

La simulation conçue comme expérience concrète

Franck Varenne - Doctorant en histoire des sciences

Centre Inter-universitaire d'Histoire des Sciences et des Techniques - Lyon 2

Adresse personnelle : 187, avenue du Maine - 75014 Paris - fvarenne@wanadoo.fr

Résumé : Par un procédé d'objections/réponses, nous passons d'abord en revue certains des arguments en faveur ou en défaveur du caractère empirique de la simulation informatique. A l'issue de ce chemin clarificateur, nous proposons des arguments en faveur du caractère concret des objets simulés en science, ce qui légitime le fait que l'on parle à leur sujet d'une expérience, plus spécifiquement d'une expérience concrète du second genre.

Introduction :

Dans un article précédent (2001), nous avons montré que, dans la littérature tant scientifique, philosophique, historique que sociologique, on trouve régulièrement trois grands types de thèses concernant le statut de la simulation par ordinateur. En effet, soit l'on considère la simulation par ordinateur comme une sorte d'expérience, soit, au contraire, on la considère comme un simple outil intellectuel ou théorique, soit, enfin, on la considère comme un moyen nouveau et inédit d'apprendre quelque chose au sujet de la « nature des choses », un moyen intermédiaire – c'est-à-dire un troisième terme – entre théorie et expérience.

Nous soutenions également qu'au vu de l'histoire récente des sciences, il n'était pas possible de trancher en général en faveur de telle ou telle de ces trois positions : tout dépend en effet du rôle épistémologique explicite ou implicite donné à chaque fois et dans chaque cas à la représentation formalisée, dans le domaine précis concerné. Par exemple, avec une approche épistémologique de type « Artificial Life », une simulation par ordinateur d'un être biologique quelconque sera considérée comme une expérience à part entière, alors que, dans le cadre d'une autre tradition épistémologique, comme celle de l'agronomie française par exemple, la simulation de la croissance d'une plante à l'aide de L-systèmes pourra, au contraire, être considérée comme purement théorique.

Avec le développement de la simulation informatique et plus seulement numérique, il nous paraît cependant possible de nous pencher plus précisément sur ce qui fait la forme empirique de la simulation alors même que sa matière, ses matériaux en sont formels. Il y a un

grand paradoxe à dire qu'une forme soit empirique et qu'une matière soit formelle. Nous pensons que c'est une des raisons pour lesquelles il est difficile de concevoir le statut épistémologique de la simulation.

Pour mettre au jour cette forme empirique prenant naissance au cœur même d'une matière formelle, nous nous proposons de partir d'une définition minimale de la simulation informatique et de rappeler en quoi on a pu voir là quelque chose comme une expérience. C'est alors en suivant et en progressant avec les objections et les réponses à ces objections que nous serons progressivement conduits à reconnaître ce qui fait, selon nous, de la simulation informatique une expérience concrète du second genre.

1- définition minimale et première formulation de la thèse :

Nous laisserons délibérément de côté la définition trop large retenue par la Society for Computer Simulation de John MacLeod. Cette définition – que nous avons nommée S1 dans (Varenne, 2001) - indique que la simulation informatique renvoie à « tout usage de l'ordinateur pour modéliser des choses » (McLeod, 1986). En effet nous ne pensons pas qu'un calcul formel effectué sur ordinateur, par exemple, puisse vraiment être qualifié de simulation.

La définition minimale que nous retiendrons ici décrit la simulation informatique comme un traitement pas à pas par ordinateur soit d'un modèle mathématique sans solution analytique, soit d'un moteur d'inférence à base de règles : automates cellulaires, SMA, modélisation orientée objet. Les premières simulations numériques sur machine électronique, les simulations Monte-Carlo de Von Neumann, Ulam et Metropolis, entrent dans cette définition, comme on le voit.

La première affirmation en faveur du caractère empirique de la simulation pourrait alors partir du constat immédiat que l'on peut tirer de cette définition minimale. Nous pouvons en effet en déduire que la simulation nous apprend toujours quelque chose, à l'image d'un récit dont on ne connaît pas *a priori* la fin. Certains auteurs ont ainsi assimilé la simulation à une « histoire d'états » à cause du caractère pas à pas de son traitement. L'ordinateur raconterait une histoire, mot à mot, sans donner pour autant la capacité de la résumer. Cette capacité que la simulation possède de passer pour une aventure de l'esprit provient en effet du caractère incompressible de son traitement formel : pour telle simulation particulière, il n'y a pas – dans l'état des connaissances du

moment - d'autres chemins intellectuels pour parvenir aux résultats. Et le résultat est dépendant de l'intégralité du chemin. Il faut donc le parcourir pas à pas sans espérer le raccourcir.

2- Objection :

Si l'on ne considère que cet argument de l'incompressibilité, il est facile de lui objecter la persistance du caractère formel, calculatoire donc seulement intellectuel de la simulation informatique. Manfred Stöckler (2000) rappelle ainsi que, même pour le traitement parallèle d'un réseau d'automates, on pourrait imaginer qu'un homme procède de lui-même, par la seule force de son esprit, à ces calculs pas à pas - qui peuvent être ramenés à des calculs séquentiels. L'ordinateur n'est qu'une machine à calculer ! La simulation demeure toujours donc de droit, sinon de fait, intellectuelle. Le fait d'être automatisée et de manipuler une masse considérable de données ne lui ferait pas faire un saut qualitatif. C'est pourquoi Stöckler pense que le statut de la simulation doit se cantonner à celui d'un argument théorique résultant d'un calcul.

3- Réponse :

A cet argument, on peut répondre par la remarque selon laquelle, depuis la construction ou la découverte – si l'on préfère - des théorèmes de limitation des systèmes formels - Gödel, hypothèse de Church, Turing -, il n'est plus tout à fait absurde de parler de mathématiques expérimentales. Avant même la démonstration du théorème des quatre couleurs de 1976, la combinatoire avait très tôt appris à se servir des capacités de simulation de l'ordinateur. Dans les années 1960, Murray Eden, par exemple, a donné un certain nombre de résultats approchés en combinatoire qui ne lui auraient pas été suggérés sans le recours à des simulations Monte-Carlo sur ordinateur.

4- Objection :

On pourrait objecter à cela que l'on n'a toujours affaire qu'à des explorations de concepts – explorations certes non compressibles par des algorithmes -, mais non pas à des explorations de la réalité elle-

même. Cette « aventure » reste une interrogation des productions de l'esprit par l'esprit, non une interrogation des réalités du monde. D'ailleurs les simulations sont le plus souvent non réalistes. Elle repose très souvent sur des modèles mathématiques. Et chacun sait bien qu'un modèle a pour fonction de simplifier, styliser, esquiver la réalité. Donc les simulations ne sont que des caricatures formelles de la réalité.

5- Réponse :

Nous répondrions à cette objection que, comme l'a montré récemment l'historien des sciences Peter Galison (1997), l'histoire de la simulation numérique sur ordinateur a d'abord été celle d'une tentative de réplique du réel. Dès le départ, c'est dans une perspective réaliste – toutes proportions gardées – que Von Neumann et Ulam interprètent la simulation Monte-Carlo dans son rapport avec les neutrons réels. Ainsi les nombres tirés au hasard figurent des comportements assimilables à des comportements individuels de neutrons, malgré le fait que les neutrons réels soient en nombre bien plus importants. Von Neumann confirme son interprétation réaliste de la méthode de Monte-Carlo appliquée à la physique nucléaire quand il rappelle que la nature de la matière est probablement granulaire, en tout cas à l'échelle à laquelle il la considère. Cette approche discrétisée et aléatoire lui semble assez réaliste après coup donc valable. Bien entendu, il s'appuie avant tout sur les théorèmes qui autorisent une résolution statistique d'équations impossibles ou trop longues à résoudre analytiquement. Mais ce qui légitime selon lui l'appellation de simulation – venant des simulations analogiques sur analyseurs différentiels – tient au fait que dans le cas des simulations numériques, comme auparavant dans celui des simulations analogiques, on a affaire à un modèle qui « vit » de façon réaliste son traitement – selon l'expression que Louis Couffignal n'appliquait justement qu'aux modèles analogiques – plus qu'il ne calcule.

De la même façon, mais dans un tout autre domaine, le généticien Kimura tendra, dans les années 1960, à considérer le traitement de ses modèles génétiques discrets comme plus réalistes que les modèles continus qu'il utilisait auparavant (Dietrich, 1996). Il utilisera la simulation numérique comme une expérience : pour réfuter des modèles continus. Cela tient là aussi au caractère granulaire de son objet d'étude, les gènes. A l'instar du neutron de la physique nucléaire, cet objet biologique peut donner facilement lieu à une approche discrétisée et

aléatoire. Kimura n'hésitera pas ainsi à parler d'expériences sur ordinateur.

6- Objection :

Les statisticiens objectent d'ordinaire que cette méthode de Monte-Carlo n'est qu'un stratagème statistique donc intramathématique, donc théorique. Ils ont très vite nié sa nouveauté et l'ont rapporté aux techniques classiques d'échantillonnage (Marshall, 1954). De plus, les simulations ne peuvent être considérées comme réalistes puisqu'elles se fondent sur des modèles simplificateurs orientés en vue d'un objectif pragmatique. Les modèles sont perspectivistes : ils sont des outils simplificateurs visant un certain objectif. Ils formalisent un point de vue. Or, un point de vue sur la réalité n'est pas la réplique de la réalité. Les modèles sont des fictions et les simulations sont des récitations particulières de ces fictions.

7- Réponse :

Certes l'histoire montre que la plupart des modèles mathématiques ont été des fictions à vocation heuristique ou pragmatique ; et ce n'est pas seulement vrai des modèles concrets de Thompson et Maxwell mais également des modèles mathématiques. Mais la question que l'on doit aujourd'hui se poser est la suivante : une simulation est-elle encore un modèle au sens où on l'a entendu jusqu'à présent ? C'est-à-dire est-elle un schéma théorique ou imagé à but simplificateur et visant une condensation de l'information ? Beaucoup de philosophes des sciences contemporains ne veulent encore voir la simulation en science que comme une expression particulière d'un modèle. Or, la simulation informatique a de plus en plus cette fonction de répliquer la réalité dans sa complexité, c'est-à-dire dans ses détails. Avec les développements techniques de la puissance et du graphisme informatiques, la simulation devient de plus en plus l'occasion de reproduire des objets virtuels prenant en considération la multiplicité des points de vue que l'on peut avoir sur eux dans la réalité, donc de produire des laboratoires virtuels. On n'a plus affaire à des perspectives réalistes mais à des objets réalistes. Dans la simulation entendue comme instrument scientifique, on dépasse le stade des seules images de synthèse. Le cas de la simulation réaliste – à échelle globale – des plantes, telle qu'elle a été

effectuée par l'équipe de Philippe de Reffye au CIRAD, a bien montré combien de tels logiciels de simulation pouvaient avoir plusieurs fonctions, brisant en cela le dogme perspectiviste du modélisme mathématisé. AMAP a ainsi d'abord servi pour faire de belles cartes de vœux ! Mais il a ensuite servi à des métiers aussi différents que celui des urbanistes, des paysagistes, des agronomes, des botanistes, des forestiers ou des écophysiologistes.

La simulation a ainsi la fonction d'opérer une synthèse des connaissances, comme le suggère Paul Caseau (1996 et 2002). Le terme doit être pris ici au sens de la chimie de synthèse : elle produit des objets synthétiques. Elle ne conduit donc pas à une analyse des connaissances ni seulement à une instanciation d'un modèle mathématique censé gardé en lui des profondeurs inexplorées. La simulation orientée objet par exemple, en s'appuyant sur la programmation du même nom, indique bien et sans ambiguïté l'importance de cette « réification » des concepts formels, de sorte que l'on peut parler à bon droit d'expériences virtuelles.

8- Objection :

Certains professionnels de la simulation peuvent encore objecter à cela que la simulation reste fondamentalement un discours, un langage, qu'elle demeure donc de la nature d'un modèle, qu'elle reste conceptuelle, même si elle donne lieu, sous ses formes graphiques à certaines présentations suggestives et sensibles de l'abstrait. Même sous forme d'images de synthèse ou de mondes virtuels, la simulation ne donnerait donc lieu qu'à une extension de notre langage et de notre écriture. Elle serait une néo-écriture qu'il faudrait apprendre à développer, à décrypter, à utiliser et à maîtriser, de peur que, dans nos vies, et dans une immense schizophrénie sociale, le virtuel ne prenne finalement le pas sur le réel.

9- Réponse :

Voilà précisément où nous voulions en venir après tous ces brefs rappels concernant l'état actuel du débat et des arguments : nous récusons l'idée que la simulation ne soit qu'un langage, sauf bien sûr à revenir aux excès du structuralisme de Roland Barthes pour qui tout

était langage. On se condamne à ne pas comprendre le rôle que joue la simulation dans les sciences, au titre d'instrument scientifique à part entière, si on ne la conçoit que comme un discours, une écriture ou un langage. La simulation n'est pas un langage car ses signes en sont hétérogènes : cela veut dire que la simulation utilise de plus en plus différents formalismes mathématiques qu'elle fait coexister d'une façon non mathématique, c'est-à-dire non réductible à une axiomatique commune. La simulation n'est pas un discours ni un langage non seulement parce qu'elle ne peut pas être résumée en fait mais aussi et surtout parce qu'elle ne peut pas être résumée ni donc pensée en droit à cause de l'hétérogénéité de ses outils conceptuels. L'apport de la simulation n'est pas seulement dû aux limites pratiques ou théoriques de la calculabilité de certains problèmes mathématiques. Il est également dû au fait que l'infrastructure informatique autorise que se côtoient des formalismes tout à fait hétéroclites, c'est-à-dire non réductibles les uns aux autres et non justiciables d'une même axiomatique. Ce qu'il faut comprendre, c'est que *la simulation utilise tout autrement les mathématiques que les modèles*. Elle objectivise des concepts formels et les fait coexister à l'intérieur d'un ou de plusieurs autres formalismes. La simulation donne lieu à l'histoire d'un écosystème rempli d'êtres mathématiques composites et hétéroclites. Elle déploie une trajectoire dans la dynamique singulière de cet écosystème, sans que cette trajectoire soit à première vue simplifiable en celle d'un système dynamique correctement formalisé et mathématisé. Cet écosystème est certes fait d'êtres mathématiques, mais il n'est pas mathématisable en tant que totalité. Ainsi le programme de simulation de la croissance des plantes AMAP du CIRAD fait pousser des graphes - topologie - par des processus stochastiques - lois de probabilité - dans l'espace tridimensionnel géométrique usuel - géométrie. A la différence des modèles, les simulations font donc coexister plusieurs formalismes et traitent toutes les mathématiques comme des mathématiques descriptives. Les simulations procèdent donc de ce que nous pouvons appeler un *polyformalisme intrinsèque*.

Précisons encore. Qu'est-ce qui permet la promotion de cette coexistence bricolée et hétéroclite entre divers êtres mathématiques ou informatiques ? La synchronisation par le traitement pas à pas. A chaque pas du traitement, les formalismes se côtoient et communiquent. C'est même leur seule façon de s'homogénéiser entre eux : par instants successifs, par échantillonnages. Le pas à pas ne sert donc plus

seulement à traiter l'incompressibilité algorithmique – cas de la simulation numérique - mais aussi et surtout l'hétérogénéité formelle des objets coexistants – cas de la simulation informatique. La simulation informatique n'est donc pas un langage parce que les signes y sont réglés par diverses axiomatiques, d'ailleurs parfois contradictoires entre elles. C'est aussi la raison pour laquelle une simulation ne peut être exprimée mathématiquement. A ce titre, elle n'a pas de grammaire, *a fortiori* pas non plus de grammaire générative – même si la simulation peut se servir ponctuellement et localement de telles grammaires comme dans le cas des L-systèmes -, *elle n'est pas un système de signes*. N'en déplaise à l'iconoclasme résiduel de nos philosophes, la simulation accepte de jouer un rôle - systématiquement méprisé dans l'épistémologie française depuis Bachelard -, celui de simples reproductions de la réalité, et ce jusque dans ses détails – à une certaine échelle bien sûr. Elle n'est donc pas une écriture à visée abstractive, mi-abstraite/mi-concrète, qui permettrait d'exprimer une capacité à formaliser dont on disposerait déjà et que l'on délèguerait ensuite à la machine. En effet elle ne peut donner lieu à une *construction mathématique des concepts* au sens de Kant.

Mais qu'entendons-nous par là ?

10- Explication de l'expression « *expérience concrète du second genre* »

Nous allons d'abord ici rappeler ce que Kant entend par « construction mathématique de concept » parce que nous pensons que cela peut être éclairant si l'on veut expliciter la différence entre un discours mathématique – et donc un modèle - et une simulation informatique. Il ne s'agit pas pour nous de revenir à Kant en affirmant qu'il existe un sujet transcendantal anhistorique et des catégories de la connaissance atemporelles. L'emprunt que nous lui ferons ne nous imposera nullement de telles adhésions doctrinales. Nous ferons simplement l'essai de quelques uns de ses concepts afin d'explorer ce que l'on peut en conserver aujourd'hui, sans prétendre reconstruire pour autant une épistémologie générale, ce qui devra nécessairement exiger bien d'autres reprises, et à un niveau plus fondamental, bien entendu.

Rappelons que l'objectif de Kant est d'expliquer l'entrelacement des mathématiques avec les phénomènes sensibles. Devant les succès de

Newton, il lui apparaîtrait que certains résultats mathématiques *a priori* - avant l'expérience sensible - correspondent à une description juste de ce qui se produit dans les phénomènes sensibles. La mécanique peut donc, selon Kant, être construite en grande partie *a priori*. Kant explique ce fait remarquable par une doctrine de la bipolarité de toute connaissance scientifique : connaître implique que l'on dispose à la fois d'un concept - une « représentation générale commune à plusieurs objets » - et d'une intuition sensible - une « représentation singulière dépendant immédiatement de la présence de l'objet » - qui viennent remplir ce concept, c'est-à-dire lui donner sa signification intuitive. Pour opérer la médiation entre les deux, c'est-à-dire pour les lier et former ainsi une connaissance conceptuelle adaptée à un objet, il y a deux façons de procéder : soit de façon empirique, soit de façon *a priori*. La mécanique de Newton peut procéder en grande partie *a priori* car notre esprit peut produire ses connaissances spontanément grâce au recours à sa faculté de développer des intuitions sensibles purement *a priori*, comme c'est le cas par exemple avec l'espace imaginé, lorsque nous résolvons en pensée un problème de géométrie pure. Or cette intuition imaginaire *a priori* se trouve présider également à la manifestation des phénomènes sensibles, à notre sensibilité et à nos perceptions des phénomènes réels. La grille de lecture à travers laquelle nous lisons les phénomènes réels est donc celle même qui nous sert à les imaginer *a priori*. Tel est le postulat majeur du kantisme que Kant présente pour sa part comme un résultat de son analyse. C'est pourquoi nous pouvons connaître certaines lois des phénomènes mécaniques totalement *a priori*, presque en fermant les yeux. C'est pourquoi il y a une physique mathématique adéquate qui permet de prédire le monde physique.

Or, et c'est d'abord cela qui nous intéresse, cette connaissance construite *a priori* repose sur la présence d'une règle permettant de commander à notre imagination la manière de remplir *a priori* ce concept - ex : le concept du principe de l'action et de la réaction, 3^{ème} loi *a priori* de la mécanique selon Kant. Cette règle est ce que Kant appelle un *schème*. Le schème du concept d'un nombre, par exemple, est la représentation de la règle récursive que l'imagination - ou intuition *a priori* - doit suivre pour le construire *a priori* et en remplir intuitivement le concept.

Qu'en est-il pour la simulation informatique ? A-t-on affaire à la construction mathématique - donc *a priori* - d'un concept ? Face au résultat d'une simulation informatique, nous n'avons pas

immédiatement de concept mais nous avons une intuition au sens de « donation sensible » - s'il s'agit d'images ou d'objets virtuels - ou même, si l'on préfère, une intuition seulement au sens de « donation d'un objet singulier » - selon le sens étendu que Jaakko Hintikka (1980) donne à l'intuition kantienne. Il n'est en effet même pas besoin de dire que le résultat d'une simulation est effectivement sensible, visible, palpable, pour dire que c'est une intuition au sens de Kant. Selon Hintikka, que nous suivons ici, la doctrine de Kant n'impose pas intrinsèquement que l'intuition humaine ne soit que sensible : elle laisse ouverte la possibilité d'une intuition étendue sans qu'elle en devienne pour autant intellectuelle. Il suffit dès lors de préciser que par le terme d' « intuition », on entend toute forme de donation à l'esprit d'une entité singulière, de quelque chose donc qui se donne d'emblée comme un apax. Cela nous semble bien être le cas de tout résultat de simulation. Or, de cette intuition, nous n'avons pas de concept - donc pas de connaissance théorique - car nous n'avons pas de schème pour appliquer un concept sur le matériau empirique divers qui nous est donné par la simulation. C'est-à-dire que nous ne disposons pas de la règle qui permet de subsumer - rassembler en généralisant - sous un concept le divers de cette intuition élargie donnée par la simulation. Et cela nous le savons de façon certaine car les axiomatiques utilisées sont formellement irréductibles voire contradictoires, donc non co-conceptualisables. Ce dont nous avons l'intuition est donc ici par nature ce qui est inconceptualisable ou inconcevable *a priori* - c'est-à-dire au moyen des seuls formalismes dont on dispose à l'heure où l'on a recours à cette simulation précise. En conséquence, il n'y a pas de représentation *a priori* dans notre intuition qui nous permettrait de prédire ce que donnera une simulation. C'est pourquoi l'on peut dire que la simulation ne donne pas lieu à une construction mathématique *a priori*. Si la simulation nous donne quelque chose de conceptuel en sortie, ce ne peut donc être un concept *a priori*, mais seulement un concept empirique.

Les connaisseurs de la doctrine kantienne pourraient précisément nous objecter ici que la façon générale de procéder propre aux schèmes - le « schème transcendantal » - est temporelle et qu'elle est parfois de ce fait échantillonnante comme peut l'être une simulation. En effet, cela est vrai du fait même que le déploiement d'un schème est toujours lié au temps - tout schème se ramène à une détermination particulière de l'intuition temporelle, l'intuition du temps - et se produit parfois pas à

pas, notamment dans la construction de tous les concepts des nombres par exemple - idée géniale de Kant. Nous répondrions qu'il faut pourtant, selon Kant, que la règle précise - le schème - de l'imagination transcendantale demeure identique au cours de la synthèse pas à pas qui se produit par elle, ce qui n'est essentiellement pas le cas de la simulation informatique, comme nous l'avons dit, même si effectivement elle est construite pas à pas, à l'instar de certains concepts *a priori* disposant d'un schème.

En résumé, il n'y a pas de concept *a priori* qui nous permettrait d'anticiper le résultat d'une simulation parce que nous ne disposons pas de règle – ou schème - permettant de le construire sous une forme théorique dans l'intuition. *La simulation n'est pas d'ordre théorique en ce sens précis qu'elle n'est pas un système formel permettant de faire se dévider par avance un certain nombre de résultats homogènes entre eux à partir d'une seule axiomatique. Elle est une utilisation physique des mathématiques.*

Dès lors, pouvons-nous dire que la simulation donne lieu à un concept empirique ? Selon Kant, le concept empirique, comme nous l'avons dit précédemment, constitue la deuxième forme possible de remplissement d'un concept par une intuition : une intuition empirique ou *a posteriori*. On a vu qu'une simulation se donne comme une intuition comportant du divers intuitif - présenté comme un écosystème complexe et singulier – que l'on a du mal à embrasser d'un seul coup d'œil de l'esprit. Or, s'agit-il ici de la même intuition que celle des mathématiciens ? Le mathématicien Georges Bouligand avait déjà thématiqué l'idée que l'intuition mathématique allait désormais bien au-delà du cadre étroit dans lequel Kant l'avait enserrée. C'est pourquoi il parlait d'intuition prolongée. On connaît par ailleurs la fécondité et la finesse des débats qui ont tourné autour de l'intuitionnisme mathématique au début du 20^{ème} siècle (Largeault, 1992). Si Kant faisait se coïncider les deux - intuition sensible et intuition mathématique *a priori* -, ne nous faudrait-il pas aujourd'hui et en revanche parler d'une « intuition élargie » d'un autre type que celle que nous propose les mathématiques contemporaines ? Si tel n'était pas le cas, on devrait toujours considérer que la simulation est une forme particulière de construction valable d'objets mathématiques, dans une perspective constructiviste. La simulation serait théorique car de nature purement mathématique. Il suffirait alors de reprendre la doctrine kantienne en

élargissant les cadres de son intuition *a priori*, en en niant le caractère transcendantal et anhistorique, cela afin d'intégrer la simulation dans l'histoire des mathématiques. Cela ne nous semble pas être le cas. L'intuitionnisme mathématique de Brouwer visait un mode de construction, supposé le plus valable, des objets mathématiques pris un à un, dans leur spécificité axiomatique et générique. C'était encore une thèse qui visait le règlement de la question de la validité des démonstrations dans un cadre mathématique homogène. Mais elle ne visait pas du tout à régler la question de l'imbrication et de la coexistence hétéroclite de divers objets mathématiques à axiomatiques irréductibles. La simulation nous met ainsi en face de l'expérience d'une coexistence dynamique entre des formalismes traités comme des objets et communiquant comme tels. *La simulation est une écologie de formalismes objectivés*. Elle est le plus souvent irréductible à une approche de type constructiviste et mathématique. De là provient son caractère empirique. Il nous reste maintenant à justifier son caractère concret.

Le concept empirique est celui qui est rempli *a posteriori* à l'occasion d'expériences et cela grâce à l'usage de l'intuition empirique. Son usage est principalement descriptif, comme dans la chimie de l'époque de Kant (Lequan, 2000), mais ne peut être explicatif, sauf si, par la suite, on parvient à le fonder sur des concepts *a priori*. Nous pouvons dire que dans notre intuition élargie par simulation, une telle connaissance empirique descriptive est acquise par concept empirique au sujet de ce *monde polyformalisé*. C'est un monde qui souffre d'incohérence mais pas d'un manque de cohésion. Plus précisément, les formalismes objectivés adhèrent les uns aux autres d'une façon telle que le résultat d'une simulation est compliqué et très intégré : la simulation fait tenir et croître ensemble ces formalismes objectivés. Le terme concret vient du latin *concreasco* - « croître ensemble ». Nous dirions donc qu'être concret – *concretus* – ne nécessite pas nécessairement la matérialité ni même le fait d'être sensible. C'est une qualité qui provient du fait que cette co-existence et cette co-croissance intégratrices participent de la constitution d'un objet qui ne devient dès lors accessible que par l'expérience. La compacité réaliste du *concret* se retrouve dans beaucoup de simulations qu'il faudrait donc concevoir comme des *expériences concrètes du second genre*, le premier genre concernant ici les expériences concrètes réelles, seul type d'expérience concrète que nous connaissions jusqu'à l'avènement de la simulation.

Conclusion

Nous terminerons en rappelant donc que, du fait de son *polyformalisme intrinsèque* - probabilités, géométrie, graphes, topologie, analyse, encapsulation informatique, etc. -, la simulation informatique peut valoir comme une expérience concrète du second genre, le premier genre renvoyant à l'expérience immédiate et aux expérimentations scientifiques. Des expériences virtuelles peuvent être menées qui n'interdisent nullement que des formalismes moins polymorphes leur soient progressivement substitués. Les travaux actuels d'AMAP (Nosenzo, 2001) ont par exemple remplacé par des algorithmes plus rapides certaines fonctionnalités qui étaient d'abord simulées dans la première version. Avec nos propos, nous ne voulions donc nullement affirmer que la simulation est à rechercher à tout prix : on ne doit pas renoncer à condenser le réel ou les simulations pour comprendre, c'est-à-dire qu'on ne doit bien sûr pas renoncer à produire des concepts que notre esprit pourrait déployer seul. Mais nous voulions préciser ce qui fait le caractère empirique d'une simulation informatique. Comme conséquence de ce que nous avons dit, la simulation n'a pas à recevoir le simple lot de consolation qu'on lui a tant de fois décerné : sa qualification vague comme outil heuristique. Tout peut jouer un rôle heuristique ! L'important est d'essayer d'expliquer précisément *en quoi* la simulation peut entre autres remplir ce rôle.

Bibliographie

- Bedau, M. A. 1998. "Philosophical content and method of Artificial Life". *The Digital Phoenix: How computers are changing philosophy*, ed. by T. W. Binum and J.H Moor, Basil Blackwell, Oxford, 135-152.
- Blaise, F. *et al.* 1998. "Simulation of the Growth of Plants – Modeling of Metamorphosis and Spatial Interactions in the Architecture and Development of Plants". *Cyberworlds*, ed. by T.L. Kunii and A. Luciani, Springer Verlag, Tokyo, 82-109.
- Caseau, P. 1996 et 2002. « Crise ou mutation de la simulation numérique », version française d'un article publié en anglais en 1996,

- communication personnelle dans sa version française remaniée (en 2002), 11 pages.
- Di Paolo, E.A. *et al.* 2000. "Simulation Models as Opaque Thought Experiments". In *Artificial Life VII*, Proc. of the 7th Intern. Conf. on Artificial Life, ed. by Mark A. Bedau *et al.*, MIT Press, Cambridge, 497-506.
- Dietrich, M. R. 1996. "Monte-Carlo Experiments and the Defense of Diffusion Models in Molecular Population Genetics", *Biology and Philosophy*, vol. 11, n°3, July 1996, 339-356.
- Franc, A. 1996. « Croissance des peuplements forestiers hétérogènes : modélisation par des réseaux d'automates cellulaires. » In CNRS 1996, 319-327.
- Galison, P. 1997. *Image and Logic*, The University of Chicago Press, 689-752.
- Hartmann, S. 1995. "Simulation". *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, vol. 3, Verlag Metzler, Stuttgart, 807-809.
- Hill, D.R.C. 1996. *Object Oriented Analysis and Simulation*, Addison-Wesley.
- Hintikka, J. 1980, 1996. *La philosophie des mathématiques chez Kant*, Paris, PUF, 1996, 311p ; 1^{ère} édition en anglais (sans lieu) : 1980.
- Humphreys, P. 1990. "Computer Simulations", in *PSA (Philosophy of Science Association)* 1990, vol. 2, 497-506.
- Kant, E. 1781, 1787. *Critique de la raison pure*, Paris, PUF-Quadrige, 150-156.
- Largeault, J. 1992. *L'intuitionnisme*. PUF, QSJ, Paris.
- Lequan, M. 2000. *La chimie selon Kant*, PUF/Philosophies, Paris, 9-23.
- McLeod, J. 1986. "Computer modeling and simulation : The changing challenge". *Simulation*, Mach 1986, 114-118.
- Marshall, A.W. 1954. "Preface". Proc. of the Symposium on Monte Carlo Methods, ed. by H.A. Meyer, Wiley & Sons, New York, v-ix.
- Nosenzo, R. *et al.* 2001. « Modèles mathématiques de conduite culturelle ». *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, éd. par E. Malézieux, G. Trébuil et M. Jaeger, CIRAD/INRA, Montpellier/Versailles, 145-172.
- Parrochia, D. 2000. « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation ». *Qu'est-ce que la vie?*, UTLS, Odile Jacob, Paris, 193-203.
- Reffye (de), Ph. *et al.* 1991. "Growth units construction in trees : a stochastic approach". *Acta Biotheretica*, 39, 325-342.

- Rohrlich, F. 1990. "Computer Simulation in the Physical Sciences", *PSA (Philosophy of Science Association)* 1990, vol. 2, 507-518.
- Stöckler, M. 2000. "On Modeling and Simulations as Instruments for the Study of Complex Systems". *Science at Century's End*, Proc. of the Pittsburgh/Konstanz Colloquium in the Philosophy of Science, 1997, Univ. of Pittsburgh Press, 355-373.
- Varenne, F. 2001. "What does a computer simulation prove ? The case of plant modeling at CIRAD (France)" *Simulation in industry*, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, October 18-20th, 2001, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, 549-554.
- Wagensberg, J. 1985, 1997. *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Barcelona, Tusquets Editores; traduction : *L'âme de la méduse*, 1997, Paris, Seuil.
- Wolfram, S. 2002. *A New Kind of Science*, Champaign, USA, Wolfram Media Inc., 2002, 39-41.