Les simulations sont-elles des expériences numériques?*

JULIE JEBEILE *Université Paris — Sorbonne (Sciences, normes, décision)*

RÉSUMÉ : Certains philosophes ont défendu qu'une analogie existait entre simulations et expériences. Mais, une fois que l'on a reconnu quelques similitudes entre elles, peut-on réellement conclure qu'en vertu de celles-ci les simulations produisent de nouvelles connaissances empiriques comme les expériences? Je soutiens que ces similitudes donnent tout au plus à l'utilisateur d'une simulation l'illusion qu'il a affaire à une expérience, mais ne peuvent fonder sérieusement une analogie entre simulation et expérience. Cependant il ne faudrait pas conclure que l'expérience est épistémologiquement supérieure à la simulation. J'analyse les cas pour lesquels simulation et expérience engendrent également des connaissances nouvelles.

ABSTRACT: Some philosophers see an analogy between simulation and experiment. But, once we acknowledge some similarities between computer simulations and experiments, can we conclude from them that simulations generate empirical knowledge, as experiments do? In this paper, I argue that the similarities between simulation and experiment give the scientist at most the illusion that she is conducting an experiment, but cannot seriously ground the analogy. However, it does not follow that experiments are always epistemologically superior to simulations. I analyze the cases when simulations and experiments equally yield new empirical knowledge.

Il est communément admis que la connaissance tirée de modèles scientifiques n'a pas une origine empirique. Cependant, en vertu d'une certaine ressemblance entre simulation numérique et expérience empirique, certains philosophes ont

* Je remercie Anouk Barberousse, Jacques Dubucs et les deux évaluateurs anonymes pour leurs précieuses remarques sur ce travail.

***Dialogue* 55 (2016), 59–86.**
© Canadian Philosophical Association/Association canadienne de philosophie 2016
doi:10.1017/S0012217315001122

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

défendu qu'une analogie existait entre simulations et expériences, suivant laquelle les simulations produisent des connaissances comme les expériences (voir notamment Guala, 2002 et 2005; Keller, 2003; Morgan, 2002, 2003 et 2005; Norton et Suppe, 2001; Winsberg, 2003). Cette analogie justifierait ainsi que les simulations soient employées pour remplacer les expériences empiriques lorsque ces dernières sont trop onéreuses, difficiles, voire impossibles d'un point de vue pragmatique, éthique et même théorique (Humphreys, 2004, p. 107). Dans ces différentes utilisations, les simulations sont souvent qualifiées d'«expériences numériques» (ou désignées par des expressions équivalentes, telles que «simulations expérimentales», «expériences simulées» et «expériences *in silico*»). Mais que peuvent bien avoir de commun les outils de calcul que sont les simulations et les expériences? Et une fois que l'on a reconnu quelques similitudes entre elles, peut-on réellement conclure qu'en vertu de celles-ci les simulations produisent de nouvelles informations empiriques aussi fiables que celles obtenues par expérience? C'est à ces questions que je compte répondre dans cet article.

Pour ce faire, j'étudie les caractéristiques communes que partagent simulation et expérience et j'examine si elles permettent réellement de justifier l'analogie fréquemment établie entre ces deux notions[1]. Selon le critère que je fixe, pour justifier l'analogie, ces caractéristiques communes doivent, à elles seules, conférer aux simulations la capacité d'accomplir les deux grands rôles usuellement assignés à l'expérience, à savoir, d'une part, (i) fournir de nouvelles connaissances et/ou, d'autre part, (ii) être susceptibles d'invalider nos meilleures hypothèses théoriques.

Plus précisément, dans la section 1, je repère les principales similitudes généralement mises en avant par les philosophes des sciences. Je soutiens que celles-ci donnent tout au plus à l'agent l'*illusion* qu'il a affaire à une expérience, mais ne peuvent fonder sérieusement une analogie entre simulation et expérience. Je discute par ailleurs, dans la section 2, de l'effet «boîte noire». Une fois ces similitudes analysées, je me concentre, dans la section 3, sur la différence fondamentale entre simulation et expérience, ultime obstacle pour tous ceux qui identifient la simulation à une expérience. Cette différence, d'ordre ontologique (Guala, 2002), réside dans le fait que les expériences impliquent nécessairement, au sein de la matière elle-même, la réalisation des processus physiques responsables de l'apparition du phénomène à étudier, tandis que les simulations impliquent, dans la machine, d'autres processus physiques qui réalisent les calculs mais ne produisent pas le phénomène lui-même.

[1] Mon analyse concerne exclusivement des simulations numériques utilisées dans les sciences empiriques dans le but d'obtenir des données et des connaissances sur des systèmes empiriques. Ainsi n'est-elle pas supposée s'appliquer aux simulations utilisées dans les domaines scientifiques qui ne sont pas consacrés à l'étude des systèmes empiriques.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Je considère deux propositions philosophiques visant à nier l'importance de ce qui est souvent appelé la «matérialité» des expériences dans la création des connaissances scientifiques. Après avoir indiqué les limites de ces propositions, je conclus que le rapprochement fait entre simulation et expérience est uniquement métaphorique. L'expression «expérience numérique» est un abus de langage qui ne relève que du caractère superficiellement expérimental des simulations. Néanmoins, je ne considère pas pour autant comme vrai le présupposé empiriste fréquemment présent chez les philosophes (en particulier Mary Morgan et Ronald Giere) qui, comme moi, pensent que simulation et expérience sont fondamentalement différentes. Selon ce présupposé, l'expérience est épistémologiquement supérieure à la simulation. Je montre donc qu'une telle affirmation tient moins fréquemment qu'on peut le croire. Enfin, dans la section 4, qui clôt l'article, j'analyse les sens pour lesquels simulation et expérience engendrent des connaissances *nouvelles*.

1. Similitudes entre simulation et expérience

Le terme «expérience numérique» est fréquemment employé par les scientifiques pour désigner une simulation numérique. Face à cet usage du terme, il faut bien reconnaître que la simulation est plus qu'un simple calcul et qu'elle partage avec l'expérience certaines similitudes notables qui lui confèrent une «allure expérimentale». Celles-ci ont trait aux interactions entre l'agent et la simulation, puisque c'est à travers elles que l'agent reconnaît en la simulation une *expérience* numérique.

Dans cette section, il serait plus exact de parler d'«étude par les simulations numériques» plutôt que de simulation, et de comparer cette étude à l'expérimentation scientifique comme le fait Wendy Parker (2009). En effet, comme Parker le souligne, la simulation est le processus computationnel opéré sur machine. À elle seule, elle n'implique donc pas la présence d'un agent qui intervient sur l'ordinateur et interagit avec le programme informatique. Or, une expérience implique nécessairement la présence d'un agent intervenant sur le dispositif expérimental. En ce sens, il est plus pertinent de comparer l'expérience à l'étude par les simulations numériques, qui est le lieu d'interactions entre l'agent et le programme informatique. Cette étude est

> l'activité plus large qui consiste à fixer l'état de l'ordinateur digital sur lequel la simulation va évoluer, à déclencher [son] évolution en exécutant le programme informatique qui la génère, et ensuite à colliger l'information concernant la manière dont les différentes propriétés [de l'ordinateur], telles que les valeurs stockées dans les différents emplacements de sa mémoire ou les couleurs utilisées à l'écran, changent en fonction de l'intervention faite (qui a consisté à fixer l'état initial du système calculant et déclencher son évolution) (Parker, 2009, p. 488)[2].

[2] Ici, comme pour les autres citations tirées d'articles en langue anglaise, les traductions sont les miennes.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Dans cette section, seront donc implicitement confondues les notions de simulation et d'étude par les simulations.

Il me faut ici recenser les similitudes entre simulation et expérience dans le but de montrer, d'une part, qu'elles peuvent éventuellement donner à l'utilisateur d'une simulation l'impression d'être devant une expérience et, d'autre part, qu'elles ne confèrent néanmoins pas aux simulations les deux fonctions épistémiques des expériences. Ainsi, cette première analyse des similitudes révélera que le terme «expérience numérique» ne se justifie qu'en adoptant le point de vue des agents, c'est-à-dire des utilisateurs des simulations. Pour eux, les simulations numériques peuvent être vécues comme des expériences. Mais rien, dans l'analyse des similitudes, ne permettra de dire que les simulations offrent des connaissances aussi fiables que les expériences ou qu'elles permettent d'invalider une théorie à l'instar des expériences.

Les similitudes entre simulation et expérience que j'ai pu recenser sont principalement au nombre de cinq. J'en présente ici quatre, et j'introduirai la cinquième dans la section 2.

Premièrement, simulation et expérience sont toutes deux utilisées comme des *lieux d'exploration*. Les simulations consistent à *explorer* mathématiquement le modèle, c'est-à-dire à en dériver les conséquences logiques, tandis que les expériences consistent à *explorer* la nature afin d'obtenir des observations ou des mesures qui viennent répondre à des questions précises. En ce sens, pour Deborah Dowling (1999), Evelyn Fox Keller (2003) ou encore Mary Morgan (2003), les simulations sont des *expériences sur la théorie* parce qu'elles en explorent les implications empiriques. Elles sont aussi parfois appelées *laboratoires virtuels*. Margaret Morrison affirme elle aussi que le système de simulation, qui est composé de l'ordinateur, du programme et du modèle de simulation, fonctionne comme un instrument de laboratoire. Il est à la fois l'appareil et le matériel à explorer et nous permet ainsi de suivre et d'étudier l'évolution du système simulé. En particulier, «[c]onsidéré comme un appareil, il nous permet de créer le type d'environnement contrôlé où l'on peut faire varier les conditions initiales, les valeurs des paramètres, etc. En ce sens il fonctionne comme un instrument de laboratoire, utilisé pour mesurer et manipuler les phénomènes physiques» (Morrison, 2009, p. 44-45). Mais la métaphore de l'exploration ne permet aucunement de considérer les simulations comme des expériences. En effet, il s'agit bien des conséquences des hypothèses théoriques qui sont étudiées dans les simulations, or ces hypothèses peuvent évidemment être incorrectes ou inappropriées. Autrement dit, l'aspect exploratoire des simulations ne garantit en rien que la simulation donnera de nouvelles connaissances.

Une deuxième similitude est que simulation et expérience sont toutes deux soumises aux *interventions* de l'agent. Chez Wendy Parker (2009) et Mary Morgan (2002) notamment, il s'agit d'un point commun essentiel. À l'instar des philosophes de l'expérience tels que Hacking (1983), Tiles (1993),

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Radder (1996) et Woodward (2003), Parker et Morgan insistent sur le fait que l'expérience implique l'intervention du scientifique. Ainsi Parker définit-elle une expérience comme suit : «une *expérience* peut être caractérisée comme une activité d'investigation qui implique d'intervenir sur un système afin de voir comment les propriétés d'intérêt du système changent, ou pas, étant donné cette intervention» (Parker, 2009, p. 487). Elle ajoute :

> une *intervention* est, grossièrement, une action réalisée dans le but de mettre un système dans un état particulier, et cela met effectivement le système dans un certain état, mais pas forcément celui désiré. Des exemples paradigmatiques d'intervention […] incluent le fait de donner un traitement médical à un patient, de chauffer un volume de liquide au-dessus d'un bec de gaz, ou d'enlever un composant d'un système (*ibid*.).

Morgan, quant à elle, affirme que «le modèle est manipulé pour obtenir des réponses à la question [posée]. Le modèle ne se manipule pas lui-même — il requiert le scientifique […]» (Morgan, 2002, p. 43).

L'intervention est manifeste dans l'utilisation des simulations dès lors que l'on examine les interactions entre l'agent et l'ordinateur. L'agent se pose une question, indique dans la machine les données d'entrée en lien avec cette question et récolte, en aval, les résultats de simulation associés à ces données qui lui permettent d'obtenir une réponse. Il peut par la suite modifier les données d'entrée s'il considère que les résultats obtenus offrent une réponse insuffisante ou incomplète. Il obtient chaque fois de nouveaux résultats lui permettant de tirer d'autres éléments d'explication. Ce mode d'interaction sous forme de «question — réponse» se retrouve à l'identique dans la relation entre l'expérimentateur et son dispositif expérimental. L'expérimentateur change certains paramètres et observe la réaction du système à ce changement. Chaque fois, le comportement modifié vient répondre à une question qu'il se pose.

Ce mode d'interaction est susceptible d'encourager le scientifique à développer des compétences similaires à celles de l'expérimentateur. Notamment, l'utilisateur de simulations (ou l'expérimentateur) apprend à contrôler et à modifier le comportement du système simulé (ou expérimental) en changeant judicieusement les paramètres d'entrée du programme informatique (ou du montage). Tous deux apprennent aussi à identifier les régularités dans les comportements du système. Ainsi, avec l'habitude, ils apprennent à anticiper la manière dont le système réagit après la modification de tel ou tel paramètre. Par exemple, si le système est un avion soumis à la force du vent, ils apprennent à identifier les changements de vitesse de l'avion en fonction de l'intensité de la force exercée, et cela, que l'avion soit une maquette dans une souffleuse ou un avion modélisé mathématiquement et visualisé à l'écran.

La sociologue des sciences Deborah Dowling a particulièrement mis l'accent sur trois compétences d'expérimentateur que développe l'utilisateur

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

de simulations, à savoir «trifouiller» le modèle mathématique, «repérer» des régularités dans le comportement des systèmes simulés et avoir une «intuition» concernant le comportement du système.

> Le sens de la manipulation directe, écrit Dowling, encourage les numériciens à développer une capacité à bien manier les modèles mathématiques avec leurs mains et leurs yeux, en les *trifouillant*, en *remarquant* comment ils agissent, et en développant une *intuition* pragmatique sur leurs façons de fonctionner. Parce que la simulation est présentée comme une cible expérimentale, le chercheur peut interagir avec comme si elle était une cible «réelle», se reposant sur des compétences physiques de reconnaissance et de réaction (Dowling, 1999, p. 269).

Elle ajoute que la production rapide des données par simulation participe au développement de ces compétences. Le fait de pouvoir changer les variables et d'obtenir des résultats dans un temps relativement court renforce l'affirmation selon laquelle la simulation est vécue comme une expérience, et peut être utilisée comme telle.

Cependant les croyances que l'utilisateur tire des simulations sont valides à la seule condition que le modèle de simulation soit une bonne représentation du système étudié. Là encore, la possibilité d'intervenir sur la simulation est indépendante du fait que celle-ci puisse engendrer des connaissances nouvelles.

Afin d'illustrer les deux autres similitudes entre simulation et expérience, considérons un exemple récent de simulation utilisée en astrophysique pour expliquer la découverte, il y a quelques années, de la fausse galaxie VirgoHI21. VirgoHI21 a été qualifiée de galaxie «sombre» parce que, totalement dépourvue d'étoiles, elle contient seulement du gaz. Sa découverte est venue remettre en question la théorie cosmologique. VirgoHI21, objet de l'amas de la Vierge, est en effet aussi massive que la Voie Lactée. Or, les théories cosmologiques actuelles ne prévoient pas que d'aussi grosses galaxies ne réussissent pas à former d'étoiles ou les aient intégralement perdues.

Afin d'expliquer ce qui semblait *prima facie* contredire leurs théories, les astrophysiciens ont cherché à reproduire la création de VirgoHI21 par la simulation. Pour ce faire, ils ont cherché à concevoir un scénario possible basé sur leurs observations empiriques. Au cours de ces observations, ils ont remarqué que la galaxie VirgoHI21 n'était pas isolée, mais située à proximité de la grande galaxie spirale NGC 4254 (Messier 99). Elle se trouve plus précisément au sein d'un long filament de gaz s'échappant de cette galaxie. Ce fut pour eux une indication que VirgoHI21 pouvait être le résidu d'une interaction passée entre deux galaxies. En effet, de longues queues de gaz sont souvent observées lorsque deux galaxies se rencontrent, car des forces dites de marée arrachent une partie des constituants de leurs disques. Ces débris apparaissent alors le plus souvent sous forme de filaments, dénommés

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

«queues de marée», composés à la fois de gaz et d'étoiles. Les astrophysiciens ont donc cherché à recréer les conditions de collision permettant de reproduire la formation de VirgoHI21. Le résultat final de leur simulation se trouve sur la figure 1.

La simulation reproduit fidèlement la distribution du gaz et la concentration de gaz de VirgoHI21. Elle révèle ainsi que, sous certaines conditions, lorsqu'une galaxie en frôle une autre à grande vitesse (autour de 1000 km/s), de la matière purement gazeuse peut être éjectée à de grandes distances et se re-condense dans le milieu intergalactique, prenant l'apparence de nuages isolés en rotation. Les images des simulations suggèrent que VirgoHI21 s'est formée lors d'une rencontre entre deux grandes galaxies spirales, il y a environ 750 millions d'années. VirgoHI21 ne serait donc pas une galaxie, mais un banal débris de collision (Duc et Bournaud, 2008). En raison de sa vitesse élevée, la deuxième galaxie doit déjà se trouver très loin, hors du champ de vue.

La figure 2 présente les différentes séquences de l'animation qui résulte de la simulation. Il faut noter que ces séquences n'ont pas été capturées à des intervalles parfaitement identiques. Néanmoins, elles ont été prises régulièrement

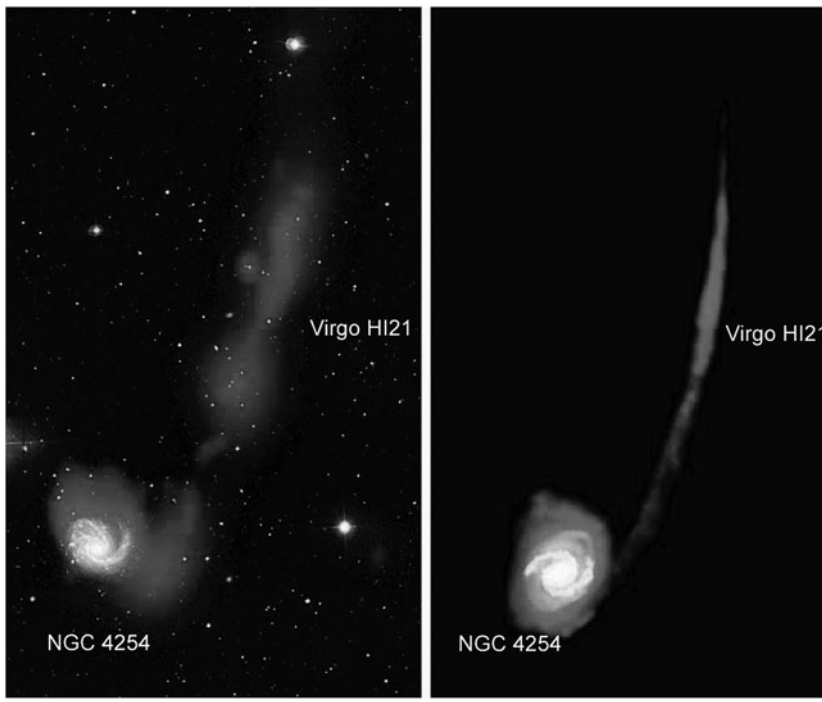


Figure 1 À gauche : image de la galaxie NGC 4254 et Virgo HI21, vue du téléscope, sur laquelle a été superposée l'émission en ondes radio du gaz d'hydrogène. À droite : le résultat de la simulation. Illustrations adaptées de Duc et Bournaud (2008). Crédits CEA/SAp. © AAS, images reproduites avec autorisation.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

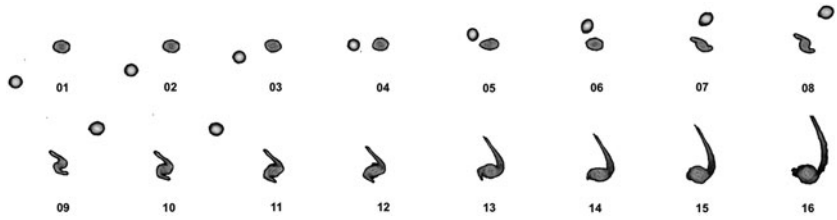


Figure 2 Animation de la simulation séquencée sur seize moments; elle représente la collision et son résultat sur 750 millions d'années. Images reproduites avec l'aimable autorisation de Pierre-Alain Duc. Crédit CEA/SAp.

et rendent compte assez fidèlement de la temporalité de la dynamique de la collision dans le film qui ne dure que quelques secondes. On y voit, dans les séquences 1 à 6, la galaxie allant à grande vitesse — possiblement la galaxie spirale Messier 98 — frôler la galaxie NGC 4254. Puis, dans les séquences allant de 7 à 16, on observe la formation d'une queue de marée qui gagne au fur et à mesure en autonomie. L'objet ainsi formé est devenu ce que l'on appelle à tort la galaxie VirgoHI21.

L'exemple de VirgoHI21 permet d'illustrer la troisième caractéristique que partagent simulation et expérience : généralement, toutes deux donnent à voir. Dans l'exemple, l'agent a même la possibilité d'observer l'évolution dans le temps du système reproduit. Dans ce cas, tout en étant le produit d'une représentation abstraite, c'est-à-dire un modèle mathématique, la simulation se réalise aussi à l'écran.

> L'ordinateur, écrivent la sociologue et psychologue Sherry Turkle et le mathématicien et informaticien Seymour Papert, se situe entre le monde des systèmes formels et les choses physiques; il a la capacité de rendre concret l'abstrait. Dans le cas le plus simple, un objet en mouvement sur un écran d'ordinateur pourrait être défini par la plus formelle des lois et ainsi être conçu comme une construction des mathématiques pures; mais en même temps, il est visible, presque tangible, et donne un sens à la manipulation directe (Turkle et Papert, 1991, p. 162, cité dans Dowling, 1999, p. 268-269).

Une conséquence éventuelle de cette «concrétisation par l'image» est de donner à l'utilisateur l'impression d'observer le système physique directement. Cela peut être le cas, comme dans l'exemple, lorsque les images produites par la simulation ressemblent à celles obtenues par les instruments d'observation. En particulier, la dernière image du film ressemble à la photographie de VirgoHI21 dans le sens où elle présente les mêmes attributs visuels — les mêmes couleurs, la même forme — aux mêmes endroits. Eric Winsberg écrit au sujet du réalisme des images de simulation que «d'un point de vue psychologique, au moins, travailler avec une simulation se rapproche davantage de la réalisation d'une expérience si la simulation produit des images qui ressemblent au monde et qui évoquent les photographies de laboratoire» (Winsberg, 2003, p. 110).

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

L'utilisateur n'est jamais longtemps dupe de la situation; il peut cependant être conforté dans sa confiance en la validité d'un modèle si celui-ci produit des simulations qui imitent fidèlement les phénomènes ciblés dans la nature. Dans le cas de VirgoHI21, la ressemblance des images tient lieu de critère de validation de l'explication donnée par la simulation (selon laquelle il y a eu collision entre deux galaxies il y a 750 millions d'années). Cette ressemblance a en définitive permis de clore le débat sur l'existence éventuelle des galaxies sombres.

Une quatrième caractéristique mise en évidence par l'exemple est la dimension temporelle de la simulation que l'on retrouve dans l'expérience[3]. La simulation numérique, en effet, donne à voir l'évolution du système cible, et ce, quelle que soit l'échelle de temps qui le caractérise dans la nature. Notamment, en accélérant ou décélérant sa propre temporalité, elle permet au scientifique de visualiser des phénomènes qui sont, dans la nature, trop lents ou trop rapides pour pouvoir être observés. Ainsi, par exemple, elle rend observables aussi bien l'évolution lente d'une galaxie que la rupture rapide d'une goutte d'eau. Elle nous permet, par conséquent, de prendre en compte une information qui serait difficilement accessible à un humain par l'observation directe. Par ailleurs, la simulation rend possible le contrôle d'autres aspects de sa temporalité : son temps peut être non seulement allongé et raccourci, mais aussi avancé et reculé en fonction des besoins de l'utilisateur. Cependant, ni la concrétisation par le visuel, ni la temporalité de la simulation ne sont des similitudes qui semblent conférer à la simulation la capacité de produire des connaissances nouvelles ou de réviser nos meilleures hypothèses théoriques. Certes, la simulation n'est pas un simple calcul numérique; elle a aussi des allures d'expérience parce qu'elle est un lieu d'exploration, parce qu'elle rend concrets les résultats de calculs mathématiques, et enfin, parce qu'elle «donne à voir» sur une durée qui rend possible l'observation. Mais ces caractéristiques ne nous permettent pas de justifier l'analogie faite entre simulation et expérience.

2. L'effet «boîte noire» des simulations

Aux caractéristiques expérimentales que j'ai mentionnées s'ajoute un effet que, selon moi, produisent à la fois simulation et expérience. Il s'agit de l'effet «boîte noire». Une expérience est pareille à une boîte noire si l'expérimentateur méconnaît une partie ou la totalité des processus physiques à l'œuvre qui produisent le phénomène observé. Dans le cas de la simulation, il peut de prime abord sembler impossible d'obtenir cet effet, puisque le programme informatique contient l'ensemble des données et des lois qui permettent la réalisation de la simulation. Autrement dit, rien, dans le programme, n'est

[3] Pour une analyse approfondie du temps dans les simulations, voir l'article de Cyrille Imbert (2008).

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

caché au scientifique. Pour Francesco Guala (2002), il s'agit là d'une différence importante entre simulation et expérience. Or je pense au contraire, avec les sociologues Deborah Dowling et Lucy Suchman, que l'effet «boîte noire» se rencontre aussi dans la simulation et contribue à renforcer l'impression qu'a l'agent d'être face à une expérience.

Pour Guala, il n'est pas nécessaire d'avoir une connaissance complète des processus physiques à l'œuvre dans le système cible pour réaliser une bonne expérience. Au contraire, ce serait la raison même de mener une expérience. Il écrit en effet que «les expériences sont particulièrement utiles lorsqu'on a une compréhension imparfaite de certains mécanismes causaux élémentaires du système étudié. Elles peuvent être utilisées dans ce contexte parce que la "matière" du laboratoire est supposée être la même que la matière qui n'est pas du laboratoire» (Guala, 2002, p. 11). Ainsi, selon lui, pour réaliser une expérience, il faut créer un système expérimental qui partage les mêmes processus pertinents, les mêmes principes causaux avec le système cible dans la nature. À cette fin, le système expérimental doit être constitué de matériaux similaires à ceux du système cible, il doit contenir des caractéristiques identiques et pertinentes du système cible, et rien ne doit interférer avec l'expérience. Dans ces conditions, il est possible d'étendre les conclusions tirées de l'expérience au système cible. Cependant, comme l'écrit Guala, «bien évidemment de nombreuses connaissances sont requises pour ce faire, mais aucune théorie fondamentale n'est requise sur la manière dont fonctionne le système cible. Les parties du système en laboratoire peuvent être mises entre parenthèses et utilisées comme "boîtes noires"» (Guala, 2002, p. 12). Autrement dit, il n'est pas obligatoire de connaître à l'avance toutes les lois décrivant le comportement du système expérimental et du système cible. Il n'est nul besoin de spécifier l'ensemble entier des équations structurelles gouvernant le système cible. Cela constitue, pour Guala, une différence fondamentale avec la simulation. Pour lui, en effet, «la connaissance requise pour réaliser un bonne simulation n'est pas la même que celle requise pour réaliser une bonne expérience» (*ibid*., p. 12).

Je partage l'idée qu'un certain nombre de processus physiques nous échappent dans une expérience, et que nous ne savons pas toujours expliquer ce qui est à l'origine du phénomène observé. Je suis par ailleurs d'accord avec Guala : les lois qui gouvernent ces processus n'ont pas besoin d'être connues à l'avance dans une expérience, tandis qu'elles sont impérativement explicitées dans une simulation. Cependant, je ne pense pas que l'on puisse conclure de cette différence que l'effet «boîte noire» soit une spécificité des expériences. Car si les lois sont inscrites dans le programme informatique et sont par là même connues en principe par l'agent (à condition qu'il ait une bonne connaissance du contenu du programme), il n'en demeure pas moins que le phénomène simulé est le produit de calculs longs et complexes qui ne peuvent être suivis mentalement par un agent humain.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

On trouve ainsi chez les sociologues Deborah Dowling et Lucy Suchman l'idée que les simulations s'accompagnent souvent de l'effet «boîte noire». Dans une simulation, l'effet «boîte noire» est dû, d'une part, à la complexité du programme informatique, et, d'autre part, à la rapidité d'exécution des opérations de calcul par la machine (c'est-à-dire son opacité épistémique). Dowling écrit en effet que

> [l]es résultats d'une simulation sont imprévisibles. Ils reposent typiquement sur des calculs qui ne sont pas solubles analytiquement, et le calcul numérique (l'exécution du calcul par la machine) des solutions est bien trop rapide pour être suivi par un unique scientifique. La complexité et l'imprévisibilité du programme de la simulation invite le scientifique à se le représenter comme une boîte noire, à interagir avec lui d'une manière expérimentale, et à expérimenter des choses pour voir ce qui se passera (Dowling, 1999, p. 266).

Cet effet «boîte noire» invite l'utilisateur à traiter le code de la simulation comme une boîte noire d'où sortent des résultats imprévisibles. Pour Dowling, il a un avantage pratique puisque, la structure interne du programme étant occultée, le scientifique délègue les calculs à la machine, et interagit avec la simulation sans chercher à connaître ou à suivre les processus computationnels. En effet, «l'imprévisibilité d'une simulation fait que l'activité de simuler est similaire à la réalisation d'une expérience physique. Le scientifique prépare le système, fixe les conditions initiales, puis adopte une attitude passive, attendant de découvrir comment le système agit» (Pickering, 1993, p. 23, cité dans Dowling, 1999, p. 265). Suchman écrit par ailleurs que «[d]ans la mesure où la machine est […] à la fois opaque intérieurement et astreinte à un comportement imprévu, nous sommes davantage enclins à interagir avec elle qu'à exécuter seulement des opérations sur elle, ou qu'à l'utiliser comme un outil réalisant des opérations sur le monde» (Suchman, 1987, p. 16, cité dans Dowling, 1999, p. 266). Dans ses interactions avec la simulation, le scientifique concentre son attention sur le comportement du système simulé lui-même, et de cette manière apprend «comment les choses fonctionnent».

Autrement dit, l'effet «boîte noire» conduit l'utilisateur à considérer la simulation comme une expérience. D'une certaine manière, nous retrouvons la même ouverture de l'utilisateur à ce qui peut résulter de la simulation chez l'expérimentateur face au dispositif expérimental. L'utilisateur fait des inférences à partir de la simulation en la manipulant; l'expérimentateur fait aussi des inférences à partir du dispositif expérimental en le manipulant. De la même manière encore, il fait varier les paramètres de la simulation et observe à l'écran comment le système simulé réagit à ses interventions.

Cet effet «boîte noire», précise Dowling, est néanmoins temporaire. Il peut en effet être détruit lorsque l'utilisateur cherche par exemple à étudier la fiabilité d'une simulation. Dans ce cas précis, celle-ci n'est plus considérée

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

comme une expérience, mais comme le produit de la théorie[4]. En particulier, lorsqu'il s'agit d'étudier sa fiabilité, la simulation est vue comme un produit de la théorie; l'agent doit dans ce cas connaître la structure interne du programme informatique. Dowling précise ainsi que «[o]uvrir la boîte noire de cette façon est nécessaire pour établir la légitimité d'une simulation. C'est le code à l'intérieur de la boîte qui détermine l'autorité avec laquelle le programme peut prétendre imiter un système expérimental cible» (Dowling, 1999, p. 267).

Pour conclure, l'expression «expérience numérique» apparaît d'ores et déjà être un abus de langage en ce qu'aucune des similitudes apparentes entre simulation et expérience ne confère à la simulation sa fonction épistémique. Toutefois, l'emploi de cette expression peut être justifié par le rapport que l'agent entretient avec la simulation. Le scientifique adopte en effet une *attitude* semblable vis-à-vis de la simulation et de l'expérience; il les questionne de la même manière. Ce serait donc uniquement du point de vue des agents que la simulation peut être identifiée à une expérience. Dans ce qui suit, je m'intéresse non plus aux similitudes, mais au débat qui a trait précisément à leur différence fondamentale, à savoir leur «matérialité».

3. La matérialité en question

Certains philosophes (Giere, 2009; Guala, 2002; Morgan, 2002 et 2003) ont mis en évidence une différence entre simulation et expérience : alors que les expériences impliquent les processus physiques responsables de l'apparition du phénomène à étudier, les simulations, quant à elles, en impliquent d'autres qui, dans la machine, réalisent les calculs mais ne produisent pas le phénomène lui-même. On peut donc se demander si la «matérialité»[5] du système expérimental crée une différence épistémologique entre expérience et simulation.

---

[4] Dans l'analyse sociologique faite par Dowling, la simulation a une double facette aux yeux de l'agent en ce qu'elle peut à la fois être le produit d'un modèle théorique et être une expérience. Dans son article, Dowling repère en effet dans le discours des scientifiques les conditions sous lesquelles un même scientifique identifie la simulation soit comme un produit de la théorie, soit comme une expérience. La simulation est considérée comme le produit de la théorie lorsque le scientifique discute par exemple les aspects intellectuels de sa conception, la précision et la solubilité de ses équations, alors qu'elle est considérée comme une expérience lorsqu'il discute de ce qu'il voit à l'écran, du fonctionnement du système simulé. «La simulation est construite comme étant à la fois "théorique" et "expérimentale", non seulement dans les mots choisis des scientifiques, mais aussi dans les différentes façons dont ils conçoivent et interagissent avec le programme informatique de la simulation» (Dowling, 1999, p. 263-264).

[5] Il faut prendre le terme «matérialité» au sens large; on dira par exemple que les ondes constituent la «matérialité» d'un système.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Pour Guala (2002), les expériences permettent d'obtenir des connaissances sur un système parce qu'elles impliquent les mêmes «causes matérielles» que celles à l'œuvre dans ce système. Il écrit : «les simulations requièrent uniquement l'existence d'une correspondance abstraite entre [la simulation] et le [système cible]. Dans les expériences, en revanche, les relations causales qui gouvernent le système expérimental et le système cible sont fondées dans la même matière» (Guala, 2002, résumé, p. 1). Ainsi, dans la simulation, la relation de correspondance avec le système cible est formelle, tandis qu'elle est matérielle dans le cas de l'expérience.

> Le présupposé crucial en ce qui concerne les expériences est que les composants pertinents du système expérimental en laboratoire sont faits de la même matière [stuff] que ceux du système cible. […] L'expérience présente les mêmes processus causaux qui sont à l'œuvre dans le monde réel, plutôt qu'elle n'expose une certaine relation formelle au moyen d'un appareil fait d'une différente matière [stuff] (Guala, 2002, p. 11)[6].

Aussi pourrait-on penser que, puisqu'elles ne sont pas faites de la même matière, la simulation et l'expérience ne sont pas épistémologiquement équivalentes. Or, il existe deux objections à cette affirmation, que j'examine l'une après l'autre. Une première objection consiste en ce que Anouk Barberousse, Sara Franceschelli et Cyrille Imbert (2009) appellent la *thèse de la physicalité*. Selon cette thèse, le fait d'être exécuté sur une machine physique fait de la simulation une véritable expérience; la simulation peut fournir le même type de données que l'expérience en laboratoire dans la mesure où les processus physiques qui ont lieu dans la machine et dans le système cible partagent la même nature causale. Il y a donc quelque chose dans la matérialité même de la machine qui justifie l'identification de la simulation à une expérience. Une version de cette thèse est introduite de façon approfondie et est défendue par Stephen Norton et Frederick Suppe (2001).

3.1. La thèse de la physicalité

Pour Norton et Suppe, «les modèles de simulation peuvent fonctionner comme des instruments de mesure fournissant des données sur le monde réel qui font face aux mêmes enjeux épistémologiques que les modèles de données» (2001, p. 69);

[6] Pour Guala, cette différence n'empêche pas les simulations de fournir des connaissances nouvelles sur le système. Cependant, elles ne le font pas en vertu de la matérialité partagée avec le système cible mais grâce à leur relation formelle avec ce système. Il ne semble pas néanmoins préférer l'une ou l'autre des méthodes comme production de connaissances. Autrement dit, Guala, contrairement à Giere et Morgan, ne prétend pas que les expériences sont épistémologiquement supérieures aux simulations.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

ils sont des «sources alternatives de données expérimentales» (*ibid*., p. 69). Pour justifier une telle affirmation, les deux auteurs défendent la thèse selon laquelle les processus physiques au cours d'une simulation dans l'ordinateur, parce qu'ils constituent une *réalisation* du modèle de simulation, se substituent à ceux qui produisent le système cible. Pour comprendre cette thèse, il me faut d'abord introduire le vocabulaire employé par Norton et Suppe.

Dans une expérimentation traditionnelle, sont collectées des données à des intervalles de temps discrets pour un certain nombre de paramètres $p_1, \ldots, p_n$. À partir de cette indication, Norton et Suppe introduisent le concept de «modèle de base», qui correspond à un modèle de données. Il s'agit d'une «version simplifiée du phénomène réel» dont les états évoluent eux-aussi à des intervalles de temps discrets et sont les valeurs simultanées pour $p_1, \ldots, p_n$. Entre le phénomène «réel» de l'expérience et le modèle de base, il semble donc qu'il y ait, selon les deux auteurs, un isomorphisme. Ils écrivent en effet que les transitions d'état du modèle de base «correspondent à celles qui pourraient être observées expérimentalement sous des conditions parfaitement contrôlées» (2001, p. 87).

La simulation, quant à elle, dérive d'un modèle plus simple que le modèle de base : c'est le modèle moyenné (lumped model). Le modèle moyenné est le modèle mathématique théorique écrit dans un langage informatique. En guise d'illustration, Norton et Suppe donnent l'exemple d'une simulation utilisée pour prédire des précipitations moyennes, régionales et annuelles. Les états du modèle de base sont les valeurs quotidiennes des précipitations. Le modèle moyenné, quant à lui, moyenne ces valeurs afin d'en obtenir des moyennes annuelles régionales.

Afin qu'une simulation puisse faire office d'expérience, les transitions d'états dans le modèle moyenné, calculées à l'aide des équations du modèle, doivent «imiter», selon les deux auteurs, les transitions du modèle de base. Dans le vocabulaire de Norton et Suppe, il faut que le modèle de base soit une réalisation du modèle moyenné. Il en est une réalisation s'il existe une bijection (mapping) entre les états du modèle de base et ceux du modèle moyenné. En outre, le programme informatique doit lui aussi être une réalisation du modèle moyenné. Il est «une incarnation physique […] du modèle moyenné qui peut être exécutée et observée» (Norton et Suppe, 2001, p. 88). Les deux auteurs affirment enfin que, «[p]uisque [l'ordinateur] est un système réel, les observations [de ce système] sont épistémiquement productives dans le sens où de nouvelles connaissances du monde peuvent être obtenues» (*ibid*., p. 88).

Au final, les simulations sont des expériences pour Norton et Suppe si les deux relations bijectives sont telles que le modèle de base et le programme informatique réalisent simultanément le modèle moyenné; le schéma de la figure 3 illustre ces relations. Pour cela, il faut qu'à travers ces deux bijections soient préservés le comportement du système ainsi que sa structure.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

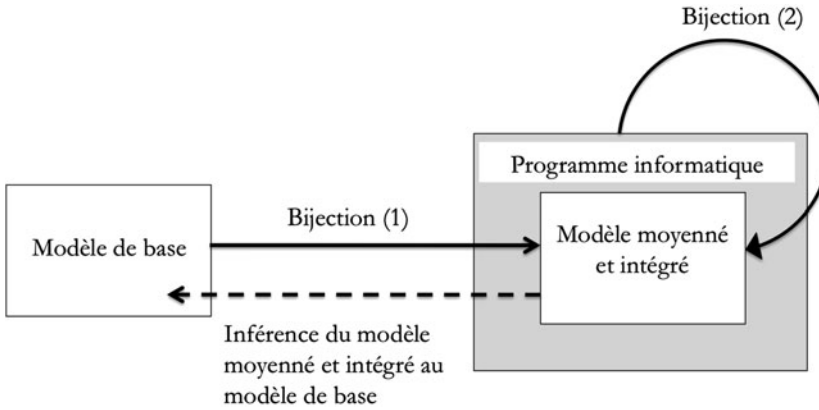


Figure 3 La modélisation numérique selon Norton et Suppe

«Ce qui peut légitimement être déterminé au sujet du [modèle de base] à partir des observations faites sur [le modèle moyenné] dépend essentiellement du niveau de conservation du comportement à travers ces bijections» (Norton et Suppe, 2001, p. 88)[7]. Présupposer la réalisation simultanée du modèle moyenné par le modèle de base et le programme informatique revient à postuler que le modèle moyenné, le programme informatique et le modèle de base partagent une structure commune. Cependant, Barberousse, Franceschelli et Imbert (2009) montrent qu'ils ne partagent pas de structure.

D'une part, Barberousse, Franceschelli et Imbert (2009) clarifient le point suivant : si structure commune il y a, la première relation bijective définie par Norton et Suppe est une relation entre les valeurs contenues dans le modèle de base et les valeurs des solutions du modèle moyenné. La seconde, quant à elle,

[7] Pour Norton et Suppe, si des écarts sont néanmoins constatés entre les résultats du modèle moyenné et les données expérimentales, il faut procéder au calibrage du modèle, c'est-à-dire ajuster ses paramètres de sorte qu'il présente un meilleur accord avec les données empiriques. En outre, «les simulations peuvent contenir des hypothèses fausses ou des hypothèses simplificatrices non fondées et peuvent tout de même détecter des effets réels. On doit déterminer quels aspects des simulations sont des effets réels et quels autres sont des artefacts et les adapter en fonction de la fiabilité et des limites des sorties du modèle de données» (2001, p. 91). Ce calibrage et ce contrôle des possibles artefacts sont aussi nécessaires dans l'expérimentation. Cela constitue un argument supplémentaire en faveur de l'identité des simulations comme expériences. «Comme l'expérience traditionnelle, si les circonstances appropriées sont réalisées et les influences contaminantes pertinentes sont contrôlées, alors les résultats d'une simulation bien calibrée peuvent être extrapolés aux systèmes de base pour donner des connaissances fiables du monde réel» (*ibid*., p. 92).

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

est une relation entre les valeurs correspondant aux *états computationnels successifs et interprétés* du programme informatique et les valeurs des solutions du modèle moyenné. Le programme informatique en lui-même ne réalise donc pas les valeurs du modèle moyenné; c'est l'état physique de l'ordinateur, régulièrement mis à jour, qui est censé les réaliser. Or, dans la plupart des simulations, on ne peut pas considérer que ce soit le cas, comme le révèle l'analyse des trois auteurs. En effet, lorsqu'on s'intéresse au fonctionnement de la machine digitale, on constate que, parfois, une partie physique de la machine est attribuée à la mémoire des valeurs de toutes les variables dans le modèle moyenné. D'autres fois, l'ensemble des valeurs prises par une même variable est conservé dans un même emplacement physique de la machine. En outre, généralement, seules les adresses des valeurs des variables sont utilisées dans le programme, puis conservées à des endroits susceptibles de changer. Aussi, la valeur d'une variable dans le modèle peut se trouver à différents emplacements physiques dans l'ordinateur, et une même localisation peut réaliser les valeurs de plusieurs variables, à des instants néanmoins différents. Par conséquent, la plupart du temps, les valeurs de variables physiques sur ordinateur ne réalisent pas le modèle moyenné. Il n'y a donc pas de structure commune entre le modèle moyenné et le programme informatique. Ainsi, pour Barberousse, Franceschelli et Imbert, «le fait que les simulations fournissent des données empiriques ne peut être légitimé par une soi-disant structure partagée entre le modèle de base, le modèle moyenné et le programme informatique en tant que système physique. La justification appropriée doit être trouvée au niveau computationnel ou à des niveaux même plus élevés» (Barberousse *et al.*, 2009, p. 565).

D'autre part, comme Barberousse, Franceschelli et Imbert le montrent, si une structure commune existait entre le modèle de base, le programme informatique et le modèle moyenné, la correspondance entre les trois devrait être fixe. Cependant, la première relation bijective, par exemple, pourrait seulement tenir statistiquement entre les états du système physique cible et les états de sortie du programme. Par exemple, dans la simulation d'un écoulement turbulent, l'énergie cinétique turbulente ou la distribution des vitesses peuvent être correctement calculées, alors que la vitesse exacte ou le champ de vorticité, dont le calcul dépend des petites perturbations en champ de vitesse dans le cas turbulent, ne peuvent généralement pas l'être.

La thèse de la physicalité ne tient donc pas, puisqu'il n'existe pas de structure commune entre le programme informatique, le modèle moyenné et le modèle de base. Dans ce qui suit, je m'intéresse à une autre objection à la thèse selon laquelle la matérialité de l'expérience crée une différence épistémologique entre expérience et simulation. Celle-ci consiste à rejeter le rôle exclusif de la matérialité comme principale caractéristique de l'expérimentation; autrement dit, il s'agit de renoncer à l'idée que les interactions physiques à l'œuvre dans le système expérimental sont responsables à elles seules de la création de phénomènes réels.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

3.2. La matière n'importe pas

Il existe une seconde objection à l'affirmation selon laquelle, puisqu'elles ne partagent pas la même matérialité, simulation et expérience ne sont pas épistémologiquement équivalentes. Cette objection consiste à nier le rôle de la matérialité dans la production de connaissances. Elle est notamment exprimée par Wendy Parker (2009). Parker s'attaque au présupposé, que l'on retrouve chez Giere et Morgan, selon lequel la simulation est forcément épistémologiquement inférieure à l'expérience. Pour Giere (2009), parce que les interactions physiques produisant le phénomène réel n'ont pas lieu dans les simulations numériques, ces dernières ne peuvent pas avoir le même crédit épistémique que les expériences. Et selon Morgan, les expériences empiriques «ont un plus grand potentiel pour réaliser des inférences sur le monde» (2005, p. 317) parce que «l'équivalence ontologique [entre le système expérimental et le système cible] fournit le pouvoir épistémologique» (*ibid*., p. 326), ce pouvoir consistant à produire des connaissances sur le monde. Ainsi, selon elle, la simulation est épistémologiquement inférieure à l'expérience. Parce qu'il n'y a pas d'équivalence ontologique entre la simulation et le système cible, elle a intrinsèquement moins de pouvoir de produire des connaissances fiables.

Pour Wendy Parker (2009), la matérialité n'est cependant pas une différence fondamentale quand il s'agit d'évaluer la supériorité épistémologique des expériences par rapport aux simulations[8]. Son argument est que la matérialité n'importe pas lorsqu'on en vient à justifier des inférences particulières sur les systèmes cible. Seule une similitude pertinente entre le système et la simulation, ou le système et l'expérience, importe. Cette similitude est de type formel dans une simulation, et de type matériel dans une expérience. Une *similitude formelle* entre le système et la simulation porte, selon la définition de Parker, sur une certaine propriété formelle qui peut seulement être instanciée par une *relation* entre propriétés.

> Par exemple, si l'évolution de propriétés sélectionnées dans deux systèmes physiques peut être décrite précisément en utilisant une unique équation mathématique, alors les systèmes partagent la propriété formelle d'avoir des propriétés qui sont reliées suivant cette équation, et les systèmes sont formellement similaires à cet égard (Parker, 2009, note 8, p. 487).

[8] Cependant, la matérialité compte pour Parker dans un sens particulier : la «matérialité» des simulations numériques, c'est-à-dire celle de l'ordinateur programmé «fait de fils, plastique, etc.» (Parker, 2009, p. 488-489), est le lieu d'une intervention par l'agent, exactement comme dans le cas des expériences empiriques. «Dans une étude par les simulations numériques, […] les scientifiques apprennent avant tout du comportement de l'ordinateur programmé; de ce comportement, prenant différentes caractéristiques de celui-ci pour représenter les caractéristiques d'un certain système cible, ils espèrent inférer quelque chose d'intéressant sur ce système cible» (*ibid*., p. 489).

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Une similitude entre le système et l'expérience, quant à elle, porte sur une certaine propriété matérielle qui peut seulement être instanciée par une entité matérielle ou physique. "Ainsi, avoir en commun la propriété d'être cassant constitue une similitude matérielle, comme l'est d'avoir en commun la propriété d'avoir un rein, alors qu'avoir en commun la propriété d'être une fonction monotone ou de générer des trajectoires entre certaines régions d'un espace ne l'est pas" (Parker, 2009, note 10, p. 487).

Elle affirme que la matérialité n'est pas importante dans l'analyse épistémologique des expériences et des simulations, car

> ce qui est ultimement intéressant lorsqu'on en vient à justifier les inférences sur les systèmes cible n'est pas la matérialité, mais la similitude pertinente. Pour justifier une telle inférence, les scientifiques ont besoin de prouver que le système expérimental est similaire au système cible sous tous les aspects pertinents, étant donné la question qu'ils veulent poser sur le système cible. Les similitudes pertinentes peuvent être des similitudes formelles, des similitudes matérielles ou une combinaison des deux, en fonction du type d'expérience et de la question posée. Mais, de façon cruciale, avoir des systèmes expérimental et cible faits de la même matière ne garantit pas que toutes les similitudes pertinentes seront obtenues (Parker, 2009, p. 493).

Selon elle, comme le système expérimental est fait de la même matière que le système cible, il y a de grandes chances pour que le premier système et le second partagent les propriétés matérielles les plus pertinentes. C'est pourquoi l'on peut généralement affirmer que l'expérience est supérieure à la simulation d'un point de vue épistémologique. Cependant, encore une fois, on n'est pas plus justifié de croire aux expériences qu'aux simulations, si l'on n'a pas pris la précaution de vérifier, au préalable, que l'expérience détient bien les similitudes pertinentes. En l'absence d'une telle vérification, rien ne garantit que l'expérience puisse fournir des inférences justifiées. Pour illustrer ce point, supposons que des biologistes aient à tester un nouveau médicament sur des rats dans l'espoir de guérir les humains d'une certaine maladie. Si la réaction des rats au traitement dépend d'une voie physiologique qui est absente chez les humains, nous aurions tort d'étendre les résultats de l'expérience à notre espèce[9]. En outre, pour des raisons pratiques, il est parfois difficile de s'assurer que le système expérimental ait les propriétés matérielles attendues. C'est le cas pour les dispositifs d'écoulement de fluide. Les nombreux paramètres sans dimension du fluide — comme le nombre de Reynolds — sont difficilement obtenus à l'identique dans le système expérimental et le système cible. En effet, ils dépendent des caractéristiques du montage, comme la profondeur du fluide ainsi que la taille, la forme, la rigidité et le mouvement du récipient dans lequel se trouve le fluide.

[9] À noter que cet exemple est donné par Parker (2009), mais à une fin argumentative différente.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Je trouve que l'analyse de Parker est originale en ce qu'elle met en évidence la possibilité qu'une expérience échoue à offrir des connaissances sur le système cible si le système expérimental ne partage pas les bonnes propriétés matérielles avec le système cible. Elle casse ainsi l'image idéalisée de l'expérience comme étant toujours supérieure épistémologiquement à la théorie, au modèle et à la simulation. Cependant, je ne pense pas que l'on puisse, comme Parker le fait, traiter sur le même plan les similitudes matérielles et les similitudes formelles, et ainsi présupposer une équivalence épistémologique entre elles. La raison principale à cela est la suivante : ce que les scientifiques peuvent à un moment donné considérer comme une similitude formelle pour les besoins d'une modélisation peut s'avérer plus tard ne pas en être une véritable. Non seulement les propriétés formelles pertinentes, une fois dans le modèle, doivent permettre de retrouver des résultats empiriques, mais elles doivent aussi être robustes. J'entends par là qu'elles doivent contribuer à assurer le succès prédictif de tout modèle qui les contient quel que soit le domaine physique visé et quelle que soit l'utilisation faite du modèle. Ainsi, il ne suffit pas qu'un seul modèle soit empiriquement adéquat pour que les propriétés formelles qu'il contient soient considérées comme justes ou appropriées dans toutes les circonstances. Il faut aussi que la robustesse de ces propriétés soit vérifiée; une telle vérification se fait à travers l'utilisation répétée de plusieurs modèles qui les contiennent. Autrement, l'on serait amené à croire que les épicycles, par exemple, constituent une similitude formelle, puisque cette hypothèse permet de réaliser de bonnes prédictions d'éclipses. L'exigence supplémentaire qu'est la vérification de la robustesse des propriétés semble en revanche ne pas s'appliquer aux propriétés matérielles. Car les effets d'une certaine propriété matérielle seraient difficilement reproduits par une toute autre propriété matérielle. En outre, la thèse de Parker présuppose une équivalence épistémologique entre simulation matérielle et simulation formelle, et ainsi semble impliquer un isomorphisme exclusif entre les propriétés matérielles d'un système réel et les propriétés formelles d'un modèle. Or, là encore, le caractère exclusif de l'isomorphisme reste toujours à prouver par les scientifiques.

Au final, la proposition de Norton et Suppe, ainsi que celle de Parker, ne sont pas à l'abri des objections, et se révèlent donc peu convaincantes. Par conséquent, il faut bien admettre qu'une différence demeure entre simulations et expériences, qui tient à leur matérialité. Néanmoins, il ne faudrait pas en conclure que les secondes sont toujours épistémologiquement supérieures aux premières, comme je souhaite le montrer présentement.

3.3. La supériorité des expériences en question

Ce n'est pas parce que la simulation n'est pas une expérience matérielle qu'elle ne peut pas fournir des connaissances aussi fiables, voire plus fiables que l'expérience. Premièrement, comme je désire le montrer, l'expérience n'est pas toujours épistémologiquement supérieure à la simulation. En effet, le fait

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

de réaliser une expérience «dans la matière elle-même» n'assure pas forcément que l'on réussisse à en tirer des inférences justifiées. Deuxièmement, dans de nombreux cas, la simulation est parfois plus à même de produire des connaissances que ne l'est l'expérience.

Il n'est pas rare que les expériences soient des guides moins fiables vers la connaissance que les modèles. D'une part, comme nous venons de le voir, le système expérimental doit contenir les bonnes propriétés matérielles afin de donner des connaissances sur le système cible. En effet, il est possible, comme dans l'exemple du rat, que le système expérimental ne possède pas les caractéristiques pertinentes du système cible à même d'expliquer le phénomène étudié. D'autre part, les erreurs de mesure peuvent être si importantes qu'aucune information précise ne peut être tirée de l'expérience (voir l'exemple d'Eran Tal (2011) qui illustre que, parfois, le modèle est plus fiable que l'expérience). De telles erreurs sont par exemple dues à l'appareil de mesure qui dysfonctionne, ou à la technique de traitement de données qui est biaisée (voir Parker, 2008 et Mayo, 1996). En outre, il existe parfois du bruit dans les mesures, dû à des phénomènes parasites qui peuvent interférer avec le phénomène d'intérêt. Dans ce cas, il peut être plus facile de contrôler le déroulement d'une simulation que celui d'une expérience.

Les expériences fournissent donc des connaissances sur le système cible sous certaines conditions uniquement, à savoir :

i) les bonnes propriétés matérielles doivent être présentes dans le dispositif expérimental;
ii) l'on doit prouver que les erreurs de mesure sont négligeables;
iii) et l'on doit vérifier qu'il n'existe pas de phénomène parasite qui puisse interférer avec le phénomène mesuré.

Il est important que ces conditions soient satisfaites non seulement lorsque nous cherchons à obtenir des connaissances à partir de l'expérience, mais aussi lorsque nous cherchons à valider un modèle avec les données mesurées au cours de celle-ci. Une condition essentielle pour confirmer un modèle computationnel est en effet la fiabilité des données empiriques obtenues.

En outre, la simulation peut s'avérer l'égal épistémologique de l'expérience dans de nombreux cas. C'est généralement vrai lorsqu'elle est utilisée dans un domaine physique bien délimité et pour lequel la théorie est hautement validée; j'entends par là que la théorie a été précédemment mise à l'épreuve de l'expérience, avec succès, dans ce domaine. En effet, compte tenu des conditions sous lesquelles une expérience produit des connaissances fiables, la simulation offre l'économie d'une expérience lorsque nous savons, de toute façon, que la théorie est opérante. Il peut ainsi être moins coûteux et plus fiable d'employer la simulation à la place de l'expérience pour des raisons pratiques ou éthiques. En effet, les expériences sont parfois trop chères, trop incertaines quant à leurs résultats — comme c'est le cas de la fusion froide —, excessivement

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

gourmandes en temps — dans l'étude du mouvement des dunes par exemple —, politiquement incorrectes — avec, par exemple, les explosions nucléaires —, voire non éthiques — comme dans les modèles épidémiologiques (Humphreys, 2004, p. 107). De plus, la simulation offre un nouvel avantage par rapport à l'expérience puisqu'elle fournit une visualisation qui est parfois inaccessible à l'expérience — par exemple la rotation de l'angle de vue de la galaxie —; elle permet de faire varier librement les données d'entrée et de réaliser ainsi des expériences de pensée ou des expériences irréalisables en pratique (Humphreys, 2004, p. 107). Néanmoins, ces avantages pratiques sont indépendants du caractère fiable ou non fiable d'une simulation. Il semble par ailleurs plus délicat d'affirmer que la simulation puisse être l'égal épistémologique de l'expérience dans des domaines physiques encore peu, voire jamais explorés, comme c'est le cas par exemple pour certains pans de l'astrophysique ou en cosmologie. En effet, dans ces domaines-là, le manque d'observations et de données empiriques nuit à la validation des modèles.

Bien que je reconnaisse l'égalité épistémologique de la simulation et de l'expérience dans certains cas, ainsi que l'avantage pratique de la première, je dois néanmoins admettre que l'expérience est la seule qui puisse sanctionner une théorie. C'est donc en un sens extrêmement étroit que l'expérience est supérieure épistémologiquement à la simulation. Il existe en effet un cas pour lequel les expériences possèdent une totale supériorité épistémologique sur la théorie : c'est lorsqu'elles entrent en conflit avec celle-ci. Ainsi, par exemple, l'observation de la position de certaines planètes et la précession des équinoxes sont venues remettre en cause l'astronomie de Ptolémée au profit de la théorie de Newton; l'observation selon laquelle certains métaux augmentent en poids durant un chauffage intense a révélé les limites de la théorie du phlogiston. La théorie du phlogiston ne permettait de prédire que la perte du poids des matériaux, tel que le bois lors d'une combustion. Cette observation a par la même occasion fourni une preuve en faveur de la théorie de Lavoisier sur la combustion de l'oxygène (voir Kuhn, 1996 [1970], chapitres V et VI).

Le conflit entre la théorie et l'expérience semble constituer une situation rare dans l'histoire des sciences, relativement à la fréquence avec laquelle les théories sont utilisées pour produire des prédictions et des explications. Néanmoins, elle suffit à accorder à l'expérience une place privilégiée dans les sciences par rapport aux théories. L'expérience, quand elle est bien menée, a eu, a et aura toujours «le dernier mot» par rapport à la meilleure théorie à disposition. Une simulation, quant à elle, ne peut constituer une falsification en tant que telle de la théorie, et le scientifique sera toujours prêt à mettre en défaut son modèle en cas d'incompatibilité avec l'expérience réelle. La simulation peut certes renforcer notre confiance dans la théorie, comme c'est le cas dans l'exemple de VirgoHI21. Mais ce renforcement ne diffère pas de celui que nous obtenons par une bonne prédiction. Cependant, si le scénario reconstitué de la création de VirgoHI21 n'avait pas permis de retrouver une image similaire à l'observation par télescope, les astrophysiciens auraient sans doute considéré

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

d'autres scénarii possibles. Si, à leur tour, ces scénarii avaient échoué, les astrophysiciens auraient dû sans doute remettre en cause leurs hypothèses simplificatrices, voire pire : leur théorie. Dans ce dernier cas encore, la simulation aurait été utilisée pour tester un nouveau scénario possible, mais seule l'observation aurait eu le dernier mot : c'est elle seule qui peut pousser le scientifique à réviser ses hypothèses théoriques. Dans ce cas, la simulation ne peut pas supplanter l'expérience, et les scientifiques seront toujours prêts à mettre en défaut leur modèle en cas d'incompatibilité avec l'expérience réelle.

Pour conclure, l'expérience n'est pas toujours supérieure épistémologiquement à la simulation, et cette dernière peut, lorsqu'elle est employée dans un domaine physique bien connu théoriquement, apporter des connaissances aussi fiables que l'expérience. Ce qui justifie leur supériorité ou leur infériorité ne se trouve pas dans les similitudes généralement mises en avant entre simulation et expérience, mais plutôt dans les conditions de réalisation d'une expérience et dans le niveau de confirmation de nos théories. Aucune des similitudes que nous avons répertoriées dans les sections 1 et 2 n'explique pourquoi les modèles fournissent de nouvelles connaissances sur le monde. La raison de leur pouvoir épistémique se trouve ailleurs dans le travail justificationnel des modèles de simulations, c'est-à-dire de tous leurs constituants : lois, idéalisations et éléments fictionnels.

4. Sur la nouveauté dans la simulation et l'expérience

Maintenant que j'ai défendu la thèse selon laquelle la supériorité épistémologique des expériences est somme toute relative aux conditions dans lesquelles elles sont réalisées, il me faut éclaircir un dernier point. Nombreux sont les auteurs qui insistent sur le fait que simulation et expérience satisfont la même fonction épistémique en produisant de nouvelles connaissances sur le système cible. Mais dans quel sens faut-il comprendre le qualificatif «nouveau»[10]?

On lit par exemple que :

> [L]es simulations produisent de nouvelles connaissances exactement comme les expériences (Guala, 2002, résumé, p. 1).
> [C]ertaines simulations numériques partagent indubitablement certaines fonctions épistémiques avec les expériences de laboratoires : elles sont exécutées pour fournir de nouvelles données sur les systèmes qui sont difficiles voire impossibles à explorer avec des instruments ordinaires (Barberousse, Franceschelli et Imbert, 2009, p. 557).
> [L]es simulations impliquent des inférences complexes comme elles vont de la théorie aux données, et elles génèrent certainement de nouvelles connaissances (Winsberg, 2009, p. 578-579).

[10] Pour une autre analyse approfondie du concept de «nouveauté» dans ce contexte, je renvoie à l'article de Barberousse et Vorms (2013).

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

> [P]uisque [l'ordinateur] est un système réel, les observations de ce système sont épistémiquement productives dans le sens où de nouvelles connaissances sur le monde peuvent ainsi être obtenues (Norton et Suppe, 2001, p. 88).

La dernière citation se démarque des autres dans le sens où, pour Norton et Suppe, la nouveauté est justifiée parce que les simulations sont littéralement des expériences. Cependant, pour les autres auteurs cités, la simulation est avant tout un calcul réalisé à partir d'un modèle mathématique. Or, en tant que simple calcul, on pourrait penser que la simulation ne peut apporter aucune connaissance nouvelle. En effet, les résultats d'une simulation sont les conséquences logiques des hypothèses théoriques et des hypothèses auxiliaires du modèle. Ils sont donc *virtuellement* contenus dans les hypothèses du modèle et, pour Paul Humphreys[11], la simulation ne fait que les rendre *explicites*. Pour ma part, je pense précisément que les simulations, parce qu'elles rendent explicites les conséquences des hypothèses, offrent des connaissances nouvelles comme les expériences. Pour le voir, il faut considérer deux critères de nouveauté.

Selon un premier critère, propre à Humphreys, la nouveauté d'une connaissance est évaluée par rapport à la théorie dont nous disposons. Si cette connaissance n'est pas un résultat théorique, alors elle est nouvelle. À cet égard, la simulation ne produit absolument aucune connaissance nouvelle puisqu'elle génère justement des résultats théoriques. Cependant, si l'on s'en tient à ce premier critère, il semble que les expériences elles-mêmes ne produisent des connaissances nouvelles que dans certains cas exceptionnels, et cela en dépit de leur essence «matérielle».

En effet, conformément à ce critère, les expériences, étant guidées par la théorie, n'offriraient rien de nouveau lorsque les prédictions théoriques sont correctes. Dans une expérience, les questions que l'on pose à la nature sont en effet orientées et motivées par la théorie. Avant de mener son expérience, l'expérimentateur a souvent une idée du résultat qu'il va mesurer ou de l'observation qu'il va faire. Par exemple, la découverte du boson de Higgs ne serait en rien une nouveauté puisque précisément la théorie actuelle — le modèle standard — le prédit. Les scientifiques savent où et comment le trouver.

Ce premier critère pose en outre un autre problème : il efface l'effet de surprise que suscite généralement la nouveauté. Ainsi, dans l'exemple de VirgoHI21, l'observation de cette fausse galaxie sombre semblait de prime abord entrer en conflit avec la théorie actuelle; elle a surpris. Or le premier critère ne rend pas compte d'une telle surprise. En effet, selon ce critère,

[11] Cette thèse, Humphreys l'a exprimée au cours de son exposé, «(Thought) Experiments and Simulations», à l'occasion du colloque sur les simulations numériques et les expériences numériques, organisé à l'IHPST (Paris), les 11-13 mars 2010.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

puisqu'une explication par la théorie, obtenue par simulation, a été fournie, et a révélé que VirgoHI21 n'est pas une galaxie mais un résidu de débris de collision passée, alors l'existence de VirgoHI21 et ses caractéristiques singulières ne seraient pas des résultats nouveaux.

Finalement, selon le premier critère, il n'y aurait nouveauté que si les données obtenues par expérience étaient véritablement en contradiction avec les hypothèses théoriques qui ont permis leur élaboration. Dans ce cas particulier, elles conduiraient à la refonte d'une partie ou de l'intégralité de notre système d'hypothèses théoriques. Comme nous l'avons dit plus haut, cela arrive peu fréquemment dans l'histoire des sciences en comparaison de l'utilisation intensive de la simulation et de l'expérience dans l'activité scientifique quotidienne. Cela me conduit à supposer qu'en général, un second critère de nouveauté est adopté par les auteurs pour lesquels simulation et expérience produisent de la nouveauté.

Selon ce second critère, simulation et expérience fournissent de nouvelles connaissances lorsque celles-ci ont été obtenues pour la première fois et apparaissent comme *pertinentes* dans le contexte scientifique où elles sont produites. Leur nouveauté est flagrante si elles se distinguent de façon patente des autres connaissances obtenues jusque-là.

Ainsi, une expérience n'offre pas de nouveauté si elle a été reproduite et que l'on en connait déjà les résultats (parce qu'ils sont inscrits par exemple dans un manuel scientifique), ou encore lorsque la théorie, hautement validée, nous a déjà donné accès à ces mêmes résultats. Par ailleurs, on ne dira généralement pas que sont nouvelles des données dont les conditions d'obtention sont similaires à celles déjà explorées. En effet, il faut en outre que leur apparition soit considérée comme pertinente. Il en est de même pour la simulation. Les résultats de simulation sont considérés comme nouveaux s'ils ont été obtenus dans des conditions physiques qui n'ont pas encore été explorées. Un résultat attendu ou proche d'un autre ne peut pas être considéré comme nouveau. Il faut que la connaissance intervienne de façon pertinente dans le corps de connaissances déjà constitué. Par exemple, l'existence d'un matériau plus dur que le diamant fut une découverte réalisée par ordinateur (Liu et Cohen, 1989). Cette découverte précéda la preuve empirique, à savoir la production récente et réussie de deux matériaux plus durs que le diamant, le nitrure de bore wurtzite et le lonsdaléite (Pan, Sun, Zhang et Chen, 2009). Dans ce cas, la simulation a permis une découverte *nouvelle*, étant donné que les données empiriques, c'est-à-dire la preuve de l'existence et la mesure de la force d'indentation du nitrure de bore wurtzite et du lonsdaléite, n'étaient jusque-là pas connues des scientifiques.

À l'instar de Morgan (2003), nous pouvons faire une analyse du second type de «nouveauté» à l'aide des concepts de *surprise* et de *confusion*. Cette analyse permet de rendre compte des cas pour lesquels les expériences fournissent des connaissances nouvelles par rapport à la théorie. Il serait tentant, nous dit Morgan (2003, p. 220-221), de croire que seules les expériences sont

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

susceptibles de nous surprendre parce que, dans le cas des simulations, les réponses aux questions que nous nous posons sont «déjà construites dans le modèle», et sont ensuite révélées par le calcul. Cependant, lorsqu'il réalise des calculs à partir d'un modèle, le scientifique a pour objectif d'obtenir des informations qu'il ne connaît pas d'avance sur le comportement du système cible. Aussi, selon Morgan, s'attend-t-il à être surpris. Je pense que cette surprise peut être aussi analysée par l'effet «boîte noire» (introduit dans la section 2). Un résultat de simulation peut être jugé surprenant dans la mesure où le scientifique ne peut pas lui-même le prédire. Il n'aurait pas pu déduire ce résultat tout seul, sans l'aide de la machine. Pour Morgan, une expérience ou une simulation peuvent donc *surprendre* le scientifique dans le sens où elles offrent un résultat qui n'était pas attendu, mais qu'explique le modèle à disposition. Par contre, seule une expérience peut le *déconcerter* quand elle fournit un résultat qui n'était pas attendu, et que le modèle n'explique pas. Je crois que la découverte des rayons X illustre parfaitement ce cas. Véritable produit du hasard, elle a sans nul doute déconcerté le physicien Roentgen «le jour où [il] interrompit une recherche normale sur les rayons cathodiques parce qu'il avait remarqué qu'un écran de platino-cyanure de baryum, placé à quelque distance de son appareillage blindé, émettait une lueur quand la décharge se produisait» (Kuhn, 1996 [1970], chapitre V, p. 89). Mais ce type de découverte est, me semble-t-il, peu fréquent. Aussi je pense que, la plupart du temps, simulation et expérience fournissent des connaissances nouvelles sur le monde de la même façon.

5. Conclusion

J'ai soutenu que l'expression «expérience numérique» ne peut se comprendre qu'en adoptant la position des agents : les simulations sont *vécues* par le scientifique comme des expériences. Les raisons de cette méprise se trouvent dans les similitudes que présentent en surface simulation et expérience, à savoir l'aspect exploratoire, le fait qu'elles sont des lieux d'intervention, la visualisation et la temporalité; elles se trouvent aussi dans l'effet «boîte noire». Or, comme je l'ai montré dans les sections 1 et 2, ces similitudes ne permettent pas de fonder une analogie entre simulation et expérience. Autrement dit, ce n'est pas en vertu de ces similitudes que les expériences fournissent des connaissances nouvelles. La raison de leur fonction épistémique se trouve ailleurs, dans l'analyse du contenu théorique du modèle.

Dans la section 3, j'ai par ailleurs étudié deux positions visant à rejeter l'affirmation selon laquelle, puisqu'elles ne sont pas faites de la même matière, la simulation et l'expérience ne peuvent pas être épistémologiquement équivalentes. Une première position — la thèse de la physicalité proposée par Norton et Suppe — consiste à montrer que simulation et expérience ne se distinguent justement pas par leur matérialité. Une seconde — celle de Parker — consiste à montrer que la matérialité de l'expérience ne fait pas d'elle un moyen plus sûr d'accès à la connaissance par rapport à la simulation. Ces deux positions

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

échouent cependant à convaincre. Néanmoins, comme je l'ai indiqué, il ne faut pas en conclure que l'expérience est toujours épistémologiquement supérieure à la simulation. Enfin, dans la section 4, j'ai défendu l'affirmation selon laquelle l'expérience et la simulation offrent des connaissances nouvelles sur le monde et j'ai précisé dans quel sens cette affirmation doit généralement se comprendre.

Références bibliographiques

Barberousse, Anouk, Sara Franceschelli et Cyrille Imbert

2009 «Computer Simulations as Experiments», *Synthese*, vol. 169, nº 3, p. 557–574.

Barberousse, Anouk et Marion Vorms

2013 «Computer Simulations and Empirical Data», dans J. M. Durán et E. Arnold, dir., *Computer Simulations and the Changing Face of Scientific Experimentation*, Newcastle, Cambridge Scholars Publishing, p. 29–45.

Dowling, Deborah

1999 «Experimenting on Theories», *Science in Context*, vol. 12, nº 2, p. 261–273.

Duc, Pierre-Alain et Frédéric Bournaud

2008 «Tidal Debris from High-Velocity Collisions as Fake Dark Galaxies: A Numerical Model of VIRGOHI21», *The Astrophysical Journal*, vol. 673, no 2, p. 787–797. doi: 10.1086/524868

Galison, Peter

1996 «Computer Simulations and the Trading Zone», dans P. Galison et D. Stump, dir., *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power*, Stanford (CA), Stanford University Press, p. 118–157.

Giere, Ronald

2009 «Is Computer Simulation Changing the Face of Experimentation?» *Philosophical Studies*, vol. 143, p. 59–62.

Guala, Francesco

2002 «Models, Simulations, and Experiments», dans L. Magnani et N. Nersessian, dir., *Model-based Reasoning: Science, Technology, Values*, New York (NY), Kluwer/Plenum, p. 59–74.

Guala, Francesco

2005 *The Methodology of Experimental Economics*, Cambridge, Cambridge University Press.

Hacking, Ian

1983 *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge, Cambridge University Press.

Humphreys, Paul

1994 «Numerical Experimentation», dans P. Humphreys, dir., *Patrick Suppes: Scientific Philosopher. Philosophy of Physics, Theory Structure, and Measurement Theory*, vol. 2, Dordrecht, Kluwer, p. 103–121.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Humphreys, Paul
2004 *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, Oxford, Oxford University Press.
Imbert, Cyrille
2008 «Le sophiste et ses images : épistémologie du temps simulé», *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, vol. 133, nº 3, p. 309–318.
Keller, Evelyn Fox
2003 «Models, Simulation, and 'Computer Experiments'», dans H. Radder, dir., *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Pittsburgh (PA), University of Pittsburgh Press, p. 198–215.
Kuhn, Thomas
1996 *The Structure of Scientific Revolutions* [1970], Chicago (IL), University of Chicago Press.
Liu, Amy Y. et Cohen, Marvin L.
1989 «Prediction of New Low Compressibility Solids», *Science*, vol. 245, nº 4920, p. 841–842.
Mayo, Deborah
1996 *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, Chicago (IL), University of Chicago Press.
Morgan, Mary S.
2002 «Model Experiments and Models in Experiments», dans L. Magnani et N. Nersessian, dir., *Model-based Reasoning: Science, Technology, Values*, New York (NY), Kluwer/Plenum, p. 41–58.
Morgan, Mary S.
2003 «Experiments Without Material Intervention: Model Experiments, Virtual Experiments and Virtually Experiments», dans H. Radder, dir., *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Pittsburgh (PA), University of Pittsburgh Press, p. 216–235.
Morgan, Mary S.
2005 «Experiments Versus Models: New Phenomena, Inference, and Surprise», *Journal of Economic Methodology*, vol. 12, nº 2, p. 317–329.
Morrison, Margaret
2009 «Models, Measurement and Computer Simulation: the Changing Face of Experimentation», *Philosophical Studies*, vol. 143, p. 33–47.
Norton, Stephen D. et Suppe, Frederick
2001 «Why Atmospheric Modeling is Good Science», dans P. Edwards et C. Miller, dir., *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance*, Cambridge (MA), The MIT Press, p. 67–106.
Pan, Zicheng, Sun, Hong, Zhang, Yi et Chen, Changfeng
2009 «Harder than Diamond: Superior Indentation Strength of Wurtzite BN and Lonsdaleite», *Physical Review Letters*, vol. 102.
Parke, Emily
2014 «Experiments, Simulations, and Epistemic Privilege», *Philosophy of Science*, vol. 81, nº 4, p. 516–536.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press

Parker, Wendy S.
2009 «Does Matter Really Matter? Computer Simulations, Experiments, and Materiality», *Synthese*, vol. 169, nº 3, p. 483–496.
Parker, Wendy S.
2008 «Computer Simulation Through an Error-Statistical Lens», *Synthese*, vol. 163, nº 3, p. 371–384.
Pickering, Andrew
1993 «The Mangle of Practice: Agency and Emergence in the Sociology of Science», *American Journal of Sociology*, vol. 99, nº 3, p. 559–589.
Radder, Hans
1996 *In and about the World: Philosophical Studies of Science and Technology*, Albany (NY), SUNY Press.
Suchman, Lucy
1987 *Plans and Situated Actions: The Problem of Human Machine Communication*, Cambridge, Cambridge University Press.
Tal, Eran
2011 «From Data to Phenomena and Back Again: Computer-Simulated Signatures», *Synthese*, vol. 182, nº 1, p. 117–129.
Tiles, J. E.
1993 «Experiment as Intervention», *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 44, nº 3, p. 463–475.
Turkle, Sherry et Papert, Seymour.
1991 «Epistemological Pluralism and the Revaluation of the Concrete», dans I. Harel et S. Papert, dir., *Constructionism: Research Reports and Essays 1985-1990*, Norwood (NJ), Ablex, p. 161–191.
Winsberg, Eric
2003 «Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World», *Philosophy of Science*, vol. 70, nº 1, p. 105–125.
Winsberg, Eric
2009 «A Tale of Two Methods», *Synthese*, vol. 169, nº 3, p. 575–592.
Woodward, James
2003 *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*, Oxford, Oxford University Press.

https://doi.org/10.1017/S0012217315001122 Published online by Cambridge University Press