

X

LA SURPRISE COMME MESURE DE L'EMPIRICITÉ DES SIMULATIONS COMPUTATIONNELLES

par Franck Varenne

*Toute recherche scientifique est une lutte entre la nécessité
d'établir le plus d'ordre avant de commencer à travailler
et celle de laisser cependant le plus possible de surprise
résulter de ce travail.*

Ernest H. Hutten¹

INTRODUCTION

À la différence des modèles matériels d'usage immémorial dans les sciences et techniques, les modèles formels aujourd'hui en plein essor semblent être de facture exclusivement linguistique parce que fondés sur le langage mathématique. À ce titre, ils paraissent *complètement* artificiels et pour cela complètement anticipables dans leurs comportements. Les maquettes ou les modèles réduits peuvent être vus quant à eux comme *partiellement* artificiels. Si donc jusque-là on pouvait admettre que l'on procède à des *expériences sur des modèles*, dans le cas où ils sont formels, cela paraît difficile. Peut-être est-ce par abus de langage que les scientifiques déclarent pourtant effectuer des *expériences sur modèle mathématique*. Sans doute, pensera-t-on,

1. Ernest H. Hutten, « Physique des symétries et théorie de l'information », *Diogène*, 72, 1970, p. 12.

font-ils cette confusion parce qu'il leur faut aujourd'hui une machine à substance physique – l'ordinateur – pour tirer parti de leurs modèles mathématiques qui sont entre-temps devenus compliqués à résoudre. C'est qu'ils confondent pense-t-on le médiateur avec l'objet d'étude, l'instrument avec ce qui est instrumenté. Or, comme on le répète à l'envi depuis les années 1950, rien de totalement nouveau, rien qui n'ait d'abord été connu et pris en compte – cela en connaissance de cause – dans les règles initiales du langage formel ne peut sortir du fonctionnement d'un ordinateur : l'ordinateur pratique au mieux l'imagination recombinate et non l'imagination créatrice. En lui, aucun pouvoir créateur.

Wittgenstein lui-même n'a-t-il pas à toutes ses époques affirmé : 1) que les mathématiques ne sont que calcul et 2) que « le calcul n'est pas une expérience² » au sens où celui qui calcule ne fait que *trouver* et non *découvrir*³ ? Dans sa première philosophie, Wittgenstein voulait dire par là qu'il ne fallait aucunement s'attendre à être surpris par le résultat d'un calcul du fait de l'absence de sens des propositions mathématiques et logiques⁴ : l'analyticité y est la règle constitutive. Dans sa philosophie des mathématiques tardives, des propos très similaires voulaient dire quelque chose de passablement différent. Ils voulaient dire que la « non-surprise » devait être considérée comme le critère même de ces jeux de langage supposés appartenir à la famille des calculs mathématiques : si on joue au *jeu de langage de calcul*, alors il faut

2. Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-philosophicus*, 6.2331, trad. G.-G. Granger, Paris, Gallimard, 1993.

3. Ludwig Wittgenstein, *Bemerkungen über die Grundlagen der Mathematik* (1956), Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1984, p. 99, § 167 : « Der Mathematiker ist ein Erfinder, kein Entdecker ». Voir aussi les *Cours sur les fondements des mathématiques*, texte établi par C. Diamond (The University of Chicago Press, 1976), Mauvezin, T.E.R., 1995, p. 95 : « It is absurd to say that we *invent* $136 \times 51 = 6936$; we *find* that this is the result ».

4. Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-philosophicus*, *supra* note 2 : « 6.125. Il est possible, et même selon la conception ancienne de la logique, de donner par avance une description de toutes les propositions logiques "vraies". 6.1251. C'est pourquoi il ne peut *jamais* y avoir de surprises en logique ». Sur ces points, voir aussi la contribution de Claudia Serban, dans ce même ouvrage.

s'attendre à ne pas être surpris par ce qui en résultera⁵. Le calcul nous oblige en ce sens : il nous oblige à la non-surprise⁶.

Mais dès lors, comment comprendre que des gens informés parlent tout de même sciemment encore de « surprise » lorsqu'il s'agit de recourir aux modèles mathématiques ? Selon l'épistémologue Mary S. Morgan⁷, en effet, les comportements des modèles mathématiques peuvent nous *surprendre*. Elle réhabilite l'idée d'un effet de surprise précisément pour conférer de nouveau un degré intermédiaire mais inédit d'empiricité aux modèles formels contemporains. Certes, elle prend soin de distinguer la *surprise* causée par le modèle de la *confusion* dans laquelle peut nous jeter une expérience réelle. Mais elle réhabilite bien cette idée de surprise. Qu'entend-elle exactement par là ? Dans un premier temps, nous essaierons de comprendre dans quelle mesure la notion de surprise rend compte d'un caractère d'empiricité que peuvent effectivement manifester certains modèles mathématiques.

Cependant, nous avons des raisons de penser que cette idée peut être prolongée. En effet, Morgan ne fait pas de différence significative entre modèles mathématiques et simulations computationnelles alors que certains auteurs ont commencé à clarifier la distinction entre ces deux objets et entre les pratiques épistémiques associées. Chez certains auteurs, dont Mark A. Bedau par exemple, la notion de simulation est d'abord venue au secours de la réflexion sur la nature précise de l'émergence dans les modèles mathématiques. Certains modèles sont plus complexes que d'autres en ce qu'ils réclament *nécessairement* des

5. Ludwig Wittgenstein, *Bemerkungen...*, supra note 3, VII, § 61, p. 424 : « *Wir rechnen nur, wenn hinter dem Resultat ein Muss steht* ». Nous traduisons : « C'est seulement lorsqu'un "on doit" [trouver ce résultat que finalement on a trouvé] se tient présent [au cours du calcul] que nous calculons. » Plus loin (p. 425) : « *Man könnte das so ausdrücken : wem die Rechnung einen kausalen Zusammenhang entdeckt, der rechnet nicht* ». Nous traduisons : « On pourrait l'exprimer ainsi : lorsqu'à celui qui calcule, le calcul découvre un lien causal, celui-là ne calcule pas [en réalité] ». Plus loin encore (p. 425) : « *Was ich sage, kommt darauf hinaus, die Mathematik sei normativ* ». Nous traduisons : « De ce que je dis, il résulte que les mathématiques sont normatives ».

6. Le mathématicien qui enrichit les mathématiques par les démonstrations de nouveaux théorèmes invente tout au plus de nouvelles significations pour les normes du discours que sont les propositions mathématiques mais il ne découvre pas des entités qui préexistaient à son geste d'invention. À ce sujet, voir les contributions réunies dans le collectif *Wittgenstein et les mathématiques* sous la direction d'Élisabeth Rigal, Mauvezin, T.E.R., 2004. Les propositions mathématiques restent en ce sens radicalement hétérogènes à des propositions factuelles.

7. Mary Morgan, « Experiments versus models: New phenomena, inference and surprise », *Journal of Economic Methodology*, 12 (2), June 2005, p. 317-329.

simulations : parmi les modèles formels, ceux qu'il faudrait nécessairement simuler sur ordinateur manifesterait donc une forme supplémentaire d'empiricité. Dans un deuxième temps, nous tâcherons de rendre compte de ce caractère d'empiricité propre aux simulations sur ordinateur en général. Et nous verrons comment s'introduit dans ce contexte le concept d'émergence faible.

Enfin, dans un troisième et dernier temps, nous poserons la question de savoir si toutes les émergences se valent dans toutes les simulations. Si en effet les simulations sur ordinateur n'assurent pas toujours la même fonction épistémique (à savoir le calcul pas à pas d'un modèle mathématique non traitable analytiquement) mais en réalité plusieurs et de surcroît nettement différenciées, n'y a-t-il pas lieu de suggérer qu'il n'y ait pas qu'un seul type d'émergence faible par simulation mais plusieurs ? Ces types d'émergence faible nous apparaîtront pour certains plus nettement liés au pouvoir de réplication et pas seulement de description – linguistique en l'espèce – des simulations.

I. LA SURPRISE DANS LES MODÈLES FORMELS

1. Les modèles mathématiques : une caractérisation

Pour Goodman, comme pour Morgan, un modèle formel en sciences contemporaines est avant tout un modèle mathématique : « Un modèle mathématique est une formule qui s'applique au processus, à l'état ou à l'objet dont elle est le modèle. Ce dont il y a modèle est le cas particulier qui convient à la description.⁸ » Un tel modèle est une structure réglée de symboles. Dans le cas d'un modèle mathématique, la structure doit reposer sur un langage. Comme Goodman le note lui-même, « un langage est un système symbolique d'une espèce particulière⁹ ». Être un symbole de quelque chose, dans ce cadre, c'est pouvoir entrer dans une relation de « *standing for* », de « valoir pour » cette chose. Un langage est un système de symboles qui permet prioritairement la *description* verbale et s'oppose (en partie) aux systèmes symboliques permettant la *dépicition*¹⁰. Pour Goodman, description et dépicition sont deux modes particuliers de *référer* à quelque chose : toutes les deux

8. Nelson Goodman, *Langages de l'art* (1968), Paris, Hachette, 2006, p. 206. Note traduction : tous les autres extraits en anglais seront également traduits par nos soins.

9. Nelson Goodman, *supra* note 8, p. 76.

10. Nelson Goodman, *supra* note 8, p. 64-67.

relèvent bien de la *représentation* en ce sens-là. Mais la description se distingue en ce qu'elle relève du mode de référer par *dénotation* (ou référence à un objet, un groupe d'objets ou un objet fictif)¹¹ alors que la dépicition peut être amenée à mettre en jeu d'autres modes de référer (dont l'exemplification ou l'expression).

2. Empiricité des modèles mathématiques selon Morgan : le critère de la surprise

Morgan veut inciter les économistes modélisateurs à développer davantage l'économie expérimentale et à se méfier des capacités d'inférence trop généreusement attribuées aux modèles¹². Elle veut montrer que le « pouvoir d'inférence » des expériences est plus important que celui des modèles même si on peut à bon droit rapprocher les modèles des expériences. Ainsi, les modèles s'apparentent à des expériences et s'en distinguent aussi. Morgan rappelle d'abord la thèse de Hacking qui réhabilitait en substance l'idée de Claude Bernard selon laquelle il nous arrive de faire des *expériences pour voir*. L'expérimentation en science est une activité créatrice car « bien que certaines théories précèdent certaines expériences, certaines expériences et certaines observations précèdent la théorie et peuvent pendant longtemps avoir une vie propre.¹³ »

Or, selon Morgan, les modèles mathématiques ont une forte parenté avec l'expérience au sens même où l'entend Hacking : ils favorisent une activité créatrice. Comme les expériences, ils sont des instruments médiateurs entre la théorie et le monde¹⁴, ils sont construits à partir d'éléments de théorie, d'éléments de données empiriques et d'éléments analogiques, et enfin, ils ont aussi une vie propre¹⁵. Ce sont des instruments autonomes : « Comme les expériences, certains modèles commencent à mener une vie indépendante de leur création originelle¹⁶ ». En cela, ils permettent ce que Morgan appelle des

11. La dénotation se distingue de l'exemplification : exemplifier, c'est un mode de symboliser ou de référer qui réfère par possession d'une propriété (Nelson Goodman, *supra* note 8, p. 86-87).

12. Morgan, *supra* note 7, p. 326.

13. Hacking Ian, *Representing and Intervening*, 1983, cité in Morgan, *supra* note 7, p. 317.

14. Morgan, *supra* note 7, p. 318.

15. Morgan, *supra* note 7, p. 319.

16. Morgan, *supra* note 7, p. 319.

« manipulations ». Or, d’où vient cette vie propre des expériences et des modèles ?

« Ce sont particulièrement ces éléments indépendants – analogies, règles, formes mathématiques, *etc.*, éléments qui interviennent dans la construction et sont indépendants soit de la théorie soit du monde – qui peuvent permettre aux expériences comme aux modèles de fonctionner de manière autonome¹⁷. »

Dans le cas plus particulier des modèles :

« Les modèles sont construits pour incorporer une certaine forme de représentation : de la théorie, du monde ou si possible des deux à la fois de telle sorte qu’en utilisant le modèle, quelque chose peut être appris au sujet de la représentation, ce qui fournit des inférences au sujet d’éléments théoriques ou d’éléments du monde¹⁸. »

Morgan note ensuite qu’alors que les modèles « représentent » des éléments de la théorie ou du monde, les expériences « répliquent » des éléments du monde. Les expériences « répliquent » c’est-à-dire « reproduisent » ou « capturent certains aspects du monde dans le même type, le même matériau ou sous la même forme que ceux du monde économique réel »¹⁹ :

« La construction d’une expérience recrée une partie du monde réel à l’intérieur de l’environnement artificiel du laboratoire. Par contraste, la construction d’un modèle crée un “monde artificiel”, artificiel parce que fait de mathématiques, de diagrammes ou de matériaux physiques appartenant à un autre domaine (*i. e.* pas ceux du domaine économique)²⁰. »

C’est cette question de différence de matériau (« *stuff* »)²¹ qui est finalement cruciale pour Morgan. Entre l’objet d’expérience isolé mais maintenu dans une « partie du monde réel » et le monde réel, il n’y a pas de « disparité ontologique »²². Cette « ontologie partagée »²³

17. Morgan, *supra* note 7, p. 319.

18. Morgan, *supra* note 7, p. 320.

19. Morgan, *supra* note 7, p. 320.

20. Morgan, *supra* note 7, p. 320.

21. Morgan, *supra* note 7, p. 320 et p. 322.

22. Morgan, *supra* note 7, p. 323.

23. Morgan, *supra* note 7, p. 323.

a des implications épistémologiques : le « pouvoir épistémologique » des expériences²⁴ est plus fort que celui des modèles. La manipulation d'un modèle peut certes réserver des « surprises »²⁵ mais elle ne peut aucunement nous « confondre » car elle se fait sur des morceaux de mathématiques²⁶ :

« Dans la construction du modèle mathématique, l'économiste connaît les ressources qui ont été [implantées] dans le modèle. Utiliser le modèle peut révéler quelques aspects surprenants et peut-être inattendus du comportement du modèle. En fait, ce qui est recherché dans l'utilisation du modèle est la révélation de ses implications, c'est le test de ses limites et ainsi de suite. Mais en principe les contraintes sur le comportement du modèle sont fixées – quelque opaques qu'elles puissent être – par l'économiste qui a construit le modèle de sorte que, aussi inattendues que soient les sorties du modèle, elles *peuvent être rapportées à leur source qui est le modèle, et réexpliquées dans les termes du modèle*²⁷. »

Morgan raisonne donc ainsi : quand les règles sont préfixées, il n'y a pas à attendre de nouveau phénomène. Une autre conséquence de son analyse s'ensuit : certaines expériences elles-mêmes sont trop contraignantes en termes de degrés de liberté, elles peuvent par principe nous empêcher de voir un nouveau phénomène non encore théorisé. La conception de l'expérience peut conduire à un « apprivoisement » (*taming*) excessif des comportements des sujets expérimentaux²⁸. Les comportements des agents économiques peuvent être canalisés par un modèle normatif/prescriptif du monde et l'expérience ne servir finalement que comme implémentation d'un modèle. Pour dépasser la surprise et rendre possible la confusion, *i. e.* le fait que l'observateur soit déconcerté, il faut qu'une « action indépendante » des acteurs expérimentaux soit possible. Nous ajouterions qu'il faut donc des dimensions et des aspects observés qui ne sont pas directement pertinents pour la vérification de la théorie.

24. Morgan, *supra* note 7, p. 323.

25. Morgan, *supra* note 7, p. 320.

26. Morgan, *supra* note 7, p. 323.

27. Morgan, *supra* note 7, p. 325. C'est nous qui soulignons. Comme on le verra, c'est notamment cette dernière affirmation qui est contestable : voir Gilles Dowek, *Les métamorphoses du calcul* (2007), Paris, Le Pommier, 2011, p. 79.

28. Morgan, *supra* note 7, p. 325.

3. Insondabilité de principe et sondabilité de principe

Il y a deux arguments clés chez Morgan. Tout d'abord, l'argument de la *propriété de substance du modèle* consiste à dire qu'à la différence des objets d'expérience, le modèle n'est que linguistique. C'est bien parce qu'un modèle mathématique n'est qu'une performance linguistique dirigée par des règles explicites (ou explicitables) qu'on ne peut pas être confondu, déconcerté par lui mais seulement surpris. En effet, rien ne nous est inconnu qui détermine son comportement. La différence entre la surprise et la confusion réside ici dans l'analyticité des productions d'un système formel défini. Rappelons que l'analyticité d'un jugement selon Kant est la propriété d'un énoncé de type « S est P » dans lequel le prédicat P est logiquement contenu dans le sujet S. Le jugement n'est alors qu'une « explicitation » (*Erklärung*) du sujet. Or, depuis Frege, on peut considérer que les dérivations mathématiques (dépendant de systèmes formels) sont toutes analytiques. Ensuite, l'argument de la *disparité de substance* entre éléments du modèle et éléments du monde souligne le fait qu'il y a une disparité ontologique entre ce qui fait l'objet d'une manipulation expérimentale et ce qui fait l'objet d'une manipulation de modèle. Avec cet argument, Morgan suppose que, par nature, la représentation ne peut jamais être une réplique. Dans l'expérience, à cause de l'ontologie partagée, nous importons des choses du monde que nous ne connaissons tout simplement pas : d'où l'observation de phénomènes radicalement nouveaux qui peut s'y produire. C'est ce qui ne serait pas possible pour le langage.

Ainsi, s'il y a certes une sorte d'*empiricité* (la surprise) dans la manipulation des modèles formels, en revanche, cette empiricité ne peut nullement lui venir d'une consubstantialité – si ténue soit-elle – avec des éléments du monde. Elle n'a donc pas la même nature que l'empiricité des expériences. Ce sont des empiricités de nature différente. Le modèle nous fait seulement trouver des *implications inaperçues*. Par contraste, l'expérience fait *émerger* des phénomènes inattendus et même non susceptibles d'être attendus, qui sont donc inconcevables : ils ne sont donc pas trouvés mais réellement découverts, pour reprendre la terminologie de Wittgenstein. On a ainsi face à face une insondabilité de principe (expérience) *et* une sondabilité de principe (modèle).

II. ÉMERGENCE FAIBLE ET EMPIRICITÉ DES SIMULATIONS

1. Points aveugles dans l'argument de Morgan

Pour montrer les limites de l'analyse de Morgan, remarquons d'abord deux choses.

Il y a différents types d'analyticité

Il faut d'abord distinguer les « règles de déduction » d'un langage formel, qui sont générales, des « axiomes qui sont spécifiques à une théorie particulière²⁹ ». À cet égard, les propositions mathématiques peuvent être dites tantôt analytiques, tantôt non analytiques :

« Le jugement qu'une proposition est vraie peut être appelé analytique quand la proposition est démontrable dans la logique des prédicats sans axiomes, auquel cas les jugements mathématiques ne sont pas analytiques [...] [Un jugement mathématique] peut être dit analytique quand la proposition est démontrable dans la logique des prédicats avec des axiomes qui constituent la définition implicite des concepts utilisés et, dans ce cas, tous les jugements mathématiques sont analytiques³⁰. »

Ainsi « $2+2 = 4$ » ne peut pas être démontré uniquement par la logique des prédicats.

L'analyticité non reconnue n'est pas toujours une évidence retardée

L'argument de Morgan repose sur l'idée que l'analyticité non reconnue n'est qu'une évidence retardée. Cette confusion entre analyticité et évidence est elle-même fondée sur la confusion entre le calcul à partir de règles et la déduction à partir d'axiomes. Or, comme le rappelle Gilles Dowek, « analytique ne signifie pas évident »³¹. Rappelons que le Théorème de Church-Turing (indécidabilité du problème de l'arrêt, 1936) montre qu'il n'existe pas d'algorithme (c'est-à-dire de méthode de calcul terminant en un nombre fini d'étapes) pour décider si une proposition est démontrable déductivement dans la logique des prédicats ou non³². Cela veut dire aussi qu'il existe des propositions démontrables déductivement qui ne sont pas accessibles par le calcul. Par conséquent,

29. Dowek, *supra* note 27, p. 58.

30. Dowek, *supra* note 27, p. 64.

31. Dowek, *supra* note 27, p. 78.

32. Dowek, *supra* note 27, p. 78.

« le calcul et le raisonnement sont deux choses différentes³³ ». Le calcul procède à partir de *règles*, d'algorithmes (*i. e.* de séquences de règles dont l'applicabilité termine) mais qui peuvent être combinés et itérés, un nombre possiblement infini de fois (cas d'un programme informatique qui ne termine pas et que l'on n'interrompt pas). Reasonner, en revanche se fait à partir d'*axiomes*. Le théorème de Church-Turing dit ainsi deux choses profondes et en apparence contradictoires :

- 1) Le raisonnement est en un sens plus puissant que le calcul ; il peut plus de choses en mathématiques et on doit donc y recourir précisément en mathématiques ;
- 2) Mais il est parfois impossible de remplacer le calcul par le raisonnement. Certains calculs pas à pas ne peuvent pas être raccourcis ni donc remplacés par des algorithmes dont on saurait qu'ils terminent. Quand on calcule ou que l'on fait calculer un ordinateur, on doit savoir qu'il peut n'exister aucun moyen déductif de démonstration directe de la forme obtenue en cours de calcul ou lorsqu'on arrête d'autorité le calcul (*i. e.* aucune démonstration par raisonnement, à partir d'axiomes) : on sait qu'il peut n'exister aucun raccourci formel procédant par raisonnement ou déduction.

Ainsi :

- 1) Certains problèmes mathématiques ne peuvent certes *pas être résolus* par le calcul ;
- 2) Mais certains problèmes ne peuvent être approchés *que* par le calcul au sens où ils ne peuvent pas toujours disposer d'une méthode de résolution qui procéderait par pur raisonnement à partir d'axiomes (par théorie déductive donc).

La déductibilité et la calculabilité ne peuvent donc pas toujours se substituer l'une à l'autre. C'est précisément une des raisons essentielles pour lesquelles on utilise non seulement des modèles mais aussi des simulations, y compris dans le cas où une déductibilité de principe (théorique) existe. Le raisonnement logique est la seule procédure à laquelle Morgan pense quand elle présente la manière de procéder des modèles mathématiques. Or, bien souvent ces modèles laissent aujourd'hui la place à des simulations, précisément pour des questions de calculabilité pratique voire théorique.

33. Dowek, *supra* note 27, p. 78.

2. Émergence forte, émergence faible et simulation

Morgan n'utilise le verbe « émerger » que pour désigner ce qui peut se produire dans une expérience réelle faite sur des éléments du monde. L'intérêt de l'article de Mark A. Bedau³⁴ est qu'il rappelle que l'on peut parler d'émergence de manière transversale : on parle alors de systèmes complexes. Dans ce cas, il s'agit certes d'*émergence faible*. Une telle émergence caractérise les systèmes vivants aussi bien que certains systèmes artificiels, typiquement, dans ce dernier cas, des systèmes computationnels ou de calcul comme les automates cellulaires (grilles de cellules à changements d'états discrets). Nous allons voir comment on peut la caractériser, précisément en lien avec la simulation.

Bedau définit d'abord les phénomènes émergents au sens large :

- « 1) Les phénomènes émergents sont constitués de – et engendrés par – des processus sous-jacents.
- 2) Les phénomènes émergents sont d'une certaine manière autonomes par rapport aux processus sous-jacents³⁵. »

Bedau s'inquiète du fait que l'on semble admettre ici la possibilité de l'apparition de quelque chose à partir de rien. Cette impression est certes confirmée si l'on entend toujours par émergence « l'émergence forte » telle que Timothy O'Conner la définit par exemple :

« Une propriété P est une propriété émergente au sens fort pour un objet O si elle survient sur les propriétés des parties de O, que P n'est une propriété d'aucune des parties de O, que P est également distincte de toute propriété structurelle de O et que P peut avoir une influence déterminante sur le comportement des parties de O (causalité descendante)³⁶. »

Or, Bedau émet un doute sur la causalité descendante. Il concède que le tout peut avoir une influence déterminante (*i. e.* manifester un lien causal) mais sur un mode plus faible : « L'émergence faible implique la causalité descendante seulement dans la forme faible créée par l'activité des micro-propriétés qui constituent les macro-propriétés

34. Mark Alan Bedau, "Weak Emergence", in J. Tomberlin (dir.), *Philosophical Perspectives: Mind, Causation and World*, vol. 11, Malden, Blackwell, 1997, p. 375-399.

35. Bedau, *supra* note 34, p. 376.

36. Timothy O'Conner, « Emergent properties », *American Philosophical Quarterly*, 1994, 31, cité par Bedau, *supra* note 35, p. 376.

structurelles³⁷ ». C'est donc plus probablement et plus fréquemment sous l'effet déterminant de leurs micropropriétés seulement que les parties se comportent, cela même si on peut avoir l'impression qu'existe une causalité descendante vraie ou forte.

La définition de l'émergence faible s'ensuit. Mais il faut pour cela d'abord imposer plusieurs points de contexte³⁸ :

- 1) Elle s'applique à un système S doté de parties ;
- 2) On y définit des micro-états (les états intrinsèques de ses parties, parties elles-mêmes en nombre possiblement variable) et des macro-états ;
- 3) Les macro-états sont des propriétés structurelles du système. Elles sont uniquement constituées de micro-états : ce peut être une propriété impliquant elle-même plusieurs autres macro-états, donc par exemple un *pattern* de comportement – une loi morphologique – ou une loi dynamique entre macro-états ;
- 4) Il existe une microdynamique D qui gouverne l'évolution dans le temps des micro-états de S.

Étant donné ces définitions et ces hypothèses, Bedau définit l'émergence faible d'un macro-état de la manière suivante : « Un macro-état P du système S doté d'une microdynamique D est faiblement émergent si et seulement s'il ne peut être dérivé de D et des conditions externes de S que par simulation³⁹. »

Le macro-état ne doit pouvoir être dérivé que par simulation. « Dérivation » signifie ici « computation ». Une computation (un calcul au sens étymologique) est une *opération discrète de remplacement d'un ou plusieurs symboles discrets par d'autres symboles discrets*. La dérivation n'est donc pas essentiellement une déduction fondée sur un système formel, avec axiomes et règles de déductibilité, même s'il lui est possible d'*émuler* une telle déduction. La philosophie logiciste de l'informatique est souvent fondée sur une confusion entre simulation et émulation⁴⁰. Une simulation est une opération de computation itérée – la microdynamique – sur les micro-états. Bedau note que même si après coup on peut trouver une explication de niveau macro pour certains macro-états qui permet de faire l'impasse sur le détail de

37. Bedau, *supra* note 34, p. 377.

38. Bedau, *supra* note 34, p. 377.

39. Bedau, *supra* note 34, p. 378.

40. Voir Franck Varenne, « Framework for M&S with Agents in regard to Agent Simulations in Social Sciences : Emulation and Simulation », in A. Muzy, D.R.C. Hill et B.P. Zeigler, *Activity-Based Modeling and Simulation*, Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise Pascal, 2010, p. 53-84.

la micro-dynamique, il n'en demeure pas moins que tous les macro-états *peuvent* toujours être dérivés de la microdynamique du système par simulation⁴¹. Ce terme modal (« peuvent ») doit être compris au sens métaphysique, ontologique et non épistémique : il ne s'agit pas de notre capacité à un moment ou à un autre de l'histoire de nos mathématiques. Ainsi, être faiblement émergent pour un macro-état, c'est être *dérivable par simulation* : « Notre besoin d'utiliser une simulation n'est dû ni à l'état contingent de nos connaissances ni à quelque limitation humaine spécifique⁴². »

Morgan conçoit les modèles formels comme des moteurs déductifs de nature toujours mathématique-linguistique car procédant uniquement à partir d'axiomes et de règles de déduction. Si on regarde le cas des simulations, on voit que leur dérivation ne consiste pas toujours en la mise au jour des implications d'axiomes initiaux, virtuellement présentes en eux. Il faut remplacer le terme d'implication par celui de dérivation computationnelle au sens strict. Cette dernière se singularise par l'existence d'effet émergent au sens où il n'y a pas toujours de raccourci déductif pour atteindre le résultat de ces dérivations. Pour paraphraser Morgan, *on ne peut pas « réexpliquer » le résultat obtenu dans les termes des règles de la computation*. Dans ce cas, il faut savoir que l'observation empirique du *pattern* résultant est parfois démontrablement le seul moyen de mettre au jour des phénomènes nouveaux, notamment dans certains automates cellulaires de type *Jeu de la vie* de Conway (problème non trivial de l'émergence des « glisseurs »). Ces phénomènes sont *irréductiblement nouveaux* au sens où ils sont *non seulement surprenants* mais aussi *confondants*. Ils restent même parfois *durablement confondants*. Là encore, il ne s'agit nullement d'un effet d'évidence retardée. Dans certains cas, on a même la preuve que l'évidence ne peut par principe pas venir : c'est-à-dire qu'après coup, on sait qu'on reste encore sans moyen autre que de relancer la simulation pas à pas pour avoir accès au phénomène, pour se le figurer ou pour l'anticiper. Comme on parle d'erreur persistante pour caractériser l'illusion, on pourrait ici parler de *vérité persistante*, persistant malgré le déni formel que notre désir de *mathesis* (appareil formel ramassé de production de propositions mathématiques) voudrait constamment lui opposer. Il y a donc surprise et même confusion par rapport à ce que l'on pouvait pratiquement ou théoriquement prévoir.

41. Bedau, *supra* note 34, p. 379.

42. Bedau, *supra* note 34, p. 379.

Résumons-nous. Il y a une surprise et une empiricité de degré 1 dans les modèles mathématiques conçus comme machines à implications. Mais il y a aussi une surprise et une empiricité de degré 2 – avec *confusion* et pas seulement *surprise* – dans les simulations computationnelles. Pour finir, on peut suggérer l'idée qu'il existe de surcroît une diversité de simulations sur computer et peut-être donc une variété de types d'empiricité dans les simulations.

III. VARIÉTÉS DES SIMULATIONS, DES ÉMERGENCES FAIBLES ET DES SURPRISES

1. Caractérisation générale de la simulation computationnelle

Bedau ne prend pas la peine de définir le terme de « simulation » : elle se réduit pour lui à la computation. Notre propre définition de la simulation (sur ordinateur bien sûr) propose d'intégrer à sa *nature d'opération de computation* sa *fonction* également essentielle de *symboliser* et de *référer* omise chez Bedau : une *simulation computationnelle* est un traitement spécifique sur des symboles prenant toujours la forme d'au moins deux phases distinctes⁴³ :

- 1) Une *phase opératoire* pendant laquelle des opérations de *computation* – *i. e.* des opérations pas à pas sur des symboles discrets – se produisent entre des symboles supposés chacun dénoter ou exemplifier des entités ou des propriétés réelles ou fictives.
- 2) Une *phase d'observation*, de visualisation, d'évaluation, de détection, de mesure, consistant en tout type de traitement secondaire (reconnaissance de formes, expérience virtuelle, etc.) considérant les produits des opérations de la phase précédente comme d'autres types de symboles à part entière appartenant à un autre niveau dénotationnel⁴⁴ ou même à un niveau symbolique d'une autre hiérarchie

43. Voir Franck Varenne, « Modèles et simulations : variétés traditionnelles et mutations contemporaines », in F. Varenne et M. Silberstein, *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome I, Paris, Matériologiques, 2013, p. 31-32.

44. Ce que Goodman appelle un *niveau* dans une « hiérarchie dénotationnelle », in Nelson Goodman, « Routes of reference », *Critical Inquiry*, 8 (1), 1981, p. 121-132. Les précisions dans ce contexte sont apportées par l'article suivant : Denis Phan, Franck Varenne, « Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences : from conceptual exploration to distinct ways of experimenting », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13 (1), 2010.

dénotationnelle que celle à laquelle appartiennent les symboles élémentaires de l'étape opératoire.

Selon la conception de Goodman, une *hiérarchie dénotationnelle* de systèmes de symboles est celle qui va des choses dénotées aux symboles (portrait, peinture, nom, etc.) les dénotant, puis de ces symboles dénotants aux symboles dénotant ces symboles eux-mêmes, comme le nom « nom » ou le mot « mot », etc. Un nom commun dénote les choses qui sont nommées par ce nom commun. De même, une variable mathématique dénote ses instanciations numériques. Nous considérons que, dans un modèle ou système de modèles sur lequel opère une simulation, il y a toujours au moins une hiérarchie dénotationnelle qui est supposée. C'est une hiérarchie interne. Mais, à côté, il y a toujours aussi des hiérarchies dénotationnelles externes. Elles sont externes au sens où elles valent pour l'état actuel de nos connaissances des choses du monde extérieures au système de modèles, c'est-à-dire qui valent en l'occurrence pour le *système cible* du système de modèles. Comme on le voit, ce qui est important dans une simulation, c'est le *changement de niveau de symboles*, soit à l'intérieur d'une même hiérarchie dénotationnelle, soit entre deux hiérarchies dénotationnelles distinctes. À partir de notre caractérisation générale de la simulation et au vu de leur traitement différencié des hiérarchies dénotationnelles, on peut définir au moins trois types distincts de simulation.

La simulation dirigée par le modèle ou simulation numérique

La simulation peut partir d'un unique modèle mathématique. C'est le cas lorsque ce modèle appelle la simulation parce qu'il est avant tout non analytiquement traitable : on ne dispose pas de moyens déductifs (ou par calcul formel) pour formuler directement et explicitement la solution modélisée que l'on recherche. La simulation consiste alors en une descente dans la hiérarchie dénotationnelle interne des variables du modèle (discrétisation) vers leurs instanciations numériques pour les besoins de la computation pas à pas, puis en une remontée vers l'observation – ou la mesure – des patterns globaux résultants de la computation. On peut dire qu'une telle simulation imite des micro-comportements du modèle : en ce sens, elle n'est pas prioritairement une simulation (imitation) du système cible. Elle est une *simulation de modèle*. C'est la simulation numérique. Paradoxalement, du fait de son insuffisante caractérisation des simulations, Bedau semble de fait réduire toutes les simulations à ce type-là même s'il prend exemple sur les automates cellulaires.

La simulation dirigée par des règles ou simulation algorithmique

Une simulation peut ne pas partir d'un modèle mathématique préalable conçu sous forme d'équations et de variables qu'il faudrait d'abord discrétiser. Elle peut partir directement de symboles élémentaires ou de symboles de règles élémentaires qui dénotent d'une manière choisie des entités ou des propriétés du système cible. Le fondement de sa fonction de symbolisation repose ici prioritairement sur un ancrage dans une *hiérarchie dénotationnelle externe*. Par exemple, les automates cellulaires sont généralement employés pour simuler des systèmes eux-mêmes spatialisés à fortes interactions locales simultanées, en géographie par exemple. On peut dire que dans le *Jeu de la vie*, il y a déjà une forme de *réplication* et pas seulement de *représentation* pour reprendre les termes distinctifs de Morgan car l'espace est représenté par rien d'autre que de l'espace : il y a en ce sens *iconicité*. C'est aussi la raison pour laquelle on peut être *confondu* et pas seulement *surpris* par le résultat d'un automate cellulaire. Les interactions latérales simultanées entre les cellules de la grille – même simples – ne sont pas réductiblement inscriptibles en une discoursivité linéaire, fut-elle mathématique.

La simulation dirigée par des objets ou simulation informatique

Il existe enfin un type de simulation qui assure en même temps les deux fonctions sus-citées : la fonction de résolution de modèle par discrétisation et la fonction de symbolisation de système cible. Ces simulations sont donc à fondement épistémique mixte et non trivial. C'est pourquoi elles reposent de plus en plus sur un construit informatique intermédiaire appelé « objet ». Dans la *programmation objet*, on peut traiter simultanément des questions de simulations numériques et des questions de simulations algorithmiques car on peut régler pas à pas les questions de leurs interactions. Les simulations intégratives (en biologie systémique par exemple) utilisent aujourd'hui ces techniques de formalisation par objets parce que cette approche permet de sérier les propriétés hétérogènes des objets du système cible d'intérêt et qu'elle permet ensuite de les faire interagir séparément en même temps que simultanément si nécessaire. Il est à noter que l'objectification est ici de nature prioritairement méthodologique : elle n'a pas à être considérée comme imposant aussi un engagement ontologique sur des objets réels corrélats des objets informatiques dans le monde réel.

CONCLUSION

Les simulations informatiques intégratives ne se réduisent pas à des implications linguistiques déléguées à la machine mêlant des descriptions linguistiques et formelles d'origines certes variées comme Morgan le soulignait déjà (descriptions d'origine empirique, d'origine théorique, etc.) : plus radicalement, c'est pas à pas, au cours de la computation, que s'y mêlent des symboles à statuts hétérogènes pouvant aller de l'empirique directement répliqué (symboles iconiques) jusqu'à des savoirs simplement descriptifs (symboles conventionnels). Cette diversité et cette hétérogénéité de constitution des simulations amènent à suggérer l'idée d'une diversité de degrés d'empiricité et donc de surprises : plus on va des modèles vers les simulations, puis plus on va des simulations numériques vers les simulations informatiques intégratives, plus la *confusion* aura aussi sa part. Si les modèles mathématiques peuvent susciter des effets de surprise, les simulations peuvent engendrer de surcroît des effets de confusion dès lors que le *pattern* obtenu – à la différence de ce qu'imaginait Morgan – ne peut pas même faire l'objet d'une réexplication abrégative et compréhensible dans les termes des règles de computation. Les simulations elles-mêmes sont de trois types : ce qui suggère que chacune manifesterait un degré d'empiricité par surprise/confusion toujours accru plus on se dirige vers des simulations composites et intégratives. Nous n'avons pu que le suggérer ici mais il y a des indices en ce sens. 1) Les simulations numériques peuvent souvent être démontrées convergentes par des moyens analytiques. C'est donc juste leur chemin effectif qui est inconnaissable *a priori*, pas le fait qu'il y ait une issue stable. 2) Les simulations à base de règles manifestent souvent une impossibilité prouvée de trouver une formulation raccourcie, même *a posteriori*. 3) Le mode de composition formel des simulations informatiques à base d'objets suggère qu'il est plus difficile encore que dans le cas précédent voire toujours impossible d'en trouver un raccourci, même *a posteriori* dès lors que les systèmes de symboles mêlés pas à pas sont non axiomatiquement réductibles.

Ainsi, de telles simulations computationnelles complexes ne sont pas des performances linguistiques appartenant à un seul langage formel homogénéisant (intégrant l'empirique et le théorique au seul niveau de la description linguistique) et dont la dynamique serait uniformément définie par un unique système formel de règles de déduction :

1) Elles pratiquent des allers et retours – au cours même de la computation – entre différents systèmes formels de symboles, divers modes

de référer, différentes axiomatiques : l'objectification permet une telle pluriformalisation, la formalisation pluri-aspectuelle simultanée.

2) Un symbole a un statut épistémique possiblement multiple et changeant au cours de la simulation (référence interne par exemplification ou référence externe par dénotation ou exemplification) : il y sert tantôt d'instruments de déductions, tantôt d'instruments de computation au sens fort ; pluralité et instabilité elles-mêmes non prévisibles (dans les grandes lignes) des statuts épistémiques des symboles.

3) Elles utilisent le traitement discret pour faire que les symboles servent tour à tour d'éléments de représentation ou d'éléments de réplique. Certains sous-modèles traitent des symboles venant d'autres sous-modèles comme des objets alors que ces autres sous-modèles n'appartenant pas à la même hiérarchie dénotationnelle les traitent comme des symboles conventionnels.

De telles simulations sont fortement déconcertantes précisément parce qu'elles captent au plus près certains des linéaments comme des intrications propres aux phénomènes multi-aspectuels et multi-échelles du monde réel, c'est-à-dire d'un monde non artificialisé par les contraintes d'aseptisation, de segmentation et d'isolement qu'impose l'expérimentation. Elles manifestent ainsi une forme spécifique de *concrétude*⁴⁵ et d'*épaisseur*⁴⁶. La construction d'une simulation informatique à base d'objets, intégrative et pluriformalisée crée certes un monde artificiel. Mais c'est un monde artificiel où est partiellement répliquée par des moyens computationnels l'épaisseur du monde comme telle puisqu'il y est reproduit ponctuellement et de manière ni pré-dictible ni post-dictible le rapport même – intrinsèquement pluriel – entre l'objet et la symbolisation de l'objet.

45. Franck Varenne, « La simulation conçue comme expérience concrète », in J.P. Müller (dr.), *Le statut épistémologique de la simulation*, 2003, Paris, éditions de l'ENST, p. 299-313.

46. Franck Varenne, « Simulation informatique et pluriformalisation des objets composites », *Philosophia Scientiae*, 13 (1), 2009, p. 135-154; « La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat* », in D. Parrochia et V. Tirloni (dir.), *Formes, systèmes et milieux techniques après Simondon*, Lyon, Jacques André, 2012, p. 107-123.

Bibliographie

- BEDAU Mark, « Weak Emergence », in Tomberlin J. (éd.), *Philosophical Perspectives: Mind, Causation and World*, vol. 11, Malden, Blackwell, 1997, p. 375-399.
- DOWEK Gilles, *Les métamorphoses du calcul* (2007), Paris, Le Pommier, 2011.
- GOODMAN Nelson, *Langages de l'art* (1968), Paris, Hachette, 2006.
- GOODMAN Nelson, « Routes of reference », *Critical Inquiry*, 8 (1), 1981, p. 121-132
- MORGAN Mary, « Experiments versus models: New phenomena, inference and surprise », *Journal of Economic Methodology*, 12 (2), 2005, p. 317-329.
- PHAN Denis et Varenne Franck, « Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: from conceptual exploration to distinct ways of experimenting », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13 (1), 2010; <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/5.html>>.
- RIGAL Elisabeth (dir.), *Wittgenstein et les mathématiques*, Mauvezin, T.E.R., 2004.
- VARENNE Franck, « La simulation conçue comme expérience concrète », in Müller J.P. (dir.), *Le statut épistémologique de la simulation*, 2003, Paris, éditions de l'ENST, p. 299-313.
- VARENNE Franck, « Framework for M&S with Agents in regard to Agent Simulations in Social Sciences : Emulation and Simulation », in Muzy A., Hill D.R.C. et Zeigler B.P., *Activity-Based Modeling and Simulation*, Clermont-Ferrand, Presses universitaires Blaise Pascal, 2010, p. 53-84; <<http://philpapers.org/rec/VARFFM>>.
- VARENNE Franck, « La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat* », in Parrochia D. et Tirloni V., *Formes, systèmes et milieux techniques après Simondon*, Lyon, Jacques André, 2012, p. 107-123.
- VARENNE Franck, « Chains of Reference in Computer Simulations », *working paper* de la FMSH, FMSH-WP-2013-51, GeWoP-4, 2013, p. 1-29; <<http://www.fmsh.fr/en/c/4002>>.
- VARENNE Franck, « Modèles et simulations : variétés traditionnelles et mutations contemporaines », in Varenne F. et Silberstein M., *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome I, Paris, Matériologiques, 2013, p. 11-49.
- WITTGENSTEIN Ludwig, *Tractatus Logico-philosophicus*, Paris, Gallimard, 1993.
- WITTGENSTEIN Ludwig, *Bemerkungen über die Grundlagen der Mathematik* (1956), Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1984.

WITTGENSTEIN Ludwig, *Cours sur les fondements des mathématiques*, texte établi par C. Diamond (1976), Mauvezin, T.E.R., 1995.