aux données qu'il est possible de produire dans le temps par une série d'expériences de simulations et se satisfaire de comparaisons partielles, soit au niveau macroscopique, soit au niveau des trajectoires

³ A ne pas confondre avec la thèse de la « surdétermination des faits par les théories » (les faits sont « chargés de théorie ») ou la thèse de la sous détermination des théories par l'expérience (plusieurs théorie compatibles avec les même faits) – voir annexe à ce chapitre.

individuelles qui apportent déjà des éléments, même s'ils sont loin d'être définitifs, pour la validation.

L'autre problème soulevé par la comparaison aux données (principalement macroscopiques) porte sur la surdétermination des paramètres du modèle. Le problème se pose classiquement pour des modèles descriptifs possédant plus de paramètres (ou de degrés de liberté) que de données disponibles. Ce problème est rarement soulevé pour la simulation multi-agents mais mérite pourtant que l'on s'y attarde. Si par exemple on dispose d'une vingtaine de points empiriques permettant de qualifier l'évolution du système-cible de manière globale à vingt instants différents et si notre modèle multi-agents est composé d'une centaine d'agents dont l'état initial de chacun, de même que l'organisation initiale les uns par rapport aux autres, influencent les résultats de la simulation, nous nous retrouvons alors devant un nombre impressionnant de degrés de liberté sur lesquels jouer et l'on pourrait presque dire que quelque soit le nombre de données disponibles, le modèle peut sous certaines conditions produire des données très proches des données empiriques. Même si l'on se retrouve rarement dans le cas caricatural d'avoir un modèle qui permette de s'ajuster à n'importe quelle série de données, ce qui remettrait en cause sa capacité à jouer le rôle de « filtre discriminant » sur les entrées, il est fréquent que le modèle multi-agents ait suffisamment de souplesse pour pouvoir localement s'ajuster à une courbe de même forme. Ce problème est évidemment à traiter au cas par cas, mais pour un modèle assez souple, il serait raisonnable de ne conduire qu'une comparaison qualitative puisqu'en définitive c'est la seule comparaison qui soit possible.

D'un point de vue formel, la validation externe consiste à apporter des indices qui permettent de dire que le modèle est effectivement adéquat aux phénomènes observés. Elle permet de tirer plusieurs types de conclusions utiles : explications sur le fonctionnement en précisant les paramètres qui influent de façon centrale ; indications sur l'influence de plusieurs institutions pour résoudre un problème ou organiser une situation ; démonstration du fonctionnement de la rationalité des acteurs ; prévisions sur l'évolution de la situation au regard du contexte présent. Selon l'objectif et les données d'origine, les éléments pour évaluer la pertinence du modèle peuvent être purement quantitatifs - on fait correspondre les valeurs d'un indicateur de la simulation avec les valeurs obtenues dans la situation réelle ; ces données peuvent être qualitatives, et l'on fait alors une évaluation de la pertinence des comportements du système en identifiant des classes qualitatives de phénomènes. Les éléments observés peuvent être uniquement globaux, ou alors concerner aussi la logique des comportements des agents individuels et des communications qu'ils effectuent.

4.3.4. Comparaison de modèles

La comparaison de modèles est également une des activités mobilisables lorsqu'il s'agit d'évaluer un modèle. Grimm [GRI 99] en préconise l'usage dans une acception un peu plus restrictive que les travaux qui ont été développés autour de la série de workshops *Model-to-Model* dont nous parlerons ensuite. Ainsi, pour Grimm, les modèles descriptifs globaux existants doivent être comparés aux simulations individus-centrées⁴ en apportant des éléments explicatifs constitutifs des phénomènes. Ce positionnement de Grimm est à resituer dans son domaine d'étude, l'écologie, pour laquelle il existe une tradition de modèles globaux, descriptifs qui ont été travaillés et comparés avec succès à de nombreuses séries empiriques. Ces modèles descriptifs qui rendent compte de phénomènes particuliers qui sont abordés dans les simulations individus-centrées étudiées par Grimm, peuvent être utilisés dès lors comme substituts à un phénomène réel. Ces modèles classiques qui tendent à expliquer des phénomènes globaux, sont généralement construits en utilisant des formalismes comme les équations aux dérivées partielles ou des modèles à compartiments. Ils constituent pour Grimm un cadre robuste de référence pour la construction de simulations individus-centrées. Ce positionnement de Grimm, s'il est séduisant, est difficilement applicable aux sciences sociales où la tradition de modélisation, si elle existe dans certains domaines (l'économie mathématique par exemple), n'a pas produit de modèles descriptifs suffisamment convaincants pour qu'ils fassent l'unanimité, contrairement à la situation en écologie. Les travaux entrepris autour de la série de workshops *Model to Model* (M2M) [HAL 03], s'ils sont plus récents, proposent un cadre plus adapté à la situation des sciences sociales en listant un certain nombre d'approches pour l'évaluation des modèles par la comparaison, en particulier les modèles de la littérature. Parmi celles-ci, nous pouvons citer par exemple :

- la réplication, dont il est fait mention plus haut, dans un nouveau langage de programmation de modèles publiés, permet d'en comprendre toutes les subtilités et de reproduire les résultats publiés [AXE 97], [BIG 05]. Ce point permet essentiellement de vérifier la reproductibilité des modèles et des résultats et montre souvent que les informations fournies dans les articles publiés sont incomplètes [ROU 03] (ce qui est même vrai pour le modèle maintenant classique d'Epstein et Axtell [EPS 96] [BIG 05]) ou concernent des résultats faux [EDM 03] ;

- le couplage des modèles où les différentes échelles (de temps ou d'espace) sont interconnectées, les résultats d'un modèle étant utilisés par un autre. L'interconnexion permet, outre l'extension d'un modèle, de traiter des données correspondant davantage à une réalité, là où par exemple des distributions théoriques ont été utilisées pour la validation interne ;

- la comparaison de différents modèles qui annoncent le même type de résultats en essayant d'identifier s'ils produisent effectivement des résultats similaires, voire

⁴ Dénomination des simulations multi-agents utilisée en écologie et parfois en sciences sociales.

identiques. Cette méthode est parfois désignée sous l'appellation « alignement de modèles » [AXT 96] et permet parmi un ensemble de modèles soit de comparer les effets d'hypothèses différentes soit, si les résultats sont similaires, de sélectionner le modèle le plus simple ou le plus facilement interprétable en suivant le principe de parcimonie ;

- la comparaison de différents modèles relativement à leur adéquation à une série de données. Cette technique, plus connue sous le terme de *docking*, permet de juger essentiellement de la reproduction qualitative de données empiriques mais ne constitue pas un critère définitif de validation des modèles, comme nous l'avons déjà souligné ;

- l'utilisation d'un modèle plus simple comme un résumé *a posteriori* ou une abstraction des résultats d'un autre modèle. Cet exercice permet à la fois de construire le modèle du modèle en facilitant la compréhension du premier ou facilite son utilisation, le deuxième modèle étant typiquement un modèle descriptif des résultats produits par le premier ;

- l'utilisation des modèles en changeant les structures et les hypothèses pour tester la robustesse structurelle du modèle.

4.4. Conclusion : comment rendre valide un système de simulation complexe ?

Arrivé au terme de cet article, le lecteur pourrait au fond être déçu de ne pas avoir de critère définitif de validité qui lui permette de répondre catégoriquement à la question « mon modèle est-il valide ? ». Il pourrait d'autant plus ressentir cette frustration s'il avait au préalable une idée de la validation telle qu'elle se pratique pour les modèles statistiques et descriptifs où la validité semble n'être jaugée en pratique que par la comparaison aux données que le modèle est censé décrire. Ce serait oublier un peu rapidement que la validation reste un jugement humain subjectif : une décision appuyée par des critères fournis par le chercheur. Vu sous cet angle, il semble que le travail principal dans la modélisation n'est pas de fournir des réponses clef en main, mais bien de fournir de manière aussi claire et détaillée que possible, les critères qui permettront sinon de valider le modèle en question, du moins de l'évaluer, de le jauger. L'impossible validation formelle d'un modèle multi-agents force à une réflexion sur l'usage du modèle pour le rendre valable, l'interprétation des résultats étant réalisée relativement à un contexte.

Parmi ces critères, et nous en avons listé un certain nombre au cours du texte, tous étant utiles à notre sens mais non absolument nécessaires, nous pouvons retenir également ceux que propose Jean-Marie Legay [LEG 73], en parlant d'autres types de modèles et d'autres types de systèmes. Jean-Marie Legay articule son discours sur la validation sur trois points essentiels :

(1) les modèles sont toujours imparfaits ;

(2) la valeur que l'on peut accorder aux modèles est nécessairement relative à leur but, un modèle étant avant tout un outil ;

(3) la validation est une décision, un jugement, qui s'appuie sur des critères de validité dont aucun, pris isolément, n'a de valeur décisive et l'ensemble des critères permet de décrire un profil du modèle étudié et de prendre la décision concernant sa validité. A partir de ces éléments, Legay donne alors une description précise de différents critères dont certains peuvent être pris en compte pour prendre cette décision de validation du modèle :

– *l'utilité du modèle* : entendue comme l'ensemble des résultats et succès produits par le modèle. En simulation multi-agents, on peut placer la posture de ComMod (voir chapitre 10° comme donnant une réponse pour une mise en contexte qui rend le modèle utile. C'est l'idée de modèle comme objet de médiation [MOR 99] ;

– *la simplicité* : critère de parcimonie que nous avons évoqué. Il faut noter que Legay précise bien que la simplicité n'est pas une qualité en soi et que la modélisation requiert une prise en compte nécessaire de la complexité de la réalité. La question de l'équilibre entre simplicité et complexité est, on l'a vu, au centre de la dispute entre tenants du KISS et du KIDS ;

– *la non-contradiction* : Le modèle doit respecter les relations observées. A cette fin, de nombreuses techniques statistiques peuvent être mobilisées, comme par exemple le test du χ^2 pour tester la correspondance entre les productions du modèle, les observables des expériences de simulations et les données empiriques collectées sur le système-cible. La non-contradiction signifie simplement que le modèle n'est pas à repousser, mais cela est insuffisant pour penser qu'il est adéquat et encore moins qu'il est le meilleur. Dans le cadre des simulations multi-agents, on a vu que la question se pose à la fois au niveau des résultats macroscopiques et des trajectoires individuelles [JAN 03] : on peut facilement obtenir de bons résultats pour de mauvaises raisons ;

– *la fécondité* : critère qui prend en compte les conséquences non prévues que le modèle entraîne, quand l'utilité concernait uniquement les conséquences prévues ;

– *la convergence* : La validité d'un modèle croît avec son usage, c'est-à-dire le nombre d'expériences indépendantes qui le confirment. Par exemple, quand sont reproduits certains équilibres du modèle de Epstein et Axtell [EPS 96], on peut considérer que le modèle gagne en solidité [BIG 05] ;

– *la stabilité* : le fait que le modèle soit insensible aux facteurs secondaires, qui ne concernent pas directement les hypothèses importantes de modélisation, mais qu'il soit sensible aux facteurs primaires. C'est cette sensibilité sélective qui fait du modèle un bon instrument d'exploration et de mesure. On a vu que le travail d'étude de la dynamique du modèle est principalement une recherche de ces facteurs primaires, et

de la détermination de l'espace des paramètres à l'intérieur duquel ils peuvent varier tout en conservant la structure du système ;

– *la non-identité* : Un modèle est efficace parce qu'il diffère de son objet, et en particulier parce qu'il est plus simple et plus mobilisable pour obtenir de la connaissance.

Aussi pertinents qu'ils soient, ces critères ont encore besoin, pour devenir opérationnels, d'être associés à des méthodes d'évaluation (en particulier techniques) éprouvées. Considérant que la simulation au sens large est assez récente, il n'est guère étonnant que la validation de simulations multi-agents, qui en est une des plus jeunes émanations, ne propose pas encore d'outils fiables et utilisés par tous. Néanmoins, la structuration autour d'équipes à compétences multiples, mobilisant tout à la fois informaticiens, statisticiens et thématiciens, commence à produire ou à adapter des outils pour l'étude des systèmes complexes que sont les simulations multi-agents. Cependant, une caractéristique de la communauté multi-agents depuis son origine est sa grande conscience qu'aussi loin qu'on aille dans la validation d'un modèle, celui-ci ne sera connu que de façon limitée, tout autant que le système-cible qu'il représente. Dans ce contexte, les questions concernant la validation des modèles ne sont pas dissociées de celles relatives à leur usage et l'évaluation positive du modèle n'en fait pas un outil abstrait de son contexte social.

4.5. Annexe. Epistémologie dans une coquille de noix : concevoir et expérimenter

Dans la tradition occidentale, depuis le : XIV^e siècle au moins, la philosophie de la connaissance s'est construite autour de l'idée de la *connaissance comme représentation* [BOU 99]. La question de *l'évaluation de la connaissance* renvoie alors à la fois à l'*objet* représenté (que représente-t-on ?), au *processus de formation des connaissances*, en particulier au rôle du *sujet* connaissant (qui représente et comment représente-t-on ?) et enfin au *rapport* entre la représentation et l'objet qu'elle représente. C'est par rapport à ces trois dimensions que les critères d'évaluation de type « validité », « adéquation » ou « vérité » prennent sens. *L'évaluation* peut donc porter aussi bien sur les rapports entre sujet et objet, y compris sur les structures (cognitives, sociales) qui l'organisent, que sur les rapports de *similarité* entre l'objet et sa représentation. Elle dépend également de la nature ontologique de l'objet de connaissance. Les critères pertinents d'évaluation dépendent donc des *points de vue* adoptés sur ces questions. Comme il y a effectivement pluralité dans ce domaine, le but de cette annexe est de résumer aussi brièvement que possible les différentes postures adoptées par les philosophes et de renvoyer à des textes de référence pour plus d'information (pour un premier aperçu, voir les ouvrages signalés dans l'introduction de ce livre). La seconde partie, plus exploratoire, introduit une approche de la simulation comme « expérimentation ». Elle suggère qu'une telle perspective, souvent évoquée dans la littérature, peut, en certains cas, conduire à remettre en cause la conception non seulement représentationnelle mais aussi langagière de la simulation. Pour des raisons de place, les épistémologies spécifiques aux Sciences Humaines et Sociales

ne sont pas abordées ici, mais le lecteur trouvera des informations à ce sujet dans [BER 01].

4.5.1. *Concevoir : la représentation et au-delà*

Pour le sens commun, les « objets » du monde tels qu'ils sont donnés à nos sens ont bien une existence « réelle ». Mais pour connaître le monde, l'homme utilise des entités, classifications et théories qui vont bien au delà de ce qui apparaît à nos sens et de ce que l'on peut donc directement représenter. Au-delà de ce qui est représentable se trouve ce qui est concevable, ou conceptualisable. Mais la « réalité » de ces inobservables est problématique : existent-ils effectivement en dehors de nous, ou sont-ils de simples constructions de l'esprit ? Par extension, la nature même de la réalité apparaît problématique. Dans quelle mesure les objets du monde sensible ne sont-ils pas eux-mêmes une construction de l'esprit ? En philosophie, ces questions de nature *ontologique* sont abordées par la question du *réalisme*.

Le Moyen-âge a opposé le réalisme, pour lequel les entités abstraites (universaux) que nous utilisons dans nos opérations de classification existent effectivement dans la nature, au *nominalisme*, pour lequel ces entités ne sont que le produit de la pensée. En logique, le réalisme est la thèse selon laquelle une propriété est vraie ou fausse indépendamment des moyens que nous avons de la vérifier. A l'époque moderne, le réalisme que l'on qualifiera avec Zwirn [ZWI 00] de « métaphysique » s'oppose à l'*idéalisme* et désigne une thèse (Z1) selon laquelle il existe une réalité extérieure (ou réalité « en soi ») indépendante de l'existence d'observateurs et de la connaissance qu'ils pourraient en avoir. Pour définir une position réaliste en philosophie de la connaissance, Zwirn introduit une thèse intermédiaire sur l'*intelligibilité du réel* (Z2) : la réalité en soi est constituée d'entités intelligibles réglées par des mécanismes qui nous sont (totalement ou partiellement) accessibles. Le *réalisme épistémique* (Z3) est alors la thèse selon laquelle les théories scientifiques acceptées sont « vraies » si leurs objets se réfèrent à des entités réelles et que leurs mécanismes se déroulent effectivement dans la réalité. Pour un réaliste épistémique, la validation d'une théorie est donc liée à son adéquation avec la réalité. Si l'on n'adopte pas le point de vue Z3, la connaissance vue comme représentation pose alors la question des *styles de représentation* [HAC 83]. Des représentations peuvent ainsi différer par la perception qu'en a le sujet (l'*expérience* sensible), par la manière dont son esprit procède (la *rationalité*), ou encore par le savoir-faire technique (la *pratique* de représentation). Des études historiques suggèrent que ces trois dimensions sont inter-dépendantes et ont varié dans le temps. Mais curieusement, la volonté de produire des critères « objectifs » et intemporels de l'activité scientifique a longtemps occulté ces interdépendances.

4.5.1.1. A l'origine des connaissances : l'expérience ou la raison ?

La proposition selon laquelle notre connaissance provient à la fois de notre expérience sensible et de nos raisonnements semble aller de soi. L'accent mis sur l'un ou l'autre de ces pôles a cependant donné naissance à deux traditions philosophiques initialement antagonistes : le *rationalisme* et l'*empirisme*. La position épistémologique empiriste, selon laquelle « toute connaissance dérive de notre expérience sensible » s'est en effet développée contre l'épistémologie rationaliste de Descartes pour laquelle « la connaissance est d'abord fondée sur la raison ». La combinaison du réalisme et de l'empirisme (comme chez Locke) est problématique. Elle pose en particulier la question de la « vérité » des connaissances (au sens Z3) lorsque celles-ci sont dérivées de l'expérience sensible par une démarche inductive. Ce « problème de l'induction » a été mis en évidence par Hume, un des fondateurs de la tradition empiriste anglo-saxonne.

La *démarche inductive* pose le problème du passage d'un énoncé d'observation singulier à un énoncé général de type nomologique (« loi empirique »). Ce passage s'effectue par une *inférence inductive* qui procède par généralisation à partir d'un certain nombre d'observations. D'un *point de vue logique*, cette inférence est incorrecte, car quel que soit le nombre d'observations auquel on procède, une observation ultérieure pourrait toujours venir contredire cette généralisation. Cependant, d'un *point de vue pratique*, cette généralisation correspond bien à un mécanisme cognitif effectif : la répétition observée engendre l'attente d'une répétition. Ce mécanisme cognitif est qualifié « d'induction selon le sens commun » par Popper [POP 72]. Pour Hume, c'est l'habitude qui est le cadre cognitif dans lequel le principe de causalité, loin d'être une nécessité inscrite dans les choses, vient se construire dans une raison acquise. Il a également proposé de distinguer, à partir d'un *critère empirique de vérifiabilité*, les discours empiriquement « dotés de sens » de ceux qui ne l'étaient pas (métaphysiques). C'est donc à partir de considérations pratiques que Hume a cherché à fonder une épistémologie empiriste qui utilise un principe de vérifiabilité fondé sur l'inférence inductive dont il avait montré lui-même la nature problématique d'un point de vue logique.

Les fondements logiques de l'induction restent aujourd'hui encore une question problématique pour les épistémologies empiristes, même dans les versions probabilistes [BOU 72], [HAC 01]. Dans ces conditions, combiner un réalisme épistémologique (Z3) avec une version naïve du principe épistémologique empiriste selon laquelle « il n'y a rien dans notre entendement qui n'y soit entré auparavant par les sens » conduit au paradoxe. Une « loi empirique » obtenue par la méthode inductive ne pourrait être réputée « vraie » que si elle « reflète » la réalité (ce serait le « miroir de la réalité »), alors qu'il n'existe pas de critère logiquement valide pour s'en assurer. Devant l'impossibilité de connaître la vérité de telles « lois », la « révolution copernicienne » de Kant est une première réponse aux questions de l'induction et du réalisme épistémologique. La *synthèse kantienne* combine un possible réalisme métaphysique avec les principes d'un idéalisme qu'elle dit transcendantal. S'il existe une réalité en dehors de nous, elle est

inconnaissable : on ne peut accéder aux choses « en soi », mais uniquement aux phénomènes sensibles. Puisqu'on ne peut fonder la vérité de la science sur la seule observation, ce ne sont pas les données sensibles, mais les formes *a priori* de la sensibilité et les concepts spontanés de l'entendement ainsi que la capacité de produire des jugements synthétiques *a priori*, qui sont au fondement de notre démarche de connaissance scientifique. Selon Zwirn, le *postulat empirique* selon lequel nous n'avons accès qu'aux phénomènes et non à la réalité « en soi » est maintenant admis par la majorité des réalistes comme des non-réalistes. Un *réalisme faible* suppose alors la réduction d'une tension : comment peut-on logiquement soutenir l'existence d'une réalité qu'on admet en même temps ne pas pouvoir connaître ?

4.5.1.2. Du pragmatisme de Peirce au conventionnalisme de Duhem et Poincaré

Selon un point de vue postkantien, la vérité ne peut donc plus résulter d'une correspondance avec un réel inconnaissable. Peirce va tenter de substituer au critère de vérité-correspondance un critère à la fois méthodologique et social. Il décrit la connaissance comme une enquête qui procède par révision successive des croyances dans le but d'atteindre une croyance « stable » du point de vue intersubjectif. La vérité, c'est alors « ce vers quoi tend l'enquête » [TIE 93]. La valeur des entités ou relations utilisées dans la connaissance savante réside dans les effets pratiques qui résultent de leur mise en œuvre. La science devient socialement autocorrective et collectivement rationnelle : son objectivité résulte de la stabilisation collective des croyances rationnelles des chercheurs. Selon Peirce lui-même, il s'agit d'un « idéalisme objectif » (et non plus transcendantal). Mais c'est aussi un *faillibilisme* car ces croyances sont toujours imparfaites, révisables. Chez Peirce, c'est le *doute justifié* qui motive l'enquête. Celui-ci provient plus d'un état subjectif d'insatisfaction que de critères empiriques objectifs. Celle-là est alors fondée sur les trois moments que sont l'abduction, la déduction et l'induction. L'*abduction* consiste à proposer une hypothèse explicative (conjecture provisoire) pour expliquer un fait surprenant qui active le *doute*. De l'hypothèse, on tire par *déduction* des conséquences que l'on soumet à l'épreuve, dans une *phase inductive*, qui n'est pas ici un processus de construction d'hypothèses par généralisation, mais une évaluation empirique. Des résultats négatifs conduisent à reformuler une nouvelle hypothèse (abduction) alors que des résultats positifs diminuent le doute. L'ensemble de cette démarche est parfois qualifiée d'« abductive » dans un sens large [WAL 03]. Elle est anti-inductiviste dans le sens où le point de départ n'est pas la généralisation d'observations, mais l'art de former des conjectures pertinentes à partir de l'observation, comme le font le médecin avec les symptômes, ou le détective avec les indices. Peirce, justifie cet « art » de manière naturaliste par un argument évolutionniste : si nous ne savions pas formuler des hypothèses pertinentes, l'espèce humaine aurait disparu. L'abduction (limitée au sens étroit d'une « inférence en faveur de la meilleure explication ») n'est pas plus que l'induction un raisonnement logiquement valide. Une hypothèse explicative peut mobiliser plusieurs conditions liées dont certaines ne sont pas nécessaires ou encore dont plusieurs peuvent avoir isolément pour conséquence le phénomène observé. De plus, une hypothèse qui semble convaincante n'exclue pas la possibilité d'hypothèses concurrentes. Ces questions vont

être reformulées au début du XX^e siècle, pour le cas de la physique, par Duhem [DUH 06] et Poincaré [POI 03].

Pour Duhem une théorie physique formalisée mathématiquement est un *système de symboles liés*, qui entraîne une *indétermination* en raison de la *nature holistique des théories*. Si l'induction facilite la constitution de « lois expérimentales » à partir des observations et stimule l'émergence de nouvelles énigmes, l'interprétation de telles lois présuppose leur rattachement à un corpus symbolique et théorique qui leur donne sens. Chez Duhem, comme chez Poincaré, les théories sont provisoires et leur adéquation aux phénomènes approchée. Un phénomène expérimental peut donc être réinterprété dans un système symbolique plus approprié. Si une théorie est consistante avec un ensemble de données, on peut toujours construire une théorie plus sophistiquée utilisant des non observables dont les prédictions se révéleront consistantes avec le même ensemble de données. Mais deux théories incompatibles pourraient aussi être en concurrence pour expliquer les mêmes observations sans qu'il soit possible de trancher entre elles. Le physicien choisira parmi les théories possibles selon le critère qui paraîtra le plus pertinent par rapport à son objectif et aux règles de sa communauté : simplicité, degré de précision des résultats, cohérence avec d'autres théories. Les théories reposent alors sur des *conventions motivées* en raison de leur commodité pour atteindre des *objectifs spécifiés*. Selon le point de vue conventionnaliste, une théorie est donc un *système formel utile* dont la validité ne dépend pas de la correspondance entre des énoncés et une réalité supposée exister en soi (Z3), mais renvoie (1) à la consistance interne du système symbolique (2) à l'accord intersubjectif de la communauté scientifique et à la capacité à « sauver les phénomènes ». Chez Poincaré cependant, cet accord n'est pas arbitraire et l'efficacité de la science provient de l'*adéquation entre la structure des théories et la structure du réel*.

4.5.1.3. *Le vérificationnisme du positivisme logique et le falsificationnisme poppérien*

Dans la filiation empiriste, les *positivistes* du « cercle de Vienne » intègrent les nouveaux développements de la logique formelle et de l'analyse du langage (à partir de Frege). Refusant les jugements synthétiques *a priori*, ils considèrent que l'induction permet de concevoir des lois par généralisation et d'organiser les connaissances selon un modèle « déductif nomologique » grâce aux règles de la logique et des mathématiques. La validité d'une loi repose pour eux sur trois principes : l'expérience sensible, la cohérence logique et la vérification.

(1) Un énoncé correctement construit est « pourvu de sens » s'il est vérifiable par l'expérience sensible ; (2) Les déductions logiques et mathématiques, sont « valides » si elles vérifient le principe de non contradiction (au sens de la logique des propositions), mais dépourvues de sens sans (1) ; (3) Le dernier principe : la *vérification empirique* est logiquement problématique. L'induction ne peut être vérifiée lors de la formulation de la loi (à cause des problèmes logiques de l'inférence inductive et du rejet des *synthèses a*

priori): elle ne peut donc l'être qu'en aval *par l'évaluation du pouvoir prédictif*. Le positivisme logique visait à fonder les sciences empiriques sur le principe de vérifiabilité (1) et sur l'unification du langage scientifique (2), ce qui présuppose en particulier une distinction entre le théorique et l'observationnel. Tous ces points ont été sérieusement remis en question, en particulier par Popper et Quine.

L'épistémologie de Popper considère qu'une théorie reste une *conjecture* [POP 63]. N'étant jamais vraie, seules ses conséquences seront soit *corroborées* soient *réfutées* par l'expérience. C'est donc un *faillibilisme* car les connaissances sont imparfaites et révisables par construction. Des théories non réfutées sont classées selon leur degré de corroboration. Malgré la fausseté constitutive des théories conjecturées, le réalisme scientifique (faible) de Popper l'amène à considérer que certaines théories sont moins « fausses » que d'autres. La fonction des critères d'adéquation empirique de Popper est l'inverse de celle du vérificationnisme des positivistes logiques.

Chez le premier, on formule d'abord une conjecture théorique, dont on déduit des conséquences qui seront soumises à l'épreuve des faits. Chez les seconds, on construit des énoncés par généralisation d'observations empiriques, on en tire des prédictions au moyen d'un système déductif et on se sert d'observations supplémentaires pour confirmer ou vérifier les énoncés ainsi établis. On peut considérer la formation de conjectures comme une démarche cognitive proche de l'abduction ; mais Popper impose la testabilité des conjectures comme aussi la notion de contenu empirique (nombre d'énoncés dérivables et empiriquement testables), comme critères de scientificité. On a adressé à cette approche deux types de critiques.

(1) On ne peut tester un énoncé ou une hypothèse séparément (ou isolément) (Duhem-Quine). Popper intègre cependant cette difficulté dans un falsificationnisme sophistiqué, même si affaibli ; (2) Comme les positivistes logiques, qui considéraient les énoncés protocolaires issus de l'expérience sensible comme hors de doute, Popper tente de fonder la connaissance scientifique sur des « faits objectifs » [POP 72]. Certaines expériences reposent ainsi sur une mesure dont on admet l'objectivité. Mais considérer une mesure comme objective, c'est faire de l'induction en supposant que les instruments de mesure ont fonctionné « comme d'habitude ». La question de la validité d'une réfutation se trouve ainsi posée. S'il n'existe pas de certitude sur la procédure de réfutation, mais seulement une conjecture, il est logiquement contradictoire de tenir les réfutations pour certaines : le critère poppérien de démarcation entre science et non-science n'est donc pas lui-même réfutable.

4.5.1.4. Le rôle de « l'arrière plan » conceptuel et l'abandon du mythe de l'unicité

De nos jours, un grand nombre d'auteurs admettent que l'induction, comme les mises à l'épreuve empiriques présupposent des « théories d'arrière plan ». Ainsi, nos perceptions comme nos expériences doivent être rattachées à des cadres conceptuels qui agissent comme un « filtre » au niveau de l'interprétation : les « faits » sont donc en partie des construits cognitifs, théoriques ou sociaux. C'est la thèse de la *surdétermination des faits par les théories*. Après Duhem [DUH 06] et Bachelard [BAC 34], Hanson [HAN 58] s'appuie sur Wittgenstein pour discuter le *poids de l'interprétation dans l'observation*, supposée objective à la fois chez les positivistes logiques et chez Popper. Pour Hanson, les faits sont toujours construits et « chargés de théorie ». S'appuyant sur la distinction (due à Reichenbach), entre *contexte de découverte* et *contexte de justification*, il montre que la « mise en forme » des faits est un moment nécessaire de la découverte, nécessaire à leur intelligibilité : les systèmes explicatifs « font partie intégrante de nos observations, de notre appréciation des faits et des données » [HAN 58, p.3]. C'est la même non-neutralité constitutive du point de vue scientifique sur son objet qui est source de fécondité : l'observateur paradigmatique n'est pas l'homme qui voit et rapporte tout ce que les observateurs normaux voient et rapportent, mais l'homme qui voit dans les objets familiers ce que personne d'autre n'a vu avant » [HAN 58, p.38]⁵.

Au début des années 60, les travaux de Quine et de Kuhn ont ruiné l'idée dominante en épistémologie d'une possible unicité (objective) des significations, et d'un accès par l'expérience au monde « tel qu'il est » (Z2). Quine [QUI 60] a prolongé la thèse de la sous-détermination des théories par une thèse de *l'indétermination de la traduction*. Elle renvoie à une confrontation entre conceptions du monde ou « schèmes conceptuels » différents, qui introduisent, comme les « paradigmes » de Kuhn [KUH 62], une dimension anthropologique et/ou historique dans l'épistémologie. On a donc une certaine incommensurabilité des discours et des théories. Chez Kuhn [KUH 77] elle peut provenir de *l'objet des théories*, de *l'historicité des conceptions* ou de *l'unicité du sens*. Chez Quine, la traduction est possible, mais elle n'est pas univoque. Cette ruine du « mythe de la signification » est aussi dévastatrice pour les thèses du positivisme logique que les problèmes du réalisme empirique le sont pour la théorie de la vérité-correspondance (où la vérité est définie comme adéquation entre les choses et leur représentation). Finalement, par

⁵ Dans les sciences sociales, cette dépendance des faits par rapport aux structures cognitives comme aux théories d'arrière-plan est maintenant admise par de nombreux auteurs [BER 01]. En économie par exemple, l'instrumentalisation du recueil des données statistiques [FOU 80], l'inadéquation des concepts théoriques et des concepts opérationnels, les discussions sur les faits stylisés ou la définition des grandeurs économiques [MOU 96] viennent s'ajouter à d'autres sources d'imprécision des données économiques [MOR 50]. En histoire, Revel dans [BER 01] considère qu'au-delà des faits historiques, cette « production » se manifeste aussi dans le choix des échelles temporelles et spatiales d'observation. Le lecteur trouvera dans [HAC 99] une discussion critique de la notion de « construction sociale » et de nombreux exemples.

des voies différentes, on retrouve le problème de l'interprétation herméneutique. L'existence de schèmes conceptuels différents se traduit par une *relativité des ontologies* : parler d'objets et de propriétés n'a de sens que dans un référentiel particulier. Même si les thèses relativistes ont elles-mêmes été sévèrement attaquées [DAV 74], [BOU 94], les contributions de Hanson, Quine et Kuhn remettent en question l'unicité des critères d'évaluation des théories et renforcent l'anti-réalisme. En présence du même phénomène, des observateurs qui ont des théories différentes auront des perceptions et des interprétations différentes. Dans un tel contexte, l'épistémologie risque la dissolution dans le relativisme (c'est-à-dire Feyerabend, voir [SCH 98], bibliographie de l'introduction).

L'abandon des critères monistes est patent et les auteurs cherchent des cadres de référence plus flexibles et compatibles avec une certaine historicité. Pour *l'empirisme constructif* de van Fraassen [FRA 80], la science construit des modèles qui « sauvent les phénomènes » et l'acceptation d'une théorie implique seulement la *croissance* en son adéquation empirique et non plus en sa vérité. Au début des années quatre-vingt, on assiste à un retour du pragmatisme. Putnam [PUT 81] a ainsi adopté une position néo-peircienne, pour contrer le relativisme « fort » tout en admettant la pluralité et l'historicité des points de vue. Il conserve le réalisme du sens commun, tout en rejetant le réalisme épistémique (Z3 - qualifié de « métaphysique » ou « externe »). Selon Putnam soutenir Z3 aboutit à un paradoxe : pour expliquer le monde du sens commun, la science ne considère comme « réel » que les objets des théories (comme les atomes), ce qui revient à nier la réalité des objets de sens commun, comme les tables et les chaises qui n'existeraient que dans notre esprit. Son *réalisme « interne »* consiste à lier le sens d'un concept à une interprétation contextuelle. Selon la perspective externaliste, il n'existe qu'une seule description vraie du monde, conformément à Z3. Selon une perspective internaliste, *une question ontologique n'a de sens qu'à l'intérieur d'un système de croissance*. On retrouve l'idée des schèmes conceptuels et celle de la relativité de l'ontologie introduites par Quine ; mais elles sont ici subordonnées à un principe de consistance interne. La « vérité », relative, dépend ainsi de la cohérence des croyances entre elles et avec les expériences telles qu'elles sont représentées dans un système conceptuel de référence (comme les tables et les chaises qui « existent » dans le système de référence du sens commun). D'un point de vue « interne » (à un cadre conceptuel) la propriété d'exister ne se réfère donc pas à une réalité « en soi », mais à un cadre conceptuel dans lequel elle prend un sens de manière déterminée. Les faits deviennent dépendants du cadre conceptuel auquel ils sont rattachés, ce qui l'amène à reconsidérer en particulier la dichotomie faits/valeurs [PUT 02] comme le mythe du point de vue épistémologique du *spectateur impartial* (le « point de vue de Dieu »).

4.5.1.5. *La théorie comme construction algorithmique dans une conception post-kantienne*

Le programme du positivisme logique considérait comme acquis l'objectivité des faits tirés de l'expérience ainsi que la consistance et la complétude des formalismes

logiques. Nous avons vu que nous ne pouvons pas être pleinement assuré de l'objectivité des faits. Le second point s'est également révélé problématique. Au début du siècle, le programme de Hilbert se donnait pour objectif de fonder les mathématiques sur la logique, dans le cadre d'un système formel meta-mathématique dont il espérait démontrer la non-contradiction et qui pourrait ainsi fournir un cadre de raisonnement et des preuves indubitables. Gödel a montré que dans tout système formel contenant l'arithmétique, il existe toujours des propositions vraies mais indécidables (ni prouvables ni réfutables dans ce système), ce qui introduit une limite intrinsèque à tout formalisme⁶. On ne peut prouver la consistance d'un tel système formel de manière purement syntaxique à l'intérieur de ce système. C'est donc une propriété elle-même indécidable de ce système et il est alors nécessaire d'avoir recours à des méthodes extérieures : la vérité ne peut être réduite à la prouvabilité, ni la sémantique à la syntaxe. Pour Zwirn [ZWI 00], ces limites montrent que « l'idéal de certitude absolue et d'isomorphisme total entre les théories et la réalité en soi doit être abandonné aussi bien pour les mathématiques que pour les sciences empiriques » (p 260). Néanmoins, cela n'empêche pas de considérer qu'on peut avoir un « degré de croyance élevé » dans les méthodes et les résultats de la démarche scientifique dans un cadre que nous allons préciser.

La conception tripartite de Zwirn s'inscrit dans une perspective post-kantienne et tire parti des acquis de la réflexion sur la physique quantique, la calculabilité et les sciences cognitives, tout en adoptant un *réalisme structurel* hérité de Poincaré. Zwirn distingue ce qui est représentable, ce qui n'est que conceptualisable et ce qui ne peut être connu par l'homme. La *réalité empirique* connaissable (les phénomènes) est ainsi décomposée en deux niveaux. Au premier niveau, la *réalité phénoménale* est ce qui est perceptible et représentable dans la réalité empirique, grâce à nos capacités cognitives. C'est ce que l'on appelle usuellement la « réalité empirique ». Mais Zwirn réserve ce terme à une capacité naturaliste de connaître, plutôt qu'à ce qui est effectivement perçu et représenté. Comme chez Quine et Putnam, les phénomènes sont filtrés par des cadres conceptuels cognitifs et sociaux : langage, culture, éducation, en relation avec les limites physiques de nos sens. On peut avoir une vision moniste ou pluraliste de la réalité phénoménale. Dans ce dernier cas, comme avec la thèse de Quine sur l'inscrutabilité de la référence⁷, il est impossible de prendre conscience de cette diversité : « dans ce cas, l'intersubjectivité est une illusion que nous n'avons aucun moyen de dissiper ». Au niveau intermédiaire, la *réalité empirique* de Zwirn lui est spécifique et correspond à *l'inconnu connaissable*. Son périmètre est déterminé *a priori* de manière naturaliste par ce qui est connaissable objectivement d'après les capacités perceptives et cognitives humaines. « En ce sens elle n'existe pas indépendamment de l'homme ». Mais si le périmètre de ce niveau est bien

⁶ Voir : [LAD 57], [GIR 89], [DEL 94], [ZWI 00] et pour une introduction, [DEL 02].

⁷ Dans le cas d'une langue unique l'indétermination de la traduction devient l'« inscrutabilité de la référence » : chaque individu a « une ontologie propre, primitivement acquise et ultimement insondable » [QUI 60]. On ne peut jamais dire avec certitude quel est le contenu profond des propos de quelqu'un, mais cette différence n'apparaît pas au niveau intersubjectif.

déterminé par des caractéristiques objectives de l'espèce humaine, c'est en quelque sorte à l'insu de l'homme lui-même. Ce niveau n'est pas connaissable en tant que tel mais détermine pour Zwirn tout ce qui est conceptualisable, tout en n'étant pas nécessairement représentable. Il permet donc d'intégrer les inobservables. Le « refus de considérer que le conceptualisable épuise tout » conduit Zwirn à définir au plus haut niveau un *domaine non conceptualisable* par l'homme « dont on ne peut pas parler » et donc inconnaissable. Le fait de restreindre le périmètre de la réalité empirique à ce qui est conceptualisable et de définir ce qui ne l'est pas de manière négative évite d'avoir à se référer comme chez Kant à une réalité à laquelle on ne peut accéder. Le connaissable peut-il être réduit au conceptualisable ? L'extension de la réalité empirique au-delà du conceptualisable serait pertinente pour le point de vue expérimental en simulation qui sera développé plus loin.

Zwirn propose une définition constructiviste des théories considérées comme des systèmes formels. Si l'on peut traduire les phénomènes dont on cherche à rendre compte sous forme d'énoncés du langage du formalisme considéré, une théorie peut être vue comme un algorithme qui peut engendrer ces énoncés. Il s'agit alors d'un *algorithme de compression* au sens de la théorie de l'information. On peut ainsi distinguer dans l'activité savante des *sciences formalisables* « qui se laissent décrire par de tels algorithmes ». Avec cette définition computationnelle des théories (proposée également par [PAR 01]), les questions de la sous-détermination des théories par l'expérience et de l'interprétation des entités théoriques trouvent une explication élégante : « les algorithmes ne sont pas de simples formules mais font appel à des entités qui servent d'intermédiaire de calcul ». « Deux algorithmes engendrant les mêmes résultats ne font pas nécessairement appels aux mêmes intermédiaires de calcul » [ZWI 00, p.352]. Les mathématiciens dits « quasi-empiristes » [PEC 98] ont fondé une partie de leurs arguments sur ces considérations liées au problème de la calculabilité (théorie algorithmique de l'information et théorie algorithmique de la preuve). Cette idée est aujourd'hui assez largement partagée. Parrochia [PAR 01] affirme ainsi qu'« en face d'une réalité quelconque, on doit d'abord essayer de la comprimer, car c'est là l'attitude scientifique, la seule que l'on puisse en fait adopter » (p. 172).

La construction de systèmes formels n'implique pas que ces derniers puissent être entièrement vérifiés par démonstration, comme le souligne Zwirn : « tout système suffisamment complexe engendre des conséquences qui échappent à ses capacités de preuve ». Cette approche ne prévoit pas explicitement d'enchaînement nécessaire allant de la réalité phénoménale vers la théorie (comme chez les positivistes) ou, au contraire, d'une conjecture théorique vers une mise à l'épreuve empirique. Selon [WAL 03] la connaissance est vue comme un *système de croyance* que l'on révisé à l'épreuve des phénomènes empiriques en cherchant à *maintenir la cohérence d'ensemble* et à *préserver les croyances qui sont les plus profondément ancrées*. On retrouvera une variante de cette « maxime de mutilation minimale » [QUI 72] avec la hiérarchie des *mis en suspension* de Livet (voir Chapitre 8. Le succès prédictif des théories s'explique par l'argument du *réalisme structurel*. Mais au lieu d'appliquer ce dernier au réel

métaphysique, comme chez Poincaré, il est *appliqué au réel empirique* (niveau intermédiaire). Les échecs s'expliquent parce que « nos théories (construites formellement) ne s'appliquent qu'à la partie de la réalité phénoménale qui s'y prête ». Finalement, le point de vue « *algorithmiste* » particulier de Zwirn, quant à lui, est anti-réaliste au sens classique, car il ne postule pas l'existence d'une réalité totalement indépendante de l'homme (Z1). Il est à la fois partiellement réaliste et partiellement idéaliste dans la mesure où le monde n'est pas une pure création de l'esprit, mais une « réalité empirique » dépendant de nos capacités perceptives et cognitives, qui peut être conçue indépendamment de chaque esprit individuel, mais ne peut l'être par définition indépendamment du monde extérieur : comme le dit Putnam [PUT 81 p. 9], cité par Zwirn : « l'esprit et le monde construisent conjointement l'esprit et le monde ».

4.5.2. Expérimenter

Si nous avons beaucoup parlé de théorie et peu de modèles, c'est qu'en épistémologie jusqu'à une période récente, les modèles ont été traités comme des instruments dérivés des théories et non comme des objets autonomes (voir introduction à cette partie). Selon la vision *pragmatique* proposée par Morgan et Morrison, les modèles (et les simulations) sont perçus comme des « médiateurs autonomes » [MOR 99] entre théorie, pratiques et données expérimentales. Mais leur autonomie n'est que relative. Selon [VAR 06] elle « est de même type que [celle] de la pragmatique par rapport à la syntaxe et à la sémantique en linguistique » (page 32). Mais le développement de l'informatique pourrait ouvrir de nouvelles opportunités. D'un côté, il existe une tradition logiciste forte en informatique, telle que l'on puisse considérer que la logique puisse offrir un cadre théorique général et suffisant pour penser l'informatique [WAG 98]. D'un autre côté, certains auteurs considèrent que l'informatique actuelle est par nature interactive, et non réductible au calcul de fonctions récursivement énumérables [GOL 05]. Ils opposent ainsi une vision « mathématique » à une vision « interactive » de la théorie informatique⁸. Cette opposition n'est pas sans rappeler (sans la recouvrir) l'opposition introduite par Axtell (voir Chapitre 6, introduction deuxième partie) entre simulation comme « complément » ou comme « substitut » des formalismes traditionnels. Cette section présente ainsi une thèse alternative qui permet de penser ces formes de simulation qualifiées de « substitut » des formalismes traditionnels. Elle oppose des simulations « mono-axiomatisées » fondées sur l'unicité du modèle sous-jacent et des simulations pluriformalisées, basées sur des modèles couplés en interaction (voir chapitre 2). [VAR 06] décrit la première approche comme un *computationalisme rationnel*, et la seconde comme un *computationalisme appliqué*, centré sur l'expérience et l'interdisciplinarité, qui permet à la simulation de trouver une véritable autonomie dans un registre « non langagier ». Selon ce point de vue, ces approches pluriformalisées

⁸ Nous remercions Anne Nicolle de nous avoir introduits à cette littérature.

ne recourent pas nécessairement à une théorie représentationnelle de la connaissance et n'engagent donc pas les mêmes questions au regard de la validation.

L'idée selon laquelle de telles simulations offriraient une nouvelle forme d'expérimentation dans les sciences commence à être partagée par de nombreux auteurs [WAG 85], [HUM 90], [WIN 03], voir [LAS 96] pour une mise en perspective et [VAR 01] pour un premier tour d'horizon. Ces auteurs retrouvent une des motivations d'un des fondateurs des techniques numériques de simulation assistées par ordinateur : le mathématicien Ulam [ULA 51]. Selon lui, la simulation numérique de type Monte Carlo, c'est-à-dire la résolution approchée d'un modèle continu au moyen d'un échantillonnage effectué sur ordinateur à partir de nombres pseudo-aléatoires, permet la « production 'physique' de modèles de situations combinatoires ». Pour Ulam, on peut dire qu'elle est une « expérience » en ce sens précis qu'elle vise à répliquer de manière imagée (spatialisée), réaliste et non abstraite⁹ la situation et le phénomène qui affecte cette situation. Une telle simulation fait un usage *physicalisé* des symboles. Nous entendons par là que le support physique des symboles entre à nouveau fortement en ligne de compte dans le calcul, sans passer par une règle conventionnelle purement abstraite de leur fonctionnement, c'est-à-dire liée à l'arbitraire des signes et à leurs règles de combinaisons désincarnées et conventionnelles : ce ne sont donc plus des symboles au sens fort. Ainsi en est-il des neutrons répliqués de manière réaliste et individuellement dans la simulation numérique d'une fission thermo-nucléaire [ULA 51]. Cette physicalisation va de pair avec une utilisation faiblement symbolique des symboles mathématiques. Une telle simulation est en ce sens un *usage non essentiellement abstraitif*, et donc non orienté « compression », du formalisme. Précisons les choses.

4.5.2.1. *Ulam : la simulation numérique*

Dans un premier temps, la simulation Monte Carlo a permis une approche instrumentée, procédant par quasi-tâtonnement (à cause des nombres pseudo-aléatoires), de manière à résoudre des problèmes ouverts en analyse combinatoire. Ulam généralisa cette heuristique à l'ensemble des mathématiques *via* les formulations logiques usuelles de la métamathématique¹⁰. Ces formulations logiques pouvant être abordées par une technique de test aléatoire automatisé et programmable, l'ensemble des mathématiques gagnait là, selon Ulam, une *approche heuristique nouvelle* qui présentait l'avantage de rendre quasi physiques les procédures de recherches et de découvertes en mathématiques (à la différence des théories de l'heuristique classiquement fondées sur la puissance des symboles, comme l'*ars inveniendi* de Leibniz, par exemple). Notons que, pour Ulam, le caractère *empirique* de telles simulations ne provient pas du simple caractère

⁹ C'est-à-dire d'une manière non prioritairement condensée en des symboles qui, comme dans les approches mathématisées classiques, ne conserverait que les relations et les isomorphismes supposés exister entre certaines caractéristiques des entités en rapport dans le phénomène étudié.

¹⁰ Calcul des propositions, calcul des prédicats, voir [GAL 97] pour plus de détails.

stochastique des formalismes implémentés. Ulam rappelle ainsi que « la distinction entre un point de vue déterministe et un point de vue probabiliste réside seulement dans l'*interprétation* et non dans le traitement mathématique lui-même » [ULA 51]. Il sait que les traitements mathématiques peuvent être démontrés parfaitement équivalents. C'est donc essentiellement la dé-symbolisation des formalismes¹¹ qui est ici mise en avant pour justifier le *caractère empirique de la simulation*. Du fait de cette dé-symbolisation, on ne peut pas considérer qu'il s'agit là d'expériences de « pensée » déléguées à la machine, comme une lecture orientée IA pourrait le croire. Pas plus qu'il ne s'agit de jeux de hasard délégués, il ne s'agit de pensées déléguées à la machine, fussent-elles opaques. Ulam va jusqu'à décrire cette activité de « physicalisation » radicale du formalisme comme une *alternative fondamentale* à la manière habituelle d'idéaliser et de symboliser en mathématique, comme également, et par contre-coup, une alternative à l'idéalisation dans toutes les mathématisations et modélisations appliquées à des phénomènes empiriques. Pour Ulam, on peut en effet toujours remplacer un phénomène physique non pas seulement par cette sorte d'idéalisation intensionnelle qu'est l'idéalisation classique, c'est-à-dire par un choix très sélectif de paramètres de contrôle moyennés et/ou apurés, mais aussi par un modèle discrétisé, à grand nombre de paramètres, voire sur un espace théoriquement infini¹² sur lequel effectuer des expériences de simulation.

Cette *idéalisation* seconde manière peut être appelée « *extensionnelle* » dès lors qu'elle résulte d'une atomisation du phénomène concerné et de la prise en compte large de tous ses degrés de liberté supposés. Si, dans cette idéalisation, chaque élément est également simplifié à l'extrême, c'est en contrepartie leur nombre infini, se manifestant par une extériorisation (car explicitation dans les cellules) des propriétés physiques, qui explicite les rapports cachés entre les variables de contrôle, de manière le plus souvent non compressible et non compréhensible. Il y a extériorisation au sens où il n'y pas de procédure algorithmique ni symbolique uniforme de type supérieur qui « intérioriserait » en elle comme en un méta-symbole ou méta-ensemble de symboles, c'est-à-dire qui résumerait mono-axiomatiquement, les symboles de type inférieur, comme c'est en revanche d'usage dans les modèles logiques ou mathématiques. Le filtrage numérique ou les procédures de compression algorithmique restent des modèles mathématiques en ce sens. C'est en quoi l'épistémologie *compressiste* néglige de penser l'apport de la simulation numérique en ce qu'elle prépare déjà les futures approches par individus, objets et agents.

¹¹ C'est-à-dire de par la prise en compte simultanée de caractéristiques hétérogènes axiomatisées d'une part de manière géométrique, d'autre part de manière stochastique.

¹² La procédure d'itération de matrice de rangs finis sur un espace infini fonde en effet la technique de Monte Carlo ; cela donnera naissance aux automates cellulaires.

4.5.2.2. Une présentation sans représentation ?

N'étant ni une conception, ni une représentation, le résultat de ce genre de simulation est donc, *a minima*, une *présentation*. C'est une présentation à visée d'abord répliquative (comme le montre l'emploi de Monte Carlo pour le dimensionnement de la bombe H) et non-prioritairement abstraite (même s'il y a des constituants abstraits ou modèles dedans, bien sûr). Les limites du kantisme tiennent au fait qu'il tend à asseoir le percept dans le concept. Le connaissable est borné par le conceptualisable : il n'y a de connaissance que par un concept. Or, avec la simulation physicalisante, et figurale en ce sens, on se trouve devant quelque chose qui n'est pas toujours d'emblée de l'ordre d'un objet perçu, c'est-à-dire d'une perception complète, avec reconnaissance d'objet. La simulation ne nous met pas devant un concept vide (comme l'inobservable chez Zwirn), mais au contraire, devant une intuition sensible sans concept. C'est en ce sens que se comprend le rôle heuristique des simulations de substitution (outre le fait qu'elles peuvent être un terrain d'analyses quantitatives et qualitatives). C'est pourquoi, visant ce genre de simulation, [VAR 03] a pu parler d'« *intuition augmentée par ordinateur* » et d'« *écosystèmes de formalismes objectivés* ». Cette intuition ou « présentation en singularité » ou encore « présentation d'un apax comme tel » serait, selon ce point de vue, à penser en un sens non mathématique, en particulier sans le recours limitant à la dialectique schème mono-axiomatisé/thème.

L'épistémologie « compressive » part du concept contraignant de *système formel* (SF). Un SF est un langage formel doté d'axiomes et de règles de transformation. Il est par principe mono-axiomatisé au sens où il part d'un ensemble unique de règles formelles non contradictoires [BEN 91], [WAG 98]. Ainsi, il y a « homogénéité » dans ce que construisent et ce que peuvent atteindre les axiomes d'un SF. Mais dans les multi-formalisations, les axiomatiques utilisées peuvent être hétérogènes, c'est-à-dire incompatibles mathématiquement en ne devenant compatibles qu'à un stade computationnel discrétisé, dans la seule implémentation [VAR 03]. Elles peuvent donc parfois être axiomatiquement contradictoires : à chaque niveau auquel on est arrivé à les penser, à les calibrer, voire à les « valider » sur le phénomène composite concerné, c'est-à-dire localement et à une échelle donnée, *on ne peut précisément pas les comprimer ensemble*. A les prendre à leurs niveaux - non dans leur implémentation machine (amont), ni dans leur résultat calculatoire (aval) - elles ne sont donc pas, à rigoureusement parler, homogènes à un SF.

Or, il n'y a de compression possible qu'après la supposition (qui est une modélisation) qu'on se représente et lit (ou filtre) le monde et les simulations elles-mêmes à travers un langage formel « plaqué » sur les phénomènes ou sur les résultats de la simulation. C'est en effet le langage que déploie en tant que tel le SF qui permet l'analyse et le filtrage numérique nécessaires à la compression. La compression de données ne travaille ainsi que sur la surface des « choses » à partir d'une conception du

monde d'avance langagière (au sens d'un langage formel consistant), précisément orientée-signal ou, plus largement encore, orientée-langage et donc à hypothèse lourde. À ce titre, le point de vue « compressiste » est un perspectivisme langagier dû à un métier spécifique et à des performances attendues précises. Dans ce cas de figure, le « schème conceptuel » anticipe le monde comme tissu d'informations et de signaux. C'est bien essentiellement le cas, par exemple, dans le béhaviorisme et l'approche statistique inférentielle de Quine. Il n'est pas surprenant alors de penser que tout est compressible, y compris une simulation que l'on croit pouvoir traiter alors soit comme un simple programme de calcul qui peut être formellement optimisé en amont, selon les quelques théorèmes de l'informatique théorique dont on dispose (compression *d'algorithme*), soit, en aval, comme un simple signal numérique compressible par principe (compression *par algorithme*). En ce sens, il y a toujours la possibilité de minimiser l'apport de la simulation substitut et de dire qu'il s'agit d'une simple méthode de calcul, de simples échantillonnages statistiques, et pas du tout d'une méthode concurrente de la représentation abstractive classique en modélisation. Hanson [HAN 58] nous a appris que bien souvent en histoire des sciences, ce qui est inventé d'abord au titre d'une procédure de calcul ingénieuse, finit par passer, avec la routinisation, pour le reflet d'une réalité sous-jacente aux observables (selon Z3). Ce fut peut-être en effet un travers des « cellularistes », ou même des tenants du « monde-ordinateur », qui ont portés aux nues les automates cellulaires pendant un temps, jusqu'à proposer une « nouvelle sorte de science ».

Pour finir, nous voudrions suggérer que multi-modélisation et multi-formalismes (voir chapitre 2), [ZEI 00] traités par la simulation non plus numérique, mais informatique, ne tomberont peut-être pas dans ce travers. Car ce qui caractérise la simulation informatique, reposant cette fois-ci sur des langages orientés-objet ou agents (voir chapitre 1) (et non plus sur des langages procéduraux), c'est la possibilité de poursuivre le mouvement lancé par Ulam vers une plus grande complexité, avec une multiplication et une diversification des entités en interaction et de leurs relations. La simulation informatique, conçue non pas comme complément, mais comme substitut des formalismes traditionnels présente désormais le statut épistémique d'une *expérience assistée par ordinateur* car la concrétion ou co-croissance des formalisations les éloigne de la conceptualisation immédiate (voir introduction, seconde partie). Le fait de tomber dans cette catégorie ne signifie pas cependant qu'une conceptualisation traduisible par un algorithme de compression soit ultérieurement impossible (d'où le développement actuel de la recherche de modèles sur des simulations, modèles comprimant que l'on pourra alors dire mono- ou uni-formalisés).

Le caractère expérimental, si spécifique, des simulations assises sur des multi-formalisations (qui sont *de facto* des simulations-substituts) semble ainsi s'ajouter au caractère quasi-empirique (au sens des mathématiciens [PEC 98], cette fois-ci), reconnu par ailleurs, des explorations par simulations de modèles ou de programmes informatiques complexes pour lesquels on ne dispose pas de preuve formelle,

caractéristique de la *simulation-complément*. Cette dernière approche est compatible avec une conception de la connaissance comme « croyance », qui présuppose une connaissance déjà formulable en propositions analysables, et telle qu'elle intervient dans la filiation analytique Quine/Davidson/Putnam. Ce rôle des croyances d'arrière-plan est essentiel à prendre en compte dans les SHS. Cependant, malgré la pertinence de cette conception de la connaissance dans le domaine conceptualisable et surtout formalisable (en particulier pour la *simulation-complément*), on peut s'interroger sur sa capacité à rendre compte des modes d'appréhension et de figuration nouveaux que propose à la connaissance humaine la *simulation-substitut* (réifiante, pluriformalisée et pluri-perspective) qui intervient aussi en SHS. Selon ce dernier point de vue, toute volonté de transformer à nouveau ce type de simulations en signes pourrait a priori rater en son fondement la spécificité d'un mode nouveau d'expérimentation. Ainsi, l'approche sémiotique de Peirce ou même l'approche quinienne de la connaissance par la métaphore des signaux et des systèmes de signes performants peuvent être très fécondes pour expliquer certains usages de la modélisation [MOR 04], surtout - on s'en doute bien - en ingénierie de la connaissance et en SHS, mais la simulation substitut, qui a aussi sa place en SHS, ne semble pas pouvoir être toujours réduite au statut d'un signe [VAR 06]. Et la réflexion épistémologique reste ouverte sur ce point.

4.6. Bibliographie

- [AMB 03a] Amblard F., Hill D.R.C., Bernard S., Truffot J., Deffuant G. « MDA Compliant Design of SimExplorer, A Software to handle simulation experimental frameworks », *Proceedings of the 2003 SCS Summer Simulation Conference*, Montréal, p. 279-284, juillet 2003.
- [AMB 03b] AMBLARD F. *Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individuelles-centrées : Application à des modèles de dynamiques d'opinions*, Thèse de doctorat en Informatique de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2003.
- [AXE 97] AXELROD R. *The Complexity of Cooperation: Agent-based models of conflict and cooperation*, Princeton University Press, 1997.
- [AXT 96] AXTELL R., AXELROD R., EPSTEIN J., COHEN M.D. « Aligning simulation models: a case study and results », *Computational and mathematical organization theory*, vol.1, p. 123-141, 1996.
- [BAC 34] BACHELARD G. *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1934.
- [BAK 03] BAKAM I. *Des systèmes multi-agents aux réseaux de pétri pour la gestion des ressources naturelles : Le cas de la faune dans l'est cameroun*, thèse de doctorat, Université de Yaoundé 1, Yaoundé, Cameroun, 2003.
- [BEN 91] BENZAKEN C. *Systèmes formels, introduction à la logique et à la théorie des langages*, Masson 1991.

- [BER 01] BERTHELOT J.M. ed. *Epistémologie des Sciences sociales*, Paris, PUF, 2001.
- [BIG 05] Bigbee A., Cioffi-Revilla C., Luke S. « Replication of sugarscape using Mason », *Fourth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS'05)*, Tokyo, mai 2005.
- [BOU 72] BOUDOT M. *Logique inductive et probabilité*, Paris, Armand Colin, 1972.
- [BOU 94] BOUDON R. CLAVELIN M. *Le relativisme est-il résistant ?*, Paris PUF, 1994.
- [BOU 99] BOULNOIS O. *L'être et la représentation*, Paris, PUF, 1999.
- [DAV 74] DAVIDSON D. « On the very idea of a conceptual scheme », *Proc. of the A.P.A.*, 14, 1974
reprinted in : *Inquiries into Truth and Interpretation*, Oxford University Press, p. 17-36, 1984.
- [DEF 02] DEFFUANT G., AMBLARD F., WEISBUCH G., FAURE T. « How can extremism prevail? A study based on the relative agreement model », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 5, n° 4, 2002.
- [DEF 03] DEFFUANT G., AMBLARD F., DUBOZ R., RAMAT E. « Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée », J.-P. Müller dir, *Rochebrune 2003 : épistémologie de la simulation*, Paris ENST, p. 45-64, 2003.
- [DEL 94] DELAHAYE J.-P. *Information, complexité et hasard*, Paris, Hermès, 1994.
- [DEL 02] DELAHAYE J.-P. *L'Intelligence et le calcul : de Gödel aux ordinateurs quantiques*, Belin - Pour la Science, 2002.
- [DUH 06] DUHEM P. *La théorie Physique, son objet sa structure*, Paris, Rivière, Vrin, 1981.
- [EDM 03] EDMONDS B., HALES D. « Replication, Replication and Replication: Some Hard Lessons from Model Alignment », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, n° 4, 2003.
- [EPS 96] EPSTEIN J., AXTELL R. *Growing Artificial Societies, Social Science from the bottom up*, MIT Press, 1996.
- [FOU 80] FOURQUET F. *Les comptes de la puissance, Histoire de la comptabilité nationale et du Plan*, Paris, Encres, 1980.
- [FRA 80] VAN FRAASSEN B. *The Scientific Image*, Oxford, Oxford University Press, 1980.
- [GAL 97] GALISON P. *Image and Logic*, Chicago, The University of Chicago Press, 1997.
- [GIL 89] GILLY B. « Les modèles bio-économiques en halieutique : démarches et limites ». In: Verdeaux, François (ed.) - La pêche : enjeux de développement et objet de recherche, *Cahiers Sciences Humaines*, vol. 25, n° 1-2, p. 23-33, 1989.
- [GIR 89] GIRAUD J.Y., NAGEL E. NEWMAN J.R., GÖDEL K. *Le théorème de Gödel*, Paris Seuil, 1989.
- [GIR 94] GIROUX S., PACHET F., PAQUETTE G. « Système d'information épiphyte : espionnage des interactions entre agents », Deuxièmes Journées Francophones IAD&SMA à Voiron, Mai 1994.

- [GRI 99] GRIMM V. « Ten years of individual-based modelling in ecology: what we have learned and what could we learn in the future? », *Ecological Modelling*, vol.115, p. 129-148, 1999.
- [GOL 05] GOLDIN D., WEGNER P. « The Church-Turing Thesis: Breaking the Myth », *CiE 2005*, LNCS 3526, pp. 152-168, Springer 2005.
- [HAC 01] HACKING I. *An introduction to Probability and Inductive Logic*, Cambridge University Press 2001, trad. *L'ouverture au probable éléments de logique inductive*, Paris, Colin, 2004.
- [HAC 83] HACKING I. *Representing and Intervening*, Cambridge University Press, 1983, traduction *Concevoir et expérimenter*, Paris, Christian Bourgois ed., 1989.
- [HAC 99] HACKING I. *The Social Construction of What ?* Harvard University Press 1999, trad. *Entre Science et réalité, la construction soiciale de quoi ? La découverte*, 2001.
- [HAL 03] HALES D., EDMONDS B., ROUCHIER J. « Model to model analysis », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, n° 4, 2003.
- [HAN 58] HANSON N.R. *Patterns of Discovery*, Cambridge Ma., Cambridge University Press, 1958, traduction : *Les Modèles de la découverte*, Dianioia 2000.
- [HUM 90] HUMPHREYS P. « Computer Simulations », *PSA*, vol. 2, p.497-506, 1990.
- [JAN 03] JANSSEN M., AHN T.K., « Adaptation vs. Anticipation in Public-Good Games », *Model to model workshop electronic Proceedings*, Rouchier J., Edmonds B., Hales, D. (eds.), 2003.
- [JEA 03] JEANSON R., BLANCO S., FOURNIER R., DENEUBOURG J.L., FOURCASSIE V., THERAULAZ G., « A model of animal movements in a bounded space », *Journal of Theoretical Biology*, vol. 225, p. 443-451, 2003.
- [KUH 62] KUHN T.S. *The Structure of Scientific Revolution* ; University of Chicago Press, 1962, traduction : *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983.
- [KUH 77] KUHN T.S. *The Essential Tension*, University of Chicago Press, 1977, traduction : *La tension essentielle, tradition et changements dans les sciences*, Paris, Gallimard, 1990.
- [LAD 57] LADRIERE J. *Les limitations internes des formalismes*, Paris, Gauthier-Villars, 1957.
- [LAS 96] LASSEGUE J. « La méthode expérimentale, la modélisation informatique et l'intelligence artificielle », *Intellectica*, 22, p. 21-65, 1996.
- [LEG 73] LEGAY J.M., *La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*, Informatique et Biosphère, 1973.
- [MAN 05] MANZO G. « Variables, mécanismes et simulations. Une combinaison des trois méthodes est-elle possible ? Une analyse critique de la littérature », *Revue Française de Sociologie*, vol. 46, n° 1, 2005.
- [MET 49] METROPOLIS N. et ULAM S. « The Monte Carlo Method », *J. Amer. Stat. Assoc.*, 44, p. 335-341, 1949.

- [MEU 01] MEURISSE T., VANBERGUE D., « Problématique de conception de simulations multi-agents », *Actes des 9^{èmes} Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuées et les Systèmes Multi-Agents*, 2001.
- [MIN 65] MINSKY M., « Matter, Mind and Models », *Proceedings of IFIP Congress*, p. 45-49, 1965.
- [MOR 04] MORAND B., *Logique de la conception – Figures de sémiotique générale d'après Charles S. Peirce*, Paris, L'Harmattan, 2004.
- [MOR 99] MORGAN M.S., MORRISON M., *Models as Mediators*, Cambridge University Press, 1999.
- [MOR 50] MORGENSTERN O., *On the accuracy of economic observations*, Princeton University Press, 1950, trad. Précision et incertitude des données économiques, Paris, Dunod, 1972.
- [MOU 96] MOUCHOT C., *Méthodologie économique*, Hachette éducation, 1996 (point Seuil 2003).
- [NAT 99] National Research Council, *Sharing the fish: toward a national policy on individual fishing quotas*. National Research Council; (ed). National Academy Press USA., Juillet 1999.
- [PAR 01] PARROCHIA D., « Algorithmique et complexité : les limites de l'informatique », *Annales d'histoire et de philosophie du vivant*, vol. 5, p. 143-173, 2001.
- [PEC 98] PECCATE P., « Philosophie et mathématiques : sur le quasi-empirisme », *Conférence au REHSEIS*, le 23 juin 1998. <http://peccate.karefil.com/Quasi/QuasiEmpirisme.html>.
- [POI 03] POINCARÉ H., *La Science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1908, (réed. Champs 1968).
- [POP 63] POPPER K., *Conjectures and Refutations - The Growth of Scientific Knowledge*, London, Henley, Routledge & Kegan 1963, traduction : *Conjectures et réfutations*, Payot 1985
- [POP 72] POPPER K., *Objective Knowledge*, Oxford University Press, 1972, trad. française : *La connaissance objective*, Aubier 1991 réed. Col. « Champs » Paris, Flammarion, 1998.
- [PUT 81] PUTNAM, H., *Reason, Truth and History*, Cambridge Ma, Cambridge University Press, 1981, traduction : *Raison, vérité et histoire*, Paris, Les Editions de Minuit, 1984.
- [PUT 02] PUTNAM, H., *The Collapse of the Fact / Value Dichotomy* Harvard University Press, 2002, traduction : *Fait / Valeur la fin d'un dogme*, Paris, Editions de l'éclat, 2004.
- [QUI 60] QUINE W.V.O., *Word and Object*, Cambridge Ma., MIT University Press 1960, traduction : *Le Mot et la Chose*, Flammarion, Paris, 1977.
- [QUI 72] QUINE W.V.O., *Méthodes de Logique*, Paris, Armand Colin, 1972.
- [ROU 00] ROUCHIER J., *La Confiance à travers l'échange. Accès aux pâturages au Nord-Cameroun et échanges non-marchands : des simulations dans des Systèmes Multi-Agents*, Université d'Orléans, thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 2000.

- [ROU 03] ROUCHIER J. « Re-Implementation of a Multi-Agent Model Aimed at Sustaining Experimental Economic Research: the Case of Simulations with Emerging Speculation », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol.6, n° 4, 2003.
- [SCH 57] SCHAEFER M.B. « A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean », *Inter-American Tropical Tuna Communication Bulletin*, vol. 2, n° 6, p. 245-285, 1957.
- [SCH 78] SCHELLING T.S., *Micromotives and Macrobehavior*, New-Tork, Norton and Co, 1978.
- [TIE 93] TIERCELIN C. *C.S. Pierce et le pragmatisme*, col. Philosophies Paris, PUF, 1993.
- [ULA 51] ULAM S. « On the Monte Carlo method », *Proceedings of a Second Symposium on Large-Scale Digital Calculating Machinery, 1949*, Cambridge Ma., Harvard University Press, p. 207, 1951.
- [VAR 01] VARENNE F. « What does a computer simulation prove ? », in *Simulation in industry*, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, p. 549-554, 2001.
- [VAR 03] VARENNE F. « La simulation conçue comme expérience concrète », J.-P. Müller dir. *Rochebrune : Le statut épistémologique de la simulation*, Paris, ENST, p. 299-313, 2003.
- [VAR 06] VARENNE F. *Les notions de métaphores et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations*, Paris, éditions Pétra, 2006.
- [WAG 98] WAGNER P. *La machine en logique*, Paris, Presses Universitaires de France, 1998.
- [WAL 03] WALLISER B., ZWIRN D., ZWIRN H. « Raisonnements non certains et changement de croyances », in MARTIN T. *Probabilités subjectives et rationalité de l'action*, Paris, CNRS, 2003.
- [WIN 03] WINSBERG E. « Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World », *Philosophy of Science*, 70, January, p. 105-125, 2003.
- [YAH 05] YAHJA A., CARLEY K.M., « WIZER: An Automated Intelligent Tool for Model Improvement of Multi-Agent Social-Network Systems », *Proceedings FLAIRS*, Miami, 2005.
- [ZEI 00] ZEIGLER, B. P., PRAEHOFER, H. et KIM, T. G. *Theory of Modeling and Simulation-Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems*, New York, Academic Press, 2000.
- [ZWI 00] ZWIRN H. *Les limites de la connaissance*, Paris, Odile Jacob, 2000.