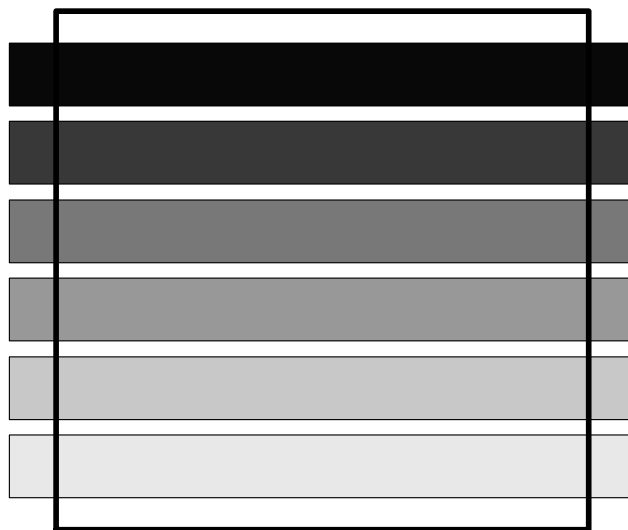


LES CAHIERS DU LANCI



**SIMULER L'ÉVOLUTION DE LA SCIENCE
POUR ÉTABLIR DES NORMES NATURALISTES**

Nicolas Payette

UQÀM
Université du Québec à Montréal

No 2008-02

Le Laboratoire d'Analyse Cognitive de l'Information (LANCI) effectue des recherches sur le traitement cognitif de l'information. La recherche fondamentale porte sur les multiples conceptions de l'information.

Elle s'intéresse plus particulièrement aux modèles cognitifs de la classification et de la catégorisation, tant dans une perspective symbolique que connexionniste.

La recherche appliquée explore les technologies informatiques qui manipulent l'information. Le territoire privilégié est celui du texte.

La recherche est de nature interdisciplinaire. Elle en appelle à la philosophie, à l'informatique, à la linguistique et à la psychologie.

Volume 7, Numéro 2008-02 – Novembre 2008

Publication du Laboratoire d'Analyse Cognitive de l'Information

Directeurs : Luc Faucher, Jean-Guy Meunier, Serge Robert et Pierre Poirier

Université du Québec à Montréal

Document disponible en ligne à l'adresse suivante : www.lanci.uqam.ca

Tirage : 5 exemplaires

Aucune partie de cette publication ne peut être conservée dans un système de recherche documentaire, traduite ou reproduite sous quelque forme que ce soit - imprimé, procédé photomécanique, microfilm, microfiche ou tout autre moyen - sans la permission écrite de l'éditeur.

Tous droits réservés pour tous pays. / All rights reserved. No part of this publication covered by the copyrights hereon may be reproduced or used in any form or by any means - graphic, electronic or mechanical - without the prior written permission of the publisher.

Dépôt légal – Bibliothèque Nationale du Canada Dépôt légal – Bibliothèque Nationale du Québec

ISBN-10 : 2-922916-19-7

ISBN-13 : 978-2-922916-19-5

© 2008 Nicolas Payette

SIMULER L'ÉVOLUTION DE LA SCIENCE POUR ÉTABLIR DES NORMES NATURALISTES

Nicolas Payette
Université du Québec à Montréal

Introduction

L'épistémologie a longtemps cherché des fondements stables pour la connaissance. Dans la tradition rationaliste, on plaçait généralement ces fondements dans un a priori étranger au monde de l'expérience sensible, que ce soit un contact préalable entre l'âme et le « monde des idées » pour les platoniciens ou un Dieu porteur de garanties épistémologiques pour les cartésiens. Ces conceptions reposent toutefois sur un dualisme ontologique quelque peu rebutant pour la science contemporaine, qui préfère s'en tenir (ne serait-ce que pour des raisons pratiques) au monisme matérialiste. La tradition empiriste, plus sensible à ce genre de réticences métaphysiques, a plutôt cherché ses garanties de connaissance dans le contact avec le monde sensible. Ainsi, c'est l'accumulation des observations qui devait nous permettre, par induction, d'en arriver aux lois universelles qui gouvernent notre monde. Il y a toutefois au moins un problème majeur avec cette conception : comme l'a fait remarquer Hume, une inférence inductive n'est pas logiquement valide. Quelque soit le nombre de corbeaux noirs observés, rien ne nous garantit que le prochain ne sera pas blanc. Les empiristes (Carnap, par exemple) ont bien essayé de contourner le problème en développant des approches probabilistes, mais puisque ces probabilités sont nécessairement établies à partir d'observations individuelles contingentes, elles restent teintées d'une forme de subjectivité insatisfaisante pour qui cherche à fonder une science objective.

Pour sortir de l'impasse humienne, il faut aborder le problème autrement. Les énoncés universels, qui intéressent la science, ont la forme $(\forall x) Fx$. Si on ne peut pas prouver l'énoncé $(\forall x) Fx$ par la conjonction $Fx_1 \& Fx_2 \& \dots \& Fx_n$, on peut toutefois le réfuter par $(\exists x) \sim Fx$. Vue ainsi, la science ne progresse pas en accumulant des vérités, mais bien en éliminant des faussetés. Cette idée est au cœur du falsificationnisme de Karl Popper (1934) et elle entraîne des conséquences normatives : vos théories doivent être falsifiables, et vous devez effectivement tenter de les falsifier. Cette normativité a priori, qui découle d'une analyse logique de la

découverte scientifique, n'est toutefois pas non plus exempte de problèmes. D'abord, la norme elle-même ne répond pas à son propre critère : elle n'est pas falsifiable. Admettre la norme, c'est encore admettre une forme de vérité métaphysique extérieure à la science. Se pose ensuite la question de son applicabilité. La nature humaine et la société étant ce qu'elles sont, n'est-ce pas utopique de demander aux scientifiques de tenter de falsifier leurs propres théories ? Et que faire d'une théorie en apparence falsifiée ? Doit-on la jeter aux oubliettes, comme semble le demander Popper, ou bien tenter de la corriger, comme cela semble plutôt avoir été le cas dans l'histoire de la science (pensons aux épicycles du système ptoléméen) ? Nos normes ne devraient-elles pas prendre en compte la pratique scientifique actuelle ?

Ces problèmes ne sont pas exclusifs à Popper. Les mêmes questions, ou des variantes de celles-ci, se posent à toute épistémologie a priori, qui cherche une normativité extérieure à la science. Si j'ai introduit ici l'épistémologie poppérienne plutôt qu'une autre, c'est parce que je souhaite examiner un type d'épistémologie qui en est l'héritier direct. À quoi pourrait ressembler une théorie qui conserve le principe de falsification, tout en remplaçant celui-ci dans la nature et en adoptant une démarche d'abord et avant tout descriptive ? Plusieurs approches sont possibles, mais celle à laquelle nous nous attarderons ici se présente sous l'étiquette « épistémologie évolutionniste ». C'est Donald T. Campbell (1974) qui l'a baptisée ainsi—nous verrons bientôt en quoi elle est évolutionniste—et c'est lui qui nous servira de guide pour en explorer le cadre théorique général. Nous nous pencherons ensuite sur l'épistémologie évolutionniste de David L. Hull (1978, 1988a, 1988b, 1988c, 2001). Alors que Campbell tente d'embrasser tous les processus de connaissance ayant cours dans la nature, Hull se concentre sur la science institutionnalisée. Au terme de notre survol théorique, nous nous retrouverons à nouveau devant la question de la normativité. Comment une épistémologie descriptive peut-elle être source de normes pour la science sans commettre le sophisme naturaliste, qui consisterait à déduire ce qui *doit être* de ce qui *est* ? Nous verrons que Hull propose une forme de normativité affaiblie, qui évite à la fois les pièges de la normativité a priori et du sophisme naturaliste. Les normes qui en découlent sont toutefois difficiles à identifier. Pour ce faire, je proposerai une solution qui sort des cadres traditionnels de l'analyse philosophique : la simulation informatique par modèles multiagents. Mais avant d'en arriver là, il nous faut d'abord examiner les théories en question.

Une approche évolutionniste de l'épistémologie

Il y a un parallèle évident à faire entre le falsificationnisme et le darwinisme. Ce parallèle n'avait pas échappé à Popper :

We choose the theory which best holds its own in competition with other theories; the one which, *by natural selection*, proves itself the fittest to survive. (Popper, 1959, p. 108, italiques ajoutées)

La science, comme la nature, fonctionne en éliminant les variantes indésirables, que ce soient les théories fausses ou les organismes moins bien adaptés à leur environnement. Popper avait aussi réalisé que l'acquisition de connaissances par élimination des erreurs ne se limite pas aux humains :

The method of trial and error is not, of course, simply identical with the scientific or critical approach—with the method of conjectures and refutation. The method of trial and error is applied not only by Einstein but, in a more dogmatic fashion, by the amoeba also. (Popper, 1963, p. 52)

La différence cruciale, selon Popper, réside toutefois dans l'attitude critique du scientifique—dans son application consciente et systématique de la norme falsificationniste : c'est ce qui fait que Einstein, contrairement à l'amibe, est *rationnel*.

Donald Campbell, tout en adhérant à l'idée que la connaissance procède par essais et erreurs, rejette toute discontinuité entre nature et science. Toute acquisition de connaissance est évolution, et *vice-versa* :

[E]volution—even in its biological aspects—is a *knowledge process*, and [...] the natural-selection paradigm for such knowledge increments can be generalized to other epistemic activities, such as learning, thought and science. (1974, p. 413, italiques ajoutées)

Campbell ne nie pas la différence entre l'amibe et Einstein, mais il tente d'en rendre compte en montrant comment, toujours à partir du même processus évolutionniste, se met en place une série de « niveaux » de connaissance qui permettent éventuellement d'en arriver aux prouesses einsteiniennes. Nous tenterons ici un survol de ces différents niveaux, mais nous verrons d'abord le processus qui leur permet d'émerger.

Selon Campbell, le processus évolutionniste en est un de variation aveugle et de rétention sélective (*blind-variation-and-selective-retention*, ou « BVSR », ci-après). Il y a trois composantes essentielles à ce processus (1974, p. 421):

1. des mécanismes pour introduire de la variation;
2. des processus de sélection consistants;
3. des mécanismes pour préserver ou propager les variations sélectionnées.

Campbell fait remarquer que les mécanismes de variation et ceux de préservation/propagation s'opposent et qu'un certain équilibre doit être atteint entre les deux pour que le processus produise les effets escomptés.

À première vue, il peut sembler difficile de croire que nos connaissances les plus élevées soient le produit de variations « aveugles¹ ». La recherche de connaissance n'est-elle pas marquée par l'intentionnalité, dirigée vers un but et guidée par une sagesse préalable ? Bien sûr, répond Campbell, mais tous ces raccourcis vers la connaissance sont eux-mêmes le produit d'un processus BVSР ayant eu lieu au préalable, que ce soit lors de la phylogénie ou de l'ontogénie du sujet connaissant. Car un raccourci vers la connaissance est lui-même une forme de connaissance. Et si on accepte la leçon humienne (et que l'on rejette les a priori rationalistes) il ne peut y avoir de nouvelles connaissances sans BVSР. Pour Campbell il s'agit d'une question analytique : « In going beyond what is already known, one cannot but go blindly. If one can go wisely, this indicates already achieved wisdom of some general sort. » (1974, p. 422)

L'effet de cette sagesse générale préétablie est habituellement de restreindre le champ des variations possibles ou encore de permettre de générer ce que Campbell appelle des « sélecteurs délégués » (*vicarious selectors*) qui peuvent être confrontés à un modèle de l'environnement plutôt qu'à l'environnement lui-même. La meilleure façon de comprendre comment sont mis en place ces raccourcis est probablement de se pencher sur la hiérarchie de niveaux décrite par Campbell. Notons toutefois que Campbell ne voit rien d'absolu dans ces niveaux; ils constituent tout au plus une première tentative de montrer comment l'édifice de notre connaissance est progressivement échafaudé à partir de processus plus simples. Un découpage beaucoup plus raffiné pourrait sûrement être réalisé, mais à ma connaissance, ce travail n'a jamais vraiment été tenté. Voici donc les dix niveaux dont il est question.

Niveau 1 : résolution non-mnémorique de problèmes

Campbell commence au niveau des organismes les plus simples. Le problème pour eux consiste simplement à trouver dans l'environnement les éléments dont ils ont besoin pour survivre et à éviter l'exposition aux éléments qui leurs sont nuisibles. La variation se fait par locomotion aveugle. La sélection se fait à l'aide de récepteurs permettant d'évaluer le caractère nocif ou bénéfique de la position actuelle de l'organisme. La rétention d'une solution consiste simplement à cesser la locomotion. D'une fois à l'autre, les solutions adoptées ne sont pas

¹ Notons ici que « aveugle » n'est pas synonyme de « aléatoire ». Les variations peuvent être générées de façon systématique, comme par exemple lorsqu'un radar explore l'environnement en tournant sur 360 degrés. L'important est de retenir que le sujet n'a aucun moyen de savoir à l'avance quelles variations seront conservées.

retenues en mémoire. Tout ce que l'organisme « sait », c'est que la discontinuité de l'environnement lui permet de résoudre des problèmes.

Niveau 2 : appareils locomoteurs délégués

Au second niveau, le processus BVSР se fait de façon déléguée (*vicarious*). Il s'agit pour l'organisme de remplacer l'exploration locomotrice de son environnement par l'utilisation de récepteurs permettant de capter à distance certaines caractéristiques de celui-ci. Le système d'écholocation des chauves-souris constitue un bon exemple d'appareil locomoteur délégué. Des ondes sonores sont projetées dans différentes directions et les directions où ces ondes sont renvoyées par des obstacles sont exclues des possibilités de locomotion. On a ici un premier exemple de raccourci : la connaissance acquise par BVSР au niveau 2 restreint les variations possibles au niveau 1.

Campbell considère d'ailleurs que la vision, malgré l'illusion phénoménale du contraire, est un mécanisme tout aussi indirect, analogue à l'écholocation, au radar ou à la canne d'un aveugle. Bien sûr, ces appareils locomoteurs délégués sont eux-mêmes le produit de l'évolution biologique, et donc d'un processus BVSР : les opérations décrites par Campbell à chaque niveau sont toujours basées sur la physiologie de l'organisme qui, selon-lui, est elle-même une forme de connaissance de l'environnement. Mais Campbell prend soin d'insister à chaque niveau sur les processus BVSР qui sous-tendent toute acquisition de connaissance au cours de la vie de l'organisme. Réfléchissant, plus tard, sur l'accueil réservé à ses théories, il remarquera que :

There is no market for such an analysis because so few epistemologists find perceptual achievements puzzling. Rather, they assume the efficacy of vision in operation. Some may use biological evolution in past environments to explain how we came to have such miraculous organs but fail to epistemologize the operation of the eyes in reflecting the contemporary environment. (Campbell, 1988, p. 173)

Niveau 3 : habitudes; et niveau 4 : instincts

Ces deux niveaux sont fortement interdépendants. Campbell affirme même que le statut épistémologique de la connaissance « innée » et celui de la connaissance « acquise » n'est pas différent, écartant du même coup la résistance des empiristes envers les connaissances innées. Il s'appuie pour cela sur le fait que le processus de sélection est, dans les deux cas, déterminé de la même façon par l'environnement :

In a crude way, instinct development can be seen as involving a trial and error of whole mutant animals, whereas trial-and-error learning involves the much cheaper wastage of responses within the lifetime of a single animal. (1974, p. 425)

Les comportements instinctifs complexes demandent un nombre élevé de mutations pour être mis en place, ce qui pourrait porter à croire que la simple sélection naturelle est insuffisante pour expliquer leur évolution. Dans la mesure, toutefois, où un comportement appris (toujours par BVSR) permet à une espèce d'occuper une niche écologique où ce comportement est avantageux, il s'ensuit une pression sélective qui tend à favoriser les individus dotés des mutations facilitant l'apparition de ce comportement. Si l'environnement reste stable sur durant un nombre suffisamment élevé de générations, ce qui était habitude peut devenir instinct. C'est ce que l'on appelle « l'effet Baldwin » (Baldwin, 1896).

On remarquera encore que les habitudes et les instincts développés au niveau 3 restreignent les mouvements potentiels de l'organisme, même dans les cas où aucun obstacle ne serait identifié par les appareils locomoteurs délégués du niveau 2.

Niveau 5 : pensée soutenue visuellement

Il s'agit pour l'organisme, à ce niveau, d'*imaginer* (littéralement) quel serait le résultat de telle ou telle action sur l'environnement qu'il perçoit visuellement. Le processus BVSR a alors lieu en pensée et seules les actions sélectionnées sont ouvertement accomplies.

Niveau 6 : pensée soutenue mnémoniquement

À ce niveau, l'environnement n'a plus besoin d'être perçu. Le processus BVSR opère sur des représentations en mémoire :

At this level the environment being searched is vicariously represented in memory or "knowledge," rather than visually, the blindly emitted vicarious thought trials being selected by a vicarious criterion substituting for an external state of affairs. The net result is the "intelligent," "creative," and "foresightful" product of thought, our admiration of which makes us extremely reluctant to subsume it under the blind-variation-and-selective-retention model. (1974, p. 427)

Il y a un saut important qui se fait à ce niveau : on passe de comportements relativement universels dans le monde animal à des comportements qui apparaissent proprement humains. La question est suffisamment préoccupante pour que Campbell, plus tôt dans sa carrière, ait consacré un article tout entier (1960) à défendre, à l'aide de nombreux exemples, l'idée que c'est un processus de BVSR qui est à l'origine de la pensée créative. Nous ne reprendrons pas ici toutes les questions abordées dans cet article, mais il y a en une qui a un certain impact sur la suggestion que je ferai plus loin d'utiliser la simulation informatique pour aider à résoudre certains problèmes épistémologiques : la question de la résolution de problèmes par ordinateur.

Campbell a entretenu un débat avec Herbert Simon, un des fondateurs du domaine de l'Intelligence Artificielle, à savoir si la résolution de problèmes par ordinateur pouvait être considérée comme un processus BVSR. Simon (1969, p. 95) affirme que l'utilisation de règles heuristiques par un programme d'ordinateur démarque significativement ce dernier d'un modèle d'essais/erreurs aveugles tel que celui qui est proposé par Campbell. La réponse de Campbell (1974, pp. 430-431), prévisible, est que les heuristiques en question sont au contraire un parfait exemple de sagesse pré-établie, elle-même atteinte par BVSR (quoique ce BVSR ait eu lieu dans le cerveau du programmeur et non dans celui de l'ordinateur). Notons une conséquence importante de la thèse selon laquelle la résolution de problèmes par un ordinateur et par un humain sont de même type : il devient acceptable d'utiliser l'ordinateur pour simuler les processus de connaissance qui nous intéressent chez les humains.

Niveau 7 : exploration socialement déléguée, apprentissage par observation et imitation

L'épistémologie évolutionniste de Campbell ne s'arrête pas au niveau des individus. Il fait remarquer que les groupes sociaux permettent à leurs membres des économies épistémiques significatives : les uns profitent des essais/erreurs des autres. Cela va de l'observation des conséquences des actions de l'autre jusqu'à l'imitation pure et simple. Campbell souligne que, même dans le cas de l'imitation, le sujet procède par BVSR, comparant ses propres tentatives, pour fin de sélection, au modèle mémorisé des actions de l'autre.

Niveau 8 : langage

Le langage vient compléter les niveaux 6 et 7 en ce qu'il permet aux individus d'un groupe social de communiquer les connaissances acquises par l'un de manière à ce que l'autre puisse les utiliser dans ses processus de pensée. Campbell inclut à ce niveau des formes de langage animal comme les danses des abeilles et les phéromones des fourmis. Dans ces cas comme dans celui du langage humain, le modèle d'acquisition du langage est lui-même un modèle BVSR. L'enfant qui apprend à parler doit tester les utilisations possibles des mots auxquels il est exposé, lesquels laissent nécessairement place à interprétation. Le processus est analogue pour le développement de la langue elle-même, la communauté de ses utilisateurs devant sélectionner, parmi tous les découpages possibles de la réalité en mots, celui qui convient le mieux à ses besoins. Ce découpage, toutefois, reste toujours provisoire et imparfait (comme la science, d'ailleurs).

Niveau 9 : accumulation culturelle

Au niveau socioculturel, Campbell affirme la multiplicité des mécanismes de sélection et en mentionne quelques-uns : sélection d'organisations sociales complètes, emprunts sélectifs à d'autres cultures, sélection de modèles à imiter à l'intérieur de la culture, sélection de pratiques culturelles à perpétuer lors du processus d'apprentissage, sélection des leaders et des éducateurs.

Les théories évolutionnistes de la culture on probablement connues une plus grande postérité que les épistémologies évolutionnistes inspirées de Campbell. On pense à Richard Dawkins (1976), Cavalli-Sforza et Feldman (1981) et, surtout, Boyd et Richerson (1985), pour n'en citer que quelques uns. C'est un sujet trop vaste pour l'aborder ici.

Niveau 10 : science

Nous en arrivons finalement à la science, qui occupe le niveau le plus élevé dans la hiérarchie de Campbell. Il souligne toutefois qu'elle est elle-même un aspect de l'évolution socioculturelle. Elle se différencie ainsi :

What is characteristic of science is that the selective system which weeds out among the variety of conjectures involves deliberate contact with the environment through experiment and quantified prediction, designed so that outcomes quite independent of the preferences of the investigator are possible. (1974, p. 434)

On retrouve donc, au bout du compte, une conception très poppérienne de la science. La différence principale, c'est que Campbell considère la norme falsificationniste comme ayant elle-même évolué par BVSR, plutôt que comme étant dictée par la logique même de la découverte scientifique.

La conception de la science comme un processus d'essais/erreurs permet aussi, selon Campbell de rendre compte de certains aspects de son histoire. D'une part, les avancées rapides de la science qui se produisent suite à l'invention de nouveaux instruments s'expliquent par le fait que ceux-ci permettent de tester plus facilement les hypothèses, rendant ainsi le processus de sélection plus efficace. De même, les domaines de recherche où les hypothèses sont généralement plus faciles à tester avancent plus vite que les autres. La découverte simultanée de certaines théories (ironiquement, ce fut le cas de celle de l'évolution) apparaît moins surprenante si on considère le fait que plusieurs chercheurs essaient des variations à partir des mêmes connaissances préalables, et que c'est la même réalité extérieure qui détermine lesquelles sont sélectionnées. La citation qui suit traduit fort bien, selon-moi, l'esprit de la vision de la science proposée par Campbell :

Let a dozen equally brilliant men each propose differing guesses about the unknown in an area of total ignorance, and let the guess of one man prove correct. From the blind-variation-and-selective-survival model this matching of guess and environment would provide us with new knowledge about the environment but would tell us nothing about the greater genius of the one man—he just happened to be standing where lightning struck. In such a case, however, we would ordinarily be tempted to look for a subtle and special talent on the part of this lucky man. However, for the genuinely unanticipatable creative act, our “awe” and “wonder” should be directed outward, at the external world thus revealed, rather than directed toward the antecedents of the discovery. (Campbell, 1960, p. 390)

Le détail des multiples mécanismes BVSR ayant cours en science reste à analyser. Entre la variation systématique de paramètres d'expérience en laboratoire et la mise en compétition de théories complètes proposée par Popper, il y a toute une série de processus sur lesquels on doit se pencher. La tentative la plus complète en ce sens est peut-être celle de David Hull.

Le processus scientifique selon David Hull

Une des raisons qui rendent la théorie de Hull intéressante, c'est qu'il s'est attelé à la tâche de décrire en détail le fonctionnement des processus évolutionnistes en science. Cette entreprise le place dans une position unique parmi les épistémologues évolutionnistes :

Many proponents of an evolutionary or selectionist epistemology are beginning to think that they must shortly “put up, or shut up”, but Hull is unusual because he has “put up”, attempted to cash one of evolutionary epistemology's promissory notes by suggesting how it might apply to conceptual change in science. (Heyes, 1988, p. 194)

Dans cette section, nous tenterons de décrire brièvement le processus scientifique selon Hull (ce qui ne saurait malheureusement faire justice à toute la finesse de sa théorie).

Hull propose son analyse générale des processus évolutionnistes en termes légèrement différents de ceux de Campbell, mais nous verrons que les deux se rejoignent. Au cœur de l'analyse de Hull, il y a deux types d'entités. Des *réplicateurs* :

an entity that passes on its structure largely intact in successive replications. (Hull, 1988a, p. 134)

Et des *interacteurs* :

an entity that interacts as a cohesive whole with its environment in such a way that this interaction causes replication to be differential. (1988a, p. 134)

Ensemble, ces réplicateurs et ces interacteurs donnent lieu à des processus de *sélection* :

a process in which the differential extinction and proliferation of interactors cause the differential perpetuation of the replicators that produced them. (1988a, p. 134)

L'aspect « variation » de l'analyse de Campbell est couvert chez Hull par le fait que la structure des réplicateurs reste « *largely intact* » (donc *pas tout à fait* intacte) d'une réplication à l'autre et que l'extinction et la prolifération des interacteurs (et par conséquent, des réplicateurs) est *différentielle*. Hull n'insiste pas sur le caractère aveugle des variations qui apparaissent lors de la réplication, mais son analyse n'est pas incompatible avec celui-ci. Cette analyse est complétée avec le concept de *lignées* :

an entity that persists indefinitely through time either in the same or an altered state as a result of replication. (1988a, p. 135)

Hull insiste sur le fait que, étant ainsi spatiotemporellement déterminées, les lignées doivent être considérées comme des *individus*. Comme philosophe de la biologie, une des thèses principales de Hull est que les espèces sont de telles lignées et qu'elles sont donc aussi des individus (Hull, 1976). Cela signifie qu'elles ne sont ni des *natural kinds*, ni des types idéaux, et cela limite le genre d'inférences qu'il est légitime de faire à leur sujet. En tant que philosophe des sciences, Hull considère que les théories forment elles aussi des lignées individuelles : ce n'est pas parce que deux idées se ressemblent qu'elles appartiennent à la même théorie. C'est parce qu'elles ont les bonnes relations de parenté.

Pour former des lignées, il faut des interacteurs et des réplicateurs. Dans l'évolution biologique, les gènes sont les réplicateurs et les organismes sont les interacteurs (quoiqu'on puisse vouloir compter d'autres types d'entités comme interacteurs, pour rendre compte, par exemple de la sélection des groupes). Dans l'évolution scientifique, les réplicateurs sont définis par Hull comme étant « les éléments du contenu substantif de la science », parmi lesquels on retrouve :

beliefs about the goals of science, proper ways to go about realizing these goals, problems and their possible solutions, modes of representation, accumulated data, and so on. (1988a, p. 140)

Dans la suite de ce texte, je regrouperai tous ces éléments différents sous le terme général : « idées ». Les idées sont de nature informationnelle et elles ont toujours besoin d'un support matériel, que ce soit un livre, un ordinateur ou bien le cerveau d'un scientifique. La prolifération différenciée des idées se fait par l'intermédiaire de ces véhicules, principalement au travers l'action des scientifiques qui les génèrent, les testent, les écrivent et les communiquent. Hull a d'abord considéré les scientifiques eux-mêmes comme des interacteurs, mais suite à certaines critiques (voir, p. ex., Heyes, 1988), il a ensuite révisé sa position, affirmant plutôt que les

scientifiques devraient être vu comme des agents facilitant l'interaction, et non pas comme les interacteurs eux-mêmes (2001, p. 4) Dans ce modèle alternatif, les idées fonctionneraient à la fois comme répliqueurs et comme interacteurs, mais auraient néanmoins besoin de l'action des scientifiques pour être transmises (un peu comme les gènes ont besoin de l'environnement cellulaire pour être recopiés ou comme les fleurs ont besoin des abeilles pour la pollinisation).

Une fois que les scientifiques sont établis comme étant les agents du changement scientifique, Hull doit spécifier le but qu'ils poursuivent. Selon lui, la principale motivation des scientifiques est l'obtention de crédit, un concept qui peut être approximativement défini comme la reconnaissance et le respect qu'un scientifique obtient de ses pairs. Le désir d'obtenir du crédit (« *the drive for credit* ») n'exclue pas la curiosité envers la Nature ou encore un sincère désir de découvrir la vérité, mais il reste, selon Hull, le but premier des scientifiques. Hull se doit donc d'expliquer comment la science, dans son ensemble, progresse malgré la primauté du crédit sur la vérité comme motivation individuelle. La solution à ce problème rétablit un pont vers le falsificationnisme poppérien : débusquer les théories fausses est une bonne façon d'obtenir du crédit. Ces dernières ont donc tendance à être exclues du bassin théorique. Et le corollaire, c'est que les idées plus proches de la vérité ont de meilleures chances d'être répliquées. Reste à voir comment fonctionne le système d'attribution de crédit et quelles sont ses conséquences pour les scientifiques qui doivent faire carrière dans un milieu où le crédit est la principale monnaie d'échange.

La principale façon d'attribuer du crédit à un scientifique est de citer ses articles. Citer un auteur n'est pas nécessairement une action altruiste, par contre. Souvent, c'est pour attaquer ses idées qu'on le cite. Dans ce cas, l'auteur cité obtient bel et bien une certaine forme de notoriété, mais ne recueille pas le même genre de crédit qu'avec une citation positive. La raison première de citer positivement un auteur, c'est de s'appuyer sur ses idées. Si ces dernières sont déjà acceptées par la communauté scientifique, elles assureront un certain support à l'idée originale qui est présentée dans l'article. Cette situation force toutefois les scientifiques à faire des compromis. Ils sont confrontés à ce que Hull désigne comme un « *trade-off* » entre obtenir du crédit et obtenir du support :

One cannot gain support from a particular work unless one cites it, and this citation automatically both confers worth on the work cited and detracts from one's own originality. Scientists would like total credit and massive support, but they cannot. Science is so organized that scientists are forced to trade off credit for support. (1988a, p. 127)

On se retrouve donc avec un continuum de stratégies possible pour un scientifique individuel, allant de stratégies très risquée, mais très payantes, à des stratégies prudentes, mais

peu payantes. La distribution de ces stratégies dans la population de scientifiques devrait avoir un impact sur la progression de la science dans son ensemble, mais il n'est pas facile de déterminer quel genre d'impact sans un modèle (formel ou empirique) pour en mesurer les effets.

Le système d'attribution du crédit impose une barrière à l'entrée de nouveaux scientifiques dans un champ de recherche. Puisque ces nouveaux scientifiques n'ont pas encore de crédit, personne ne peut obtenir de support en citant leur travail. Et ils n'obtiendront pas de crédit s'ils ne sont pas cités. Pour briser ce cercle vicieux, il semblerait qu'il soit nécessaire pour les scientifiques expérimentés de se comporter de façon altruiste envers les novices, et de les citer sans obtenir de support en retour. Pour expliquer cet altruisme apparent, Hull se tourne vers un concept emprunté à l'évolution biologique : la notion de « valeur adaptative inclusive² » (Hamilton, 1964). Adopter un comportement altruiste envers les individus auxquels nous sommes apparentés favorise la réplication des gènes que nous partageons avec eux. Ainsi, il peut être avantageux pour une mère (d'un point de vue génétique) de se sacrifier pour deux de ses enfants, avec chacun desquels elle partage 50% de ses gènes. De même, un professeur qui confère du crédit à une de ses étudiantes, par exemple, favorise éventuellement la réplication de ses propres idées, dont l'étudiante est porteuse. Quoique louables, ces comportements n'en sont pas moins motivés par le désir de crédit. Encore ici, on se retrouve face à la question des conséquences épistémiques de ces comportements. La science progresse-t-elle plus rapidement lorsque les professeurs favorisent leurs propres étudiants, ou encore les collègues avec lesquels ils savent partager beaucoup d'idées? Quels sont les effets de ces regroupements stratégiques, que Hull appelle des « dèmes »? Les réponses à ces questions ont des conséquences normatives, mais elles ne sont pas faciles à obtenir sans modèle précis.

La question de la normativité

Hull est toujours très prudent lorsqu'il s'agit d'évaluer les conséquences épistémiques de sa théorie. En tant que philosophe naturaliste, il se méfie d'une normativité a priori. Il est même quelque peu réfractaire à l'utilisation de l'étiquette « épistémologie » pour désigner sa théorie (Hull, 1988c, p. 244). Cette hésitation lui vient en partie du fait qu'il navigue en eaux troubles à cause de son point de vue évolutionniste. Dans toutes ses œuvres, il prend un soin particulier à

² Aucune traduction de « *inclusive fitness* » ne semble faire consensus dans la littérature.

souligner que ce n'est pas parce qu'une idée ou une théorie a évolué de façon darwinienne que celle-ci s'en trouve pour autant *justifiée*.

Comme nous l'avons vu avec Campbell, les processus évolutionnistes ont tendance à augmenter l'adaptation entre un système et son environnement. La Nature fait bel et bien partie de l'environnement d'un scientifique. Mais la « niche écologique » d'un scientifique inclut aussi ses collègues, ses étudiants, des universités, des revues scientifiques, des agences de financement, etc. Tout comme nos organes sensoriels ont évolué de telle manière qu'ils nous servent bien dans un contexte normal mais peuvent nous tromper dans des situations inhabituelles (pensons aux objets qui semblent brisés dans l'eau à cause de la réfraction de la lumière), les idées scientifiques sont aussi « adaptées » à l'environnement social dans lequel les scientifiques travaillent, et pas seulement à la « vraie structure » de la Nature. Le plus loin que Hull est prêt à aller en termes de normativité, c'est de dire que :

The only normative force that my theory warrants is conditional. If science is organized the way that I say it is [...] then certain strategies are likely to work better than others. (Hull, 1988c, pp. 242-243)

Mais comment faire pour établir quelles sont les stratégies qui doivent être adoptées, tant du point de vue du scientifique individuel qui essaie d'obtenir du crédit que du point de vue du législateur (ou du philosophe) qui cherche à savoir quelles lois (ou quelles normes) favoriseront l'atteinte de la vérité pour l'institution scientifique dans son ensemble? Même les règles de comportement individuel risquent d'avoir des conséquences imprévisibles dans l'environnement complexe qu'est le monde universitaire. Quand on en arrive à tenter de réguler les interactions entre les scientifiques et les institutions au sein desquelles elles ont lieu, toute tentative de prédiction devient fort risquée.

Ce genre de question n'est pas unique à Hull, et concerne toute philosophie des sciences naturaliste. Un des principaux défenseurs du naturalisme est Quine, et sa réflexion sur cette question nous offre une piste de solution :

Naturalization of epistemology does not jettison the normative and settle for the indiscriminate description of ongoing procedures. For me, normative epistemology is a branch of engineering. It is the technology of truth-seeking, or, in more cautiously epistemological term, prediction. Like any technology, it makes free use of whatever scientific findings may suit its purpose. [...] The normative here, as elsewhere in engineering, becomes descriptive when the terminal parameter is expressed (Quine, 1986, pp. 664-665)

Ainsi, la frontière entre le normatif et le descriptif s'effacerait lorsque le « paramètre terminal », la valeur à maximiser, serait spécifié. Cela correspond bien à la normativité

conditionnelle exprimée par Hull, mais le parallèle que fait Quine avec l'ingénierie est éclairant. Que fait l'ingénieur qui doit, par exemple, maximiser le rapport entre la résistance d'une structure et son poids? Il utilise un modèle de la structure à construire (un pont, par exemple) qui lui permettra de calculer son poids et sa résistance. Ce modèle, à la base, est purement descriptif. Il ne fait intervenir que les lois de la physique et la description des matériaux à utiliser et de leur agencement. Cependant, l'ingénieur peut faire varier différents paramètres de son modèle et voir ainsi dans quelles conditions le poids sera minimisé et la résistance, maximisée. Au bout du compte, il obtient quelque chose qui ressemble à des normes : *si* on veut un pont léger et solide, on *doit* le construire de telle ou telle manière. Peut-on faire la même chose en épistémologie?

Utilisation de modèles formels en épistémologie

Un de grands mérites des modèles formels est qu'ils permettent de tirer systématiquement les conséquences d'une hypothèse donnée pour un ensemble de conditions initiales. La façon traditionnelle d'exploiter cette caractéristique est de l'utiliser pour opérationnaliser une hypothèse : il s'agit alors de vérifier empiriquement si les prédictions tirées du modèle se réalisent lorsque les conditions observées dans la réalité correspondent à celles qui sont établies pour le modèle. Les modèles prennent toutefois un intérêt particulier lorsqu'on les utilise pour palier à la difficulté de réaliser des expériences contrôlées dans certains domaines. Des conditions initiales impossibles à réaliser expérimentalement et des échelles temporelles impraticables ne posent aucune difficulté à un modèle formel.

Les préoccupations normatives inhérentes à l'épistémologie donnent souvent lieu à de telles difficultés. Hull en est bien conscient :

Philosophers have also traditionally expressed normative claims about science. In general, such prescriptions are extremely difficult to test. One suggestion is to convince groups of scientists. Have them adopt one's views about how science *should* be conducted and see what happens. If science in such areas grinds to a halt, then possibly something is wrong with one's normative claims. Conversely, if those scientists who adopt our views are even more successful in attaining their epistemic goals, then possibly there is something to be said for these norms. (Hull, 2001, p. 194)

Hull donne comme exemple la question de savoir si les scientifiques *devraient* tenter de répliquer tous les résultats sur lesquels ils basent leurs recherches et fait l'hypothèse qu'un tel comportement ralentirait significativement le progrès scientifique. À ma connaissance, toutefois,

Hull ne fait jamais explicitement le lien entre de telles questions et l'utilisation de modèles formels pour y répondre.

Pourtant, comme il l'admet lui-même, la méthode qu'il propose n'est pas une panacée. Un groupe de scientifiques sera réticent à appliquer de nouvelles normes s'ils ne sont pas assurés de pouvoir obtenir plus de crédit suite à leur application. Aussi, la mise en place de nouvelles politiques scientifiques incertaines peut se révéler coûteuse, à la fois économiquement et politiquement. Quoique la confrontation au monde réel sera toujours nécessaire en bout de ligne, il serait avantageux d'avoir une façon virtuelle d'évaluer préalablement les conséquences de nos normes.

Traditionnellement, les modèles utilisés dans les sciences évolutionnistes sont plutôt des modèles analytiques qui tente de décrire l'évolution d'un système à l'aide d'équations différentielles ou encore des modèles basés sur la théorie des jeux. Ces modèles nous offrent déjà une façon d'évaluer des normes. Il semble toutefois que les modèles dits « multiagents », tels qu'ils se sont développés depuis quelques années, offrent une alternative intéressante. Ils ont, entre autres, l'avantage de ne pas être limités à des problèmes qui peuvent être exprimés par un ensemble d'équations soluble. Ils nous permettent donc de reproduire de façon très fine des processus tels que ceux qui sont décrits par Hull et d'explorer les effets épistémiques de différents comportements individuels ou de différentes normes épistémiques. Je vais développer cette question dans la prochaine section, dont le but ne sera pas de proposer un modèle complet de la théorie de Hull, mais bien de montrer pourquoi je crois que les modèles multiagents sont bien adaptés à son épistémologie évolutionniste.

Pourquoi un modèle multiagents

Michael Wooldridge offre la définition suivante de ce qu'est un agent:

An agent is a computer system that is situated in some environment and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives. (Wooldridge, 2002, p. 15)

Manifestement, il faut plus d'un agent pour obtenir un système *multiagents*, mais même à ce niveau individuel, on distingue déjà deux caractéristiques importantes des agents de ces modèles : ils sont *autonomes* et *situés*.

La notion d'autonomie réfère ici à l'absence de contrôle central. Dans le contexte d'une simulation sociale, cela correspond à une certaine forme d'individualisme méthodologique: bien

que les institutions (et autres macrostructures) puissent établir des politiques (des règles, des valeurs, etc.), ce ne sont pas elles qui coordonnent directement les agents. À chaque étape d'une simulation multiagents, chaque agent a le plein contrôle sur les décisions qu'il prend pour atteindre ses buts.

Un agent est aussi *situé*, au sens où il occupe une position spécifique dans un certain espace et que ses comportements sont en partie déterminés par cette position. Ceci introduit la notion d'*interactions locales* entre les agents qui sont voisins dans cet espace. Dans le cas qui nous intéresse, l'espace immédiat dans lequel un agent (i.e., d'un scientifique) est situé est un *réseau social* : il est lié à ses étudiants, ses collaborateurs, ses collègues, etc. Un « voisin », dans cet espace, c'est simplement quelqu'un avec qui il entretient un lien direct.

Joshua Epstein—qui, avec Robert Axtell, a produit l'exemple paradigmatique d'une simulation multiagent avec le modèle « Sugarscape » (1996)—insiste sur une autre caractéristique: *la rationalité limitée*, affirmant que :

Agents do not have global information, and they do not have infinite computational power. Typically, they make use of simple rules based on local information [...]. (Epstein, 2007, p. 6)

Quoique cette caractéristique pourrait sembler rebutante pour un épistémologue traditionnel, qui serait préoccupé par la question de la rationalité parfaite, elle est tout à fait appropriée pour l'entreprise naturaliste de Hull, qui cherche plutôt à savoir quelles sont les possibilités de connaissance qui s'offrent à des agents dotés d'information et de capacités cognitives limitées.

La dernière caractéristique des modèles multiagents que nous aborderons ici est peut-être la plus importante pour construire un modèle de la théorie de Hull: *l'hétérogénéité*. Des agents hétérogènes ne sont pas, comme le souligne Epstein, rassemblés dans quelques bassins homogènes (2007, p. 6) Ils peuvent différer les uns des autres d'autant de façons que le domaine des paramètres de chacune de leurs propriétés individuelles le permet. Ces propriétés peuvent inclure leur position dans l'espace, leur représentation du monde, leurs gènes, leurs croyances, leurs désirs, leurs buts, ou toute autre propriété que l'on pourrait juger bon d'implémenter pour les décrire le mieux possible.

Nous en venons maintenant à la façon dont un modèle de la théorie de Hull peut exploiter ces caractéristiques. Cette théorie fait intervenir plusieurs types de comportements que peuvent adopter les scientifiques. Ces divers comportements donnent lieu à différents types d'interactions entre scientifiques, lesquelles constituent différents mécanismes de répliation des idées. Bref, il s'agit d'un système qui ne se traduirait en un ensemble d'équations différentielles qu'au prix de simplifications radicales. Même en supposant que l'on réussisse à opérer cette traduction en

capturant les propriétés essentielles de la théorie de Hull, le système d'équations qui en résulterait serait difficile à manier analytiquement. Un modèle multiagents n'échappe pas aux impératifs de la simplification, mais l'hétérogénéité permise par ces modèles facilite la gestion de la complexité. Il est généralement plus facile de décrire ce qui se passe quand l'agent a_1 rencontre l'agent a_2 , selon les propriétés respectives de ceux-ci, que de décrire ce qui se passe quand l'ensemble des individus de type A interagit avec l'ensemble des individus de type B et des individus de type C . Une fois cette description traduite dans un langage informatique, on peut laisser l'ordinateur simuler pas à pas ces interactions. Au bout du compte, l'approche multiagents permet de rendre justice aux complexités de la théorie de Hull, tout en laissant à l'ordinateur le soin d'en calculer les conséquences.

Les simulations multiagents permettent de simuler le comportement d'agents hétérogènes, mais elles permettent aussi de suivre à la trace des *objets* hétérogènes avec lesquels les agents interagissent (mais qui ne sont pas autonomes comme le sont les agents). Dans un modèle multiagent de la théorie de Hull, ces entités, ce sont les répliqueurs : les *idées*. Et le fait de pouvoir suivre à la trace ces idées hétérogènes convient bien à la conception que Hull se fait des lignées théoriques. On se rappellera qu'avant de s'attaquer à l'épistémologie évolutionniste, Hull avait déjà apporté une contribution importante à la philosophie de la biologie, en soutenant que les espèces animales, comme les gènes ou les organismes, ne sont pas des types, des ensembles ou des classes, mais bien des individus spatiotemporellement délimités (Hull, 1976). Autant les idées individuelles que les lignées conceptuelles qu'elles forment sont considérées, dans son système, comme des entités historiques individuelles. Ceci entraîne l'utilisation par Hull du concept d'« identité par descendance », où la parenté prend le pas sur la similarité : un système théorique préserve son identité au travers le temps parce que les idées qui le composent entretiennent entre elles des relations généalogiques, et non parce que ces idées ont des propriétés essentielles en commun. Des idées contradictoires entre elles peuvent exister au sein d'un même système conceptuel. Cette distinction se transpose aussi au niveau des scientifiques eux-mêmes, dont les interrelations professionnelles, et non la similitude des idées, déterminent l'appartenance à un groupe. Une telle conception exige une méthode de référence appropriée pour parler des objets de la science. Hull suggère l'utilisation de la méthode par spécimen-type utilisée en biologie :

Because both sorts of historical entities are variable through time and internally heterogeneous at any one time, they cannot be individuated in terms of "essences," whether essential members or essential tenets. [...] If one wants to individuate a scientific group, all one has to do is pick a member, any member, and trace out his or her professionally relevant relations. If one wants to individuate a conceptual system, all one

has to do is to select a particular token of a particular tenet and trace out its conceptual relations, both inferential and genealogical. When we trace out inferential relations, the only ones that count are those that were actually made. (Hull, 1988b, pp. 508-509)

Pour être fidèle à l'importance que Hull accorde aux individus et à leur position particulière dans l'espace et le temps, il faut que les objets du modèle formel qui les décrivent soit en accord avec cette conception. Pour que la méthode de référence par spécimen-type soit applicable à notre modèle, il faut que celui-ci garde la trace des objets individuels et des relations qu'ils entretiennent entre eux. C'est le genre de tâche auxquelles les modèles multiagents excellent.

Les modèles multiagents ne sont pas les seuls à être appropriés pour la simulation en philosophie des sciences mais, pour les raisons mentionnées ici, ce sont ceux qui me semble les mieux adaptés à la philosophie de Hull.

Conclusion

Le chemin parcouru dans les sections précédentes nous a conduit de Popper à Hull, en passant par Campbell. Même s'il est injuste de passer sous silence les contributions de leurs prédécesseurs et de leurs contemporains, il y a, entre ces trois penseurs, une progression particulièrement intéressante. Les intuitions initiales appartiennent à Popper. Plutôt que de tenter de minimiser le problème posé par Hume, il a accepté pleinement sa critique de l'induction et proposé une façon d'aborder la science qui fonctionne par élimination des erreurs plutôt que par accumulation des vérités. Popper n'avait pas manqué de voir le parallèle entre son falsificationnisme et l'évolution darwinienne, mais il n'a jamais adopté le naturalisme qui lui aurait permis de rendre compte de la continuité entre l'évolution biologique et scientifique et de replacer les humains (et les normes qui les guident) au sein de la Nature. Cette contribution appartient plutôt à Campbell. En insistant sur l'ubiquité des processus BVSR, il a montré comment notre capacité à connaître émerge d'une hiérarchie de niveaux d'organisation qui ne fait appel à aucune considération a priori. Ce faisant, Campbell rend compte à la fois de la créativité humaine (de notre capacité à faire les conjectures si chères à Popper) et des processus par lesquels celle-ci donne naissance à l'entreprise scientifique. Mais si Campbell décrit bien les processus fondamentaux par lesquels la science progresse, il a tout de même fallu attendre Hull pour remplir la promesse naturaliste de l'épistémologie évolutionniste et bien décrire les détails de leur implémentation et, surtout, les conséquences de leur fonctionnement.

Malgré cela, on se demande encore, au terme de ce cheminement, comment l'épistémologie naturaliste peut nous aider à formuler des normes pour mieux connaître. Il serait fallacieux de déduire du fait que la science fonctionne de telle ou telle façon qu'elle *doit* aussi fonctionner ainsi. Hull est conscient des limites de l'épistémologie descriptive et nous offre, faute de normes absolues, une normativité conditionnelle : *si* la science fonctionne ainsi, certaines normes seront plus efficaces pour arriver à un but donné. Mais comment trouver ces normes? Mon humble conjecture est que les modèles multiagents pourraient être une bonne façon d'y parvenir. En reproduisant, comme les caractéristiques de ces modèles expliquées plus haut nous le permettent, le fonctionnement de la science telle que décrite par Hull, on se donne un outil pour évaluer les conséquences de diverses façons d'organiser la science. À la fin de son livre, Hull énumère une série de questions soulevées par sa théorie :

How prevalent can stealing become before the likelihood that one will get credit for one's contribution is so reduced that the system ceases to work? [...] Does science develop more quickly in areas characterized by competing factions than in areas where scientists work largely alone? [...] How much cohesion is enough? How much is too much? Can group selection influence selection at the level of the individual scientist? How much competition is too much competition? What happens when science becomes too competitive? Scientists aggressively seek credit. Can scientists become too aggressive in their quest? What effects does extreme aggression have on the careers of individual scientists? On science itself? (Hull, 1988b, pp. 520-521)

Le genre de modèle que j'ai suggéré ici permettrait de donner une tentative de réponse à ces questions sans avoir, par exemple, à convaincre les scientifiques d'être plus ou moins agressifs les uns envers les autres. La qualité des réponses obtenues dépend, bien sûr, de la qualité du modèle qui les a produites, mais un tel modèle permet à tout le moins d'expérimenter plusieurs possibilités avant de les confronter à la réalité. On se retrouve alors avec ce que Campbell a décrit comme un processus de BVS par sélecteurs délégués : les variations de paramètres dans la simulation permettent de restreindre le champs des variations qui valent la peine d'être essayées dans le monde réel. Et si les variations sélectionnées par le modèle ne se révèlent pas utiles dans le monde réel, c'est le modèle lui-même qui, au bout du compte, devra être rejeté (ou à tout le moins corrigé). On aura alors éliminé une variante possible.

Bibliographie

- Baldwin, J. M. (1896). A New Factor in Evolution. *The American Naturalist*, 30(354), 441.
- Boyd, R., & Richerson, P. J. (1985). *Culture and the Evolutionary Process* (p. 331). Chicago: University of Chicago Press.
- Campbell, D. T. (1960). Blind variation and selective retentions in creative thought as in other knowledge processes. *Psychological Review*, 67(6), 380-400.
- Campbell, D. T. (1974). Evolutionary Epistemology. In *The Philosophy of Karl Popper*, The Library of living philosophers. (Vols. 1-2, Vol. 1, pp. 413-463). Open Court.
- Campbell, D. T. (1988). A general 'selection theory', as implemented in biological evolution and in social belief-transmission-with-modification in science. *Biology and Philosophy*, 3(2), 171-177.
- Cavalli-Sforza, L. L., & Feldman, M. W. (1981). *Cultural transmission and evolution: a quantitative approach*, Monogr Popul Biol. (pp. 1-388). 16.
- Dawkins, R. (1976). *The Selfish Gene* (p. 224). New York: Oxford University Press.
- Epstein, J. M. (2007). *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling* (Har/Cdr., p. 352). Princeton University Press.
- Epstein, J. M., Axtell, R., & Project, 2. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up* (p. 208). Brookings Institution Press.
- Hamilton, W. D. (1964). The Genetical Evolution of Social Behavior. *Journal of Theoretical Biology*, 7(1-52), 8.
- Heyes, C. (1988). Are scientists agents in scientific change? *Biology and Philosophy*, 3(2), 194-199. doi: 10.1007/BF00140998.
- Hull, D. L. (1976). Are Species Really Individuals? *Systematic Zoology*, 25(2), 174-191.
- Hull, D. L. (1978). Altruism in science: A sociobiological model of co-operative behaviour among scientists. *Animal Behaviour*, 26(Part 3), 685-697.
- Hull, D. L. (1988a). A mechanism and its metaphysics: An evolutionary account of the social and conceptual development of science. *Biology and Philosophy*, 3(2), 123-155.
- Hull, D. L. (1988b). *Science as a Process: An Evolutionary Account of the Social and Conceptual Development of Science*, Science and its conceptual foundations. Chicago: University of Chicago Press.
- Hull, D. L. (1988c). A period of development: A response. *Biology and Philosophy*, 3(2), 241-263. doi: 10.1007/BF00141008.
- Hull, David L. 2001. *Science and Selection: Essays on Biological Evolution and the Philosophy of Science*. Cambridge University Press.
- Popper, K. R. (1934). *Logik der Forschung*. Vienne: Julius Springer Verlag.

-
- Popper, K. R. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. New York: Basic Books.
- Popper, K. R. (1963). *Conjectures and Refutations*. New York: Basic Books.
- Quine, W. (1986). Reply to Morton White. In P. A. Schilpp & L. Hahn (Eds.), *The Philosophy of W. V. Quine* (pp. 663-665). La Salle: Open Court.
- Simon, H. (1969). *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wooldridge, M. J. (2002). *An Introduction to Multiagent Systems* (p. 348). J. Wiley.