



Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ?

Franck Varenne

► To cite this version:

Franck Varenne. Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ?. Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ?, Dec 2002, Besançon, France. pp. 111-143. hal-00536151

HAL Id: hal-00536151

<https://hal.science/hal-00536151>

Submitted on 15 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ?

Franck Varenne - fvarenne@wanadoo.fr

« Tu ne te feras aucune image sculptée,
rien qui ressemble à ce qui est dans les
cieux là-haut, ou sur la terre ici-bas, ou
dans les eaux au-dessous de la terre. »

Exode, 20, 4-5.

Introduction :

Bachelard a constamment travaillé à minorer le rôle de l'intuition dans la pratique scientifique. Sans nier son omniprésence, il lui a systématiquement donné un rôle négatif : il la présente comme ce qui doit être par destination et par nature rectifié¹. Elle est cet adjuvant transitoire qui peut bien être premier et immédiat mais qui ne peut pas être un premier savoir, encore moins un savoir premier, car ce premier arrêt de la raison vivante doit être nié pour éviter que la raison ne s'enferme dans le statisme mortifère à quoi tout idéalisme la réduit. En science, parce que la raison est vivante, il n'y aurait donc jamais d'intuition droite comme on peut dire qu'il existe parfois des opinions droites. Or, cette épistémologie bachelardienne de la raison vivante, et pour cela même dialectique, ne nous paraît pas pouvoir rendre compte des nouvelles pratiques de simulation informatique propres à la recherche scientifique contemporaine. Lorsque les scientifiques disent qu'ils font des « expériences par ordinateur », qu'ils disposent de « laboratoires virtuels », faut-il continuer à les comprendre en un sens purement métaphorique ? Il ne nous semble pas : il n'est plus possible de traiter la simulation comme une métaphore ou comme un simple procédé heuristique fatalement destiné à être nié ou dépassé. La pratique montre que, dans un nombre croissant de domaines scientifiques - sciences de la nature, sciences humaines aussi bien que sciences des artefacts -, la simulation ne joue plus le rôle de succédané temporaire d'une théorie encore en gésine parce que non encore élaborée ; c'est-à-dire qu'elle ne joue plus systématiquement le rôle d'un modèle provisoire ou d'un schéma servant à condenser les mesures. C'est qu'elle n'a pas la nature d'un signe graphique, linguistique ou mathématique. Elle joue au contraire de plus en plus le rôle d'une réplique détaillée du réel : elle est une intuition reconstruite avec justesse mais sans abstraction rationnelle et généralisante, donc sans transfiguration iconique. Elle n'est plus un signe substitut d'un autre signe mais un objet substitut d'un autre objet. Elle doit en effet valoir comme intuition immédiate afin qu'en expérimentant sur elle, on puisse rechercher des modèles mathématiques condensants. La simulation n'a donc pas la vocation de valoir comme un résumé abstraitif. La représentation à valeur scientifique ne serait donc aucunement un schéma dans ce cas précis : elle serait une intuition construite.

Pourtant, à cause justement de son souci du détail, elle est souvent le fruit de collaborations multiples et étroites entre diverses expertises scientifiques et où les sciences descriptives - comme la botanique par exemple - sont remises à l'honneur, à côté des sciences abstraites. Il y a donc bien là quelque chose comme un savoir construit collectivement mais sans pour autant qu'il ait directement en vue la constitution de représentations rationnelles abstraites vérifiées et rectifiées. La pratique contemporaine des simulations informatiques semble ainsi confirmer en un sens l'idée bachelardienne d'une « union des travailleurs de la preuve » tout en invalidant ce qu'il y a de

¹ Voir, par exemple, (Bachelard, G., 1940, 1983), pp. 139 : « Les intuitions sont très utiles : elles servent à être détruites ». Voir également (Bachelard, G., 1951, 1965), pp. 68-70 ; en particulier, p. 68 : « toute expérimentation est d'abord une épure, elle est pensée sur le plan même de la représentation, soit dit en employant le mot de représentation avec toutes les résonances philosophiques. » Nous comprenons ici qu'il est notamment fait allusion au caractère tout à la fois formel et actif de la représentation métaphysique et scientifique tel qu'il a été précisément pensé d'abord par Leibniz, cela en complète opposition avec l'image visuellement ressemblante et statique.

foncièrement iconoclaste, ou tout au moins de systématiquement anti-intuitiviste parce qu'anti-idolâtre, dans son épistémologie mathématisante et dialectique. La question du statut épistémologique des simulations informatiques présente donc l'intérêt d'ouvrir en deux, en quelque sorte, l'épistémologie bachelardienne, de la faire travailler, de la mettre en crise avec elle-même. Elle nous permet ainsi de pénétrer directement et en profondeur quelques uns de ses présupposés, avec un regard tout à la fois contemporain et critique, si tant est que l'histoire de l'épistémologie est bien elle aussi, comme nous le croyons, une histoire jugée.

Les retombées de cette question de la simulation nous paraissent assez importantes. Car si l'on dit que la simulation ne donne pas lieu à une représentation iconique puisque qu'elle ne vaut pas comme une écriture et qu'elle ne prête donc pas à une iconographie, en fait-on pour autant une idole ? L'union des travailleurs de la preuve travaille-t-elle aujourd'hui à se constituer des idoles ? Et qu'y devient alors le rationalisme scientifique ? Car dans les simulations contemporaines, le signifiant ressemble souvent au signifié : la simulation produit donc des objets substitutifs servant à des substituts d'expérience. Certains domaines comme l'aéronautique, par exemple, font désormais davantage confiance aux simulations qu'aux essais en vol. Qu'est-ce que cela signifie ? Proposer à l'épistémologue de travailler à penser enfin correctement la pratique actuelle des simulations, est-ce nécessairement le plonger dans l'enfer de l'idolâtrie ? Est-ce le pousser à accepter de transgresser l'interdiction biblique de l'idole, interdiction qui est bien plus récurrente parce que péremptoire et angoissante que la seule dévalorisation hellénique et philosophique de la copie, puisque touchant au cœur même de notre culture judéo-chrétienne et à ses résurgences sporadiques, mais inconscientes, jusque dans l'épistémologie elle-même ?

La première question que nous poserons sera donc celle-ci : qu'est ce qui impose à Bachelard de cantonner l'intuition à ce rôle négatif ? Nous tâcherons de mettre en lumière le sens de ce cantonnement dans certains passages de son premier livre : « La connaissance approchée ». Sans doute est-ce un réflexe d'historien qui nous commande ici d'aller aux sources, mais c'est aussi parce que nous croyons que Bachelard y expose de façon assez nette, car paradoxalement très imagée, le rapport entre l'esprit connaissant et le monde, notamment sous la forme du couple point/surface.

Nous tâcherons ensuite d'exposer les interdits épistémologiques que l'on peut tirer des critiques de l'image interprétée comme simple cohésion par opposition à la cohérence - quand bien même cette cohérence serait plurale comme en chimie et quand bien même la cohésion serait pensée comme le signe positif d'un réel asymptotique, comme ce que doit viser le « matérialisme technique »² - telles qu'elles apparaissent dans son avant-dernier ouvrage d'épistémologie : « Le rationalisme appliqué ». Au delà des évolutions terminologiques ou conceptuelles de l'épistémologie bachelardienne, ce couple cohésion/cohérence nous paraît en effet répondre significativement au couple point/surface mis en oeuvre vingt-et-un ans auparavant en le ratifiant de nouveau. Nous pensons que l'un peut éclairer l'autre et donner ainsi une des raisons principales pour lesquelles l'intuition et l'image statique sont pensées négativement par Bachelard. N'est-ce pas en effet pour lui la cohésion incohérente qui fait l'irrationnel de toute image lorsqu'elle n'est pas encore schématisée ni donc rationalisée ? N'est-ce pas pour cette raison même qu'il nous faut toujours, et sans tarder, schématiser l'intuition, quitte à user d'approximations qui se donnent comme telles, c'est-à-dire comme signes de la distance respectueuse de l'icône - le concept, le modèle mathématique, le schéma, l'algorithme, l'hypothèse théorique - à ce qu'elle représente³ ?

² (Bachelard, G., 1949, 1962), p. 10.

³ On peut, si on le souhaite, situer Bachelard parmi les iconophiles et non parmi les iconoclastes, cela parce qu'il donne quand même un rôle – dialectique – à l'image. Il n'en demeure pas moins que, chez lui, toute image rationnellement valable se verra justement érigée en icône, c'est-à-dire en représentation isomorphe, abstractive et formelle, au rebours de toute figuration simplement reproductrice qui est censée donner inmanquablement lieu à une idolâtrie et qui, à ce titre, doit être rejetée. Malgré son caractère réducteur, cette classification nous semble avoir un autre mérite. Elle permet de comprendre pourquoi en tant qu'« iconophile » dialectique, Bachelard aura été la cible des iconoclastes radicaux que furent en leur temps les néo-marxistes français. Dans les critiques qu'ils proféreront à son encontre, ce sera toujours l'idéalisme résiduel qui, de façon obsessionnelle, sera pointé du doigt : voir par exemple (Lecourt, D., 1974) ou (Vadée, M., 1975).

Dans un troisième temps, nous expliciterons en quoi consiste une simulation informatique et nous nous demanderons dans quelle mesure on peut dire qu'elle donne lieu à des représentations où la cohésion et non la cohérence est la règle. En effet, les éléments d'une simulation adhèrent entre eux mais ils ne sont pas ordonnés les uns aux autres. Nous montrerons alors pourquoi on ne peut dire que la simulation est un modèle mathématique et pourquoi elle s'appuie sur un usage matériel des mathématiques. Dans le cadre computationnel des simulations, les mathématiques ne sont plus traitées comme des instruments fonctionnels - c'est-à-dire mettant en œuvre une fonction mathématique généralisante et abstractive, ou un algorithme logico-mathématique, donc une action de connaissance, un acte de conception - mais comme des instruments descriptifs⁴. Et nous nous demanderons pourquoi il serait également faux de faire d'une simulation un simple modèle analogique purement descriptif. A ce titre, la simulation peut aujourd'hui suppléer à l'absence d'expérimentation - et non seulement à l'absence de théories - dans certaines sciences de la vie et de l'environnement non réductionnistes - agronomie, botanique, foresterie - et dans certaines sciences humaines - sociologie, géographie, histoire, urbanisme. La simulation faisant à la fois plus et moins qu'une mathématisation - il n'y a donc pas recouvrement -, on devra dire qu'elle fait autre chose - ce que l'épistémologue doit prendre en compte - et qu'ainsi le couple dialectique expérimentation/théorie mathématique doit laisser la place à la triade expérimentation/simulation/théorie. Cette triade reste encore à penser de façon précise et différenciée.

Pour finir, nous reviendrons sur ce que l'on peut en conséquence retenir de l'épistémologie bachelardienne mais aussi sur ce que l'on doit aujourd'hui y rectifier du point de vue du statut épistémologique des simulations. Notamment, nous proposerons l'idée selon laquelle l'intuition n'est plus à opposer à la raison discursive, sous prétexte que l'intuition serait fondamentalement esseulante et ferait fatalement violence à la rationalité en se présentant à la fois comme évidente et comme intransmissible. Si tel était le cas, elle se doublerait en effet toujours d'un recours au principe d'autorité. Mais si une intuition, une image peut être co-construite, c'est qu'elle est communicable et qu'elle donne lieu à un sens commun partageable et vérifiable, du second genre il est vrai, sans pour autant user de l'autorité d'une révélation intime, impartageable et esseulante.

Le point et la surface

Mais, tout d'abord, de quelle manière Bachelard se représente-t-il la nécessité de placer l'intuition au second plan dans la connaissance ? Si l'on se réfère au tout début de son œuvre, c'est par l'image du point et de la surface qu'il explicite cette nécessité. L'image physiologico-géométrique du contact entre un point et une surface intervient en effet dès les premières pages de « La connaissance approchée ». Elle sert à rendre sensible le postulat bachelardien de l'action abstractive primitive que recèlerait tout rapport cognitif d'un esprit au concret :

« Les barrières qu'un concret doit franchir pour se signaler à l'esprit sont si diverses, les points de vue sélectifs si hétérogènes (physique, chimique, moteur) que tout s'efface devant le dernier effort du processus sensible, devant le mouvement naissant qui réveille - ou qui

⁴ Comme Bachelard semble en avoir entraperçu la possibilité, mais non sans en revenir par la suite à sa critique du positivisme : « Il y a en effet une différence épistémologique bien remarquable entre certains *symboles* qui ne tendent qu'à traduire intuitivement des connaissances générales et certains *modèles* dans lesquels se manifeste une connaissance plus réaliste, plus particulière. De même la tendance objectivante de l'esprit rationnel est si forte que dans les mathématiques qui visent à la prolifération de l'abstrait, il n'est pas impossible de déceler des structures qui renvoient à une étude objective. Il y a ainsi place pour une expérience post-abstractive », *ibid.*, pp. 10-11. Mais Bachelard ne vise qu'à contrer ici les thèses portant sur l'acquisition progressive de la raison abstractive par l'observation de la nature. Et il récuse, en passant, le fait qu'un modèle, tout en étant réaliste, puisse avoir d'autres fonctions que particulières c'est-à-dire directement opérationnelles. Or, selon nous, la simulation n'offre plus seulement cette capacité de ramener des considérations abstractives au cas particulier et de prêter à un calcul opérationnel.

construit - la cellule nerveuse. En gros, on peut dire que cette action fait correspondre une surface sensorielle à un point musculaire. Devant un monde prodigieusement multiple, *un* mouvement. Toute la valeur représentative de l'abstrait est dans cette correspondance mathématique surface-point. Si l'on osait pousser la comparaison jusqu'à la limite métaphysique, on pourrait dire que le seul fait que l'esprit est un centre devait entraîner le caractère abstrait de la connaissance. On n'a qu'un cerveau pour penser à tout.

Ce mouvement naissant, c'est donc, à notre point de vue, le concept minimum, le premier schéma, le premier signe. C'est en associant de tels signes que la micro-psychologie devrait tenter de retracer les étapes de la connaissance [...] L'impulsion élémentaire qui nous paraît l'origine la plus lointaine de l'idée générale se stabilise par résonance tout en conservant assez de liberté pour servir à l'adaptation », (Bachelard, G., 1928, 1973), pp. 17-18. C'est l'auteur qui souligne.

C'est donc sur le modèle⁵ de l'assimilation fonctionnelle des excitations que subit toute cellule nerveuse que Bachelard conçoit le rapport dialectique élémentaire entre l'esprit et le concret. A l'échelle de la cellule, l'assimilation fonctionnelle travaille déjà à niveler les différences entre les réactions aux excitations singulières successives pour constituer l'« abstrait élémentaire » (ibid., p. 18). C'est en ce sens qu'elle abstrait et généralise. Le point ne peut représenter une surface en la répliquant telle quelle : il doit donc abstraire d'elle une « idée générale », un concept qui se caractérisera par sa stabilité au regard des « aberrations de l'excitation » autour de la moyenne. Dans cette perspective physiologique, la connaissance primitive n'apparaît donc pas comme un donné singulier, comme une intuition ou une sensation élémentaire mais comme un « abstrait élémentaire ». La stabilité première, résultat d'une oscillation amortie - cette image de l'oscillateur traverse tout l'ouvrage -, donne lieu à un concept qui se définit donc par son caractère essentiellement approché et nivelant au regard des variations singulières. La première connaissance est en cela adaptative et abstractive. Elle est à ce titre purement conceptuelle.

Il résulte également de cette image physiologique que le concept n'est cependant pas théorique - le terme de théorie n'apparaît pratiquement jamais dans l'ouvrage -, ce qui serait faire preuve d'idéalisme : il n'est pas une image statique simplifiée ; il est pleinement acte puisqu'il est homogène à une « impulsion », à une réaction organique face à une excitation⁶. Le concept ne se définit pas par ce qu'il figure mais par ce qu'il fait : il condense, abstrait, résume et moyenne. Le postulat de Bachelard est donc ici ce qu'il appelle plus loin (p. 101) la « dialectique naturelle de

⁵ Nous ne reviendrons pas ici sur les critiques qui ont été souvent formulées à l'encontre de la manière proprement bachelardienne d'exprimer une épistémologie en recourant préférentiellement à des métaphores scientifiques et naturalistes. Sur ce point, on peut se référer à (Lecourt, D., 1972). Si l'on voulait aujourd'hui interpréter ce modèle métaphorique au pied de la lettre, un tenant du programme de « naturalisation de l'esprit » - par exemple - pourrait néanmoins objecter que Bachelard se rend ici coupable de confondre abusivement différents ordres de grandeurs : celui de la cellule avec celui du cerveau ou du système nerveux central. Or, Bachelard est censé appartenir à ceux qui ont très tôt pris conscience de la difficile voire de l'impossible réduction des ordres de grandeurs les uns aux autres. Nous serions donc là en face d'une incohérence doctrinale. D'autre part, du point de vue de l'histoire de la philosophie, il y aurait certes lieu de retracer la genèse de tels modèles épistémologico-physiologiques chez Condillac, chez les idéologues, chez Maine de Biran puis chez Nietzsche et Bergson, par exemple. Notre objectif étant de mieux comprendre le sens de la priorité donnée à l'acte abstratif par Bachelard, ce n'est pas ici le lieu de revenir sur ces analyses critiques ou historiques.

⁶ Il est à noter que ce sera par des termes très proches que Bachelard s'expliquera, en 1939, la poésie des Chants de Maldoror : l'œuvre de Lautréamont est une poésie de « l'excitation, de l'impulsion musculaire » (Bachelard, 1939, 1986), p. 14. C'est pourquoi, « elle n'est en rien une poésie visuelle des formes et des couleurs », ibid., p. 14. Plus loin, Bachelard précise : « Les formes animales y sont mal dessinées. En fait, elles ne sont pas *reproduites* ; elles sont vraiment *produites* », ibid., p. 14. Ce qu'il appellera donc plus tard la « fonction de l'irréel » - in (Bachelard, G., 1957, 1994), pp. 16-17, c'est-à-dire l'imagination poétique, n'est pas, elle-même, une faculté de figurer, de représenter, de reproduire ou de recombinaison du déjà-vu ; elle est une fonction, une action libre, l'action de transfigurer par les mots et donc d'anticiper le réel. En ce sens, l'analyse de l'imagination poétique n'est pas si éloignée de l'analyse de la conceptualisation scientifique comme action formelle et « musculaire ». De plus, cette « imagination » récusait elle aussi l'idée d'une « image comme un simple substitut d'une réalité sensible », ibid., p. 15.

l'esprit »: la raison est en mouvement, la raison est un mouvement⁷. Elle est le mouvement de stabilisation autour d'un état statique ou d'un état périodique entretenu. Elle procède en effet de manière dynamique, à la façon soit d'un oscillateur entretenu cherchant son état de résonance, soit d'un oscillateur amorti et s'orientant, par des aller et retour amortis, vers son point stable final. Une telle approche du concept permet d'échapper à toute forme d'idéalisme car le rôle de l'hypothèse théorique y est de prêter essentiellement à vérification donc toujours finalement à action.

Ainsi le concret-surface se « signale »-t-il à l'esprit-point, mais nulle part ne se présente à lui. Il fait toujours signe ou « signal » mais jamais corps. C'est en ce sens que nous pouvons parler d'un iconoclasme propre à l'épistémologie bachelardienne : le schéma ou le concept n'est pas même une icône du réel, alors même que justement le réel est - selon les qualifications qu'il reprend à Meyerson - l'« inconnu inépuisable » (p. 13), l'« irrationnel » (pp. 160 et 177)⁸.

Or, si l'on ne peut assimiler cette épistémologie dynamique et dialectique à la philosophie de Hegel, elle ne nous semble cependant pas pouvoir échapper à ce qui guette toute pensée qui se veut dialectique par principe : l'homogénéisation optimiste du plan de l'être et de celui du concept et du langage. Nous proposons de nommer *linguisticisme*⁹ cette attitude épistémologique qui tend à nous faire interpréter tout rapport cognitif en termes exclusifs de langage, cela parce que tout donné serait au fond toujours déjà *du langage*, ou tout au moins parce que la vérité de tout donné ne se manifesterait que médiatement *dans le langage*. En l'espèce, avec cette image physiologico-géométrique du point musculaire et de la surface sensorielle, Bachelard arrive à faire naître ensemble le dire et l'être, pourvu que le dire soit conçu comme un faire et que le théorique soit alors remplacé par l'opérateur, l'actif. Comme conséquence du linguisticisme, tout rapport cognitif avec le réel doit alors être pensé sur le modèle du rapport dialogué et linguistique avec autrui. Le recours à la « dialectique » chez Bachelard permet en fait de maintenir tout rapport cognitif dans une interprétation étroitement linguisticiste tout en donnant l'impression d'ouvrir la théorie de la connaissance kantienne à la complexité des pratiques scientifiques réelles.

Mais, comme par ailleurs, dans cette première épistémologie bachelardienne, le réel est pensé à l'image d'un dieu transcendant - incompréhensible, infini, irrationnel -, on comprend du même coup qu'une telle théorie de l'acte de connaître puisse en même temps satisfaire à l'interdit biblique de l'image reproductrice. Marie-José Mondzain a rappelé combien la posture iconoclaste, lors de la querelle byzantine des images, trouvait toujours son issue dans la survalorisation de l'agir¹⁰. Or, nous avons dit combien il était important pour Bachelard que le concept soit considéré comme un *acte*. Selon nous, cette survalorisation de l'agir jouerait de même dans toute l'épistémologie bachelardienne, et, dans une certaine mesure, dans toute l'épistémologie française depuis lors¹¹. Il n'y

⁷ Bachelard a indiqué plus tard combien cette dialectique ne se résume pas à la dialectique de Hegel qualifiée de dialectique *a priori*. En effet, cette dernière ne se prêterait pas à l'exercice quotidien et toujours renouvelé de la liberté. Voir le chapitre « Le surrationalisme », in « L'engagement rationaliste », p. 8.

⁸ « La science fait face à l'irrationalité fondamentale du donné », *ibid.*, p. 160. « Une telle résistance aux actes vraiment simples et clairs de l'esprit rappelle l'irrationalité foncière du donné [...] M. Meyerson a montré que le réel était l'irrationnel en soi ... », *ibid.*, p. 177. Il faut noter que dans le livre de 1949, Bachelard récusera cette thèse meyersonnienne en la rattachant au côté empiriste de son axe des épistémologies. C'est le réaliste convaincu qui affirmera que le réel est à penser comme irrationalité, non pas le tenant du rationalisme appliqué ou du matérialisme rationnel. Or, à cette époque-là, la thèse de Meyerson ne tiendra plus pour Bachelard, parce qu'il disposera d'un nouvel argument qui lui permettra de radicaliser son rationalisme : l'idée qu'un fait scientifique n'est pas ce que l'on « a bien vu » mais ce que l'on « aurait dû prévoir », (Bachelard, G., 1949, 1962), p. 3. Il s'autorisera ainsi à opposer le temps logique et le temps chronologique en déshistoricisant radicalement l'action rationnelle : en tant que modèle chronologique, le modèle physiologique du point et de la surface ne pourra donc plus valoir.

⁹ Plus précisément, serait « linguisticiste » toute épistémologie ou toute théorie de la connaissance qui ne verrait dans tout rapport cognitif, toute activité ou toute représentation scientifique que le *fonctionnement formel ou bien concret d'un système linguistique*, que ce soit dans une perspective dialectique, syntaxique, sémantique ou pragmatique.

¹⁰ (Mondzain, M.-J., 1996), p. 98.

¹¹ Au cours de nos recherches, ce constat plus général nous est apparu lorsque, dans une perspective d'histoire des sciences, nous avons cru pouvoir utiliser l'actuelle épistémologie française de l'informatique pour essayer de conceptualiser et périodiser précisément l'histoire récente des usages de l'ordinateur. Mais, le linguisticisme de principe et la passion pour l'informationnel, le relationnel et le circulationnel y sont ancrés à un tel point qu'il est impossible

aurait donc pas d'autres choix : que Dieu soit Yahvé, la nature¹² ou bien encore le réel, une posture iconoclaste présentera toujours la connaissance comme une signalétique et privilégiera toujours la pratique ou l'action – qu'elle soit pieuse, vertueuse ou surveillée – sur la contemplation passive d'une image ou même d'une icône¹³. Certes, c'est aussi parce que Bachelard voulait échapper à l'idéalisme de son temps – mais aussi au pragmatisme anglo-saxon qu'il identifiait à une sorte d'idéalisme – et parce qu'il voulait également prendre le contre-pied des thèses bergsoniennes sur le caractère figé des représentations scientifiques qu'il rejoignit ainsi une position épistémologique tout à la fois dynamique et iconoclaste. C'est encore parce qu'il voulait rendre compte de la construction expérimentalo-mathématique des concepts, si caractéristique de la microphysique du début du 20^{ème}

d'expliquer par les concepts que mobilise cette épistémologie post-bachelardienne la nouveauté des pratiques de simulation sur *computer* que nous évoquons ici. Notre regard critique va donc au-delà de Bachelard sur ce point précis. Il serait en effet tout à la fois injuste et aberrant de reprocher à la seule épistémologie de Bachelard de n'avoir pas tous les moyens de penser une pratique que Bachelard n'a pu connaître en son temps.

¹² Nombre d'épistémologues contemporains semblent plus ou moins explicitement partir du principe métaphysique – spinoziste si l'on veut – que la nature est dieu. Michel Serres est l'un des seuls à l'avoir exprimé sans détours, en pleine conformité avec son iconoclasme « hermétique » : « Je crois, parfois dans le Dieu de mon père, athée converti soudain au milieu des obus dans le champ de Verdun, je crois, souvent, aux dieux de mes plus vieux aïeux, je sais bien, à part moi, qu'ils remplissent l'espace ; qu'ils constituent le monde ; surtout : qu'ils soudent la société [...] Je crois surtout, je crois essentiellement que le monde est Dieu, que la nature est Dieu [...] Tout est Dieu sauf celui qui l'écrit, qui en lâche la plume parmi les pleurs », (Serres, M., 1991), pp. 230-231.

¹³ Ces indications sommaires semblent confirmer dans une perspective nouvelle – celle d'une histoire de l'épistémologie et non pas seulement d'une histoire de la philosophie politique ou morale – la thèse désormais classique de la « sécularisation » de la culture judéo-chrétienne. Rappelons les termes du débat. En 1949, après les travaux de Max Weber et Carl Schmitt, Karl Löwith formule de façon radicale la thèse selon laquelle, entre le 17^{ème} et le 18^{ème} siècle occidental, « le progrès remplaça la Providence » (Löwith, 1949, 2002), p. 136. Odo Marquard (1973, 2002) reçoit pour partie les arguments de Löwith, mais en insistant davantage sur le fait que c'est bien la Nature – avec, en première ligne, la nature humaine – qui remplace Dieu dans la position ambiguë de puissance à la fois tutélaire et effrayante. Cet effroi face à la nature divinisée aurait ainsi suscité en retour la promotion de la philosophie dialectique – car philosophie de la médiation linguistique systématique – de Hegel et de Marx (ibid., p. 36). Ainsi, pour Marquard, le structuralisme à la française n'aurait été qu'un « palier réduit » de la philosophie de l'histoire sécularisée, c'est-à-dire une forme dégradée, en forte contradiction interne avec la philosophie dialectique mais de ce fait fortement déterminée par elle (ibid., pp. 16-17). C'est là que nous ajouterions l'idée selon laquelle la divinisation problématique de la Nature s'est doublée, dans les philosophies épistémologiques d'inspiration dialectique et/ou structuraliste, et cela de façon assez logique, d'une reprise de l'iconoclasme biblique, en particulier dans l'après-guerre. Qu'elle chante l'avènement des « réseaux » informatiques ou qu'elle y voit de nouvelles idoles, d'un côté comme de l'autre, l'épistémologie aurait ainsi tort de se croire débarrassée de la matrice biblique. Avec de telles considérations, nous pourrions cependant tomber sous le coup des critiques très fines de la thèse de la « sécularisation » telles qu'elles ont été formulées par Hans Blumenberg (1966, 1999) : ainsi peut-être notre perspective cède-t-elle au « substantialisme historique » (ibid., p. 37) propre aux tenants de la théorie de la sécularisation comme Löwith, par exemple. Ce substantialisme consisterait à partir du principe contestable – car anhistorique et finalement platonicien voire judéo-chrétien en son cœur ! – qu'il y aurait des constantes cachées en histoire culturelle, constantes formant la substance durable des choses historiques et de leurs diverses expressions plus ou moins adéquates au fil du temps. Mais si les tenants de l'interprétation du cours de l'histoire par le jeu de la sécularisation se rendent coupables de commettre ainsi un cercle logique – ils retrouvent en effet ce qu'ils ont toujours déjà supposé, mais sous une autre forme : la substance permanente de l'histoire (ibid., p. 19) – Blumenberg nous paraît se rendre tout autant coupable d'un tel cercle puisqu'il part du principe – proche de celui de Cassirer (1910, 1977) – selon lequel le caractère fonctionnel du langage prime sur son caractère substantiel. Ainsi il travaille à débusquer l'« idéologie » (op. cit., p. 74) – l'idolâtrie dirions-nous – qu'il suppose à l'œuvre dans l'idée de sécularisation en affirmant que la constance d'une fonction n'autorise pas à penser la constance d'une substance cachée derrière cette fonction (ibid., p. 74). Plus loin – autre signe de son linguisticisme de principe –, Blumenberg explique que cette erreur serait due à un usage idolâtre de la langue (ibid., p. 97). Ainsi en serait-il du terme « infini » utilisé pour Dieu, puis pour la nature (ibid., chapitre 7) : on aurait donc tort de croire que la nature a directement hérité de Dieu en recevant ses attributs essentiels. Il nous exhorte ainsi à porter une attention plus soutenue à la logique économique et fonctionnelle du signe plutôt qu'à ce que ce dernier est supposé travestir substantiellement puisque ce serait une erreur de penser qu'il réinvestit ou travestit quelque chose. Mais dès lors qu'il s'appuie sur un linguisticisme non problématisé, Blumenberg serait en fait victime de la sécularisation – plus spécialement la sécularisation de l'iconoclasme – qu'il essaie pourtant de délégitimer ! Sans vouloir trancher ici sur ce point difficile car nécessitant beaucoup d'érudition, permettons-nous de signaler que le débat nous semble donc encore bien ouvert. Il se pourrait d'ailleurs que la question de la sécularisation se pose plus directement dans l'histoire des théories de la connaissance – avec la reconduction de l'iconoclasme biblique au cœur de l'épistémologie – que dans l'histoire des théories politiques et des philosophies de l'histoire – avec leurs supposées reconductions sécularisées des concepts de salut et de Providence.

siècle¹⁴, cela à l'encontre de toute construction uniquement mathématique des concepts scientifiques telle que Kant l'avait préconisé pour toute science, sur le modèle de la mécanique rationnelle. Davantage, il voulait pouvoir rendre compte de cette évolution même dans les styles de construction des concepts scientifiques. Dès lors que la construction purement mathématique et intuitive des concepts lui semblait appartenir à l'histoire révolue de la raison scientifique, il ne pouvait donner qu'un rôle négatif à l'intuition entendue comme donnée immédiate du singulier ou comme lieu d'une production imaginative réglée par un schème toujours fixe.

La cohérence et la cohésion

Dans le même ouvrage de 1928, Bachelard a rendu compte de ce qu'il appelait « l'hétérogénéité des domaines » de la mathématique (ibid., p. 191) : c'est même de ce non recouvrement et de l'impossible traduction mutuelle des formalismes mathématiques qu'il a tiré la preuve que toute connaissance, même mathématique ne peut être qu'approchée. En effet, cette hétérogénéité des « corps » de la mathématique fait qu'on travaille toujours à approcher des « êtres » définis nominalement dans une axiomatique par des procédures données dans une autre axiomatique : tel est le cas pour les nombres irrationnels que l'on approche indéfiniment par des rationnels. De même, la matière qui résiste à la science physique produit aussi cet effet de réalité¹⁵ - il y a ainsi une fonction « objet » - parce qu'elle est intrinsèquement hétérogène : elle est « feuilletée ». Et c'est cette coïncidence dans l'hétérogénéité même qui expliquerait finalement la mystérieuse adéquation entre mathématique et réalité physique, à condition qu'on surveille cette coïncidence dans le détail et dans chaque ordre de grandeur.

Or, Bachelard n'envisage jamais que l'on puisse faire coexister ces domaines hétérogènes à cause du simple fait qu'ils sont mathématiquement contradictoires. Cette impossibilité est aussi pour lui une occasion supplémentaire de confirmer la thèse du dynamisme dialectique de la connaissance scientifique : la cohérence doit primer puisque la dialectique est la logique de l'être - ou de l'esprit cherchant à connaître ou plutôt encore du rapport esprit-réalité - et non une logique de l'apparence et du discours. Ce serait donc un non-sens de neutraliser cette dialectique agissante - parce que tout concept mathématique agit et interagit - en forçant ces concepts à coexister dans une image

¹⁴ Il nous paraît essentiel de rapporter l'épistémologie de Bachelard à la science de son temps et particulièrement à celle qu'il connaissait. Sur ce point, l'apport d'un historien des sciences est précieux : Giorgio Israel (1996) montre par exemple combien la physique théorique des années 1905-1930 – que, fautivement, Bachelard appelle encore « physique mathématique », in (1931-1932, 1970), p.24 - a effectivement développé une construction de concept d'un style très nouveau où l'expérimentation et l'hypothèse théorique ont été plus étroitement liées que jamais. Mais il rappelle aussi que cette physique s'est vue aujourd'hui - depuis les années 1950 et l'avènement du *computer* - rattrapée par la physique mathématique issue de la mécanique classique et des travaux de Poincaré : c'est dans le domaine de la modélisation mathématique qu'elle triomphe de nouveau aujourd'hui, et plus seulement en physique, mais également en biologie et en sciences humaines. Il ne nous paraît donc pas déraisonnable de parler de nouveau, dans ce cas, de construction mathématique de concepts, faute de quoi le vague du vocabulaire dialectique risque de jeter une fois de plus l'épistémologie dans la confusion et de satisfaire à bon compte en donnant à voir - de façon certes irréfutable - de l'abstrait-concret en toute pratique scientifique. Nous n'ignorons pas combien notre tentative de ressaisir la philosophie des sciences dans son histoire même, aux côtés de l'histoire des idées, des sciences mais aussi des religions, contredit le projet principal de Bachelard très proche en cela du programme de « reconstruction » lakatossien : « L'effort philosophique que nous tentons, répétons-le en toute occasion, sur tous nos exemples, consiste précisément à rendre à l'organisation rationnelle son indépendance à l'égard de l'histoire. Toute pensée humaine peut heureusement être refaite ; le rationalisme recommence, à chaque découverte, toute sa pensée. Il ne méconnaît pas sa propre histoire, mais il la récrit, il la réorganise pour en découvrir la véritable efficacité », (Bachelard, G., 1949, 1962), p. 199. On pourrait faire un mauvais procès à Bachelard en lui objectant qu'il s'autorise ici ce qu'il interdit aux idéalistes : chercher à fixer une représentation définitive de l'épistémologie. Mais nous préférons penser que ce serait en quelque sorte par fidélité à Bachelard qu'il faudrait le dépasser sur ce point en laissant l'histoire des sciences juger rationnellement de son épistémologie, puisque lui-même nous a par ailleurs commandé de penser l'épistémologie dans sa fragmentation et ses évolutions.

¹⁵ Dans cette perspective, être réel c'est seulement résister à la schématisation rationnelle, puisque Bachelard se réclame d'un « réalisme sans substance », (Bachelard, G., 1928, 1973), p. 298.

hétéroclite et incohérente. La possibilité, pire : la pertinence scientifique d'une telle coexistence des contradictoires serait un véritable revers pour la perspective dialectique et iconoclaste.

Nous pensons que c'est pour cette raison même que, vingt-et-un ans plus tard, dans « Le rationalisme appliqué », Bachelard se livrera à un procès en irrationalité de tout recours à l'image au motif que cette dernière ne peut offrir qu'une cohésion mais non une cohérence.

Dans le passage précis auquel nous nous référons, Bachelard, après avoir rappelé que « la pensée rationnelle est une pensée de constante réorganisation » (Bachelard, G., 1949, 1962, p. 39), oppose la « pensée pensée » à la « pensée vécue ». La pensée vécue désigne le bloc compact de vécu qui s'impose à nous à chaque instant dans sa cohésion massive. Et la pensée pensée est celle qui recherche la cohérence et qui ne peut se satisfaire de simplement constater la pensée vécue. Penser n'est donc pas constater un paysage statique incohérent, c'est agir en raison pour déceler des cohérences : « aussi nous pouvons voir que la cohérence n'est jamais une simple constatation de la cohésion. »¹⁶ C'est alors l'occasion pour Bachelard de se livrer à une critique de toute représentation hétéroclite : « le rationaliste ne se donne le droit de se servir du *tous* qu'à l'égard d'entités qui ont été spécifiées dans un corps d'entités définies. »¹⁷ Ou bien encore : « dès qu'on s'oblige à ne considérer que des existences définies, on ne peut composer comme objets que des objets qui ont le même statut d'objectivation [...] On ne formalise pas l'incohérent. On ne peut faire monter à la coexistence ce qui s'éparpille en existences hétéroclites. »¹⁸ Et Bachelard de concéder que ce type de rapprochements hétéroclites vaut peut-être pour le poète surréaliste¹⁹, mais qu'il ne peut valoir pour le rationaliste qui, pour sa part, doit trouver une raison approchée donnant naissance à une cohérence.

Bachelard poursuit alors en indiquant qu'Husserl reste imprécis lorsqu'il considère qu'à tout donné correspond une « faculté de recevoir » : Bachelard lui préfère l'expression de « faculté de réceptionner », cette dernière indiquant bien que l'on doit « rejeter comme « inexistant » des matériaux mal définis, peu cohérés. »²⁰ Autrement dit, on ne peut recevoir que ce que l'on sait recevoir : la priorité du concept et du langage est donc ici encore manifeste, comme dans le livre de 1928²¹, mais elle n'est plus justifiée par une image naturaliste du type de celle du point musculaire et

¹⁶ Ibid., p. 40.

¹⁷ Ibid., p. 40.

¹⁸ Ibid., p. 41.

¹⁹ Ibid., p. 42.

²⁰ Ibid., p. 43.

²¹ On n'a pas assez noté ce qu'il y avait d'anthropomorphisme dans toute épistémologie dialectique. Claude Bruaire a maintes fois effleuré cette question dans ses ouvrages sur Hegel, sans en tirer toutes les conséquences critiques du point de vue de l'histoire de l'épistémologie. Voir par exemple (Bruaire, C., 1985, 1993), pp. 104-105. Ainsi que nous l'avons déjà suggéré, avec l'option dialectique, on projette sur la cognition les règles du rapport que les hommes entretiennent les uns avec les autres : un rapport linguistique et de dialogue. Or, nous ne voyons pas en quoi l'épistémologie contemporaine dépasse les obstacles épistémologiques élémentaires sur ce point lorsqu'elle se « dialectise » et qu'avec confiance elle nie par principe toute implication de l'intuition dans la construction des savoirs. En tant qu'anthropomorphisme, c'est encore, selon nous, une façon de projeter du connu humain sur de l'inconnu non humain : l'épistémologie néo-marxiste des modèles - avec Althusser, Badiou et Lecourt - puis structuraliste - avec Serres, le premier Granger -, la philosophie des graphies - avec Dagognet - ainsi que la sociologie des sciences - avec le programme fort - sont longtemps restées esclaves de ce linguisticisme de principe. Il s'agirait là d'un cas d'obstacle méta-épistémologique puisque interne à l'épistémologie. Or, il nous faut prendre conscience d'une des raisons principales pour lesquelles ces pratiques philosophiques d'après-guerre ont toutes convergé en manifestant la présence d'un véritable « esprit du temps » épistémologique : la peur du retour menaçant de l'idole et le désir farouche de voir se construire les savoirs sur une solidarité inter-humaine jugée plus primitive que toutes les intuitions intimes et dangereusement esseulantes du passé récent. Plus ou moins consciemment, ces épistémologies d'après-guerre ont donc toutes violemment réitéré l'interdiction biblique de l'objet substitutif afin de réintégrer en elles au plus vite la posture économique et iconologique judéo-chrétienne qui venait d'être frappée de plein fouet par le culte idolâtre propre aux nazis. Selon nous, le « démon de la théorie » (Compagnon, 1998) ou la « soif de formalisme » (Dosse, 1992) de l'après-guerre ne témoignerait pas seulement d'une « détestation de soi » (François Dosse) de la culture occidentale de l'époque - par ailleurs déjà confirmée par de nombreux historiens des idées (dont Philippe Breton et Serge Proulx (1989), en plus des deux auteurs précédents) - mais également et surtout d'une réassomption particulièrement forte de l'interdit biblique traditionnel par cette épistémologie européenne, et spécialement française, devant la récente violation d'un des tabous fondateurs de la culture. Frappée par l'ambivalence - longtemps déniée - de son rôle particulier, pendant la guerre contre les nazis, la culture française d'après-guerre, aurait ainsi travaillé à expier dans l'ombre cette culpabilité qui aurait alors fait symptôme théorique de n'être ni immédiatement reconnue ou verbalisée. Cette prise de relais se serait manifestée

de la surface sensorielle. C'est l'argument logique qui prime ici : l'intuition immédiate de l'hétéroclite, c'est-à-dire du non encore conçu, est réputée directement impossible. Elle est niée dans son existence même. En effet, dès les premières pages de ce livre de 1949, le fait brut a été totalement annulé - réputé nul - grâce à la thèse selon laquelle le fait n'est vu que parce qu'il est prévu dans une visée anticipante et cohérente. Le fait brut serait le fait hétéroclite, sans rimes ni raison : il n'est pas vu parce que non conçu. Dans les deux passages, l'inspiration est donc bien la même, mais non les arguments avancés. Cette conformité et cette différence nous paraissent révéler le fait que Bachelard tenait probablement plus que tout à minimiser le rôle de l'intuition en science, peu importe le moyen, et cela à cause de son aversion pour toute forme d'idéalisme.

Pourquoi nous sommes-nous particulièrement penchés sur ce dernier passage ? La réponse est simple : nous soutenons que la simulation informatique est précisément la mise en œuvre de cette coexistence d'êtres mathématiques hétéroclites que Bachelard avait voulu, en son temps, condamner, par fidélité à son épistémologie dynamique, dialectique, différentielle et de ce fait iconoclaste, à tout le moins anti-idolâtre. Observons en quoi une telle pratique pourrait rectifier l'épistémologie bachelardienne.

La simulation conçue comme une intuition

Notre objectif est de montrer que la simulation informatique n'est ni un modèle mathématique, ni un algorithme, ni un système de signes, ni une nouvelle écriture. Pour ce faire, nous n'évoquerons pas ici l'histoire complexe de la simulation²². Qu'il nous suffise de proposer une définition de la simulation informatique à la fois en compréhension et en extension. La définition minimale que nous retiendrons ici la décrit comme un traitement pas à pas par ordinateur soit d'un modèle mathématique sans solution analytique, soit d'un moteur d'inférence à base de règles : automates cellulaires, système multi-agents – SMA –, modélisation orientée objet – MOO. Nous avons recensé ailleurs (Varenne, 2001) les neuf différentes positions possibles, et déjà publiées dans la littérature, au sujet du statut épistémologique de la simulation. Nous avons également montré que prétendre en décider de façon univoque revenait au fond à exprimer une ontologie particulière et non seulement une épistémologie. Néanmoins, il est un fait que tous les articles ou ouvrages concernés

dans l'épistémologie par l'assomption singulière de l'anti-idolâtrie fondatrice par le sacrifice à la fois définitif et réitéré - donc compulsif et rituel - de l'intuition scientifique sur l'autel de l'abstraction mathématique. Ainsi, par moments, Bachelard dévoile-t-il cet iconoclasme en des termes dépourvus d'ambiguïté. Son épistémologie du non-psychologisme prend alors une forme sacrificielle plus radicale encore qu'avant-guerre : « Le formalisme peut, par exemple, dégénérer en un automatisme du rationnel [une iconolâtrie] et la raison devient comme absente de son organisation. Il faut alors qu'on sacrifie une victime à cette divinité lointaine [la raison], pour qu'elle se ranime dans les fumées de l'holocauste. Pour dire les choses plus simplement, il faut remettre dans les formules un peu de psychologie pour qu'un non-psychologisme en acte se développe en effaçant le psychologisme », (Bachelard, 1949, 1962), p. 13. Devant de tels *lapses* que nous ne pouvons ici qu'évoquer, aux côtés de celui - magistral - de « *coupure* » - ce terme, relayé successivement par Lacan, Granger, Althusser, Canguilhem, Foucault et Ricœur, à la grande différence de celui de « rupture », ne peut manquer d'évoquer une pulsion d'autoagression et d'automutilation propre à la culture théorique d'après-guerre - , il nous paraît plus qu'urgent d'en appeler aujourd'hui au développement d'une *psychanalyse de la connaissance épistémologique* qui, à bien des égards, nous paraîtrait aussi pertinente qu'une psychanalyse de la connaissance objective. Ce serait peut-être un moyen, si ce n'est de dépasser, tout au moins de déplacer l'anthropomorphisme propre à tout linguisticisme, y compris dialectique. Il nous faudrait également produire une psycho-histoire de l'épistémologie pour discerner et comprendre la signification des dénis réitérés et consensuels de la profondeur, du sujet et de l'intériorité, par exemple, dans l'épistémologie française contemporaine. Ces postures, en supprimant le lieu même d'une enquête psychanalytique, ne manifesteraient peut-être rien d'autre qu'une forme supérieure de déni. Serait ici déniée, par exemple, la façon dont l'épistémologie relaye aujourd'hui subrepticement le pouvoir biblique dans la reconduction d'un de ses interdits fondateurs. Or, l'inconvénient de tout déni est de nous vouer à la répétition stérile. Prenons donc garde qu'il n'en soit pas de même pour l'épistémologie contemporaine.

²² Voir (Galison, P., 1997) pour l'histoire de la simulation numérique en physique. Voir (Varenne, F., 2003a) pour une ébauche de cette histoire dans les sciences de la vie.

reconnaissent : l'utilisation croissante de la simulation comme substitut de l'expérimentation et non plus seulement comme procédure de résolution approchée d'un modèle théorique et mathématique. A quoi cela tient-il ?

A notre avis, deux types d'arguments peuvent être ici invoqués : les arguments pragmatiques et les arguments intellectualistes, ces derniers essayant de partir d'une réflexion sur la construction de concepts à notre époque où se développent des sciences computationnelles²³. En effet, si l'on veut d'abord s'appuyer sur une analyse pragmatique ou sociologique des pratiques de simulation, on pourra faire remarquer que les simulations sont souvent conçues comme des répliques assez fidèles des phénomènes et par lesquelles on ne vise pas à condenser l'information mais, au contraire, à en maintenir intégralement la richesse²⁴. On pourra aussi faire valoir le fait que les résultats de simulation donnent souvent lieu aux mêmes traitements statistiques que les expérimentations réelles, que ces résultats peuvent être réputés réfuter une théorie.

L'approche intellectualiste, en revanche, pourra faire valoir que cette parenté entre résultat de simulation et expérimentation réelle tient au caractère souvent non calculable des logiciels et des procédures utilisées : la plupart des logiciels d'aujourd'hui sont en effet eux-mêmes vérifiées statistiquement, donc « empiriquement », puisque les théorèmes mathématiques de limitation de la calculabilité – pratique – montrent que, passé un certain degré de complexité, un logiciel ne peut pas être vérifié pratiquement *a priori* par un autre, mais qu'il faut le faire fonctionner pour savoir s'il remplit sa fonction.

Un deuxième argument intellectualiste, plus précis, nous paraît pouvoir être formulé cependant. C'est le vocabulaire kantien qui nous y aidera. Qu'on veuille bien nous pardonner cette référence à l'heure où notre réflexion devrait porter exclusivement sur l'œuvre de Bachelard, mais cette nécessité même nous semble significative : notre essai d'argument ne nous semblera pouvoir s'inspirer que de la théorie kantienne de la connaissance car c'est là que nous trouverons des concepts suffisamment précis pour nous mettre sur la piste d'une explication du caractère paradoxalement expérimental et intuitif de l'actuelle simulation informatique²⁵.

Selon nous, en effet, on se condamne à ne pas comprendre le rôle que joue la simulation dans les sciences si on ne la conçoit que comme un discours, une écriture ou un langage. La simulation n'est pas un langage car ses signes en sont hétérogènes : cela veut dire que, de plus en plus, la simulation utilise différents formalismes mathématiques²⁶ qu'elle fait coexister d'une façon non mathématique, c'est-à-dire non réductible à une axiomatique commune. La simulation n'est pas un discours ni un langage non seulement parce qu'elle ne peut pas être résumée *en fait* – non calculabilité pratique – mais aussi et surtout parce qu'elle ne peut pas être résumée ni donc pensée *en*

²³ Il existe une physique, une chimie et une biologie computationnelles : leur principe commun consiste à ne plus immédiatement ni systématiquement rechercher des formulations mathématiques calculables pour théoriser, mais à s'appuyer sur la computation pas à pas – et à une échelle microscopique – pour faire construire à l'ordinateur des images – à échelle macroscopique – susceptibles de donner lieu à des prédictions ou à des expérimentations virtuelles. Voir, par exemple, le cas de la simulation dynamique moléculaire, in (EDP, 1999), mais aussi (Michalewicz, M.T., 1997) pour la biologie computationnelle.

²⁴ Ainsi, dans la lignée de la biométrie anglo-saxonne, le recours aux processus stochastiques ne témoignerait pas du fait que l'on assume le caractère approché de la connaissance mais au contraire d'un souci de la précision et du détail dans la réplique. Pour ce point de vue, voir (Chorafas, D. N., 1966, pp. 32-33). En fait, la question de savoir si l'on raconte fictivement mais efficacement le réel, ou si on l'approxime ou bien encore si on le réplique avec des processus stochastiques est directement liée à l'ontologie et à la théorie de la connaissance que se fixent *volens nolens* les scientifiques. Voir sur ce point (Galison, P., 1997) et (Varenne, F., 2001). Le polyphilosophisme dont parle Bachelard est bien à l'œuvre ici. Mais on ne voit justement pas pourquoi il faudrait privilégier *a priori* une épistémologie ou une ontologie dialectique en parlant de connaissance approchée dès qu'il s'agit d'expliquer l'introduction du formalisme des probabilités, par exemple. Voir (Bachelard, G., 1928, 1973), chapitre VIII. Le polyphilosophisme n'est donc pas seulement une polyépistémologie mais il est aussi et peut-être d'abord – qu'on le veuille ou non – une polyontologie. Sur ce point, si l'on veut être rigoureux, l'ontologie dialectique elle-même – qu'elle soit du sujet, de l'objet ou de la relation sujet-objet – n'a pas à prévaloir par principe sur les autres.

²⁵ Selon nous, l'épistémologie ne devrait d'ailleurs pas craindre de revenir, d'une philosophie du concept et de la conception, à une philosophie de la conceptualisation, aujourd'hui nécessaire si l'on veut penser la simulation.

²⁶ Avec de moins en moins de préférences *a priori*, notamment pour le formalisme intégral-différentiel classique.

droit à cause de l'hétérogénéité de ses outils conceptuels. L'apport de la simulation n'est pas seulement dû aux limites pratiques ou théoriques de la calculabilité de certains problèmes mathématiques. Il est également dû au fait que l'infrastructure informatique²⁷ autorise que se côtoient des formalismes tout à fait hétéroclites, c'est-à-dire non réductibles les uns aux autres et non justiciables d'une même axiomatique. Ce qu'il faut comprendre, c'est que *la simulation utilise tout autrement les mathématiques que les modèles mathématiques*. Elle objective des concepts formels et les fait coexister à l'intérieur d'un ou de plusieurs autres formalismes. La simulation donne lieu à l'histoire d'un écosystème rempli d'êtres mathématiques composites et hétéroclites. Elle déploie une trajectoire dans la dynamique singulière de cet écosystème, sans que cette trajectoire soit à première vue simplifiable en celle d'un système dynamique correctement formalisé et mathématisé. Cet écosystème est certes fait d'êtres mathématiques, mais il n'est pas mathématisable en tant que totalité. Ainsi le programme de simulation de la croissance des plantes AMAP du CIRAD²⁸ fait « pousser » des arborescences sous forme de graphes - topologie ou théorie des graphes - dont les rameaux sont eux-mêmes contrôlés par des processus stochastiques - lois de probabilité - et dont le déploiement virtuel s'effectue dans l'espace tridimensionnel géométrique usuel - géométrie. A la différence des modèles mathématiques, les simulations font donc coexister plusieurs formalismes et traitent toutes les mathématiques comme des mathématiques descriptives. Les simulations procèdent donc de ce que nous pouvons appeler un *polyformalisme intrinsèque*.

Précisons encore. Qu'est-ce qui permet la promotion de cette coexistence bricolée et hétéroclite entre divers êtres mathématiques ou informatiques ? *La synchronisation par le traitement pas à pas*. A chaque pas du traitement, les formalismes se côtoient et communiquent. C'est même leur seule façon de s'homogénéiser entre eux : par instants successifs, par échantillonnages. Le pas à pas ne sert donc plus seulement à traiter l'incompressibilité algorithmique - cas de la simulation *numérique* - mais aussi et surtout l'hétérogénéité formelle des objets coexistants - cas de la simulation *informatique*. La simulation informatique n'est donc pas un langage parce que les signes y sont réglés par diverses axiomatiques, d'ailleurs parfois contradictoires entre elles. C'est aussi la raison pour laquelle une simulation ne peut être exprimée mathématiquement. A ce titre, elle n'a pas de grammaire, *a fortiori* pas non plus de grammaire générative, *elle n'est pas un système de signes*. Dans ces conditions, le rôle que joue une simulation peut être celui d'une simple reproduction de la réalité, et ce jusque dans ses détails – à une certaine échelle bien sûr. Elle n'est donc pas une écriture à visée abstractive, mi-abstraite/mi-concrète, qui permettrait d'exprimer une capacité à formaliser dont on disposerait déjà et que l'on délèguerait ensuite à la machine. C'est précisément parce qu'elle ne peut donner lieu à une *construction mathématique des concepts* au sens de Kant.

En effet, face au résultat d'une simulation informatique, nous n'avons pas immédiatement de concept mais nous avons une intuition au sens de « donation sensible » - s'il s'agit d'images ou d'objets virtuels - ou même, si l'on préfère, une intuition seulement au sens de « donation d'un objet singulier » - selon le sens étendu que Jaakko Hintikka (1980) donne à l'intuition kantienne. Il n'est en effet même pas besoin de dire que le résultat d'une simulation est effectivement sensible, visible, pour dire que c'est une intuition au sens de Kant. Selon Hintikka, que nous suivons ici, la doctrine de Kant n'impose pas intrinsèquement que l'intuition humaine ne soit que sensible : elle laisse ouverte la possibilité d'une intuition étendue sans qu'elle en devienne pour autant intellectuelle. Il suffit dès

²⁷ C'est notamment la cas de la Simulation Multi-Agents et de la Simulation Orientée-Objet. Voir (Hill, D. R. C., 1996). Dans cette dernière, en particulier, l'encapsulation de propriétés hétérogènes tend à « réifier » - selon l'expression désormais courante reprise notamment par Alexis Drogoul (2002) - les objets modélisés, en en conservant une description hétéroclite globale. Cela permet au modélisateur de se dispenser de les condenser en propriétés uniformément formalisées. Malgré sa reconnaissance d'une réalité physique « feuilletée », nous croyons que Bachelard a trop été fasciné par l'entreprise réductionniste de la microphysique du début du 20^{ème} siècle pour accepter une approche globale - positiviste pour le dire vite - du type de celle que la modélisation mathématique purement phénoménologique mettra pourtant en œuvre dans les années 1950-1960. Or, c'est parce que les sciences, avec le développement de la modélisation mathématique dans l'après-guerre, en sont passées par un certain renoncement à l'idéal réductionniste, que la greffe de la simulation numérique a pu prendre, par la suite, en autorisant la réhabilitation inattendue de notre regard intuitif « grandeur nature », ou à « échelle humaine », sur le monde et que les sciences non-physiques ont pu, en retour, en bénéficier. Le positivisme appliqué n'a donc pas eu que des effets positivistes.

²⁸ Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement.

lors de préciser que par le terme d'« intuition », on entend toute forme de donation à l'esprit de quelque chose qui se donne d'emblée comme un apax. Cela nous semble bien être le cas de tout résultat de simulation. Or, de cette intuition, nous n'avons pas de concept car nous n'avons pas de schème pour appliquer un concept sur le matériau empirique divers qui nous est donné par la simulation. C'est-à-dire que nous ne disposons pas de la règle qui permet de rassembler sous un concept le divers de cette intuition élargie donnée par la simulation. Et cela nous le savons de façon certaine car les axiomatiques utilisées sont formellement irréductibles voire contradictoires, donc non co-conceptualisables. Ce dont nous avons l'intuition est donc ici par nature ce qui est inconceptualisable ou inconcevable *a priori* – c'est-à-dire au moyen des seuls formalismes dont on dispose à l'heure où l'on a recours à cette simulation précise²⁹. En conséquence, il n'y a pas de représentation *a priori* dans notre intuition qui nous permettrait de prédire ce que donnera une simulation. C'est pourquoi l'on peut dire que la simulation ne donne pas lieu à une construction mathématique *a priori*. Si la simulation nous donne à construire quelque chose de conceptuel en sortie, ce ne peut donc être un concept *a priori*, mais seulement un concept empirique.

On pourrait nous objecter ici que la façon générale de procéder propre à tous les schèmes - le « schème transcendantal » - est temporelle et qu'elle est donc parfois échantillonnante comme peut l'être une simulation. En effet, cela est vrai du fait même que le déploiement d'un schème est toujours lié au temps - tout schème se ramène à une détermination particulière de l'intuition temporelle, l'intuition du temps - et se produit parfois pas à pas, notamment dans la construction de tous les concepts des nombres par exemple. Nous répondrions qu'il faut pourtant, selon Kant, que la règle précise - le schème - de l'imagination transcendantale demeure *identique* au cours de la synthèse pas à pas qui se produit par elle, ce qui n'est essentiellement pas le cas de la simulation informatique, comme nous l'avons dit, même si effectivement elle est construite pas à pas, à l'instar de certains concepts *a priori* disposant d'un schème.

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

Ainsi, nous avons vu qu'une simulation se donne comme une intuition comportant du divers intuitif - présenté comme un écosystème complexe et singulier – que l'on a du mal à embrasser d'un seul coup d'œil de l'esprit. Or, s'agit-il ici de la même intuition que celle des mathématiciens ? Le mathématicien Georges Bouligand avait déjà thématiqué l'idée que l'intuition mathématique allait désormais bien au-delà du cadre étroit dans lequel Kant l'avait enserrée. C'est pourquoi il parlait d'intuition prolongée. On connaît par ailleurs la fécondité et la finesse des débats qui ont tourné autour de l'intuitionnisme mathématique au début du 20^{ème} siècle (Largeault, 1992). Si Kant faisait coïncider les deux - intuition sensible et intuition mathématique *a priori* -, ne nous faudrait-il pas aujourd'hui et en revanche parler d'une « intuition élargie » d'un autre type que celle que nous proposent les mathématiques contemporaines ? Si tel n'était pas le cas, on devrait toujours considérer que la simulation est une forme particulière de construction valable d'objets mathématiques, dans une perspective constructiviste. La simulation serait donc conceptuelle car de nature purement mathématique. Il suffirait alors de reprendre la doctrine kantienne en élargissant les cadres de son intuition *a priori*, en en niant le caractère transcendantal et anhistorique, cela afin d'intégrer la simulation dans l'histoire des mathématiques. Cela ne nous semble pas être le cas. L'intuitionnisme mathématique de Brouwer, par exemple, visait un mode de construction, supposé le plus valable, des objets mathématiques pris un à un, dans leur spécificité axiomatique et générique. C'était encore une thèse qui visait le règlement de la question de la validité des démonstrations dans un cadre

²⁹ Sans préjudice d'une future modélisation voire théorisation effectivement condensante du phénomène reconstitué. Tel a d'ailleurs bien été le cas pour les simulations de croissance des plantes d'AMAP : en 2001, les chercheurs du CIRAD/AMAP et de l'INRIA ont simplifié leur logiciel en trouvant les algorithmes qui donnaient les mêmes résultats - presque aussi riches en informations - que les simulations primitives. Voir (Nosenzo, R. *et al.* 2001). Notons qu'une telle condensation n'eût sans doute pas été possible sans le passage par des expériences virtuelles sur simulations, c'est-à-dire sans la version antérieure du logiciel.

mathématique homogène. Mais elle ne visait pas du tout à régler la question de l'imbrication et de la coexistence hétéroclite de divers objets mathématiques à axiomatiques irréductibles. La simulation nous met ainsi en face de l'expérience d'une coexistence dynamique entre des formalismes traités comme des objets et communiquant comme tels. *La simulation est un écosystème de formalismes objectivés*. Elle est le plus souvent irréductible à une approche de type constructiviste et mathématique. De là provient son caractère intuitif³⁰.

En effet, la simulation souffre d'incohérence mais pas d'un manque de cohésion. Plus précisément, les formalismes qui y sont objectivés et imbriqués adhèrent les uns aux autres d'une façon telle que le résultat d'une simulation est très intégré : la simulation fait tenir et croître ensemble ces formalismes objectivés ; c'est donc une intuition concrète, si l'on se réfère à l'étymologie du terme « concret » : croître ensemble. A ce titre, elle est une image du type de celles que Bachelard avait justement exclues de son épistémologie, comme nous l'avons vu. En revanche, elle donne lieu à quelque chose de « réel », car c'est précisément la cohésion incohérente résistant à toute conception immédiate qui fait fonction de réalité pour Bachelard.

On pourrait nous objecter que l'épistémologie de Bachelard, précisément parce qu'elle brise le carcan idéaliste et trop étroit de la construction seulement mathématique et *a priori* des concepts, permet de penser ce type inédit de pratique scientifique. En effet, nous concédons fort bien que nous avons là affaire à un « abstrait-concret » qui permet la construction expérimentalo-mathématique de concepts scientifiques. Et l'on pourrait dire qu'on en peut dès lors aisément comprendre le rôle heuristique sans réhabiliter les concepts kantien. Mais le problème que pose sur ce point l'épistémologie bachelardienne tient à ce qu'elle embrasse trop largement les pratiques scientifiques en procédant à un nivellement interdisant à l'historien des sciences de penser précisément les évolutions épistémologiques et les ruptures. A trop systématiquement vouloir penser l'évolution et la vie de la raison, la générosité conceptuelle de Bachelard se retourne contre son épistémologie en la rendant très vague et irréfutable à bien des égards.

Mais considérons donc l'objection de la construction expérimentalo-mathématique des concepts : loin de nous conduire à rectifier l'épistémologie bachelardienne, une simulation incarnerait précisément ce mélange inextricable, ce « couplage » de l'expérimentation et de la mathématique - dont la micro-physique du 20^{ème} siècle a montré le premier exemple flagrant - que Bachelard avait justement inscrit en lieu et place de la construction seulement mathématique des concepts. Simplement, la simulation serait la présentation unifiée d'une telle construction en un signe, en un symbole, en une icône. Mais qu'on nous dise alors où, dans une simulation, se situe l'expérimental ? Et s'il réside dans les données qui ont conduit à la calibration des sous-modèles mutuellement intriqués, en quoi n'est-ce pas aussi le cas pour l'expérimental réel ? Dans l'expérimentation réelle, on « réceptionne » des mesures, dans l'expérimentation virtuelle, on les « réceptionne » certes aussi, au sens où on les conçoit de nouveau, mais on en fait également bien d'autres choses : on les reproduit et on les fait *coexister*. Or, y a-t-il, avec les concepts de Bachelard, un moyen de distinguer cet expérimental virtuel de l'expérimental réel ? Car, si l'on accepte de faire un moment de l'histoire-fiction, Bachelard nous concéderait sans doute que la simulation n'est pas le

³⁰ De là, on peut également conclure que la solution de l'oscillation ascendante du schème au thème – et retour – telle que la propose l'épistémologie historique des mathématiques inspirée par la philosophie de Husserl – voir par exemple les travaux de Cavailles ou du premier Granger –, ne peut pas non plus valoir comme explication, dans le cas de la simulation. En effet, ce n'est pas un schème qui donne le résultat de la simulation. L'utilisation d'une simulation ne ressortit donc pas à ce que Bachelard avait aussi entrevu comme étant à l'œuvre dans l'histoire des sciences formelles : la réification progressive du construit conceptuel. Il s'agit d'autre chose : il nous faut donc aujourd'hui tâcher de penser ce procédé cognitif nouveau plus correctement et plus précisément. Nous ne prétendons pas ici fournir toutes les clés qui mèneraient à sa compréhension effective. Toujours est-il qu'il nous paraît désormais peu instructif de vouloir se sortir de cette difficulté par une nième pirouette dialectique sur la matérialité du signe et le caractère sémiotique de la matière. La générosité de ce genre d'argument irréfutable – source de confusions – interdit la pensée des distinctions dont a tant besoin l'histoire des sciences. Il nous paraît d'ailleurs paradoxal mais significatif qu'une pensée dialectique travaille en fait très souvent à déshistoriciser l'histoire des sciences et de l'épistémologie. Sur ce point, les critiques de Lecourt à l'encontre de Bachelard sont toujours valables, sauf que leur auteur n'aperçoit pas que cette déshistoricisation de l'histoire des sciences provient du procédé dialectique lui-même.

« réel ». Donc il lui faudrait distinguer l'expérimentalo-mathématique réel de l'expérimentalo-mathématique virtuel. Lui faudrait-il alors définir et distinguer un « abstrait-concret » concret et un « abstrait-concret » abstrait ? Cela ne paraît pas raisonnable. On voit donc que la volonté de ne surtout pas recourir à la notion d'intuition devrait nous faire faire des contorsions très confuses si ce n'est absurdes. Il ne nous paraît donc plus possible de penser la simulation informatique à l'image d'un signe abstraitif ni même d'une icône condensante et transfigurante. Elle est une expérience virtuelle « pour voir »³¹. On n'a plus affaire à des perspectives réalistes mais à des objets virtuels réalistes. Dans la simulation, on dépasse le stade des seules images de synthèse. Le cas de la simulation réaliste – à échelle globale – des plantes, telle qu'elle a été effectuée par l'équipe de Philippe de Reffye au CIRAD, a bien montré combien de tels logiciels de simulation pouvaient avoir plusieurs fonctions, brisant en cela le dogme perspectiviste du modélisme mathématisé³² : le logiciel AMAP a ainsi d'abord servi pour faire de belles cartes de vœux ! Mais il a ensuite servi à des métiers aussi différents que ceux des urbanistes, des paysagistes, des agronomes, des botanistes, des forestiers ou des écophysiologistes. Et cela tient au fait que l'on n'a pas affaire à une simple perspective ou à une icône mais à un *objet substitutif*, au grand dam sans doute des chasseurs d'idoles. Indiquons pour finir que c'est sur de telles simulations *concrètes* que de nombreuses expériences virtuelles sont menées : notamment celles qui visent à « mesurer » virtuellement le transfert radiatif de peuplements forestiers bien connus. Ce genre d'expérience permet l'interprétation précise d'images satellite de zones peu accessibles. En effet, les mathématiques sont impuissantes dans ce cas précis puisqu'elles ne sont pas capables de remonter de l'image captée à la

³¹ Bachelard, en conformité avec son linguisticisme de principe, nie que le « voir » seul puisse présider à une quelconque expérimentation sérieuse : « L'expérience ainsi associée à des vues théoriques n'a rien de commun avec la recherche occasionnelle, avec ces expériences "pour voir" qui n'ont aucune place dans des sciences fortement constituées comme sont désormais la Physique et la Chimie, dans des sciences où l'instrument est l'intermédiaire nécessaire pour étudier un phénomène vraiment instrumenté, désigné comme un objet d'une phénoménotéchnique. Aucun physicien ne dépenserait "ses crédits" pour faire construire un instrument sans destination théorique. En Physique, l'expérience "pour voir" de Claude Bernard n'a pas de sens », (Bachelard, G., 1949, 1962), pp. 2-3. Avec le développement considérable de la simulation dans tous les domaines de la science - humaine comme de la nature -, nous avons aujourd'hui de multiples occasions de voir que cet interdit bachelardien ne peut plus valoir. Sur le postulat que nous nommons linguisticisme de la philosophie de Bachelard, voir, par exemple, (Poirier, R., 1984), p. 341 : « Ce monde n'est saisi qu'à travers le langage. Bachelard est un homme de livres, lecteur infatigable et passionné. Et par ailleurs son expérience, sa vie sont essentiellement parlées et écrites. La vraie réalité scientifique est une description théorique, en langage mathématique. La vraie réalité poétique n'est pas contemplation, silence, émerveillement, elle est verbale, parlante, agissante et l'image n'est pas vision qui serait immobile. Elle est matière que l'on pétrit, avec effort, dans le temps. » Dès 1957, la volonté de croire en l'homogénéité voire en l'« identité de la parole et du réel » a par ailleurs été définie par Gaëtan Picon comme appartenant tout particulièrement au « style de l'esprit contemporain » et comme ayant notamment sa source dans la philosophie dialectique de Hegel. Voir (Picon, G., 1957), p. 30. La pensée de Bachelard, sur ce point, n'a pas constitué une exception : le relationnisme qui en découle – « au commencement est la Relation... », (Bachelard, G., 1931-1932, 1970), p. 19 - est largement partagé par un contemporain comme Cassirer (1910, 1977). Pour notre part, nous ajouterions que les réticences bachelardiennes et, plus largement, contemporaines, à l'égard du recours à l'objet substitutif en science témoignent du fait que l'épistémologie contemporaine reconduit plus ou moins consciemment l'iconoclastie ou l'iconophilie judéo-chrétienne en la déplaçant – au sens précis donné par Freud à ce terme – dans les normes appliquées aux représentations scientifiques. Sans le vouloir, et tout en s'en défendant par son spinozisme ou son « christianisme athée », l'épistémologie contemporaine, en tant que prise en charge de la culture et du savoir de l'époque, demeurerait ainsi sous la forte dépendance de la matrice biblique et chrétienne auparavant rendue immanente et laïque par Hegel. Mais il nous faudrait plus de temps et plus d'espace pour tenter de confirmer cette hypothèse. Voir également nos notes *supra*.

³² Ce que nous appelons le « modélisme mathématisé et perspectiviste » désigne un discours épistémologique qui a longtemps servi à légitimer le recours aux modèles mathématiques en science lorsqu'on ne voulait pas se livrer à des considérations purement positivistes. Il tient en trois affirmations : 1. le modèle est toujours une simplification de la réalité ; 2. lorsqu'il devient mathématique, cela signifie que cette simplification s'exerce à travers des isomorphismes : la simplification devient synonyme d'abstraction mathématique ; 3. en tant que simplification, le modèle déploie un point de vue, une perspective – c'est un outil dédié à une tâche particulière -, c'est en quoi il se distingue de la théorie qui, elle, se veut objective. Indiquons que ce discours est également combattu aujourd'hui sur son autre bord. Nancy Cartwright soutient par exemple que les modèles sont plus véridiques que les théories dès lors qu'elles ne servent plus qu'à appliquer ces derniers à la « réalité » ; voir (Cartwright, N., 1983). Pour notre part, ce sont plutôt la première et la deuxième caractéristiques que les modèles de simulation ne nous semblent plus pouvoir adopter, cela au contraire des modèles mathématiques traditionnels.

végétation réelle supportée par la zone photographiée³³. On compare le signal virtuel produit par l'expérience sur l'objet substitutif virtuel avec le signal réel ; et on évalue ainsi les chances d'avoir interprété correctement ou non la source de cette image réelle.

Des concepts construits en commun au regard d'objets communs (re)constitués : la simulation comme expérience commune vérifiée.

Ce qui faisait tout l'intérêt de la thèse bachelardienne sur la conjugaison étroite et permanente de l'expérimentation et des mathématiques dans toute construction de concepts était la nécessité de supposer l'existence d'une « cité scientifique » pour que s'épanouisse la véritable rationalité : une construction aussi complexe et demandant des compétences aussi diverses devait inévitablement – donc par principe – appeler une construction collective, sociale. Le développement considérable de la simulation informatique dans toutes les sciences implique-t-il dès lors le retour à une compétence unique, de surcroît intuitive, donc à une matrice épistémologique de type hiérarchique³⁴ ? Il n'en est rien, selon nous. Tel sera l'objet de nos dernières réflexions qui ne seront ici qu'esquissées. C'est là qu'il nous paraîtra possible de rejoindre à un autre niveau la thèse bachelardienne, à condition de lever l'interdit pesant indistinctement sur toute forme d'intuition.

Tout d'abord, une simulation ne peut devenir un objet substitutif que si elle a été préparée par une cohorte d'experts en différentes disciplines. On ne peut concevoir de simulation que dans un cadre interdisciplinaire car, puisqu'il faut restituer le caractère concret d'un objet, il est nécessaire d'entrecroiser les points de vue dans le détail. Tel a été le cas pour le développement du logiciel de simulation de croissance des plantes au CIRAD : les botanistes ont été chargés de proposer les modèles graphiques architecturaux et de constituer les histogrammes par des mesures sur le terrain, de façon à rendre compte de la naissance et de la ramification probabilistes des bourgeons. Des mécaniciens ont proposé un modèle mathématique de la flexion des branches de façon à rendre simulable la casse naturelle des branches. Des informaticiens de plus en plus spécialisés ont proposé un style de programmation de plus en plus orienté objet, en fonction de l'accroissement des propriétés implémentées dans la simulation. Plus récemment, des écophysiologistes et des agronomes ont contribué à réintégrer dans la simulation des modèles mathématiques de circulation hydrique réaliste pour la plante virtuelle. On voit donc bien que, dans cette interdisciplinarité, il s'agit d'abord d'une collaboration et non d'une immédiate surveillance, car les spécialités sont hétérogènes et originellement très éloignées les unes des autres. Cependant, il est vrai que si, dans ce genre de pratiques, les experts peuvent davantage se côtoyer plutôt que directement se jauger et se juger, ils doivent apprendre à être plus pédagogues vis-à-vis de leurs collègues de façon à pouvoir communiquer : ils apprennent à pratiquer une forme de « rationalisme enseignant » en vue d'une intuition commune construite, mais non en vue d'un surrationalisme. La simulation, en ce sens, ne tend pas à la constitution d'un surobject mais seulement d'un double de l'objet. Cet objet ensuite leur échappe en partie puisque, de par son caractère concret³⁵, il peut servir naturellement à un nombre considérable de métiers et d'objectifs. Contrairement à ce que l'on a pu croire, en particulier à la suite des critiques formulées par René Thom, la simulation n'est donc pas systématiquement inféodée à la technoscience pragmatique et à ses objectifs de rentabilité et de prévision sans compréhension. Au contraire même de la modélisation mathématique, elle peut être une pratique ouverte, collective et non aliénée à un objectif précis et préfixé.

Certes, la conception d'une simulation encourage en retour les spécialistes monodisciplinaires à modifier, à préciser, à élaguer leurs concepts au contact de leurs collègues. Mais la simulation en elle-même n'est pas conçue pour cela. Elle se contente de l'« état de l'art » de chaque discipline et

³³ Il s'agit d'un cas de « problèmes » dits « inverses » où les outils analytiques de déconvolution de signal sont souvent inopérants.

³⁴ Où les informaticiens tiendraient le haut du pavé...

³⁵ Sur ce point, nous nous permettons de renvoyer aux développements de (Varenne, F., 2003a) et (Varenne, F., 2003b).

propose une synthèse réifiante *délibérément prématurée*³⁶ que tout le monde, en revanche, est à même de contempler et d'expérimenter dans son résultat intuitif. La tentative de reconstitution virtuelle de l'objet peut donc conduire à aménager les représentations théoriques monodisciplinaires dans la mesure où cette reconstitution permet de les tester pseudo-empiriquement – transversalement pourrait-on dire – puisqu'on y teste leur compatibilité avec d'autres représentations théoriques et non d'abord avec l'expérimentation. C'est-à-dire qu'on y teste la viabilité de leur coexistence dans une représentation globale de l'objet. La rectification se produit donc ici d'abord selon la surveillance réciproque des formalismes dans le but de se redonner en commun mais plus commodément une expérience du monde par ailleurs expérimentable en réalité et à échelle globale. Les différentes disciplines de la science peuvent donc se *contrarier* sans pour autant se *contredire*. Elles peuvent s'utiliser, s'instrumentaliser, se phagocyter, mais sans jamais même se réduire ou s'anéantir. La surveillance n'est pas ici d'ordre dialectique car il n'y a de contradiction – donc de dialectique – que dans un système linguistique bipolaire et formant ou visant à former d'abord une cohérence, ce qui n'est pas le cas d'une simulation.

Conclusion

Ce ne serait donc que par accident que l'intuition aura été esseulante. Elle ne le serait pas essentiellement. Elle l'a longtemps été dans l'histoire des savoirs, avant que n'apparaisse la simulation numérique puis informatique. L'émergence de la simulation informatique permettrait ainsi à la philosophie de mettre en évidence une distinction jusque là inaperçue entre le rapport intime à une image et le rapport immédiat à un monde intuitif commun. L'irrationalité du premier n'entraînerait pas celle du second. Et, le second ne renverrait pas systématiquement à une économie iconologique du signe, qu'elle soit interprétée ou reconduite de façon transcendante – hiérarchique/biblique - ou immanente – dialectique ou sociologique/pragmatique. Si par exemple on tient à rejeter l'intériorité comme appartenant à une philosophie périmée, il serait cependant erroné de rejeter aujourd'hui indistinctement avec elle toute forme d'intuition, en considérant abusivement qu'elle est systématiquement mystique, esseulante et donc potentiellement sécrétrice de violence et de barbarie. Il y aurait lieu de se laisser réellement surprendre - rectifier peut-être - par l'innovation rationnelle de la science contemporaine, cette dernière nous forçant à introduire la notion nouvelle d'un sens commun co-construit, d'un sens commun du second genre, d'une immédiateté seconde et commune qui ne soit ni symbolique ni schématique. La donation intuitive pourrait n'être condamnée ni nécessairement à une expérience intime et inaccessible à la surveillance d'autrui - en conformité avec la matrice biblique ou hiérarchique -, ni non plus à une expérience collective et idéologique – idolâtre - d'adhésion inconditionnelle et de transe, vécue par un corps social auparavant totalisé parce que conçu pour exorciser l'esseulement des individus contemporains - en conformité avec la tentation totalitaire, fusionnelle ou omni-communicationnelle, « diabolique » parce qu'anti-symbolique. Si la philosophie continentale veut être précise donc forte, elle doit s'entraîner à ne plus considérer indistinctement toute simulation à visée scientifique comme un potentiel veau d'or qui menacerait la loi mosaïque fondatrice. Peut-être alors y aura-t-il un moyen de penser la simulation informatique en évitant les habituelles précautions, les cantonnements, les préventions, voire les condamnations ou invectives anti-idolâtres. Ces dernières reposent toujours, croyons-nous, sur l'ignorance des distinctions que nous avons cherché à mettre au jour ici, mais aussi sur une certaine fidélité à l'iconoclasme biblique à l'intérieur de la tradition épistémologique contemporaine. Cette fidélité appellerait en elle-même une *psychanalyse de la connaissance épistémologique*. Il y aurait ainsi peut-être lieu de s'émanciper de l'épouvantail récurrent de l'idolâtrie, en sortant enfin du vieil enclos conceptuel formé par le triangle iconoclastie/iconophilie/idolâtrie à quoi l'épistémologie se restreint encore pour penser l'innovation rationnelle. Nous pensons que la réelle richesse des

³⁶ Ce qui est précisément faire preuve d'idéalisme selon Bachelard : « le réalisme est définitif et l'idéalisme est prématuré », (Bachelard, G., 1949, 1962), p. 8. Dans ce même ordre d'idées, Canguilhem concevra toute idéologie scientifique comme une science prématurée.

différentes constructions de concept qui interviennent dans les sciences d'aujourd'hui reste encore pensable pour la philosophie, même s'il lui est de plus en plus difficile de ne pas capituler devant la facilité d'une approche sociologique uniformisante et totalisante. Si cette résorption de la philosophie des savoirs dans ce que nous avons appelé le linguisticisme contemporain n'intervient finalement pas, il y aura, selon nous, beaucoup à gagner pour une philosophie des savoirs qui cherche à s'expliquer les épistémologies régionales que déploient aujourd'hui les diverses pratiques de modélisation. Les nouvelles épistémologies pragmatistes ou réalistes, quant à elles, toujours fascinées par leur seul combat contre le médiatisme des théories des *sense-data* - cette affirmation persistante de la présence d'une médiation dans toute connaissance - ne s'aperçoivent pas assez que, plus fondamentalement, elles restent tout aussi tributaires du linguisticisme avec leurs solutions logicistes ou pragmatistes, de ce pragmatisme explicitement linguistique d'inspiration et issu notamment des travaux d'Austin qui pensait le langage à même la réalité³⁷.

Plus spécialement, il nous est paru possible de mettre au jour une des limites de l'épistémologie dialectique de Bachelard, notamment en ce qu'elle ne donne pas les concepts pour penser assez précisément et distinctement les pratiques contemporaines de simulation. S'il faut d'ailleurs en croire le biologiste théoricien Jorge Wagensberg (1985, 1997)³⁸, la science contemporaine se développerait désormais selon la *triade expérimentation/simulation/théorie* et non plus selon la *dialectique expérimentation/théorie mathématisée*³⁹. Ce serait donc l'ultime raison pour laquelle une vision seulement dialectique, c'est-à-dire foncièrement axiale, agonistique et bipolaire⁴⁰, car fondée sur la seule contradiction⁴¹ interne aux rapports discursifs inter-humains – donc sur une représentation encore très anthropomorphe –, ne semble plus à même de cartographier tout le champ des philosophismes régionaux de la science. Voir notre figure 1.

³⁷ Option linguisticiste que le pragmatisme partage donc avec le dialecticisme continental depuis le *linguistic turn*. Ce rapprochement mériterait une étude nuancée et approfondie. Il permettrait peut-être de compléter les nombreux travaux contemporains sur la communauté aujourd'hui reconnue des racines de la philosophie analytique et de la philosophie continentale.

³⁸ Aux pages 103 à 105.

³⁹ Voici comment on peut résumer le propos – de style assez poppérien – de Wagensberg sur ce que nous proposons d'appeler la « triade épistémologique » : une expérimentation peut réfuter une simulation qui peut elle-même réfuter une théorie. En retour, la théorie peut prédire une simulation qui peut elle-même prédire une expérimentation. Il se produit donc une circulation par aller et retour.

⁴⁰ Comme l'indique la mise en axe du polyphilosophisme in (Bachelard, G., 1949, 1962), p. 5.

⁴¹ C'est le mérite d'Aristote d'avoir rappelé qu'il existe des contraires non contradictoires.

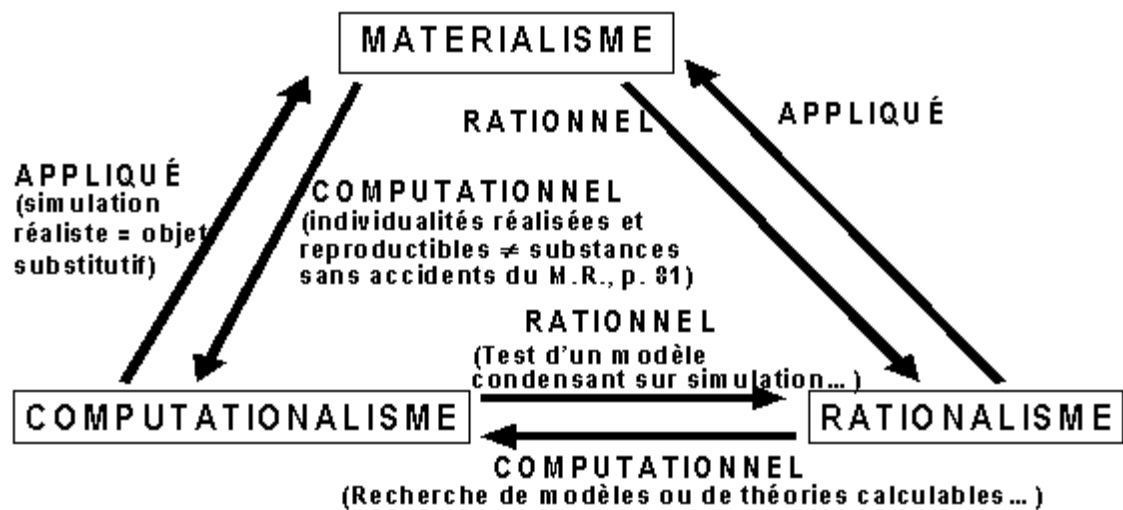


Figure 1. Complexifier la dialectique : la triade épistémologique.

Nous proposons de complexifier la dialectique matérialisme/rationalisme de Bachelard en lui adjoignant un « computationalisme ». Attention à ne pas prendre ce terme au sens de la « théorie computationnelle de l'esprit » propre aux sciences cognitives - et considérant que les processus mentaux sont des calculs formels syntaxiques - mais bien au sens des sciences de la nature computationnelles procédant à des simulations individu-centrées. Le computationalisme est dès lors *appliqué* s'il vise à concevoir une simulation réaliste, la plus détaillée possible et ayant pour rôle de servir comme objet substitutif. Tel est le cas des logiciels AMAP. Il est en revanche *rationnel* s'il s'affronte à un modèle mathématique condensant. Ce modèle est alors testé sur une simulation computationnelle. Ainsi en a-t-il été de la formalisation mathématique ultérieure des phénomènes de criticalité auto-organisée qui avaient d'abord été mis en évidence dans des simulations par Bak, Tang et Wiesenfeld en 1987 (Jensen, H.-J., 1998). Le rationalisme devient de son côté *computationnel* s'il vise à produire des modèles mathématiques calculables pratiquement c'est-à-dire par *computer*. En ce sens, la physique d'aujourd'hui recherche de plus en plus systématiquement des théories calculables. Enfin, le matérialisme devient *computationnel* s'il nous conduit à réaliser des individualités virtuelles reproductibles, c'est-à-dire des substances particulières, avec accidents, cela en complément et à la différence de la production de substances matérielles idéalisées, mais sans accident, sans individualité, qu'autorise le matérialisme rationnel selon (Bachelard, G., 1953, 1990), p. 81.

Dans le seul domaine de la physique théorique, l'analyse épistémologique spectrale à quoi Bachelard s'essayait dans « La philosophie du non » et dans les premières pages du « Rationalisme appliqué » peut bien encore valoir aujourd'hui. Mais cette linéarité du spectre ne saurait aucunement convenir pour les autres sciences, contrairement à ce qu'il suppose dans les phrases qui suivent⁴² le passage auquel nous pensons : la linéarité de son axe des philosophismes ne peut plus convenir puisque, dans les sciences où l'on simule, ce n'est plus une oscillation que nous avons, mais une circulation⁴³. Premièrement donc, le polyphilosophisme devrait devenir spatial, surfacique à tout le

⁴² « D'autre part, si l'on examinait, avec une même volonté de trouver les éléments d'une polyphilosophie, d'autres sciences comme les mathématiques, la biologie, la sociologie, la psychologie, on devrait naturellement établir d'autres spectres pour l'analyse philosophique. Mais aucun spectre n'est plus étendu que le spectre qui aide à classer les philosophèmes des sciences physiques », (Bachelard, G., 1949, 1962), p. 7. Selon nous, si l'on voulait conserver quand même l'image tirée de l'analyse fréquentielle, on aurait aujourd'hui affaire à un spectre spatial d'image – donc en 3 dimensions car muni de ses convolutions latérales - et non plus à un spectre axial d'un signal linéaire.

⁴³ Avec ce terme, gardons-nous de réintroduire ici le linguisticisme dont nous avons aperçu les limites précédemment. Il ne s'agit surtout pas d'affirmer une fois de plus, après Michel Serres et Bruno Latour par exemple, que dans toutes les pratiques rationnelles de la science, ce ne sont que des signes qui circulent, des inscriptions ou encore des pratiques

moins, et non seulement linéaire ou axial comme auparavant, puisqu'il doit désormais s'appuyer sur trois sources différentes de savoir et non sur deux. Deuxièmement, il devrait laisser, en conséquence, libre cours à des contrariétés et non à de simples contradictions. Pourrait alors de nouveau être posée la question des différents moteurs de l'histoire des sciences et de leur *réelle* diversité, ce problème ayant souvent été trop schématiquement résolu dans des perspectives aux *a priori* dialectiques, linguisticistes et de ce fait passablement anhistoriques et réductrices⁴⁴. Troisièmement, dans ce cadre-là, le rôle de l'intuition construite *via* la simulation, source d'un savoir compris comme expérience concrète du second genre, devra trouver une explication épistémologique plus précise que celle que lui confère sa traditionnelle interprétation linguisticiste en termes d'écriture ou de système de signes.

Bibliographie

- Adami, C., 1998. *Introduction to Artificial Life*, Springer Verlag, coll. Telos, New York.
- Bachelard, G. 1928, 1973. *Essai sur la connaissance approchée*, Vrin, Paris.
- Bachelard, G., 1931-32, 1970. « Noumène et microphysique », in *Etudes*, Vrin, Paris, 11-24.
- Bachelard, G., 1934-35, 1970. « L'idéalisme discursif », in *Etudes*, Vrin, Paris, 87-97.
- Bachelard, G. 1936, 1972. « Le surrationalisme », repris in *L'engagement rationaliste*, PUF, Paris, 1972, 7-12.
- Bachelard, G., 1938, 1980. *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin.
- Bachelard, G. 1939, 1956. *Lautréamont*, José Corti, Paris.
- Bachelard, G. 1940, 1983. *La philosophie du non*, PUF, Quadrige, Paris.
- Bachelard, G. 1949, 1962. *Le rationalisme appliqué*, PUF, Paris.
- Bachelard G. 1951, 1965. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, PUF, Paris.
- Bachelard G. 1953, 1990. *Le matérialisme rationnel*, PUF, Paris.
- Bachelard, G. 1957, 1994. *La poétique de l'espace*, PUF, Quadrige, Paris.
- Ballot, G. et Weisbuch, G. 2000. *Applications of Simulation to Social Sciences*, Hermes, Oxford.

homogènes à des signes. Pour notre part, nous pensons qu'une des premières tâches d'une épistémologie réellement ouverte, c'est-à-dire non systématiquement linguisticiste – et aujourd'hui encore largement à construire –, consisterait à montrer que les divers types de rapports qu'entretiennent mutuellement expérimentation, simulation et théorie sont hétérogènes, non mutuellement réductibles ni directement opposables et que les circulations qui se manifestent entre elles sont à penser de façon diversement différenciée, c'est-à-dire de façon essentiellement non dialectique, non dialogique, non spectrale, non axiale, non binaire. Ce n'est donc pas toujours sous le régime anthropomorphe de la contradiction que jouent entre eux matérialisme, computationalisme et rationalisme. Il n'est d'ailleurs même pas certain que ce troisième pôle de connaissance que nous proposons de concevoir soit le dernier à ajouter dans l'histoire des sciences et qu'il faille ainsi remplacer le culte dialectique par le culte triadique, ce dont nous nous garderons. Qu'il nous suffise d'avoir indiqué combien on devait aujourd'hui ouvrir la raison épistémologique à la réelle complexité des constructions de concepts scientifiques !

⁴⁴ A l'heure où nous achevons cet article, la presse scientifique (*Science, La Recherche*) se fait l'écho d'une polémique au sujet du livre récent de Stephen Wolfram (2002). Partant de sa fascination pour la faculté que possèdent les automates cellulaires de modéliser simplement des formes complexes, Wolfram y présente en effet la thèse radicale selon laquelle – si l'on reprend les termes de notre triade – tout rationalisme sera à terme réduit au computationalisme. Des chercheurs impliqués, comme Mélanie Mitchell (2003), n'ont pas tardé à exprimer leur malaise face au caractère excessif de cette thèse, mais sans pouvoir apporter d'arguments épistémologiques convaincants. Pour notre part, nous pensons que, dans ce type de polémique – où l'épistémologie brille par son absence ou bien (ce qui est pire) par des jugements à l'emporte-pièce (« ce sont les idolâtres éphémères d'une nouvelle technique », « c'est un nouvel avatar du positivisme anglo-saxon » entend-on déjà) – l'épistémologie de tradition continentale pourrait utiliser ses riches et complexes capacités de conceptualiser pour rendre justice au matérialisme et au rationalisme aux côtés du computationalisme. Cela nous paraîtrait la meilleure façon d'être aujourd'hui encore bachelardien sans pour cela recourir à l'habituel – mais il est vrai si commode – procès en idolâtrie. Ainsi, l'affection toute particulière que Wolfram semble porter au computationalisme pourra être alors comprise, c'est-à-dire située dans un contexte d'histoire des idées, des sciences et des techniques. C'est de façon éclairante qu'elle sera alors comparée à de semblables – anciennes mais sans doute tout aussi illégitimes – prédilections pour le rationalisme seul ou pour le matérialisme seul, de telles prédilections ayant déjà eu cours jadis dans l'histoire des sciences et de l'épistémologie.

- Bedau, M. A. 1998. "Philosophical content and method of Artificial Life". *The Digital Phoenix: How computers are changing philosophy*, ed. by T. W. Binum and J.H Moor, Basil Blackwell, Oxford, 135-152.
- Blaise, F. *et al.* 1998. "Simulation of the Growth of Plants – Modeling of Metamorphosis and Spatial Interactions in the Architecture and Development of Plants". *Cyberworlds*, ed. by T.L. Kunii and A. Luciani, Springer Verlag, Tokyo, 82-109.
- Blumenberg, H., 1966, 1988, 1999. *Die Legitimität der Neuzeit*, 1966, 2ème édition : 1988 ; traduction : *La légitimité des temps modernes*, 1999, Gallimard, Paris.
- Bonabeau, E. et Theraulaz, G., 1994. *Intelligence collective*, sous la direction d'Eric Bonabeau et Guy Theraulaz, Hermès, Paris.
- Bouchon, J., Reffye (de) Ph. et Barthélémy, D. 1995. *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*, INRA-Editions, Paris.
- Breton, P. et Proulx, S., 1989. *L'explosion de la communication*, La Découverte, Paris.
- Bruaire, C. 1985, 1993. *La dialectique*, PUF, QSJ, Paris.
- Cartwright, N. 1983. *How the Laws of Physics lie*, Oxford University Press, Oxford.
- Caseau, P. 1996 et 2002. « Crise ou mutation de la simulation numérique », version française d'un article publié en anglais en 1996, communication personnelle dans sa version française remaniée (en 2002), 11 pages.
- Cassirer, E., 1910, 1977. *Substanz und Funktion*, 1910 ; traduction : *Substance et fonction*, Editions de Minuit, Paris, 1977.
- Chorafas, D.N., 1966. *La simulation mathématique et ses applications*, Dunod, Paris.
- Compagnon, A., 1998. *Le démon de la théorie*, Seuil, Paris.
- Dagognet, F., 1969, 2002. *Tableaux et langages de la chimie – Essai sur la représentation*, Seuil, Paris, 1969 ; réédition : Champ-Vallon, coll. Milieux, 2002.
- Dagognet, F., 1973. *Ecriture et iconographie*, Vrin, Paris.
- Dagognet, F., 1979. *Mémoire pour l'avenir – Vers une méthodologie de l'informatique*, Vrin, Paris.
- Dagognet, F., 1984. *Philosophie de l'image*, Vrin, Paris.
- Dagognet, F., 2002. *Changements de perspective*, La Table Ronde, Paris.
- Damien, R. 1995. *Bibliothèque et Etat*, PUF, Paris.
- Debray, R. 1992. *Vie et mort de l'image*, Gallimard, Paris.
- Deffuand, G., Amblard, F., Duboz, R. et Ramat E., 2003. *Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée*, Actes des 9^{èmes} journées de rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels (Rochebrunne, 2003) sur *Le statut épistémologique de la simulation*, organisées par l'European Conference on Artificial Life (ECAL) et par l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCO), 13 pages, à paraître.
- Di Paolo, E.A. *et al.* 2000. "Simulation Models as Opaque Thought Experiments". In *Artificial Life VII*, Proc. of the 7th Intern. Conf. on Artificial Life, ed. by Mark A. Bedau *et al.*, MIT Press, Cambridge, 497-506.
- Dietrich, M. R. 1996. "Monte-Carlo Experiments and the Defense of Diffusion Models in Molecular Population Genetics", *Biology and Philosophy*, vol. 11, n°3, July 1996, 339-356.
- Dosse, F. 1992. *Histoire du structuralisme*, La Découverte, Paris.
- Drogoul, A., 2002. « La programmation orientée objet », cours de DEA d'Alexis Drogoul, Université Paris 6, accessible sur <http://miriad.lip6.fr/~drogoul/cours/gla/OODesign.GLA.pdf>, 143 transparents.
- EDP, 1999. *Modélisation mathématique et simulation numérique*, « échanges physique industrie n°4 », EDP, Les Ulis, 1999.
- Ferber, J., 1995. *Les systèmes multi-agents – Vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, 1995, 1997 (nouvelle présentation).
- Ferrand, N., 1999. *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*, CEMAGREF-Editions, Longjumeau.
- Galison, P. 1997. *Image and Logic*, The University of Chicago Press, 689-752.
- Gilbert, N. et Troitzsch, K.G., 1999. *Simulation for the social scientist*, Buckingham and Philadelphia, Open University Press.

- Harmon, S. Y., 2002. "Can there be a science of Simulation ? Why should we care ?", *Modeling & Simulation*, vol. 1, n°1, January-March 2002, 8.
- Hartmann, S. 1995. "Simulation", in *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, vol. 3, Verlag Metzler, Stuttgart, 807-809.
- Hegselmann, R., Mueller, U. et Troitsch, K., 1996. *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, ed. by R. Hegselmann et al., Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publisher.
- Heudin, J.-C., 1994. *La vie artificielle*, Hermès, Paris.
- Hill, D.R.C. 1996. *Object Oriented Analysis and Simulation*, Addison-Wesley.
- Hintikka, J. 1980, 1996. *La philosophie des mathématiques chez Kant*, PUF, Paris, 1996, 311p ; 1^{ère} édition en anglais (sans lieu) : 1980.
- Humphreys, P. 1990. "Computer Simulations", in *PSA (Philosophy of Science Association)*, 1990, vol. 2, 497-506.
- Israel, G., 1996. *La mathématisation du réel*, Seuil, Paris.
- Jensen, H.-J. 1998. *Self-Organized Criticality. Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kant, E. 1781, 1787, 1985. *Critique de la raison pure*, PUF-Quadrige, Paris.
- Largeault, J. 1992. *L'intuitionnisme*. PUF, QJSJ, Paris.
- Lecourt, D. 1972. *Pour une critique de l'épistémologie*. Maspero, Paris.
- Lecourt, D., 1974. *Bachelard. Le jour et la nuit*. Grasset, Paris.
- Löwith, K. 1949, 1983, 2002. *Meaning and History*, 1949 ; en allemand : *Weltgeschichte und Heilsgeschehen. Die theologische Voraussetzungen der Geschichtsphilosophie*, 1983 ; traduction : *Histoire et salut. Les présupposés théologiques de la Philosophie de l'histoire*, 2002, Gallimard, Paris.
- Mainzer, K., 1994, 1997. *Thinking in Complexity*, Springer Verlag, Berlin, 1997 (3rd edition) ; 1st edition : 1994.
- Marion, J.-L., 1977. *L'idole et la distance*. Grasset, Paris.
- Marquard O. 1973, 2002. *Schwierigkeiten mit der Geschichtsphilosophie. Aufsätze*, 1973 ; traduction: *Des difficultés avec la philosophie de l'histoire. Essais*, 2002, Editions de la MSH, Paris.
- Michalewicz, M. T., 1997. *Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences*, Vol. 1: "Modelling of Biological Structures and Processes", Melbourne, CSIRO Publishing, Michalewicz ed.
- Mitchell, M. 2003. Quelques raisons de douter. *La Recherche*, n°360, janvier 2003, 38-43 ; traduction d'un article paru originellement dans *Science*, sans date.
- Nosenzo, R. et al. 2001. Modèles mathématiques de conduite culturale, in *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, éd. par E. Malézieux, G. Trébuil et M. Jaeger, CIRAD/INRA, Montpellier/Versailles, 145-172.
- Parrochia, D. 2000. « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation », *Qu'est-ce que la vie?*, UTLS, Odile Jacob, Paris, 193-203.
- Picon, G. 1957. *Panorama des idées contemporaines*. Paris, NRF.
- Poirier, R. 1984. « Conclusion », in *Bachelard, l'homme du poème et du théorème*. Colloque du centenaire – Dijon 1984, Dijon, EUD, 339-344.
- Ramunni, G. 1989. *La physique du calcul – Histoire de l'ordinateur*, Hachette, coll. Histoire et philosophie des sciences, Paris.
- Reffye (de), Ph. et al. 1991. "Growth units construction in trees : a stochastic approach". *Acta Biotheoretica*, 39, 325-342.
- Rohrlich, F. 1990. "Computer Simulation in the Physical Sciences", *PSA (Philosophy of Science Association)* 1990, vol. 2, 507-518.
- Salanskis, J.-M., 2001. « Kant, la science et l'attitude philosophique », *Les philosophies françaises et la science : dialogue avec Kant*, ENS éditions, Paris, pp. 199-235.
- Serres, M. 1991. *Le tiers-instruit*, François Bourin, Paris.
- Sfez, L., 1988. *Critique de la communication*, Paris, Seuil.

- Stöckler, M. 2000. "On Modeling and Simulations as Instruments for the Study of Complex Systems", in *Science at Century's End*, Proc. of the Pittsburgh/Konstanz Colloquium in the Philosophy of Science, 1997, Univ. of Pittsburgh Press, 355-373.
- Vadée, M. 1975. *Bachelard ou le nouvel idéalisme philosophique*, Paris, Editions sociales.
- Varenne, F. 2001. "What does a computer simulation prove ? The case of plant modeling at CIRAD (France)" *Simulation in industry*, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, October 18-20th, 2001, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, 549-554.
- Varenne, F. 2003a. « La simulation informatique face à la méthode des modèles », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 11, 2003, n°1, pp. 16-28.
- Varenne, F. 2003b. « La simulation conçue comme expérience concrète », Actes des 10^{èmes} journées de rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels (Rochebrune, 2003) sur *Le statut épistémologique de la simulation*, organisées par l'European Conference on Artificial Life (ECAL) et par l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCO), éditions de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris (ENST), pp. 299-313.
- Wagensberg, J. 1985, 1997. *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Barcelona, Tusquets Editores; traduction : *L'âme de la méduse*, 1997, Paris, Seuil.
- Wildberger, A. M., 2002. "Artificial Intuition", *Modeling & Simulation*, vol. 1, n°2, April-June 2002, 10-11.
- Wolfram, S. 2002. *A New Kind of Science*, Champaign, USA, Wolfram Media Inc., 2002.