

ANNEXE A

Histoire de la modélisation : un état des lieux

Dans cette annexe, nous allons nous attacher à rappeler les principaux travaux qui ont déjà concerné l'histoire des modèles. Au passage, nous préciserons également la teneur de ce qui nous semble faire consensus au sujet de l'histoire de la naissance des modèles formels à la fin du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème} siècle. Ces travaux représentent un socle d'approches historiques antérieures sur lequel nous nous sommes souvent appuyé pour les périodes et les objets d'étude qui ne tombaient pas directement dans notre problématique. Ils nous ont également servi à décider, parfois par contraste, de l'esprit dans lequel nous devons procéder pour notre part.

Les différentes approches en histoire des modélisations

Avant tout, remarquons qu'il existe au moins quatre façons d'écrire l'histoire de la modélisation dans les sciences non-exactes, c'est-à-dire dans les sciences du vivant et de l'homme. Ces quatre approches coïncident naturellement chacune avec l'une des approches actuelles et relativement concurrentes ou complémentaires de l'histoire des sciences. Une première approche, souvent préférée par les historiens, consiste à se concentrer sur l'histoire administrative des programmes de recherche, des crédits, des laboratoires et des hommes. En ce qui concerne la modélisation, peu de travaux épousant cette perspective ont paru ; faute de recul, selon nous, mais aussi à cause de la difficulté qu'il y a à catégoriser les institutions scientifiques par la seule pratique de la modélisation. Cette pratique ne se définit pas en effet par le recouvrement d'un seul ou de quelques secteurs restreints de la science. Elle ne se définit donc pas par un objet d'étude bien identifiable. En outre, depuis une dizaine d'années, la modélisation a atteint la science dans son ensemble. Si, avec la modélisation, on n'a affaire qu'à une nouvelle technique théorique de mathématisation ou de calcul, elle peut en effet sans trop de dommages demeurer relativement transparente aux yeux de l'histoire institutionnelle du fait qu'elle brouille les cartes en transgressant les frontières. On comprendrait alors qu'une telle histoire ne fasse pas de la modélisation un objet d'étude séparé ou privilégié. Mais si, au contraire, cette pratique bouleverse effectivement la science dans son ensemble, en la réunifiant par exemple derrière des pratiques communes, l'histoire institutionnelle n'est pas non plus prête à s'engager sur ce point, mais cette fois-ci pour une autre raison : son actuelle réticence à embrasser des pans entiers de la science, voire à ressaisir le développement d'ensemble de la science. Nous ne voulons pas dire qu'une telle histoire synoptique serait immédiatement réalisable, mais seulement qu'elle serait souhaitable pour la compréhension historique des déploiements et des mises en œuvre progressives et différenciées des pratiques de modélisation. Quoi qu'il en soit, dans un cas comme dans l'autre l'histoire institutionnelle n'a pas encore réellement pris acte de l'émergence récente de la modélisation.

Une deuxième histoire des sciences, plus technique et davantage sectorisée, car produite le plus souvent par les scientifiques, se concentre sur la généalogie supposée relativement autonome et interne des productions scientifiques d'un champ donné. Ces productions, alors considérées comme des résultats plus ou moins cumulatifs, sont inscrites dans des filiations reconstruites *a posteriori* si nécessaire¹. Qu'on le veuille ou non, c'est bien dans cet horizon-là que l'on retrouve la plupart des travaux historiques récents sur la modélisation, et cela dans la mesure où les scientifiques produisent nombre de récapitulatifs ou de mises en perspective visant à argumenter, problématiser, valoriser, enraciner ou simplement situer leurs propres apports. Même si cette approche est précieuse, une telle histoire est évidemment elle-même située et doit donc être à chaque fois vérifiée et relativisée au regard des sources primaires dont nous disposons par ailleurs. L'historienne des sciences américaine Sharon E. Kingsland a fortement insisté, et à juste titre selon nous, sur la nécessité de prendre en compte aujourd'hui l'utilisation que les scientifiques font de l'histoire de leur domaine². L'histoire des sciences est désormais inséparable de l'histoire de ses révisions à travers les multiples historiques que produisent les scientifiques eux-mêmes pour des raisons essentiellement internes à leur propres pratiques argumentatives.

Or, précisons d'entrée qu'il ne nous sera de toute façon pas possible de dresser ici un état de la question telle qu'elle est traitée dans ces travaux de scientifiques. Nous devons nous justifier sur ce point. En effet, les occurrences de ces fragments d'histoire sont innombrables ; de plus, ces fragments sont très dispersés et relativement idiosyncrasiques car liés à la perception des chercheurs qui les produisent, à leurs formations, à leurs centres d'intérêt et enfin à la relative contingence de leur aisance littéraire au regard de la majorité silencieuse, sur ce point, de leurs collègues scientifiques. Cependant, nous récusons deux points de vue opposés et trop tranchés sur la valeur de tels essais. Ces deux points de vue témoignent l'un comme l'autre d'une mésestime du rôle tout à la fois informatif et stratégique de ces petits essais historiques intervenant au cœur des travaux techniques. D'une part, on peut, par excès de purisme selon nous, se rendre coupable de n'accepter comme valable que cette seule histoire intellectuelle des sciences, sous prétexte que ceux qui l'écrivent en sont les seuls véritables connaisseurs, à savoir les scientifiques eux-mêmes, tout autre historien risquant de se rendre victime d'une vision déformée et donc idéologisée par ses options philosophiques. Il n'y aurait de bonne histoire des sciences qu'écrite par les scientifiques spécialistes eux-mêmes. Si l'on peut certes légitimement contester l'objectivité comme la compétence de l'historien ou du philosophe, on n'en doit pas moins contester selon nous et en bonne logique celle du scientifique en matière d'histoire, faute de quoi on se rend coupable d'une surévaluation de principe qui nous paraît très difficile à justifier.

D'autre part, et à l'inverse, on peut se rendre coupable de négliger de tels travaux sous le prétexte que les scientifiques y seraient tout à la fois juges et partis. C'est ignorer un peu vite que de tels textes jouent un rôle dans la production et l'explicitation mêmes des résultats techniques. Si on veut les ignorer comment dès lors écrire une histoire des sciences ? Ce n'est pas le moindre des mérites de la sociologie des sciences de nous avoir fait apercevoir combien la rhétorique et un habile recrutement des pairs, *via* les bibliographies mais aussi *via* ces petits essais d'histoire des sciences, jouent un rôle d'importance y compris dans les travaux réputés les plus abstraits et formels³. Nous pouvons supposer, sans grands risques, que dans les champs moins formalisés

¹ Cette approche peut également rappeler, quoique très grossièrement, celle du philosophe Imre Lakatos. Ce dernier n'hésite pas en effet à prôner une reconstruction *a posteriori* des filiations techniques et intellectuelles : voir par exemple [Lakatos, I., 1978, 1986, 1994].

² Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 235-236.

³ On peut se référer à la tradition de décryptage sociologique de la logique telle qu'elle fut initiée, entre autres, par Jack Goody puis David Bloor, à la fin des années 1970. Sur le cas particulier de l'histoire de la logique floue, voir les travaux

des sciences de la vie et des sciences humaines, ces essais récapitulatifs jouent *a fortiori* un grand rôle dans la constitution même des pratiques techniques puisqu'ils servent notamment à argumenter le choix de certains formalismes par opposition à d'autres, jugés dépassés parce que censés appartenir à l'histoire.

Dans le même ordre d'idées, on pourrait nous objecter également que de tels historiques sont par principe aisés à balayer de la main pour le philosophe et l'historien, du fait qu'ils témoignent le plus souvent d'une philosophie des sciences rudimentaire et donc d'une incompréhension fondamentale des raisons et des processus qui animent véritablement la science dans son histoire¹. C'est là encore se rendre coupable d'un procès d'intention qui nous paraît désormais injuste : à la différence peut-être de l'époque de Bachelard ou de celle de ses disciples, on ne peut plus aujourd'hui partir du principe que la philosophie spontanée des savants est prévisible, donc inutile à lire, car univoque ou trivialement bipolarisée². Avec le développement de la modélisation, le polyphilosophisme que Bachelard voulait voir à l'œuvre mais de façon cachée (aux yeux des philosophes comme des scientifiques réfléchissant en philosophes sur leur discipline) dans les travaux des physiciens contemporains³, est devenu monnaie courante en physique et dans diverses autres sciences. Ce polyphilosophisme se présente de façon souvent consciente, ouverte et sous la forme soit de micro-épistémologies locales et orientées, soit d'une polyméthodologie de principe assumée, quoique peut-être encore naïvement, par nombre de scientifiques⁴. Il règne en effet un relatif accord au sujet d'un des apports de la modélisation dans les sciences : le recours à des formalismes divers, dispersés, de moins en moins préférés par tradition interne au champ considéré mais de plus en plus par translation entre champs naguère hétérogènes⁵. La dispersion technique comme épistémologique de la méthode des modèles nous semble reconnue de manière assez large, dans le troisième quart du 20^{ème} siècle. Ces travaux historiques ou récapitulatifs ne doivent donc pas être méprisés par principe, car c'est aussi en eux qu'une épistémologie, certes peut-être seulement inchoative, peut se laisser lire qui nous rendrait plus compréhensibles les évolutions rapides du monde scientifique contemporain.

Toutes ces raisons font qu'on ne peut se dispenser d'avoir recours à ces sources précieuses. Mais il faut bien garder à l'esprit que leur statut est à la frontière entre ce que l'historien nomme « source primaire » et « source secondaire » (voir les arguments de notre introduction générale). Ce serait une erreur selon nous de faire entrer de force ces essais d'histoire des sciences dans l'une ou l'autre seulement de ces deux catégories de sources. C'est

récents menés par Claude Rosenthal [Rosenthal, C., 1998]. Par ailleurs, la notion sociologique de « recrutement » est longuement thématisée dans [Latour, B., 1989, 1995].

¹ Michel Fichant indique ainsi que, dans une perspective bachelardienne, la philosophie des sciences propre aux scientifiques – philosophie tiraillée entre un empirisme grossier et un souci éthique hors de propos – ne les autorise pas à produire une épistémologie historique valable, [Fichant, M., 1973, 2000], p. 143.

² Selon l'interprétation unilinéaire d'Althusser (1967) par exemple, qui, dans la dynamique de la science, ne veut voir à l'œuvre que deux tendances antagonistes : le matérialisme et l'idéalisme.

³ Voir [Bachelard, G., 1949, 1962], pp. 5-7.

⁴ Voir, par exemple, les réflexions épistémologiques de valeur menées par Pierre Delattre sur un cas scientifique précis à partir du problème de la pluralité des modèles. Parlant de deux modèles d'interprétation de certaines maladies, il précise : « La difficulté [à conjoindre les deux modèles concurrents] vient essentiellement, à mon avis, d'une part des contextes épistémologiques différents dans lesquels nous nous sommes placés respectivement [...], d'autre part des objectifs différents que nous avons. Pour des raisons pratiques – thérapeutiques – précises. E. Bernard-Weil devait élaborer un modèle qui 'colle' au plus près des données cliniques nombreuses qu'il avait relevées, avec toutes les contraintes que cela suppose. De mon côté, je n'avais pour objectif que de montrer la possibilité théorique du phénomène de régulation inverse, en me plaçant dans le cadre d'un formalisme cohérent et d'applicabilité assez large - celui des systèmes de transformations », [Delattre, P. et Thellier, M., 1979], Tome 1, p. 369.

⁵ C'est par exemple en ces termes que le mathématicien et historien de la modélisation mathématique, Giorgio Israel décrit une des deux propriétés qui, selon lui, caractérisent la modélisation mathématique : « le renoncement à toute tentative d'aboutir à une image unifiée de la nature : un modèle mathématique est un fragment de mathématique appliqué à un fragment de réalité », [Israel, G., 1996], p. 11.

aussi pourquoi, pour couper court à ces difficultés dont nous avons conscience, nous avons bien sûr recours à elles, mais préférentiellement en contexte, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de restituer au plus près l'histoire du cas que nous avons choisi. Ce n'est que dans le contexte de la restitution historique elle-même que nous sommes à même de rectifier, si le besoin s'en fait sentir, de telles interprétations historiques. Nous nous refusons donc à tenter de broser ici un tableau synoptique de l'histoire des sciences écrite par les scientifiques eux-mêmes, car nous ne serions pas d'emblée aptes à en percevoir les limites ni non plus à en exprimer par avance l'unité ou la diversité.

Une troisième histoire des sciences, plus philosophique car cherchant à se rendre compréhensible une certaine « logique de l'histoire »¹ tout en laissant place à la contingence, tente de ressaisir les conditions de possibilité tant historiques, contextuelles et sociales que techniques, épistémologiques et conceptuelles de la science en marche propre à une époque. D'elle dépend tout un ensemble de productions épistémologiques, particulièrement en France, dont nous étudierons en revanche ici de façon assez détaillée les positions successives et concurrentes au sujet des modèles (voir annexe B). L'épistémologie historique française, surtout depuis Georges Canguilhem, s'est en effet assez constamment intéressée au développement des modèles et des simulations. Nous verrons cependant que, malgré ses déclarations d'intention, il lui a en fait souvent manqué une réelle approche historique, comme une maîtrise exhaustive de certains corpus choisis, surtout en ce qui concerne la science contemporaine. Ces approches sont de ce fait trop souvent précipitées, ou nivelantes au regard de la complexité de l'histoire. Du point de vue de la méthode historique et de l'utilisation de l'histoire qui leur est propre, les philosophes des sciences anglo-saxons peuvent être, dans leur majorité, également rangés dans cette catégorie d'épistémologie historique. Ils procèdent par études de cas de façon à pouvoir exprimer une épistémologie personnelle sans toujours prendre la peine de resituer ces « cas » dans leur contexte institutionnel et intellectuel et sans toujours se laisser surprendre par les déroutes que, selon nous, l'histoire intellectuelle se doit de faire subir à toute préconception épistémologique hâtive, sans quoi elle risque bien de ne rien nous enseigner. Les sociologues des sciences ont alors eu beau jeu de critiquer cette méthode mais ils se sont souvent rendus coupables de pratiquer de la même façon en partant simplement d'autres *a priori* philosophiques : des *a priori* sociologistes que nous classerons aussi dans les *a priori* de type philosophique.

Dans un style nettement différent, plus proche d'une histoire épistémologique que d'une épistémologie historique, car privilégiant l'histoire intellectuelle et sociale tout en y mêlant, mais secondairement, des réflexions épistémologiques éparpillées, on retrouve, pour les domaines qui nous concernent, les travaux de Sharon E. Kingsland² et Giorgio Israel, notamment pour la modélisation dans les sciences de la vie, et ceux de Peter Galison pour la modélisation et la simulation en physique nucléaire³. C'est à de tels travaux que nous prêterons particulièrement attention dans cette annexe. Ils constituent le quatrième type d'histoire des sciences. C'est ce type d'histoire qui s'inscrirait plutôt sous la bannière d'une coexistence enfin pacifique entre une approche intellectualiste, du type de celle que la France avait connue avec Koyré⁴, et une approche

¹ Ainsi, selon Georges Canguilhem, dans la perspective d'une épistémologie historique des sciences, il s'agit au contraire de faire prévaloir les « droits de la logique de l'histoire » sur les « droits de la logique », [Canguilhem, G., 1955], p. 5.

² Dans « Modeling Nature » [Kingsland, S. E., 1985, 1995], l'auteur retrace l'histoire de l'écologie des populations dans une approche centrée sur les principales figures qui l'ont illustrée et sur leurs apports respectifs.

³ [Galison, P., 1997].

⁴ Sur le conflit des approches à la fin du « règne » de Koyré, chez les philosophes et sociologues français intéressés à l'histoire des sciences et des idées, on peut consulter les articles réunis dans le numéro spécial de la *Revue de synthèse*

apparentée à l'histoire sociale des idées et des techniques. Délaissées par les philosophes, ce sont d'abord les historiens qui, en France, ont victorieusement pris le relais en ce domaine, notamment avec Jacques Roger et ses élèves. Cependant, ces travaux d'historiens ont rarement concerné l'époque et l'objet qui ici nous intéressent. Ce sont alors des scientifiques qui sont venus à leur tour, et progressivement, à cette approche. Cette quatrième forme d'histoire des sciences contemporaines, que l'on pourrait qualifier d'intégrative, a mobilisé des scientifiques venus après coup à l'histoire et elle a récemment vu la naissance de travaux d'importance. Or, c'est bien dans cette dernière perspective, celle d'une histoire épistémologique intégrative, mais aussi compréhensive, que nous souhaitons inscrire notre propre démarche. Mais comment allons-nous procéder pour cette revue des travaux existants ?

Plan de cet état des lieux

Dans un premier temps, nous rappellerons rapidement la teneur des accords relatifs entre historiens au sujet de l'émergence des modèles scientifiques avant l'apparition des modèles mathématiques. Cette émergence se perdant dans les origines débattues des pratiques techniques des hommes, ce n'est pas ici le lieu d'en proposer une lecture historique nouvelle. Cela passerait nos compétences comme le cadre limité de ce travail. Nous avons donc tâché de rappeler ce qui nous semblait faire consensus à nos yeux, dans cette histoire difficile mais déjà écrite par d'autres. Cette préhistoire des modèles nous est en fait apparue comme rapportée d'une façon assez uniforme par les différents historiens et philosophes qui s'en sont préoccupés. Sur ces origines semble en effet régner une sorte d'accord minimal que nous nous contenterons donc de rappeler, même si des questions de détail peuvent bien sûr, çà et là, être soulevées. Cependant, comme on le verra, cet exposé rapide ne sera pas sans conséquence. À l'occasion de ce rappel que nous voulons assez général, il nous sera en effet donné d'apercevoir par exemple déjà précisément l'origine et la teneur du malentendu qui règne entre la conception anglo-saxonne et germanique (voire autrichienne) des modèles, d'une part, et la conception plus spécifiquement française, d'autre part. Ce malentendu se maintiendra sous des formes à peine modifiées ; et il prospérera en déployant par la suite son ombre portée sur les interprétations divergentes qui seront données à la mathématisation croissante des modèles scientifiques au 20^{ème} siècle. Dans un deuxième temps, nous procéderons à un rappel synthétique des divers acquis que l'on doit à différents historiens des sciences contemporaines, en particulier en histoire de la modélisation mathématique dans les sciences du vivant. Il nous apparaîtra que c'est l'histoire de cette modélisation en écologie, dynamique des populations, génétique et biométrie qui, en ce domaine, est la plus avancée. La raison en est simple : c'est surtout par ces biais que la méthode des modèles mathématiques est d'abord entrée dans les sciences de la vie. Les historiens des modèles se sont donc penchés préférentiellement sur ces disciplines. Quant à la modélisation de l'ontogenèse, elle a semblé s'imposer avec moins de force et plus de difficultés. L'histoire de la modélisation de la forme des plantes reste donc pour sa part un terrain relativement vierge.

Les modèles avant la modélisation mathématique

Pour certains anthropologues, il semble qu'une pratique cognitive des modèles ait toujours existé sous une forme ou sous une autre, à commencer par la pratique des images et des modèles

consacré à Henri Berr : [Biard, A., Bourel, D. et Brian, E., 1997], en particulier la contribution de Pietro Redondi, pp. 139-155.

réduits¹ et ce dès le développement d'une pensée mythique. Il est même des théories biologiques, neurobiologiques ou cognitives contemporaines qui caractérisent l'esprit par sa faculté essentielle à modéliser et à simuler le monde réel ou la vie mentale d'autrui². La pratique des modèles serait ainsi consubstantielle à l'exercice de l'esprit humain et donc, *a fortiori*, inhérente à toute technique humaine. Sans vouloir rentrer dans ces débats scientifiques actuels qui ne nous concernent pas directement, précisons que, de leur côté, les historiens des sciences et des techniques s'accordent au moins sur un fait qui semble caractériser l'histoire des idées et des pratiques plus particulières de la modélisation dans la science occidentale : l'abstraction croissante de ses modèles au cours du temps. La préhistoire de ces modèles indique en effet que d'instruments techniques de test et de persuasion qu'ils furent d'abord, ils sont progressivement devenus des instruments scientifiques voire des objets théoriques³. Dans la culture occidentale, nous voyons poindre en effet cette tendance à l'abstraction, apparemment assez générale, et qui pousse aujourd'hui les modèles à n'être essentiellement que des modèles mathématiques. Comment, dans les études déjà existantes, a-t-on généralement interprété cette évolution ?

Comme le rappelle Suzanne Bachelard (1979), le terme « modèle » vient du latin *modulus*, via l'italien *modello*, qui désignait l'unité de mesure étalon servant à définir les rapports entre les dimensions des édifices architecturaux. De façon très générale, il désigne donc ce à quoi on se rapporte pour se représenter quelque chose. Dans ces conditions, le modèle peut être soit la chose visée à travers cette représentation (le modèle est alors normatif et est perçu dans son exemplarité insigne : le « *top-model* »), soit le résultat de l'acte de représentation, autrement dit le représentant nécessairement simplifié et altéré de l'objet représenté : le « modèle réduit ». Rappelons qu'il est extrêmement courant dans l'histoire des langues de voir ainsi se manifester, pour le même mot, des glissements de sens qui s'opèrent selon l'axe même de la métonymie⁴. Il ne faut donc point trop s'en étonner ici. Nous ne nous attarderons pas sur la question de savoir ce que peut signifier cette actuelle ambivalence dans le cas de la signification de notre terme « modèle », même si elle peut donner effectivement lieu à des problématisations poétiques ou philosophiques suggestives. Remarquons simplement que c'est la seconde signification qui finalement prédomine dans les techniques et les sciences, aux débuts de l'époque moderne. Le modèle devient synonyme de représentation simplifiée. Cela signifie d'abord qu'il peut être réalisé à une échelle différente de ce qu'il représente. Dans ce cas, les matériaux utilisés pour le modèle sont identiques ou tout au moins de qualité physiquement semblable à ceux dont est constitué ce qu'il représente. Le modèle est ainsi apparenté à une maquette : d'où l'expression « modèle

¹ Voir [Lévi-Strauss, C., 1962, 1985], p. 39 : « Autrement dit, la vertu intrinsèque du modèle réduit est qu'il compense la renonciation à des dimensions sensibles par l'acquisition de dimensions intelligibles. » On sait par ailleurs combien Claude Lévi-Strauss a su rendre plausible, avec son analyse du bricolage comme pensée scientifique « première » (*ibid.*, p. 30) – exercée à l'aide d'images qui font signes sans être encore des concepts –, l'idée d'une anthropologie voire d'une préhistoire des sciences. Par ailleurs, le recours aux concepts de l'anthropologie des sciences en préhistoire des sciences fait l'objet d'un vif débat actuellement, débat dans lequel nous ne rentrerons pas. Voir, sur ce débat, [Keller, O., 1998].

² Voir [Monod, J., 1970b], p. 23 : « C'est le puissant développement et l'usage intensif de la fonction de simulation qui me paraissent caractériser les propriétés uniques du cerveau de l'homme [...] Je ne crois pas en effet qu'il faille considérer les images non visuelles sur lesquelles opère la simulation comme des symboles, mais plutôt, si j'ose ainsi dire, comme la 'réalité' subjective et abstraite, directement offerte à l'expérience imaginaire. » Voir également [Jeannerod, M., 2002], chapitre VIII, pp. 141-167, intitulé « La simulation mentale ». L'approche de cet auteur insiste sur le fait qu'il y a chez l'homme moins d'empathie avec le non-biologique ou le non-humain qu'avec nos semblables. Le rapport empathique à autrui engagerait notre esprit dans une sorte de simulation de ses états mentaux par les nôtres.

³ Nous ne nous prononcerons pas ici sur la question de savoir s'il y a eu rupture ou continuité dans cette préhistoire des modèles par rapport à la « mentalité primitive » - lecture discontinuiste de Lévy-Bruhl – ou par rapport à la « pensée sauvage ou mythique » - lecture continuiste de Lévi-Strauss.

⁴ La métonymie est la figure de style par laquelle on désigne la partie par le tout, l'effet par la cause, etc. Sur la fréquence de tels glissements sémantiques dans l'évolution des langues, voir [Zinc, G., 2000].

réduit ». Chez les ingénieurs du 16^{ème} siècle, il a alors la double fonction de persuader et de permettre des simulations, c'est-à-dire la « monstration des effets », selon l'expression d'Hélène Vérin¹. Le modèle est là pour illustrer un argument ou pour remplacer un calcul par une mesure directe sur le modèle matériel, comme dans les actuelles souffleries. Aujourd'hui ce genre de modèle matériel existe donc encore et a explicitement pour fonction de pallier l'absence d'une méthode de résolution par arguments logiques ou mathématiques. C'est notamment le cas en hydro-dynamique où les équations de Navier-Stokes ne peuvent être analytiquement résolues.

La persistance de l'usage des modèles en science et technique confirme le diagnostic récent (1994) de l'historien des sciences Alistair Cameron Crombie au sujet des divers styles récurrents, depuis la Renaissance, qui animent la pensée scientifico-technique occidentale. Dans le cas de la modélisation, il s'agit du recours à un analogue matériel dans le but de mieux connaître l'objet modélisé. Remarquons que cela suppose de souscrire à ce que les anglo-saxons appellent le *maker's argument* : pouvoir produire et reproduire, c'est savoir. Or, pour Crombie, cette pratique récurrente de la modélisation témoignerait de la constitution d'un type de rationalité relativement indépendant des cinq autres types qu'il énumère par ailleurs² : la déduction à partir de principes, la logique du contrôle expérimental, la taxonomie, le calcul des chances en situation d'incertitude et la dérivation historique ou explication généalogique. Ainsi que le remarque Anne Fagot-Largeault, une telle présentation de la modélisation à l'intérieur du déploiement ramifié de la rationalité occidentale et de ses styles, au cours de son histoire, tend à asseoir aussi bien l'idée d'une incommensurabilité relative entre ces styles, déjà rendue populaire par Thomas Kuhn en son temps, que celle d'une possible cohabitation pacifique entre eux. Cette dernière idée nous paraît plus récente et originale. C'est l'occasion pour Crombie de préciser l'idée selon laquelle la rationalité occidentale, n'étant en elle-même ni uniforme ni univoque, pourrait donc être intrinsèquement, car constitutivement, disposée à accueillir les modes de construction et d'accréditation du savoir propres à d'autres civilisations ou à d'autres cultures. S'il nous faut bien évidemment suivre Crombie lorsqu'il constate l'ancienneté des pratiques de modélisation et leur récurrence, de proche en proche et par périodes, dans l'histoire des sciences, notre problématique, on le voit d'emblée, ne peut pourtant se satisfaire de ce seul constat, certes modeste et sans doute clairvoyant dans sa précision et sa rigueur historique. Car, si l'on se limite à affirmer que ces styles de démarche scientifique cohabitent et travaillent parfois à se compléter mutuellement, on ne s'autorise pas pour autant à penser la possible résorption de l'un en l'autre. Or ce type de résorption nous semble pourtant intervenir, notamment lorsque le modèle devient mathématique et qu'il n'est plus seulement matériel. En effet, nous faudrait-il alors situer la pratique contemporaine des modèles mathématiques dans la lignée du premier style (la déduction et la mathématisation), ou dans celle du deuxième (la logique du contrôle expérimental) ou bien encore dans celle du troisième (la modélisation analogique) ? N'est-ce pas finalement plutôt dans les trois ? Les ramifications de la rationalité occidentale dont parle Crombie donneraient donc parfois lieu à des bouclages, à des cas de fusions entre rameaux naguère autonomes. La perspective qui est la nôtre, de par le choix d'une problématique centrée sur la mathématisation croissante des sciences non-exactes au moyen des nouvelles formes de modélisation semblerait donc confirmer aussi bien que modifier quelque peu, pour la période récente, le diagnostic général de Crombie. Mais existe-t-il déjà quelque accord entre historiens au sujet des premières métamorphoses des modèles dans le passé des sciences ?

¹ [Vérin, H., 1993], p. 45.

² Pour ce passage, nous nous appuyons sur la synthèse rapide qu'en fait Anne Fagot-Largeault dans [Andler, D., Fagot-Largeault, A. et Saint-Sernin, B., 2002], pp. 162-164.

Les modèles mécaniques du vivant : identification physico-mécanique ou analogie structurelle ?

Ainsi que Canguilhem l'a noté¹, nombre des termes grecs de l'anatomie humaine et dont l'étymologie atteste l'antiquité sont en fait directement construits sur une identification mécanique et fonctionnelle entre organes vivants et objets techniques. Il est donc difficile de situer précisément, dans l'histoire des sciences, l'origine de cette pratique de l'analogie ou de l'identification entre objets de nature et objets de main d'homme : elle est probablement au moins contemporaine de la constitution même de la plupart des langues occidentales. Ce qui renverrait donc dans un passé bien plus ancien les racines de la modélisation que l'on veut voir souvent naître dans la Renaissance européenne. Quoi qu'il en soit, dans le cas particulier de la médecine, c'est bien dès l'Antiquité que le modèle rend tangible et visible de façon simplifiée le fonctionnement ou la structure d'un organe. Par la suite, dès le début du 17^{ème} siècle, et avant même que le terme de « modèle » n'apparaisse dans une perspective explicite de connaissance et non plus seulement comme vague analogie fonctionnelle, l'usage de « modèle du vivant » au sens d'une identification d'un mécanisme à un organe, s'est énormément développé, et ce notamment dans le contexte de la philosophie mécaniste. Descartes, par exemple, reprenant les idées du médecin anglais Harvey, identifie le cœur à une pompe. Ces « modèles » mécaniques avant la lettre atteignent leur apogée avec Vaucanson. Mais, à la différence des modèles réduits des ingénieurs, ces modèles du vivant apportaient déjà avec eux une ambiguïté nouvelle et donc ouvraient la voie à des options philosophiques divergentes : fallait-il les considérer comme étant seulement structurés de façon analogue (identification structurelle ou analogie) ou comme étant matériellement semblables aux organes qu'ils représentaient (identification physico-mécanique) ? Autrement dit, ces modèles mécaniques étaient-ils mécanistes² ?

Cet usage du modèle mécanique pour le vivant n'était pas neutre en effet, puisqu'il semblait illustrer la thèse controversée d'une réduction du vivant au physico-mécanique. La même question peut d'ailleurs être posée en ce qui concerne les lois de l'optique géométrique « appliquées » au vivant si l'on remarque, avec Canguilhem, que la formation du concept de réflexe leur doit, avec Willis, la notion de « réflexion »³. À notre avis, l'ambiguïté inévitable et le caractère de manifeste ou tout au moins de représentation polémique de tout modèle du vivant, en ce sens précis, venaient notamment du fait qu'il n'était pas possible de fabriquer un modèle du vivant avec les mêmes matériaux que ceux dont est constitué ce qu'il représentait, à la différence du modèle réduit des ingénieurs, sauf à prendre un autre être vivant, mais que précisément on n'avait pas fabriqué ou « modelé », pour un « modèle » du premier. C'est d'ailleurs précisément ce dernier sens, plus tardif, que le mot modèle prendra, lorsque la biologie contemporaine désignera de ce terme la drosophile ou d'autres organismes parmi les plus simples à étudier. Quoi qu'il en soit, selon Jean-Claude Beaune⁴, chez Vaucanson par exemple, le rôle simplement heuristique des automates était conscient et clairement attesté : il s'agissait de mieux faire voir et ainsi de mieux faire comprendre le fonctionnement de la vie animale. L'ambiguïté dont nous avons parlé est donc probablement aussi ancienne que cette pratique de l'analogie ou de l'identification entre objets de

¹ [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 306.

² Pour une analyse fouillée des transactions complexes entre mécanisme et vitalisme au cours du 17^{ème} siècle, voir [Duchesneau, F., 1998].

³ [Canguilhem, G., 1955].

⁴ [Beaune, J.-C., 1979].

nature et objets de main d'homme : entre l'identification seulement structurelle et l'identification physico-mécanique, on ne peut dire que le choix ait toujours été conscient ni qu'il ait toujours été fait.

Il faut remarquer que, jusqu'au début du 20^{ème} siècle, la science du vivant, malgré sa fascination pour les automates, n'avait pas su trancher entre l'approche de simple monstration et celle de démonstration rigoureuse. Certes les automates de Vaucanson avaient clos une période brillante, mais qui restera pour longtemps stérile : Vaucanson n'avait pu ni voulu fournir les outils de validation rigoureuse de ses analogies matérielles¹. En effet, ainsi que l'explique Jean-Claude Beaune, dans l'esprit de Vaucanson et à son insu, magie transcendante et science se mêlaient encore trop : empreint de la tradition mythique et fasciné lui-même, il lui suffisait, en quelque sorte, d'attendre, sans en être bien conscient, que l'automate s'anime comme dans le mythe. Ainsi, dans cet état d'esprit, il lui aurait semblé peu pertinent de rechercher à affiner davantage, dans la rigueur et par la mesure laborieuse pour en concevoir une théorie, cette analogie déjà si patente entre le corps vivant et l'automate.

C'est en fait la physique qui développera de façon intensive la pratique des modèles, à la fin du 19^{ème} siècle, avant d'inspirer assez rapidement la biologie en retour. Mais cet usage des modèles concrets en biologie se renouvellera dans la mesure même où la physique, précédant la biologie, a ouvert le savoir à des champs de phénomènes, donc à des champs d'analogies, nouveaux, dont plus particulièrement celui de l'électricité. Cela transparaît notamment dans l'histoire des différents modèles électriques du nerf tels qu'ils verront le jour à partir des travaux de Galvani².

Les modèles mécaniques en électrostatique, électromagnétisme et thermodynamique

Il existe une vaste littérature sur l'essor des modèles dans les sciences physiques. Nous pouvons renvoyer ici au travail de J. Dhombres et J.-B. Robert sur Fourier (1998), aux travaux de P. M. Harman sur Thomson, Faraday et Maxwell (1998), à ceux, déjà anciens, de R. Dugas sur Boltzmann (1959), à ceux de J. Bouveresse sur Boltzmann (1991, 2001), et à la plupart de ceux réunis par Morgan et Morrison (1999), ainsi qu'à leurs bibliographies.

Historiquement, il apparaît que les modèles se développent en physique à une époque où les savants se penchent sur de nouveaux phénomènes, rebelles à une réduction directe à la mécanique qui serait tout à la fois simple et immédiate. Or, il faut bien comprendre que, dans la physique du 19^{ème} siècle, l'objectif principal de la modélisation a bien été d'emblée de se rendre accessibles des phénomènes jusque là mal maîtrisés parce qu'incomplètement théorisés. L'enjeu principal des modèles, en physique, est bien, dans ce contexte, d'accroître une maîtrise mathématique. Mais cette volonté de maîtrise mathématique est équivoque et n'est pas interprétée partout de la même manière : soit on pense que cette volonté commande simplement de se rendre à même de construire le formalisme mathématique adéquat, soit on considère que la détention de ce formalisme doit se doubler d'une maîtrise intellectuelle de la mathématique concernée, surtout si elle est nouvelle. Nous pensons que c'est principalement sur cette ambivalence interprétative largement due aux différences nationales entre la pratique de la « science » en France et celle des pays anglo-saxons (Angleterre, Etats-Unis principalement) que vont s'installer des malentendus entre historiens et épistémologues qui subsistent parfois aujourd'hui.

Ainsi, de façon compréhensible, certains historiens des sciences français veulent voir en Fourier l'un des premiers physiciens à avoir produit une modélisation au sens d'une modélisation

¹ [Beaune, J.-C., 1979].

² [Canguilhem, G., 1963, 1968].

mathématique. Si l'on accepte en effet de considérer que l'on a directement recours au modèle mathématique en science dès que l'on peine à se donner des phénomènes une représentation que l'on juge adéquate, on peut dire que c'est avec Joseph Fourier que la physique, après la mécanique, devient tout à la fois modélisante et mathématique. C'est bien sur ce point la thèse que soutiennent Jean Dhombres et Jean-Bernard Robert¹. En effet, ce serait devant la question du transfert de la chaleur que la pratique moderne de la modélisation aurait fourbi des armes prometteuses et se serait développée efficacement, au sens où elle aurait réussi à introduire *directement* un outillage mathématique dans une discipline jusqu'alors rebelle à la prédiction précise car vouée aux « qualités secondes », selon la tradition philosophique².

Dans le cas de Fourier, on serait dès lors autorisé à dire que la difficulté de son entreprise l'aurait paradoxalement servi. En effet, en ce qui concerne les phénomènes qui intéressaient Fourier, rien ne se donne à *voir* de ce qui se trame dans la matière et lui fait communiquer sa chaleur. Pour produire une théorie de la communication de la chaleur, il faudrait donc inventer, se livrer à une construction imaginative purement mathématique. En supposant que l'on peut s'en tenir au seul problème de la communication de la chaleur, sans se laisser paralyser par la question de sa substance, Fourier montre en effet que l'on peut procéder par une « notion hypothétique de la communication de la chaleur », ainsi qu'il le dit lui-même³. Ce serait donc parce que Fourier aurait délibérément décidé de porter une attention plus soutenue aux relations fonctionnelles entre les phénomènes mesurables, aux processus, qu'à leur nature hypothétique, qu'il aurait ouvert la voie d'une physique pleinement mathématique.

Mais selon les historiens des sciences anglo-saxons, la modélisation n'aurait pas eu d'emblée pour seul objectif la mathématisation directe de phénomènes mal conçus à l'échelle microscopique. La naissance de la modélisation en physique serait ainsi moins due à une volonté de mathématiser directement, en s'émancipant des observables, qu'à une nécessité de saisir par la pensée ce qui se joue précisément *dans les outils mathématiques* que l'on manipule en pensée et qui s'avèrent en effet (et c'est là que les deux contextes techniques et scientifiques français comme anglais sont bien entendu communs) de plus en plus sophistiqués et complexes. C'est pourquoi une grande partie des historiens situent plutôt dans les travaux de Faraday, Helmholtz, Hertz, Thomson (Lord Kelvin), Maxwell et Boltzmann l'avènement progressif de la pratique contemporaine de la modélisation. Nous suivons de préférence cette lecture de l'histoire des sciences car, dans la perspective qui est la nôtre, nous choisissons délibérément de privilégier une approche particulièrement sensible aux problèmes communs auxquels une génération de scientifiques a pu se sentir nouvellement mais consciemment et explicitement confrontée. Il ne s'agit certainement pas pour nous de nier que Fourier ait eu recours à une façon nouvelle de mathématiser en physique, ce qui est possible, ni que cette façon ait par la suite servi d'idéal scientifique pour certains successeurs, mais seulement de tempérer l'approche rétrospective qui lui accorderait d'avoir été le premier promoteur de la modélisation mathématique avant même que le terme n'existe.

Dans cette perspective, c'est l'incontestable inflation du terme « *model* » dans les écrits des auteurs principalement anglo-saxons de la seconde moitié du 19^{ème} siècle qui peut, à bon droit, nous donner le point de départ de cette nouvelle forme de pratique scientifique et ainsi nous poser

¹ [Dhombres, J. et Robert, J.-B., 1998].

² C'est encore par cette propriété de se prêter à une mathématisation directe – donc sans passage par une théorie – que Nicolas Bouleau caractérise la modélisation dans les sciences et les sciences de l'ingénieur. Voir [Bouleau, N., 1999], p. 320.

³ [Dhombres, J. et Robert, J.-B., 1998], p. 472.

question. Suivant cette lecture, les physiciens anglais, ainsi que Boltzmann, certes stimulés par la réussite de Fourier, ont repris cet objectif de mathématisation pour les problèmes de l'électromagnétisme et de la théorie des gaz, mais tout en restant attachés à la possibilité d'exprimer et de se figurer concrètement ce que l'outil mathématique enveloppe. Maxwell¹, le premier, qualifie, « l'imagerie géométrique » des lignes de force inventée par Faraday de « modèle géométrique »². Cette façon de procéder possède l'immense qualité, selon lui, de nous faire « obtenir des idées physiques sans théorie physique »³. Remarquons bien ici que le modèle, même s'il est explicitement qualifié de « géométrique », permet non pas tant d'abord de mathématiser un domaine physique nouveau que de se le représenter physiquement en l'absence (supposée temporaire) de théorie physique adéquate. Maxwell range d'ailleurs ce type de modèles (le « modèle géométrique ») parmi les « analogies physiques ». Voici sa définition : « par analogie physique, j'entends cette similitude partielle entre les lois d'une science et celles d'une autre, et qui fait que chacune des deux illustre l'autre »⁴. On le voit, cette citation souvent reprise par les épistémologues français⁵, ne désigne pas aussi clairement qu'on l'aurait peut-être voulu une anticipation de ce que les mathématiciens appelleront plus tard un isomorphisme. Elle est en elle-même déjà porteuse d'ambiguïtés.

Par la suite, Maxwell justifiera aussi le recours à l'image des boules dures, infiniment élastiques et s'entrechoquant, pour expliquer le comportement des gaz. La physique statistique est donc un terrain de naissance privilégié pour les modèles scientifiques au sens contemporain. Mais il est une chose que l'on veut souvent ignorer : Maxwell tiendra à distinguer ce deuxième type d'« analogie physique » du premier, précisant en cela la distinction déjà opérée par Thomson entre « théorisation mathématique » et « théorisation physique »⁶. En effet, devant les lignes de force de Faraday, il faut seulement parler d'un « modèle géométrique », selon lui, autrement dit, d'une analogie essentiellement mathématique. On ne doit pas y prendre au sérieux ce recours à un domaine physique autre, pour illustrer celui qui nous occupe. C'est-à-dire que le physicien ne fait ici aucune hypothèse physique concernant l'existence supposée de quelques lignes de force que ce soit. La visée ici est bien précise et limitée. Ainsi la « fonction potentielle », par exemple, qui découle de cette lecture géométrique de Faraday n'est conçue, par Maxwell, que comme une « abstraction mathématique » qui permet de « clarifier nos conceptions » et « diriger notre attention » vers les propriétés réelles de l'espace⁷. Il ne faut donc pas la concevoir comme appartenant à une théorie physique à part entière, mais comme seulement destinée à ouvrir la voie à une théorie plus mature⁸. Au contraire, avec l'image des boules dures s'entrechoquant, le gaz fait l'objet d'une hypothèse physique au sens strict⁹. Les particules sont traitées comme si elles étaient approximativement des sphères dures. Le modèle vaut donc ici comme une approximation par laquelle on construit une « abstraction concrète » de la réalité, si l'on peut dire : « abstraction » parce qu'on idéalise et simplifie, « concrète » par ce que l'on se figure cette idéalisation sous une forme matérielle. Or, même si Maxwell exprime clairement la différence de statut entre les deux types d'analogie physique qui interviennent dans son œuvre, la confusion est

¹ Pour ces réflexions sur Maxwell, nous nous inspirons grandement des analyses très précises de [Harman, P. M., 1998].

² [Harman, P. M., 1998], p. 71.

³ [Harman, P. M., 1998], p. 71.

⁴ [Harman, P. M., 1998], p. 88.

⁵ Notamment [Canguilhem, G., 1963, 1968], [Bachelard, S., 1979] et [Parrochia, D., 1990].

⁶ [Harman, P. M., 1998], p. 79.

⁷ [Harman, P. M., 1998], p. 73.

⁸ [Harman, P. M., 1998], p. 88.

⁹ [Harman, P. M., 1998], p. 92.

aisée. Elle a inévitablement été entretenue par la suite et cela peut expliquer pour une part les fameuses réticences de Pierre Duhem, un demi-siècle plus tard, à l'égard des modèles (voir Annexe B). Mais dans les deux cas de figure, l'« analogie physique », qu'elle soit stricte ou seulement mathématique, a pour fonction essentielle, chez Maxwell, de rendre les théorèmes mathématiques « plus intelligibles à nombre d'esprits » et ainsi plus aisément « applicables aux problèmes physiques »¹.

À titre de bilan provisoire, on peut déjà apercevoir que les pratiques de Faraday, Hertz, Thomson et Maxwell ont mis en évidence l'équivoque qui se fait jour dans la pratique de la modélisation en physique. À la fin du 19^{ème} siècle, à l'instar de ce qui se passait déjà en biologie lorsque l'on avait recours à des modèles physiques, le statut épistémologique du modèle devient problématique dans la science physique elle-même. User d'un modèle mécanique, est-ce vouloir réduire tous les phénomènes physiques à la mécanique, discipline reine parce qu'entièrement mathématisée et donc porteuse d'un sens ontologique plus fondamental (modélisation réductionniste) ? Ou est-ce seulement illustrer une formulation mathématique tellement sophistiquée que l'on a perdu la possibilité d'une immédiate conception par l'entendement si bien qu'il faudrait la traduire en modèle pour la rendre intuitive à l'imagination (modélisation illustrative) ? A-t-on même besoin de rendre intuitive à l'imagination une formulation mathématique (modélisation figurative) ? C'est la question que posera Duhem. Et, cette illustration ne risque-t-elle pas d'être prise au premier degré, c'est-à-dire au sens d'une complète figuration, d'une présentation visualisable adéquate des phénomènes sous-jacents (modélisation idéologique) ? C'est la question originelle de Duhem, mais déplacée et reconduite, comme on le verra dans l'Annexe B, par Bachelard, Althusser, Badiou puis Canguilhem.

L'article « *Model* » de Boltzmann (1902)

Notons que, d'un point de vue historique, c'est l'article de l'*Encyclopedia Britannica* écrit par Boltzmann en 1902 qui rend publique, aux yeux des lecteurs cultivés, la généralisation de cette méthode dans les sciences physiques, même s'il n'est pas dépourvu d'ambiguïtés². Nous allons toutefois tâcher d'en repérer ici la construction et les principaux arguments. Boltzmann y rappelle avant tout que le terme de « modèle » a d'abord désigné une représentation tangible construite réellement ou en pensée. Il poursuit son exposé par l'affirmation selon laquelle, malgré les réticences et le mépris que les sciences avaient fini par avoir pour ces monstrations sommaires et concrètes, et cela essentiellement à cause du succès des symboles et des écritures dans la science post-newtonienne, la nécessité de recourir aux modèles se ferait de nouveau particulièrement ressentir dans les sciences, en ce début de 20^{ème} siècle. Cet article lui sert donc de tribune pour expliciter les mutations qu'il a pu constater ou qu'il voit venir dans la pratique scientifique. Il attribue ce renversement de tendance à l'augmentation considérable du volume des faits recueillis par la science au 19^{ème} siècle. Un tel accroissement obligerait de façon inédite les savants à suivre scrupuleusement la règle visant à économiser les efforts consentis pour la compréhension ou saisie englobante de ces faits, et la traduction des uns dans les autres³. Le recours aux modèles nous permettrait donc de suivre cette règle d'économie de pensée,

¹ [Harman, P. M., 1998], p. 90.

² Nous remercions ici Girolamo Ramunni et Pierre Matarasso de nous avoir fait remarquer l'importance de cet article.

³ Le texte dit exactement : "Yet as the facts of science increased in number, the greatest economy of effort had to be observed in comprehending them and in conveying them to others ; and the firm establishment of ocular demonstration was inevitable in view of its enormous superiority over purely abstract symbolism for the rapid and complete exhibition of complicated relations", [Boltzmann, L., 1902], p. 215.

popularisée auparavant par l'épistémologie d'Ernst Mach. Voici exactement dans quels termes Boltzmann justifie l'adaptation des modèles à cet objectif :

« Et l'établissement ferme de démonstrations oculaires était inévitable eu égard à leur énorme supériorité par rapport au symbolisme purement abstrait car elles autorisent une rapide et complète exposition [exhibition] des relations compliquées. »¹

Le fait que Boltzmann confère une grande importance à l'exposition concrète de relations symboliques compliquées tient à sa théorie de la connaissance dont il a pris la peine de rappeler brièvement la teneur, au début de son article :

« Depuis longtemps déjà la philosophie a perçu que l'essence du processus de notre pensée tient dans le fait que nous attachons des attributs physiques particuliers – nos concepts – aux divers objets réels qui nous entourent et par le moyen desquels nous essayons de représenter les objets à notre esprit [...] Selon cette perspective, nos pensées se tiennent à l'égard des choses dans un même rapport que les modèles aux objets qu'ils représentent. L'essence de ce processus est le rattachement d'un concept ayant un contenu défini à chaque chose, mais sans que cela implique une complète similitude entre la chose et la pensée ; parce que, naturellement, on ne peut connaître que très partiellement la ressemblance de nos pensées aux choses auxquelles nous les rattachons. »²

Boltzmann conçoit bien qu'une obscurité occasionnant de nouvelles réticences pourrait demeurer dans ses propos, notamment à cause de l'introduction de la notion assez vague de « ressemblance ». Il poursuit donc immédiatement, en recourant à une énumération d'analogies afin d'explicitier cette notion imprécise :

« Le type de ressemblance dépend ici de la nature de la connexion, la corrélation étant analogue à celle qui existe entre la pensée et le langage, le langage et l'écriture, les notes sur la portée et les sons musicaux, etc. Ici, bien sûr, la symbolisation de la chose est le point important, bien que la plus grande correspondance possible soit recherchée entre les deux quand cela est faisable, l'échelle musicale, par exemple, étant imitée par la position plus ou moins haute des notes sur la portée. Quand donc nous nous efforçons d'assister nos conceptions de l'espace par des chiffres, par les méthodes de la géométrie descriptive et par divers fils et objets modèles, notre topographie par des plans, des tableaux et des globes, et nos idées mécaniques et physiques par des modèles cinématiques, nous ne faisons qu'étendre et poursuivre le principe par le moyen duquel nous comprenons les objets dans notre pensée et nous les représentons dans le langage et l'écriture. C'est précisément de cette même manière que le microscope ou le télescope forme une continuation et une multiplication des lentilles de notre œil, et que le carnet de notes

¹ Argument à comparer avec ceux de Pierre Duhem dont il est question dans l'annexe B. Pour le texte intégral et originel de ce passage, voir la note précédente.

² "Long ago philosophy perceived the essence of our process of thought to lie in the fact that we attach to the various real objects around us particular physical attributes – our concepts – and by means of these to try to represent the objects to our minds [...] On this view our thoughts stand to things in the same relation as models to the objects the represent. The essence of the process is the attachment of one concept having a definite content to each thing, but without implying complete similarity between thing and thought ; for naturally we can know but little of the resemblance of our thoughts to the things to which we attach them", [Boltzmann, L., 1902], pp. 213-214.

représente une extension externe du processus que la mémoire provoque par des moyens purement internes. »¹

On voit donc que, par une espèce d'ironie, la définition de la ressemblance ne nous est pas donnée au niveau conceptuel mais que Boltzmann produit au contraire une énumération qui vaut comme monstration performative, en quelque sorte, de ce que cela peut signifier pour deux choses d'être ressemblantes. Il nous renvoie ainsi à des exemples divers de différents types de ressemblances qui sont donc eux-mêmes censés se ressembler pour donner consistance à la notion de ressemblance dans son unité. À nous de chercher à voir le point commun. En fait, il serait vain de croire en une définition unique de la ressemblance, voilà ce que veut dire et montrer ici Boltzmann. Il y a donc bien là en effet quelque chose comme la préfiguration d'un argument que l'on retrouvera bientôt chez Wittgenstein² et qui permettra de mettre en doute l'univocité des termes et la croyance en des significations subsistant hors de la mise en œuvre chaque fois particulière des mots dans des jeux de langage. Précisons même que cette doctrine de la ressemblance préfigure en un sens l'explication wittgensteinienne³ de l'unité de l'idée par la notion vague mais pertinemment imagée d'« air de famille ». Les mots désignent des choses différentes qui entretiennent entre elles un air de famille mais qui n'est pas le même d'une ressemblance à l'autre. Autrement dit, la ressemblance est chaque fois de type différent. Mais cela n'empêche pourtant qu'on la perçoive. D'où l'impossibilité de principe de définir à un niveau général et valant dans tous les cas ce que signifie une ressemblance⁴. Toujours est-il que cette théorie de la connaissance permet à Boltzmann de rendre homogènes entre elles nos conceptions et nos

¹ «What resemblance there is lies principally in the nature of the connection, the correlation being analogous to that which obtains between thought and language, language and writing, the notes on the stave and musical sounds, &c. Here, of course, the symbolization of the thing is the important point, though, where feasible, the utmost possible correspondence is sought between the two – the musical scale, for example, being imitated by placing the notes higher or lower. When therefore, we endeavour to assist our conceptions of space by figures, by the methods of descriptive geometry, and by various thread and object models ; our topography by plans, charts and globes ; and our mechanical and physical ideas by kinematic models – we are simply extending and continuing the principle by means of which we comprehend objects in thought and represent them in language or writing. In precisely the same way the microscope or telescope forms a continuation and multiplication of the lenses of the eye ; and the notebook represents an external expansion of the same process which the memory brings about by purely internal means", [Boltzmann, L., 1902], p. 214.

² Comme l'a vu Jacques Bouveresse, in [Bouveresse, J., 1974, 1987], pp. 200-216 et [Bouveresse, J., 2001], *passim*.

³ Cette idée sera davantage mise en lumière dans les *Investigations philosophiques*. Voir [Wittgenstein, L., 1922, 1961, 1990], § 67, p. 150 : « Je ne puis caractériser mieux ces analogies [entre les différents jeux que désigne le mot 'jeu'] que par le mot : 'ressemblances de famille' ; car c'est de la sorte que s'entrecroisent et s'enveloppent les unes sur les autres les différentes ressemblances qui existent entre les différents membres d'une famille ; la taille, les traits du visage, la couleur des yeux, la démarche, le tempérament, etc. – Et je disais : les 'jeux' constituent une famille. » Si la notion d'isomorphisme peut donc éventuellement valoir pour les concepts scientifiques chez le premier Wittgenstein, celui du *Tractatus*, il nous semble bien qu'elle est intenable chez le second Wittgenstein, celui des « Investigations », notamment pour les concepts philosophiques ou pour les concepts plus courants encore, c'est-à-dire en fait pour les concepts plus mal définis que ceux de la science. Il est significatif que, même dans cette seconde période, on retrouve les échos de textes boltzmanniens du type de celui que nous citons. L'épistémologie de Boltzmann nous paraît en avance sur celle du *Tractatus* et même sur celle des « Investigations » puisqu'elle relativise les concepts de la science eux-mêmes de la même façon que Wittgenstein le fera pour les seuls concepts philosophiques. En tout cas, grâce à la perspicacité de Wittgenstein, il nous apparaît rétrospectivement que ce texte de Boltzmann indique qu'on ne peut cantonner l'usage des représentations en science même à de purs isomorphismes qui seraient eux-mêmes entre eux isomorphes. Il serait faux de croire que l'on peut définir à l'avance les types de ressemblances et les faire se ressembler entre eux *a priori*, c'est-à-dire avant qu'on ait fait un usage scientifique et pratique de chacun d'eux. Cette question est celle même de la possibilité d'une épistémologie formaliste et générale. L'interprétation structuraliste, que fera Bourbaki, de la construction des modèles dans les sciences de la nature se montrera sur ce point très simpliste. Une telle lecture réductrice contribuera cependant au développement de l'approche typiquement mathématisée des sciences de la nature par nombres d'épistémologues français, et ce, jusqu'à nos jours. On n'a en effet encore rien dit en épistémologie des sciences mathématisées de la nature, quand on a dit qu'on y cherche, teste ou construit des structures (théories ou modèles) qui soient isomorphes à des structures mathématiques, que ces structures mathématiques soient d'ailleurs elles-mêmes préexistantes ou construites pour l'occasion, peu importe à cet égard.

⁴ Et, par contre-coup, tous les mots et les concepts de la langue.

représentations matérielles : il n'y a pas lieu de les hiérarchiser puisque les unes sont les continuations des autres et que les concepts ne sont que des « attributs physiques particuliers »¹. Davantage, il étend cette thèse de l'homogénéité des représentations internes et externes à ce qu'il appelle les « analogies arithmétiques » et dont il admet qu'elles ne sont pas à proprement parler des modèles mais dont il affirme qu'elles entretiennent avec le modèle, qu'il conçoit ici toujours simplement comme une « analogie spatiale concrète et en trois dimensions »², une relation de parallélisme.

En conséquence de cela, Boltzmann exhorte les scientifiques à suivre concurremment deux attitudes qui peuvent paraître, à première vue, contradictoires. Selon lui en effet, il faut d'une part qu'ils accroissent leur capacité à former des déductions à partir de prémisses purement formelles sans recours à des modèles tangibles. Et, d'autre part, ils doivent également faire en sorte que « les conceptions purement abstraites soient aidées par des modèles objectifs et compréhensifs dans les cas où l'on ne pourrait pas ni adéquatement ni directement traiter une grande masse de faits »³. La seconde exhortation n'est pas nouvelle, on le voit. Mais pour comprendre comment Boltzmann en vient à sa première exhortation, il convient de rappeler que la méthode déductive n'est pas à rejeter pour lui, au contraire. Cependant, elle ne doit pas être considérée comme analogue à ce qu'il appelle la « méthode euclidienne »⁴ qui se fonde sur une croyance en des axiomes formels enracinés. Elle doit au contraire inciter à l'élaboration et à l'utilisation abstraite de théories ou d'images qui condensent de façon économique et utile les connaissances. Pour Boltzmann comme pour Mach, la croyance en un enracinement des formalismes n'est donc plus nécessaire. Les théories, elles aussi, sont des images, mais elles ont la particularité d'en englober et résumer certaines autres qui sont moins simples et moins économes en moyens représentatifs. Et c'est lorsque ces théories-images demeurent elles-mêmes difficiles à embrasser du regard de l'esprit qu'il faut avoir recours aux modèles qui sont eux-mêmes des images explicatives de ces images abstraites⁵.

Dans les derniers paragraphes de son article, Boltzmann légitime enfin par un second argument cette nécessité d'un nouveau recours aux modèles⁶. Selon lui, pour comprendre cet argument, on doit se reporter à l'histoire de nos « conceptions de la nature » depuis Newton. Cette histoire a connu, selon lui, deux périodes majeures. Dans une première phase, la physique

¹ Sous l'influence explicite de Darwin, ce continuisme transparaît entre autres déjà dans un exposé de 1897 – *Über die Frage nach der objektiven Existenz der Vorgänge in der unbelebten Natur* (Sur la question de l'existence objective des processus dans la nature inerte) –, prononcé à l'Académie des Sciences de Vienne et cité par René Dugas : « La liaison intime entre les domaines psychiques et physiques est donné comme un fait d'expérience. Il est de ce fait hautement probable qu'à chaque processus psychique correspond dans le cerveau un processus matériel, qui lui est subordonné de façon univoque », [Dugas, R., 1959], p. 131. Boltzmann ajoute alors : « nous considérons le cerveau comme l'appareil, l'organe servant à la construction des *Weltbilder* [images du monde] », *ibid.*, p. 131.

² « a concrete spatial analogy in three dimensions », [Boltzmann, L., 1902], p. 214.

³ « purely abstract conceptions should be helped by objective and comprehensive models in cases where the mass of matter cannot be adequately dealt with directly », [Boltzmann, L., 1902], p. 215.

⁴ « Cette méthode part d'un nombre aussi réduit que possible de propositions, aussi évidentes que possible. Celles-ci étaient tenues dans l'ancien temps pour évidentes *a priori*, considérées comme données directement à l'esprit, et c'est pourquoi on les qualifiait d'axiomes [...] Mais la force démonstrative de semblables considérations devait graduellement tomber en discrédit, le premier pas dans ce sens étant dû [...] à ce qu'on était passé d'une base évidente *a priori* à un simple fondement garanti par l'expérience. On réalisa encore que les déductions à partir d'une telle base n'étaient possibles que moyennant de nombreuses hypothèses nouvelles, et enfin Hertz devait montrer que, nommément dans le domaine de la physique, notre conviction en la justesse d'une théorie conduit, dans tous les cas connus, à des conclusions exactes à l'égard des phénomènes. », *Über die Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik* (1899), (*Sur les principes fondamentaux et les équations fondamentales de la mécanique*) cité par [Dugas, R., 1959], pp. 34-35.

⁵ Comme on peut le voir, là est déjà en germe la position plus tardive de Nancy Cartwright (1983).

⁶ Le premier argument s'étant contenté, comme nous l'avons dit précédemment, de constater l'expansion considérable des faits que la science doit désormais concevoir.

théorique « se donnait comme principal objet d'investigation la structure interne de la matière telle qu'elle existait réellement »¹. Mais cette phase aurait vu sa fin devant les tentatives de théorisation des phénomènes électriques et magnétiques car elles conduisaient à des hypothèses « quelque peu artificielles et improbables »². Cela a conduit Faraday puis Maxwell, qui a mis en forme les idées de Faraday et les a adoptées pour l'essentiel, à faire entrer la théorie physique dans cette seconde phase dans laquelle nous serions alors. En ce début de 20^{ème} siècle, les atomes encore utilisés dans ces nouvelles théories ne sont plus à prendre au sens strict de points mathématiques exacts et aussi purs que des abstraits réellement existants. La véritable nature des constituants de la matière est délibérément considérée comme inconnue et les relations qui sont propres aux modèles qui les représentent ne sont considérées que « comme un processus ayant plus ou moins de ressemblance avec les fonctionnements de la nature, et représentant plus ou moins certains aspects qui les accompagnent »³. Pour Boltzmann, la théorie maxwellienne n'est donc qu'un moyen par lequel les phénomènes peuvent être reproduits d'une façon qui leur est similaire ; et, en tant que représentation, elle ne sert qu'à rapprocher d'une façon relativement uniforme des phénomènes empiriquement dispersés. Elle est une formalisation déracinée.

Après cette lecture suivie, formons donc un rapide bilan des idées générales de Boltzmann. D'après ses propos, toute mathématisation repose sur l'intuition, c'est-à-dire sur la faculté de recevoir ou suggérer des images. Ses réflexions sur l'outil mathématique qu'est l'équation différentielle, doublées d'une sensibilité à l'« intelligibilité » des lois mathématiques, ont fait de lui un promoteur de l'approche par analogie physique et par ce qu'il appelle les « images de pensée » (*Gedankenbilder*). Boltzmann a ainsi pu apparaître comme le défenseur d'un recours réductionniste aux modèles. Contre les énergétistes, Boltzmann tient en effet à soutenir que l'on ne peut penser clairement sans images. On peut bien combiner ces images, mais les combinaisons les plus claires pour l'esprit doivent être restreintes. En tout cas, elles doivent rester de nature finie afin qu'on puisse en discerner les éléments atomiques. Aussi, l'équation différentielle, avec ses infinitésimaux, n'est-elle pas la meilleure pourvoyeuse d'images ; loin s'en faut. Il faut donc tâcher de conserver le plus longtemps possible cet accès intellectuel à l'image qu'est le modèle fini d'un mécanisme analogue aux équations. En outre, pour Boltzmann, on ne doit pas oublier que les dérivés et les intégrales sont elles-mêmes des produits de l'approche mécaniste poussée à sa limite et non, à l'inverse, des êtres mathématiques plus nobles et antérieurs qu'il faudrait, dans le pire des cas, approcher par des modèles. C'est là une des conséquences de son approche finitiste et constructiviste en mathématiques⁴. Dans cette perspective, les équations sont donc logiquement secondes par rapport aux modèles finis. Ainsi s'explique leur fondamentale opacité pour notre esprit mais aussi le fait qu'elles exercent sur lui un pouvoir de fascination usurpé. Conformément à ce que nous montre notre lecture suivie de l'article de 1902, nous sommes fondés à suivre Jacques Bouveresse sur ce point lorsqu'il indique que le modélisme de Boltzmann est de type méthodologique et non ontologique⁵. À ce titre, Boltzmann a contribué de façon décisive à l'introduction d'une façon nouvelle de mathématiser la physique. Contre l'approche purement phénoménologique, il a soutenu que penser, y compris de façon

¹ "This first phase of theoretical physics may be called the direct one, in that it took as its principal object the investigation of the internal structure of matter as it actually exists", [Boltzmann, L., 1902], p. 217.

² "In explaining magnetic and electrical phenomena it inevitably fell into somewhat artificial and improbable hypotheses", [Boltzmann, L., 1902], p. 217.

³ "a process having more or less resemblance to the workings of nature, and representing more or less exactly certain aspects incidental to them", [Boltzmann, L., 1902], pp. 217-218.

⁴ Sur ce point, voir [Boltzmann, L., 1897], *passim*.

⁵ Voir [Bouveresse, J., 1997] et [Bouveresse, J., 2001].

abstraite, nécessitait un recours à des modèles, qu'ils soient mécaniques ou d'une autre nature, dans la mesure où ceux-ci pouvaient être considérés comme une continuation de la pensée par d'autres moyens sensibles. Pour ce faire, il s'appuyait notamment sur l'utilisation que Maxwell avait fait des modèles mécaniques en électromagnétisme.

Cette interprétation se confirme pleinement, selon nous, si l'on s'aperçoit que, dans ses propres modèles à visée de clarification, Boltzmann peut avoir recours à un domaine d'intuition cette fois-ci sans rapport aucun avec le domaine intuitif physique correspondant. En effet, pour introduire son modèle mathématique du calcul des probabilités, en particulier, il utilise l'analogie du tirage de boules dans une urne ou bien celle des jeux de hasard. Ce faisant, il recourt à une façon manifestement nouvelle d'utiliser les mathématiques en physique ou, plus précisément, à une façon inédite d'utiliser des mathématiques nouvelles, le calcul des probabilités, pour modéliser des phénomènes physiques et cela de façon nettement fictive. Ainsi, il ouvre officiellement la voie à une forme de mathématisation purement descriptive telle qu'elle se développera fortement dans les méthodes statistiques appliquées à la biologie et, en particulier, en agronomie, au début du 20^{ème} siècle. La modélisation statistique entendue en ce sens d'un scénario purement fictif pourra aisément, on le comprend, s'émanciper du seul territoire de la physique pour se transférer aux sciences non-exactes. La méthode des modèles statistiques rejoindra explicitement en cela les travaux, certes plus anciens, de démographie, d'anthropométrie ou de biométrie où le caractère fictif des construits formels n'était pas toujours clairement assumé.

Finalement, on peut qualifier le modélisme de Boltzmann de cognitif. Pour lui en effet, ce qui est important, c'est que notre pensée puisse se figurer ce qui se passe, peu importe que les choses se passent réellement ainsi. Sans doute même qu'on ne saura jamais se figurer ce qui se passe vraiment. Là n'est pas la question¹. Point n'est besoin de croire en une essence mathématico-physique ultime et fondamental du monde physique. La pensée scientifique ne se sert pas du modèle pour désigner l'essence des choses mais pour en concevoir le plus clairement possible certains phénomènes.

Les travaux récents des historiens des sciences sur le développement des modèles

Après ces rappels généraux comme après ce commentaire très succinct de l'article de Boltzmann, nous sommes désormais à même de comprendre que la clé de la naissance de la méthode des modèles dans les sciences, au sens contemporain du terme « modèle », réside bien dans ce que nous appelons la conscience cette fois-ci bien nette d'un fort *déracinement des formalismes* à l'orée du 20^{ème} siècle. Certains voient même de pures fictions dans les formalisations des sciences de la nature. D'autres sont plus circonspects et constatent qu'il y a différents degrés de fidélité au réel dans les modèles. Le modèle est alors conçu soit comme une aide à l'hypothèse réaliste, soit comme une aide à la conception par l'esprit humain de théories abstraites sinon purement formelles. Un consensus semble bien pourtant se dessiner autour de cette idée de *déracinement* : le modèle ne dit pas directement l'essence du phénomène. Il n'y est

¹ Boltzmann ne semble pas toutefois aller jusqu'aux extrémités auxquelles va le philosophe Hans Vaihinger dans son ouvrage intitulé *Philosophie du « comme si »* (*Philosophie des 'als ob'* - 1911). Vaihinger s'inspire lui aussi directement de Faraday. Mais il reproche à Maxwell sa timidité par rapport au caractère purement fictif des construits mathématiques en physique (voir [Vaihinger, H., 1911, 1935], Part II, §18, pp. 223. Vaihinger fait remonter l'histoire des « construits » fictifs en physique à Archimède. Ce dernier aurait ainsi conçu l'idée purement fictive, voire contradictoire, de « point fixe », c'est-à-dire de centre de gravité d'un solide ou d'un ensemble de solides (*ibid.*, pp. 224-225). Selon Vaihinger, cette idée sert à écourter considérablement les calculs (pour l'application des forces en l'occurrence) de manière à les rendre faisables. Elle est à la fois nécessaire et dépourvue de sens du point de vue d'un hypothétique référent dans la réalité.

plus enraciné. Il n'en est pas même abstrait. Au contraire, il est un « construit », né de la spontanéité de l'esprit humain. Mais ce construit est ambivalent car il peut encore se voir prêter différents objectifs en fonction des ontologies de chacun, d'où les désaccords entre les physiciens eux-mêmes à la fin du 19^{ème} siècle. On peut déjà l'anticiper : cette ambivalence va elle-même être transférée et transformée en même temps que ces nouvelles méthodes formelles de la physique seront transférées aux autres sciences. Le malentendu pourra ensuite s'étendre aux philosophies des sciences, comme nous aurons l'occasion de l'évoquer dans l'annexe B.

Mais il existe déjà un certain nombre de travaux historiques sur les transferts et les développements des techniques de modélisation mathématique dans les sciences de la vie. Ici, nous allons donc plus particulièrement rappeler les acquis des historiens des sciences en matière d'histoire de la modélisation, en particulier dans les sciences de la vie et de l'environnement, mais aussi en ce qui concerne l'histoire de la simulation en physique (puisque à part quelques articles, on ne trouve pas encore d'histoires de la simulation numérique ou informatique dans les sciences de la vie).

Sharon E. Kingsland

C'est en 1985 que l'historienne des sciences américaine Sharon E. Kingsland publie la première étude historique d'ensemble sur la naissance des modèles mathématiques en écologie des populations, principalement en écologie animale. Ce travail analyse patiemment, à un niveau tout à la fois technique, conceptuel et pratique, les débuts des tentatives de représentation mathématique appliquées à la croissance des populations, à la prédation et à la compétition. Une place moindre y est faite au contexte social et intellectuel. Pour restituer cette histoire, l'auteur a ainsi choisi de suivre chronologiquement, et assez individuellement, chacun des principaux acteurs du domaine dans l'ordre de leurs interventions respectives sur la scène scientifique. Cet ouvrage constitue donc davantage l'exposé de différentes « séries d'épisodes »¹, comme le concède l'auteur, qu'une histoire complète de l'écologie des populations. Or, même si le domaine de l'écologie des populations ne recouvre pas celui de la botanique et de la croissance des plantes, la proximité de ces travaux, dans le temps, dans leurs objets et dans leurs méthodes, avec ceux qui nous intéressent, nous commande d'examiner de près ce que cet auteur nous y apprend de l'émergence de la modélisation mathématique.

Tout d'abord, Sharon E. Kingsland rappelle combien, au début du 20^{ème} siècle, les écologues étaient davantage portés sur le travail en champ et en laboratoire. Moins versés dans la formalisation mathématique et très sceptiques à son égard, ils furent donc d'abord distancés par des chercheurs venus des sciences physiques et des sciences humaines, comme la démographie. Dès le début, leur argument critique le plus fréquent à l'encontre de la mathématisation était celui de la simplification outrancière et inacceptable que l'introduction des mathématiques commandait. Dans les années 1920, pour nombre d'écologues et de naturalistes, il ne semblait toujours pas possible de capturer et de faire tenir dans des équations la complexité du monde vivant réel². Les modèles avaient alors le plus souvent la forme d'équations différentielles ou de systèmes d'équations différentielles. Les variables représentaient les effectifs respectifs des espèces ou des classes d'âges. Or, afin de pouvoir utiliser ce type de modèles, l'écologie des populations faisait en effet plusieurs hypothèses restrictives qui pouvaient d'ailleurs servir à dessiner le contour de ce domaine scientifique, avant qu'il ne vienne, plus tard, interférer et se confondre avec la génétique

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 6.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 2.

des populations pour former la dynamique des populations : d'une part, les populations étaient supposées ne pas varier génétiquement. D'autre part, l'environnement physique aussi était supposé demeurer le même¹. Ces modèles étaient donc, pourrait-on dire, assez peu dynamiques : ils n'affectaient de dynamique qu'aux variables jugées intéressantes. Néanmoins, certains écologues ont peu à peu surmonté leur méfiance première et ils eurent l'envie de tester expérimentalement ces modèles. Sharon E. Kingsland raconte alors précisément comment ces premiers modélisateurs en écologie des populations ont dû apprendre à intégrer de façon inédite les approches de terrain, les expérimentations et les approches théoriques. On peut dire ainsi qu'au milieu des années 1940, il existait déjà une « communauté vivante d'écologues des populations en écologie »². Ce fut bien sûr surtout le cas aux Etats-Unis.

Dans les années d'après-guerre, l'écologie des populations commença à admettre qu'elle ne trouverait pas de lois simples du type de celles que l'on voit apparaître en physique. Les modèles se sont alors sophistiqués, mais surtout le recours à des analyses de données systématiques s'est intensifié et cela grâce aux premiers développements de l'ordinateur. L'ordre du jour était surtout à la prise en compte de la complexité retrouvée des phénomènes écologiques. Les écologues apprirent alors davantage de mathématiques et ils eurent directement recours à des collègues mathématiciens pour qu'ils les initient à d'autres mathématiques que celles des systèmes d'équations différentielles³. Ces autres styles de mathématiques appliquées et descriptives s'étaient eux-mêmes développés durant la guerre et dans l'immédiate après-guerre. Ce fut notamment le cas de la recherche opérationnelle qui visait la mise en équations et la modélisation prédictive du comportement complexe de systèmes mixtes : hommes et machines, hommes et institutions, hommes et administrations. La théorie des systèmes de Ludwig von Bertalanffy, développée avant-guerre, commençait également à avoir du crédit, comme d'abord en biologie et en physiologie. Le holisme que prônait déjà Alfred Lotka dans les années 1920 rencontrait alors plus d'adeptes. La théorie de l'information de Claude Shannon et Warren Weaver se développait et semblait applicable dans divers domaines hétérogènes. La théorie des jeux enfin, ainsi que la programmation mathématique, empruntées pour leur part à l'économie, semblaient pouvoir fournir d'autres formalismes mathématiques à l'écologie. Tous ces nouveaux styles disponibles, ainsi que le développement des modèles d'analyse de données, faisaient souffler un vent de liberté qui annonçait un assouplissement de l'outil mathématique et donc sa possible prise en compte de la complexité du vivant. En dynamique des populations, les modèles devinrent alors de plus en plus réalistes et détaillés, leurs performances dépendant toujours davantage de celles des ordinateurs disponibles. La recherche de capacités prédictives accrues était en effet favorisée par la demande sociale, émanant elle-même d'une prise de conscience et d'une prise en compte générale puis institutionnelle de diverses menaces écologiques d'envergure. Aux Etats-Unis, à la fin des années 1960, des programmes de recherche au niveau national apparaissent alors qui valorisent spécifiquement la prédiction écologique⁴.

C'est à cette époque de forte expansion de la dynamique des populations de type immédiatement opérationnelle et pragmatique, pourrions-nous dire, qu'une approche mathématique alternative commence à prendre son essor, notamment en la personne de Robert H. MacArthur : « ses modèles étaient plus généraux : ils ne donnaient pas de prédictions

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 1.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 2.

³ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 3.

⁴ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 3.

numériques, mais distinguaient différentes alternatives seulement en un sens qualitatif »¹. Cette scission entre modèles empiriques et modèles théoriques en écologie rejoignait alors une partition de même type, déjà à l'œuvre depuis les années 1930, en économie. Les travaux de MacArthur ont mené à des controverses dont il est possible aujourd'hui, selon Sharon E. Kingsland, d'interpréter l'interrogation sous-jacente et commune: « où se trouve le juste équilibre entre une vision mathématique du monde et la vision plus focalisée de l'écologue qui étudie la nature en un temps et en un lieu particulier ? » Ce qui est ressorti finalement assez clairement de cette controverse, ce n'est pas son règlement en faveur d'un côté ou de l'autre, mais l'affirmation de la pluralité nécessaire des types d'épistémologies dans la science écologique. Sharon E. Kingsland situe donc dans les années 1960 la prise en compte, en écologie, d'une nécessaire polyépistémologie². Or, nous pouvons déjà signaler que cette prise de conscience et l'acceptation d'une telle évolution dans la méthode est tout à fait équivalente ici à celle que nous avons pu également repérer dans l'histoire des domaines qui nous ont intéressé (voir notre deuxième époque). Sharon E. Kingsland caractérise l'histoire de l'écologie à partir de ce moment-là comme étant celle de changements incessants dans les critères des méthodes à imposer à la nature pour la connaître (ce qu'on appelle l'épistémologie), changements ne dépendant notamment parfois que de l'esprit du temps. D'où le fait que se confirme, selon nous, la nécessité pour l'historien et le philosophe de se livrer à une histoire intellectuelle des sciences et des techniques contemporaines, surtout lorsque l'on s'intéresse à des sciences à épistémologies à la fois diversifiées et labiles, comme c'est le cas de beaucoup de sciences au 20^{ème} siècle.

Par ailleurs, une tension, celle-ci constante et encore actuelle selon Kingsland, traverse toute l'histoire de l'écologie des populations : la tension entre la nécessité d'une vision historiciste des phénomènes vivants en écologie (c'est-à-dire le fait de considérer qu'ils appartiennent à une histoire, à des histoires de vies et d'évolutions singulières) et les tentatives de mathématiser qui se soldent toujours, jusqu'il y a peu, par la suppression de cette historicité. Beaucoup de controverses ont été dues, selon Sharon E. Kingsland, à cette tension durable³.

Dans le détail des chapitres de ce livre, l'auteur passe alors en revue un certain nombre d'acteurs qui se sont illustrés dans l'écologie des populations, successivement : Alfred Lotka (1880-1949), Raymond Pearl (1879-1940), Vito Volterra (1860-1940), Alexander J. Nicholson (1895-1969), William R. Thompson (1887-1972), G. F. Gause (né en 1910), David Lack (1910-1973), G. Evelyn Hutchinson (né en 1903) et Robert H. MacArthur (1930-1972). Dans les paragraphes qui suivent, nous allons rappeler et commenter un certain nombre des résultats qu'a pu obtenir notre auteur et qui nous ont servi tout à la fois à contextualiser et à mettre en perspective notre propre étude. Mais nous nous limiterons aux travaux qui ont précédé les années 1940, dans la mesure où l'histoire qui nous intéresse (la modélisation de la croissance des plantes) prend précisément une forte autonomie à partir de cette époque.

Tout d'abord, sans vouloir rapporter l'intégralité des résultats de cette étude, il est important, selon nous, de faire remarquer que Sharon E. Kingsland trouve très souvent nécessaire de s'appuyer sur l'hypothèse que des influences philosophiques sont toujours à l'œuvre en écologie mathématique, science que l'on pourrait croire épargnée par de telles survivances d'un autre âge. Elle juge par exemple nécessaire de nous rapporter le contenu des vues holistiques de Herbert

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 4.

² C'est nous qui introduisons ce terme pour ramasser l'argument général de Kingsland. Nous procédons ici bien sûr à une spécification du terme de polyphilosophie introduit naguère par Bachelard, notamment *in* [Bachelard, G., 1949, 1962], p. 7.

³ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 5.

Spencer¹ et de « la philosophie de la nature » allemande pour s'expliquer les conceptions holistiques d'Alfred Lotka. Il est un fait que Lotka n'était pas un écologue de formation. Spécialiste de la chimie physique à l'origine, c'était cependant presque en autodidacte qu'il se mouvait librement d'une science à l'autre : physique, chimie, biologie, économie et sciences sociales². Ainsi sa particulière et précoce attention à ce que l'on appellera plus tard, avec la synthèse énergétiste des frères Odum (1953), le caractère « systémique » des phénomènes écologiques ne peut être attribuée à la seule considération d'arguments scientifiques. Cela se confirme si l'on remarque que ses *Elements of Physical Biology*, parus en 1925, ne rencontreront d'abord que très peu d'échos. Or le « système » dont traite Lotka n'est rien de moins que le monde en son entier. Et les transferts très fréquents de diverses méthodes mathématiques entre différents domaines de la science (physique, biologie, écologie, etc.) s'autorisent déjà chez lui d'une vision unificatrice de type énergétiste. Mais, dans les années 1920, ces modèles peuvent apparaître comme excessivement spéculatifs, voire purement phénoménologiques aux yeux de ses premiers lecteurs. Et de ce fait, Sharon E. Kingsland se trouve légitimée à imputer ce type de spéculations, osées pour l'époque, à des intuitions ou des représentations philosophiques. D'où le fait que s'explique aussi pour nous ce recours à l'histoire des idées dans leurs diverses formes d'expression, lorsque l'on s'intéresse à l'émergence d'une science nouvelle. Lotka prônait en fait la constitution d'une « biologie physique » à l'image de la chimie physique à partir de la considération de ces seuls facteurs énergétiques communs aux deux domaines concernés³. Sharon E. Kingsland montre alors qu'il n'y a pas même jusqu'aux détails de ses modèles mathématiques de l'évolution darwinienne qui ne doivent quelque chose aux idées d'Herbert Spencer, plus encore qu'aux idées vagues de l'énergétique de W. Ostwald⁴. C'est là encore, selon nous, une confirmation, sur le cas de l'écologie mathématique naissante, de la nécessaire prise en compte de l'imbrication de l'histoire des idées et de l'histoire des sciences, surtout lorsque l'on se penche sur l'histoire de la modélisation. Dans les pratiques de modélisation mathématique, à cause du déracinement corrélatif, il règne en effet une liberté et une mobilité épistémologiques inédites, qui rendent la science perméable aux esprits du temps, sans pour autant qu'elle demeure durablement prisonnière de simples idéologies de passage. Cette labilité épistémologique rend la science perméable, certes, mais surtout, et c'est ce que n'ont pas souvent vu les critiques pressés des idéologies en science⁵, elle permet en retour qu'aucune cristallisation définitive ne se produise, qu'aucune épistémologie ne prenne trop solidement et illégitimement le dessus sur toutes les autres. Signalons ici qu'en ce qui concerne notre objet d'étude, nous pouvons à bon droit nous poser la question de savoir si ce polyépistémologisme, assumé à une certaine époque, décrit bien toujours l'état actuel général de la méthode scientifique dans les sciences du complexe. Peut-être cette phase que décrit Kingsland est-elle déjà vouée à s'effacer progressivement, depuis les années 1990, non sans qu'on en ait tiré bien des leçons.

Par ailleurs, les travaux de Kingsland montrent que Lotka a également fondé son approche énergétiste et systémique avant l'heure sur sa connaissance de l'économie mathématique du 19^{ème} siècle et des travaux de Cournot, Walras, Gossen, Jevons et Pareto. Lotka a alors essayé de traduire les concepts disponibles de la tradition utilitariste (concepts eux-mêmes déjà mathématisés par Jevons sur le modèle des principes d'optimum existant en physique) en des

¹ Selon elle, la doctrine de Herbert Spencer « embrassait une vision de l'homme comme une part active d'un cosmos interconnecté », [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 6.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 28.

³ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 26.

⁴ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 41.

⁵ Comme celles d'Althusser (1967), Badiou (1969) et Lecourt (1972), par exemple.

termes valables d'un point de vue de l'adéquation ou de l'adaptation biologique d'une espèce à une autre, d'une espèce à son milieu¹. Cet emprunt très précoce de ce qui allait devenir l'écologie mathématique à l'économie politique (domaine où avait pourtant déjà cours l'analogie entre les flux économiques et les énergies physiques) doit être selon nous souligné, parce que la plupart des transferts de modèles mathématiques entre sciences humaines et sciences de la nature ou entre sciences de la nature elles-mêmes partiront pendant très longtemps, comme le confirment en un sens certains pans de notre histoire des modèles de plantes, d'un point de vue énergétiste général destiné à rendre homogènes les différentes variables intervenant dans les divers domaines concernés. Longtemps, la considération de l'énergie (puis de l'entropie) servira comme un argument ontologique visant à légitimer le transfert de diverses représentations formalisées d'un champ à l'autre des sciences, à savoir d'abord essentiellement de celui des faits naturels à celui des faits humains (de la physique à l'économie) et inversement (de l'économie à l'écologie ou à la physiologie, par exemple).

L'énergie servira ainsi d'horizon d'homogénéisation ontologique et de rencontre. De par la capacité des scientifiques du début du 20^{ème} siècle à traduire des flux naturels comme des flux humains en termes énergétiques, elle autorise une certaine forme d'homogénéisation du fait naturel et du fait humain. Elle permettra ainsi de justifier les analogies d'abord les plus surprenantes. Dans la vision philosophique de Lotka, il s'agit donc moins de recourir aux modèles mathématiques comme autant de pures analogies formelles et phénoménologiques que comme transferts théoriques fondés en raison, au moins partiellement, de par l'invocation, légitime selon lui, des flux d'énergie universels et transgressant les frontières entre l'humain et le naturel, entre le populationnel (la phylogenèse) et l'individuel (l'ontogenèse). Cependant, il admet que les individus « transformateurs d'énergie » qui interviennent dans ses modèles ne sont encore que des abstractions simplifiantes.

C'est le biologiste et zoologiste américain Raymond Pearl qui fit véritablement connaître et reconnaître les travaux de Lotka dans les milieux de l'écologie. Son approche personnelle lui permit en effet de rendre les modèles mathématiques de populations moins spéculatifs et moins philosophiques aux yeux de ses collègues, ainsi que plus adaptés à l'approche expérimentale. Il a en effet contribué au raffermissement des liens entre les méthodes statistiques de la démographie humaine et celles des sciences biologiques, *via* la biométrie. Ses arguments en faveur des modèles n'étaient pas de même type que ceux de Lotka. De sa formation statistique à Londres, auprès de Karl Pearson, entre 1905 et 1906, il garde une approche épistémologique franchement positiviste de ce qu'il appellera alors la « biologie des groupes ». Il avait été en effet fortement impressionné par l'ouvrage de Karl Pearson *The Grammar of Science*, publié en 1892². Dans cet ouvrage, le statisticien Karl Pearson décrit les différentes phases qui permettent de mener à bien toute recherche scientifique, notamment le mode de construction des lois des phénomènes. Selon Pearson en effet, le scientifique se construit une image du monde extérieur à partir du seul matériau brut de la perception sensible. Par la suite, son objectif essentiel est de parvenir à classer ces faits élémentaires. Le talent du scientifique s'exerce donc dans la reconnaissance de certaines redondances ou de certaines relations mutuelles entre ces faits. Sharon E. Kingsland résume alors la suite des étapes que le scientifique doit suivre selon Pearson :

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 41-42.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 56-58. Voir [Pearson, K., 1892, 1937, 1949].

« Une fois que les faits sont classés, un scientifique doit appliquer son imagination créative pour exprimer ces faits de la façon la plus économique. Ce processus mène à l'énonciation de lois scientifiques. »¹

Notre auteur cite alors Karl Pearson lui-même :

« La proposition singulière, la formule brève, les quelques mots qui, dans notre esprit, remplacent un grand éventail de relations entre des phénomènes isolés, c'est cela que nous appelons une loi scientifique. »²

L'étape suivante consiste en un retour à l'expérience par un test de cette loi hypothétique effectué à l'aide de nouveaux faits empiriques. Or, cette invention de lois entre elle-même dans un processus général d'expression toujours plus précise et toujours moins approchée des relations générales qui apparaissent dans les faits observés. Tout en visant un éventail toujours plus grand de faits, la loi, régulièrement modifiée au regard des expériences successives toujours plus fines, est donc censée également coïncider de plus en plus avec la loi la plus fondamentale et la moins approchée de la nature, dans le domaine concerné. À cet égard, Pearson s'autorise explicitement des réflexions de Bacon pour confirmer la vision inductiviste du développement du savoir scientifique telle qu'il la présente. Et c'est Newton qui, selon lui, a réussi le premier à mener à bien une telle méthode.

Si donc l'inspiration de Pearl est positiviste, elle n'en demeure pas moins attachée à la construction de lois vraiment générales et à valeur fondamentale. Nous devons bien comprendre ici que, dans cette perspective positiviste propre à la biologie des années 1900-1920, donc dans une vision épistémologique proche de celle de Bacon, de Mach mais aussi de Comte (ce dernier étant moins connu dans les pays anglo-saxons) et, en un sens aussi, de Duhem, l'espoir de l'accès à la réalité par le biais de la science n'est pas totalement supprimé puisqu'il est en fait déplacé sur l'espoir d'une unification cognitive, sur un espoir seulement intra-cognitif, il est vrai, d'une unification des lois sous une seule ou sous quelques unes d'entre elles, décrétées fondamentales. À cette époque donc, l'unification des lois remplace encore la connaissance ontologique effective comme idéal asymptotique de la science. Chez les biologistes, l'heure n'est pas encore tout à fait à la polyépistémologie ni à l'acceptation des approches parallèles et à différentes échelles des mêmes phénomènes. Ainsi peut-on s'expliquer l'approche holistique de Raymond Pearl par laquelle il s'autorise à passer des organismes aux populations. « Il avait tendance à traiter les populations comme un tout », nous précise Sharon E. Kingsland, même s'il savait que les populations ne bénéficiaient pas du même degré d'intégration, comme l'avaient déjà signalé bien d'autres biologistes après les philosophes Auguste Comte puis Herbert Spencer. Ainsi se préoccupait-il de suivre les caractéristiques globales des populations (comme le taux de croissance ou de mortalité) de la même façon que la durée de vie des individus. Il considérait cette durée de vie elle-même non pas comme une caractéristique séparée mais comme « l'expression structurelle-fonctionnelle totale de l'organisation ou de la structure de l'individu », selon ses propres termes, rapportés par Sharon E. Kingsland³. La loi de la croissance d'une population était donc identifiée à quelque chose comme la vitalité d'un supraorganisme. C'est la raison pour

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 58.

² Karl Pearson, *The Grammar of Science*, 2nd édition, London, Adam & Charles Black, 1900, p. 31, cité in [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 58.

³ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 61.

laquelle la courbe logistique ou courbe en S, déjà présente chez Verhulst et Quételet¹, lui apparut incarner ce que l'épistémologie de Pearson lui commandait de rechercher sous la forme d'une loi unitaire de la croissance, tant des organismes que des populations². On peut donc comprendre que, malgré son inductivisme de principe, c'est-à-dire son souci de fonder les lois dans l'expérience et les mesures statistiques, Pearl fut finalement conduit à hypostasier la courbe logistique au point de croire pouvoir la reconnaître comme sous-jacente à de nombreux phénomènes de croissance de différentes natures. Certes, Pearl ne prenait pas la courbe logistique comme l'expression d'un mécanisme sous-jacent et qui serait ainsi omniprésent dans toute croissance mais simplement comme l'image la plus précise pour décrire de tels phénomènes. Avec elle, il croyait avoir atteint l'optimum de ce processus de raffinement des hypothèses mathématiques, dont parlait Pearson, et selon lequel on pouvait légitimement tendre à l'expression scientifique unique et synthétique d'une série de phénomènes. Même s'il ne croyait bien sûr pas au réalisme du modèle mathématique, c'est-à-dire en sa capacité à décrire l'essence des mécanismes sous-jacents, il croyait donc quand même en la possibilité pour le scientifique de parvenir à une optimisation mathématique unique et univoque qui prendrait la forme d'un modèle valant comme loi-mère en quelque sorte³. C'est pourquoi il n'hésitait pas à comparer le statut de sa courbe logistique aux lois de Kepler ou à celle de Boyle⁴, indiquant par là qu'il attendait son Newton. Et en 1927, il affirmait que cette loi était désormais à considérer comme un fait directement observé et, de ce fait, incontestable⁵.

Les critiques qui ont été faites à l'encontre de l'approche de Pearl consistaient principalement en l'invocation de deux types d'arguments : selon les premiers, cette approche mathématique, partant de l'identification abusive entre des populations et des individus, reposait sur l'hypothèse fautive d'une très faible interaction entre la population et son « milieu » (milieu social, historique et économique pour ce qui est de la démographie), ce qui bien évidemment la disqualifiait aussi aux yeux des écologues ; selon les autres, on ne pouvait considérer que cette courbe logistique avait la moindre justification théorique quant aux phénomènes élémentaires susceptibles de conduire à une telle mise en forme analytique au niveau global.

Nous voulons insister maintenant sur un autre apport historique et épistémologique que l'on doit à l'ouvrage de Sharon E. Kingsland. L'auteur y évoque bien entendu l'épisode tant relaté par ailleurs de la « découverte » conjointe ou simultanée du modèle mathématique de type prédateur-proie par Alfred Lotka et Vito Volterra. L'intérêt de son approche tient au fait qu'elle montre clairement en quoi l'on peut et l'on doit distinguer l'épistémologie de Lotka de celle de Volterra, alors même qu'ils construisent tous deux, quasiment en même temps, le même modèle pour résoudre le même problème scientifique. Pour saisir cette différence, il faut rappeler qu'à l'époque, il existait, en épidémiologie, une manière de produire des modèles mathématiques concurrente de celle de Lotka ou de Pearl. En effet, à partir des travaux de Sir Ronald Ross (qui reçut le prix Nobel en 1902 pour ses travaux sur les causes de la malaria), l'épidémiologie pratiquait déjà une méthode de modélisation que Ross qualifiait de « méthode *a priori* »⁶. Elle consistait à « partir d'hypothèses au sujet de la cause d'une épidémie et de construire un ensemble d'équations

¹ En 1835, ce dernier l'avait reconstruite dans une perspective mécaniste à partir de l'identification entre la résistance à la croissance biologique et la résistance physique à l'entrée dans un milieu.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 61 et 65.

³ C'est précisément la croyance en ce caractère unique de la représentation mathématique optimale, abstraction faite de l'échelle d'étude et de l'objectif visé, qui sera remise en question dans les décennies qui suivront, notamment dans les sciences de l'homme, avec Herbert A. Simon. Voir [Simon, H.-A., 1969, 1991].

⁴ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 68.

⁵ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 76.

⁶ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 99.

différentielles pour décrire la situation basée sur ces hypothèses ». Par la suite, par déduction logique et par calcul, on tirait de cette équation des propriétés mathématiques que l'on confrontait aux observations. Cette approche, on le voit, s'opposait nettement à l'inductivisme de Pearson et Pearl. Ross en avait bien conscience lorsqu'il qualifiait cette dernière de « méthode *a posteriori* » puisqu'en effet elle partait avant tout des observations. Or, en épidémiologie, ainsi que le souligne Sharon E. Kingsland, les statistiques pouvaient servir indifféremment aux deux approches parce que l'on disposait de suffisamment d'observations. Alors qu'en écologie, le manque d'observations en termes d'histoires de vies et de populations étant le problème majeur (on manquait cruellement de données en grand nombre), il paraissait aléatoire de ne s'en tenir qu'à la méthode inductiviste ou *a posteriori*. C'est l'entomologiste canadien William R. Thompson qui, dans les années 1920, perçoit alors l'avantage qu'il y a, dans ces conditions, à adopter de préférence la méthode de modélisation *a priori* de Ronald Ross. Cela lui semblait également correspondre à la nouvelle impulsion que donnait le livre fraîchement paru, en 1917, de D'Arcy Wentworth Thompson : *On Growth and Form*. Cet ouvrage légitimait selon lui une approche constructiviste et aprioriste des modèles mathématiques en biologie, approche conçue à partir des seules lois physiques élémentaires gouvernant les formes et la croissance biologiques. Pour sa part, William R. Thompson partit donc d'hypothèses concernant le comportement biologique individuel des insectes dont il étudiait les populations ; et il construisit des modèles *a priori*. Ses collègues lui reprochèrent alors de ne fonder ses hypothèses élémentaires que sur des spéculations, à cause du manque d'information biologique précise dont les scientifiques disposaient en ce domaine. Et Thompson lui-même se rétracta plus tard sous la pression de tels arguments anti-mathématicistes. En revanche, pour ce qui concerne une réflexion sur l'histoire des modèles, il est important de noter que ce sont plutôt les travaux de Lotka que William R. Thompson (dans sa période favorable aux modèles) et les disciples de Ross considérèrent comme spéculatifs. Lotka, comme nous l'avons dit, avait en effet une approche inductiviste, plus focalisée sur une échelle globale donc. Ses expressions mathématiques venaient directement d'analogies avec les dynamiques de réactions chimiques telles qu'elles étaient exprimées par des systèmes d'équations différentielles. Et Sharon E. Kingsland précise alors combien la théorie générale des systèmes de Bertalanffy étendra ce type d'approche systémique originellement développée par Lotka¹.

À l'inverse d'Alfred Lotka, Vito Volterra appartenait plutôt à cette école de pensée qui favorisait une interprétation hypothétique, *a priori* et constructiviste des modèles, du type de celle qui avait été développée par Ross et Thompson entre les années 1910 et 1920. C'est sa particulière maîtrise de la physique mathématique² qui l'autorisait à penser le problème des dynamiques de populations de prédateurs et de proies en termes de mécanique statistique³. Dans ses travaux personnels, les agrégations ou associations biologiques étaient pensées, à un niveau élémentaire et *a priori*, comme des analogues des phénomènes de « rencontres » entre molécules dans un gaz. Cela lui permettait donc de construire un système d'équations valant à échelle globale en partant de ces seules rencontres élémentaires. De son côté, c'est dans une perspective

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 103.

² Il était professeur de physique mathématique à l'université de Rome.

³ Sharon E. Kingsland cite ce passage de Volterra - tiré du volume 3 de ses *Opere matematiche*, Rome, Academi dei Lincei, 1962, p. 248 : « Tous ceux de notre génération ont été élevés avec ces principes qu'un monde moderne appelle mécanicistes ; et, en effet, l'idée selon laquelle tous les phénomènes, au moins ceux qui tombent dans le domaine de la physique, peuvent être réduits à des phénomènes de mouvement et peuvent être transportés dans la sphère de la mécanique classique était un dogme auquel adhéraient toutes les écoles et dont l'origine se perd dans la lointaine philosophie cartésienne », [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 124.

nettement systémique et influencée par la chimie que Lotka s'autorisait au contraire d'une analogie directe et seulement verbale entre des rapports entre populations et des concentrations chimiques. Cela le conduisait immédiatement, et sans construction, à l'expression mathématique des « réactions » ou « relations » destructrices qui en découlent. Le reproche de spéculation, on le voit, touchait donc les deux côtés : le côté de l'approche *a posteriori*, comme celui de l'approche *a priori*. Or, tout dépendait du point de vue où l'on se plaçait.

Réfléchissons donc ici aux soubassements épistémologiques qui, selon nous, se révèlent à l'occasion de ces critiques rapportées par Sharon E. Kingsland. Si en effet l'on considérait que le rôle de la mathématisation était de permettre de proposer une explication hypothétique du passage des phénomènes d'une échelle micro- à une échelle macroscopique, alors on privilégiait l'approche explicative, constructive et *a priori* de Ross et Volterra. Mais si, au contraire, on accordait à la mathématisation le rôle de décrire phénoménologiquement des relations entre des observations à une échelle globale (ce qui imposait de renoncer d'abord à un usage constructif ou constitutif et « réaliste » des concepts mathématiques), pour qu'ensuite par approximations formelles successives on découvre la loi-mère unificatrice de toutes ces lois (loi-mère de nature donc purement linguistique), alors on privilégiait l'approche énergétiste de Lotka. Cette approche, apparentée à la vision épistémologique contemporaine de Duhem n'est pas sans rapport, on le voit avec un certain conventionnalisme finaliste porté par une croyance ou une foi en un ordonnancement général, qu'il soit divin ou naturel : les lois ou les modèles mathématiques sont purement linguistiques et théoriques certes, d'où l'acceptation des commandements positivistes, mais le scientifique théoricien doit partir du principe qu'au final il existera une loi-mère formelle qui permettra de s'apercevoir qu'elle est fondée, non pas en essence, sur un être donné empiriquement, mais en raison, sur une harmonie générale, donc qu'elle est fondée sur une finalité.

Le finalisme implicite propre à cette première approche systémique en écologie, celle de Lotka, s'opposait donc frontalement au mécanicisme, considéré comme moins spéculatif parce que plus galiléen et newtonien, de Ross et Volterra qui, en valorisant une approche mathématique constructiviste des problèmes écologiques et biologiques, pratiquait explicitement la co-construction des concepts mathématiques et des concepts écologiques et donc semblait davantage donner à voir comment on pouvait justifier dans le détail l'introduction nouvelle des mathématiques dans ces sciences du vivant. Or, selon nous, les biologistes, surtout en France, ont d'abord préféré retenir de ce modèle de Lotka-Volterra cette justification constructive et *a priori* de Volterra, et cela pour plusieurs raisons. Ce n'est qu'ensuite, après la seconde guerre mondiale, que Lotka fut redécouvert comme instigateur de l'approche systémique. Ils préférèrent d'abord l'approche *a priori* parce que Volterra était bien plus en vue dans le monde universitaire, mais aussi parce que Volterra l'avait abondamment diffusée lors de ses conférences à l'Institut Henri Poincaré de l'hiver 1928-1929¹. Ils la préférèrent aussi parce qu'elle consonait bien sûr avec la formation classique, mécaniciste, anti-finaliste, des biologistes et des physiciens mathématiciens de l'époque. Ils la préférèrent enfin parce qu'elle permettait un traitement mathématique du problème généralisé au cas où l'on avait affaire à plusieurs populations de prédateurs et de proies.

Par la suite, Lotka se tourna, de son côté, vers la démographie et Volterra continua à développer ses analogies physiques à travers les concepts de « travail démographique », d'« énergie démographique » et de « principe de moindre action vitale »². Or, par ailleurs, avec Wladimir I. Vernadsky et Georgii Frantsevitch Gause, une approche holistique similaire à celle de

¹ Voir sur ce point [Volterra, V., 1931, 1990], p. v.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 115.

Lotka voit le jour en Russie mais dans un contexte biogéochimique. Vernadsky fonde en effet sa vision holistique sur des considérations de cycles globaux de matières et d'énergie dans la biosphère. C'est donc bien aussi une approche énergétiste mais qui prête davantage son attention à la totalisation et à la régulation des cycles énergétiques et matériels généraux qu'aux acteurs considérés comme « transformateurs » d'énergie, au sens de Lotka. William R. Thompson, pour sa part, en insistant sur l'idée que les lois ou les modèles mathématiques décrivent seulement la nature, mais ne la gouvernent pas, finira par critiquer fortement l'approche par modèles mathématiques du fait que, selon lui, les mathématiques ne peuvent servir à prédire le fortuit qui est pourtant la règle dans le monde du vivant¹. Le fortuit naît selon lui, comme pour Cournot, de l'intersection d'un grand nombre de séries de causes fortement intriquées. Et les équations mathématiques capables de décrire de telles rencontres non seulement ne sont pas pratiquement solubles, mais en fait c'est le caractère essentiellement événementiel du monde vivant, son historicité fondamentale, qui fait obstacle par principe à sa formalisation mathématique adéquate. Il en retient la fondamentale imprédictibilité des phénomènes du vivant.

Pour finir, dans sa conclusion et dans sa postface de 1995, en accord avec ce diagnostic précoce de Thompson, Sharon E. Kingsland considère rétrospectivement que l'oubli de l'historicité des phénomènes écologiques a effectivement fait la limite principale des modèles mathématiques en écologie jusqu'aux années 1980. Comme historienne des sciences contemporaines, elle s'autorisait, en 1985, à pronostiquer le prochain développement de débats critiques sur l'historicité des phénomènes vivants de par leur complexité. En 1995, elle constate avec satisfaction que son pronostic était le bon. La génétique des populations, évolutionnaire par principe, a ainsi été rejointe par l'écologie des populations et la dynamique des populations dans des propositions de synthèse comme la sociobiologie de Edward O. Wilson. Une plus grande attention à l'histoire serait ainsi l'apanage des modèles les plus récents. Mais l'appel à une approche historique peut recouvrir en fait plusieurs demandes de natures différentes : considérer toute description d'un écosystème comme une histoire à raconter à cause de la contingence des faits qui s'y produisent, ou bien considérer l'évolution des espèces dans leur généalogie phylogénétique, ou encore élargir la fenêtre temporelle de description à une échelle de plusieurs siècles ou milliers d'années². Quoi qu'il en soit, la tendance actuelle, selon Kingsland, est à la complexification et à l'accroissement du « réalisme » des modèles du fait de l'augmentation des performances des ordinateurs.

Une des dernières idées développées par notre auteur nous paraît d'importance. Il s'agit de l'acceptation récente de ce que nous avons appelé une polyépistémologie dans le domaine de l'écologie. Sharon E. Kingsland cite ainsi une phrase de l'écologue théoricien Robert May :

« Plus que jamais les questions écologiques doivent être étudiées à différents niveaux et sur des échelles temporelles et spatiales différentes, et cela en partant de la façon donc l'accident évolutionnaire, l'environnement et les contraintes biomécaniques forment les histoires de vie des organismes individuels dans des temps et des lieux particuliers, jusqu'à la façon dont la tectonique des plaques et le changement climatique global ont aidé à la formation de royaumes biogéographiques. »³

¹ [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 140.

² [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 222.

³ C'est à la page 228 que Sharon E. Kingsland cite cet extrait de la page 339 de « Ecological Concepts : The Contribution of Ecology to an Understanding of the Natural World », Cherrett, ed., Oxford, Blackwell Scientific, 1989 ; il s'agit de l'extrait d'un article de Robert May intitulé « Levels of Organization in Ecology ».

Dans de tels propos, on perçoit qu'un changement s'est opéré en faveur d'une approche multi-niveaux des problèmes écologiques et biologiques. Dans sa postface, notre auteur ne se préoccupe pas, bien sûr, d'exposer en détail comment les scientifiques en sont arrivés à une telle polyépistémologie assumée. La période étudiée et la définition de son domaine (l'écologie des populations) lui en interdisaient l'explicitation. De notre côté, nous sommes donc amené à nous demander si ce pluralisme épistémologique caractérise également les domaines qui nous préoccupent et, si tel est le cas, à quels facteurs on peut historiquement l'imputer. De la restitution historique assez précise que nous a laissée Kingsland, nous pouvons d'ores et déjà retenir qu'une telle attitude scientifique n'était pas présente dès les premières modélisations mathématiques en écologie. Mais en a-t-il été de même dans d'autres sciences du vivant ? Enfin, ce problème, soulevé déjà par William R. Thompson dans les années 1930, de la difficile mathématisation du contingent et de l'historique, n'a-t-il pas été rencontré par d'autres disciplines comme, par exemple, les sciences de la morphogenèse ? Comment a-t-il été réglé ou contourné ? Quel rôle la simulation a-t-elle joué dans les tentatives de résolution de ce problème apparemment transdisciplinaire ? En outre, on peut tirer de la restitution de cette histoire que, très tôt, l'économie a fourni des modèles à l'écologie jusqu'à la synthèse énergétiste des frères Odum. Et ce transfert a été possible car, dans les domaines concernés, on ne considérait à chaque fois que des phénomènes de flux, de transports, d'échanges de matières ou d'énergie. De même, pour ce qui est des transferts de modèles de la mécanique ou de la chimie à l'écologie, on n'y considérait là encore que des phénomènes de rencontre, des phénomènes énergétiques ou d'échanges de matière, comme nous l'a montré l'évocation des travaux différents, par l'esprit, de Lotka et de Volterra. Energétisme et mécanisme ont donc été les deux principaux horizons d'homogénéisation des concepts et donc de transfert des modèles mathématiques entre domaines scientifiques hétérogènes, cela avant que n'intervienne l'« informatisme » hérité du mariage de la théorie de la communication avec la cybernétique. Mais qu'en a-t-il été pour les phénomènes de ramification, de croissance organique ? Le fait que certains de ces phénomènes biologiques soient davantage à considérer comme autant de modes différents de mise en espace, avant d'être des mises en fonctionnement, n'a-t-il pas été, pendant un temps, un obstacle au transfert de modèles jusque là assis sur l'homogénéisation énergétiste, mécaniste ou « informatiste » ? De manière suggestive, l'histoire de la formalisation de la croissance et de la forme des plantes montre en effet que ces transferts de concepts et de modèles issus de la physique y ont été plus hasardeux.

Jean-Paul Deléage

Le physicien et historien des sciences Jean-Paul Deléage a écrit l'une des histoires de l'écologie les plus compréhensives et les plus complètes parues en français de ces vingt dernières années¹. Elle reprend mais complète assez bien l'étude de Kingsland. Une place assez importante y est donnée à l'émergence des pratiques de modélisation. Cependant la perspective historique est davantage attentive à l'émergence et aux devenir des concepts théoriques de la science écologique, de sa naissance aux années 1980, qu'aux soubassements proprement épistémologiques ou philosophiques des diverses mathématisations que l'écologie a pu mettre en œuvre. Rappelons certains des apports de cet ouvrage dans la perspective qui nous préoccupe, et tâchons de mettre spécifiquement en lumière ce qu'on y apprend des choix épistémologiques en matière de mathématisation et de modélisation.

¹ [Deléage, J.-P., 1991, 1994]. Elle paraît après les travaux de Pascal Acot [Acot, P., 1988] et ceux de Jean-Marc Drouin [Drouin, J.-M., 1991].

Tout d'abord, en précisant les origines historiques des concepts d'« économie de la nature » puis d'« écologie », Jean-Paul Deléage nous permet de comprendre les liens natifs qui unissent l'écologie à l'économie politique et que l'on aurait pu croire relativement récents. C'est en effet chez les physiocrates, en particulier chez Quesnay, que l'économie des hommes est pour la première fois explicitement pensée en lien avec l'« économie de la nature », il est vrai au moyen d'une lecture théologique de cette dernière. Ainsi, dès le 18^{ème} siècle pour Deléage, l'« histoire naturelle » s'est progressivement transformée en « une économie politique de la nature, prémices de l'écologie »¹. Mais c'est seulement à la fin du 19^{ème} siècle, dans la décennie 1880-1890, et dans une perspective politique principalement inspirée du socialisme, que Serge Podolinsky puis Patrick Geddes vont penser l'économique et l'écologique en termes communs d'énergie et de « bilan énergétique »². Jean-Paul Deléage attribue alors aux préjugés « anti-écologiques et anti-thermodynamiques » l'oubli prolongé de ces premières approches énergétistes communes aux faits humains et aux faits naturels³. Ces préjugés ont été partagés tant par l'orthodoxie de l'économie politique que par les économistes ou les philosophes marxistes⁴. Notre auteur rapporte ensuite le contenu d'un article d'Arthur Tansley, publié en 1935 dans la revue *Ecology*, et qui plaide pour l'introduction du terme « écosystème » en écologie mais sans que l'on considère par là que l'on a affaire à un organisme. Tansley met donc les écologues en garde contre une vision organiciste des populations et des écosystèmes. Et il rejette ainsi toute conception finaliste que pourrait implicitement imposer une approche trop délibérément holistique. Il rappelle que l'écosystème est une construction mentale des scientifiques pour le besoin de l'étude mais qu'il ne doit pas être considéré comme une « donnée brute »⁵.

Par la suite, dans un chapitre intitulé « Tout est énergie ! », notre auteur montre combien, dans l'après-guerre, à partir des travaux de G. Evelyn Hutchinson, mais surtout à partir de l'article fondateur de Raymond Lindeman⁶ prônant une approche des écosystèmes par la dynamique des réseaux trophiques, la vision énergétiste a été développée sous tous azimuts en écologie. L'analyse énergétique est popularisée par l'ouvrage d'Eugene Odum, *The Fundamentals of Ecology* de 1953. Deléage note que c'est sous l'influence du jeune frère de Eugene Odum, le spécialiste de chimie nucléaire Howart T. Odum, que, dans ce livre, transparaît une vision très fortement systémique inspirée de Hutchinson et de Lotka. Les diagrammes énergétiques ressemblent ainsi à des circuits électriques. Les frères Odum introduisent alors un principe thermodynamique supplémentaire par rapport à ceux de la physique et qui serait selon eux spécifiquement suivi par les êtres vivants établis en systèmes. Il s'agit du « principe du maximum de puissance ». Ce

¹ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 37.

² [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 68-70.

³ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 70.

⁴ Pour confirmer la pertinence de ce rappel allusif de Deléage, on peut se référer ici au contenu de quelques diatribes de Lénine, extraites de « Matérialisme et empiriocriticisme » : « Le 'pragmatisme' est peut-être le 'dernier cri de la mode' de la philosophie américaine la plus récente. C'est peut-être au pragmatisme que les revues philosophiques accordent la part la plus large. Le pragmatisme tourne en dérision la métaphysique du matérialisme et de l'idéalisme, porte aux nues l'expérience et seulement l'expérience, voit dans la pratique l'unique critère, se réclame du courant positiviste en général, invoque plus spécialement Ostwald, Mach, Pearson, Poincaré, Duhem, le fait que la science n'est pas une 'copie absolue de la réalité', et ... déduite de tout cela, le plus tranquillement du monde, l'existence de Dieu, à des fins pratiques, exclusivement pratiques, sans la moindre métaphysique, sans dépasser aucunement les limites de l'expérience », [Lénine, V. I., 1908, 1973], pp. 338-339. C'est l'auteur qui souligne. Dans les pages suivantes, Lénine range alors la doctrine d'Ostwald et l'épistémologie de Pearson parmi les « subterfuges théoriques » qui témoignent en fait d'un « idéalisme physique » allié, comme tout idéalisme, de la religion et de la bourgeoisie en place. Voir *ibid.*, p. 340 et [Lénine, V. I., 1894-1923, 1978, 1982], pp. 180-181. On voit donc qu'en effet l'énergétisme n'était pas en grâce auprès des marxistes du début du siècle.

⁵ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 119-120.

⁶ Publié en 1942.

principe, dont Howard T. Odum attribue la paternité à Lotka, permet de rendre compte de la situation la plus fréquente des écosystèmes : le non-équilibre. Jean-Paul Deléage le décrit ainsi :

« Selon ce principe, les écosystèmes qui ont des aptitudes particulières à l'utilisation de la puissance des flux d'énergie, sont aussi les plus aptes à la survie et à la domination. »¹

Sur les diagrammes d'Howard T. Odum apparaissent alors conjointement les processus naturels et les processus artificiels. Ce qui l'autorise à ne plus faire de différence de nature entre les faits naturels et les faits sociaux. À la fin de son chapitre, notre auteur rappelle pourtant brièvement la teneur des critiques qu'un chercheur comme Nicholas Georgescu-Roegen avait pu adresser à l'encontre de cette vision totalement et exclusivement énergétiste. Mais, toujours selon notre auteur, Georgescu-Roegen aurait surtout insisté sur le fait que le « métabolisme des échanges entre la nature et la société » évolue dans l'histoire et ne peut donc être considéré comme structurellement identique et stable puisque sa construction est toujours en partie dépendante d'un état donné de la société². Cependant Jean-Paul Deléage oublie de rappeler aussi l'argument physique et thermodynamique également rapporté par les écrits de Georgescu-Roegen. Indiquons-le ici en quelques mots en citant l'auteur lui-même et en le commentant : « il n'y a pas de création de matière à partir de la *seule* énergie. »³ Autrement dit, dans les modèles énergétistes, on ne peut faire jouer un rôle symétrique à l'énergie et à la matière. La matière terrestre (le géochimique) détient en elle une « information », une « énergie » qui ne peut pas totalement être reconstituée à partir de seuls apports d'énergie libre, comme c'est le cas pour beaucoup de minéraux. Or, en recourant à des diagrammes de flux purement énergétiques ou ramenant l'organisation de la matière à de l'énergie, on donne la fausse impression d'un possible recyclage alors que par principe l'écosystème intégrant l'humain, et qui mobilise donc de la matière brute directement soustraite à la Terre, ne peut autoriser un tel recyclage⁴.

Dans le chapitre suivant, intitulé « Complexités », Jean-Paul Deléage rappelle d'abord que la théorie de l'information, concurremment avec l'approche énergétiste, a eu son heure de gloire en modélisation écologique, des années 1960 à la fin des années 1970. La formalisation de Claude Shannon puis celle de Léon Brillouin ont été prisées pendant un temps parce qu'elles permettaient de commencer à rendre compte de la diversité écologique considérée de plus en plus comme caractéristique fondamentale d'un écosystème⁵. Les écologues Robert MacArthur et Ramon Margalef ont ainsi pensé les écosystèmes en analogie avec les réseaux de communication tels que les conçoivent les ingénieurs en télécommunications dans les années 1940. Or, dans ce cas particulier de transfert méthodologique, on a affaire, pour la première fois en écologie, à l'intervention d'une science de l'ingénieur sous la forme d'un réservoir d'analogies et donc de modèles mathématiques. L'information y rendait compte de la diversité spécifique de l'écosystème. À chaque espèce présente dans l'écosystème correspondait un type de symbole ; et le nombre de symboles de ce type était directement proportionné au nombre d'individus de cette espèce.

¹ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 137.

² Pour cet argument, on peut se rapporter en effet à [Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], p. 108.

³ [Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], p. 158.

⁴ [Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], pp. 172-173 : « la matière, tout autant que l'énergie, est soumise à une dégradation entropique continue et irrévocable [...] la thermodynamique traditionnelle ne mentionne en aucune manière la dégradation entropique de la matière, elle a créé l'impression que la matière ne se dégrade pas. La littérature de base laisse en effet croire que tout convertisseur matériel dure indéfiniment sans la moindre usure. »

⁵ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 174-178.

L'écosystème était donc analysé comme une communication symbolique dont on pouvait mesurer la redondance ou la richesse informative, c'est-à-dire la diversité, par l'entropie informationnelle.

Avec ce type de modélisation « informatique », l'horizon d'homogénéisation est donc déjà plus abstrait que ceux de l'énergétisme ou du mécanisme. Ici, c'est la seule notion d'information qui autorise le transfert des modèles de télécommunication au domaine de l'écologie. Or, l'information est de nature symbolique, linguistique, classificatoire, plus que matérielle. Elle renvoie donc explicitement à une exstase¹ plus qu'à une substance au sens dans lequel Bachelard introduisait ce néologisme. C'est-à-dire que l'« information » d'un écosystème, à la différence de son « énergie » ou de ses taux de « rencontres » mécaniques, dépend uniquement de ce que les hommes peuvent y discerner de façon abstraite, nominale, à savoir l'espèce, en l'occurrence. Le recours à la notion d'information empêche donc explicitement, et d'une façon inédite dans l'histoire de l'écologie mathématique, toute lecture essentialiste de l'horizon d'homogénéisation. La mathématisation ne sert plus ici à formaliser des êtres ou des réalités essentielles qui manifesteraient leurs pouvoirs dans des phénomènes observables de différentes natures. Alors que les horizons d'homogénéisation propres à l'énergétisme et au mécanisme pouvaient, l'un comme l'autre, sembler encore s'appuyer sur la manifestation partielle d'une réalité commune considérée comme patente, qu'elle soit supposée (sous-jacente, constitutive), ou sur-imposée (globale, holistique), la modélisation « informatique », au contraire, ne repose plus que sur le choix manifestement humain de désigner et de classer, d'organiser et de trier. Il s'agit donc là d'une mathématisation explicite et directe de notre seule perception des phénomènes. Dans ces conditions, on n'est plus très loin de prendre en compte le fait que la formalisation dépende du point de vue de l'observateur, puisque la vision formalisée que l'on a des phénomènes n'est plus considérée comme une approximation objective et ayant son fondement dans les choses mêmes. La voie est ainsi ouverte au modélisme perspectiviste. Le déracinement du modèle est par là accompli.

Cependant, en ce qui concerne le recours aux formalisations de la théorie de la communication en écologie, Jean-Paul Deléage rappelle qu'il fut de courte durée. Un argument décisif, publié en 1978 par l'écologue Paul Colinvaux, participa en effet au déclin d'une telle approche du fait des incohérences qu'elle colportait. Paul Colinvaux rappelait, en substance, qu'on ne pouvait considérer les êtres vivants d'un réseau trophique comme remplissant des fonctions équivalentes aux nœuds d'un réseau de communication. Il faut considérer qu'ils exercent une fonction tout à fait inverse de ces nœuds de communication et de redistribution de l'information : l'essentiel de leur activité consiste à essayer d'empêcher la communication de la nourriture. Paul Colinvaux écrivait ainsi :

¹ Voir [Bachelard, G., 1949, 1962], p. 39 : « L'électron n'est plus électrique dans le sens où les fluides du 18^{ème} siècle étaient dits électriques. La *centralité* de la notion marquée par le qualificatif *électrique* s'est déplacée. *L'électron n'est plus vraiment une substance électrique*, c'est très exactement une exstase. Même dans des connaissances où l'organisé est un donné manifeste, où l'organisé est un point de départ pour le savoir, on voit bientôt la pensée de réorganisation dépasser l'organisé. » C'est donc ce que Bachelard appelle la « différentielle d'instruction » (*ibid.*, p. 39) qui caractérise le fait que l'on ne considère du donné que le construit qu'on y place à travers les opérations d'instructions à son sujet. Ce faisant, il fait allusion au contexte scientifique de la physique quantique. L'exstase finit donc par ne valoir que comme extensive : « la force centrale d'une exstase étant mesurée par le nombre et la diversité de ses extensions », *ibid.*, p. 39. L'exstase ne renvoie pas à une réalité qui elle, en revanche, donne une intensité, un sens au terme de substance. L'« intensité », l'« intension » que véhicule la notion de substance est à psychanalyser pour Bachelard en ce qu'elle recèle toujours en elle des sources de convictions philosophiques irrationnelles. En tant que « construits », les « donnés » auxquels a affaire la physique quantique ne sont donc que des ensembles de possibilités d'opérations rationnelles, de réorganisations conceptuelles ou de pratiques phénoménotecniques. C'est en ce sens qu'ils sont des exstases.

« Les vrais individus sont en fait des barrières sur les routes, qui freinent l'écoulement de la nourriture. Et c'est ce point qui rend le modèle non seulement irréal mais absurde. »¹

On ne peut donc exprimer la stabilité propre aux réseaux trophiques de la même façon que la stabilité des réseaux de communication. Pour ces derniers, la stabilité est d'autant plus grande que les nœuds communiquent fortement et sont davantage reliés à d'autres, alors que dans les réseaux trophiques, la tendance n'est pas à l'intensification ni à l'augmentation numérique des relations, bien au contraire. On peut donc conserver la notion d'« indice de diversité » mais on ne peut faire de ce modèle un modèle dynamique pertinent².

Du livre de Jean-Paul Deléage, nous retiendrons enfin son évocation de l'introduction en écologie des modèles de chaos déterministe par Robert May, au milieu des années 1970. Les travaux de Robert May ont consisté à mettre en évidence, à partir du modèle logistique classique, des zones de comportements de type chaotique, c'est-à-dire des zones où l'on ne peut déceler extérieurement aucune fluctuation régulière. Ce modèle a beaucoup séduit parce qu'il semblait résoudre au niveau théorique un problème en attente de solution depuis longtemps : on avait déjà souvent observé des fluctuations apparemment aléatoires dans des populations animales. Et ces observations semblaient contredire les tenants d'une explication déterministe des évolutions de populations. Or, selon notre auteur, les études théoriques de Robert May ont permis de réconcilier les déterministes avec les partisans de l'irréductibilité de l'aléatoire. La mise en évidence de l'engendrement d'un comportement complexe à partir d'un modèle simple a contribué à redonner une légitimité à la modélisation mathématique en écologie. Mais en même temps, ce travail théorique sur les cycles limites et les bifurcations ne donna d'abord qu'un argument théorique ainsi que des explications seulement qualitatives. Ce type de mathématisation a donc d'abord joué un rôle semblable à celui de la modélisation mathématique théorique et qualitative en économie telle qu'elle prospère depuis les années 1930. Son rôle a davantage consisté à conserver et à consolider une théorie écologique préexistante et cela aux dépens d'une modélisation opérationnelle puisque, comme le dit notre auteur, « une situation mathématiquement 'chaotique' peut se révéler stable du point de vue écologique ». Selon nous, elle a donc d'abord servi à protéger le noyau dur de la théorie des assauts de l'observation et de ses surprises. Loin donc d'autoriser avant tout une expansion de la modélisation mathématique, elle a semblé d'abord autoriser un refuge dans des représentations théoriques déjà bien établies. Aussi la prise en compte nouvelle et retentissante des mathématiques du chaos a-t-elle été au bout du compte très ambivalente par rapport au développement de la modélisation mathématique. Dans la même page du livre de Jean-Paul Deléage, on tire deux phrases qui témoignent bien de cette ambivalence :

« Il arrive cependant que la formalisation mathématique débouche sur un jeu stérile qui est à lui-même sa propre fin. »³

Mais on lit aussi dans le paragraphe suivant :

« Les grandes questions de l'écologie deviennent formalisables, et les mathématiques permettent de mieux saisir l'ensemble des implications, éventuellement contradictoires, de ces diverses formalisations. »¹

¹ Cité par Jean-Paul Deléage in [Deléage, J.-P., 1991, 1994], *ibid.*, p. 177.

² [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 177-178.

³ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 194.

Pour notre part, nous estimons que cette ambivalence des mathématiques du chaos à l'égard de la modélisation mathématique provient d'un malentendu répandu au sujet du regard que l'on doit avoir en général sur la mathématisation en science. Et ce malentendu a déjà été exprimé par nous précédemment, quoique dans un autre contexte. Il est dû à une divergence implicite mais fondamentale dans la façon de définir le comportement que l'on doit avoir vis-à-vis d'un modèle mathématique : le modèle mathématique doit-il être conçu comme le furent les premiers modèles de Maxwell et Boltzmann, c'est-à-dire de façon à se rendre compréhensibles les mathématiques ? Dans ce cas, on se méfierait des modèles mathématiques à comportement chaotique parce que justement ils nous déçoivent quant à cet objectif cognitif. C'est ce genre d'argument qui peut justifier la première phrase de Deléage, ci-dessus. Ou bien les modèles mathématiques doivent-ils se livrer à nous comme autant d'isomorphismes abstraits, sous la forme de schémas simplificateurs mais opérationnels, qui nous permettent de prédire et d'agir ? Sur ce point, les mathématiques du chaos ne déçoivent pas parce qu'elles vont jusqu'à donner l'impression qu'elles suivent le réel dans ses linéaments les plus imprévisibles, voire les plus contradictoires *a priori*. Et c'est bien plutôt dans cet esprit que Deléage écrit sa seconde phrase.

Giorgio Israel

Le mathématicien et historien des sciences italien Giorgio Israel a lui aussi travaillé sur la naissance de la modélisation mathématique à l'orée du 20^{ème} siècle, après s'être penché sur les débuts de la mathématisation en économie politique au 18^{ème} et 19^{ème} siècle. Ses travaux sur la modélisation, d'abord publiés sous forme d'articles, ont été diffusés et popularisés dans deux ouvrages récents parus en français². Selon cet auteur, la modélisation mathématique constitue bien une forme nouvelle de mathématisation dans les sciences, notamment dans ces sciences qui jusque là échappaient à la mathématisation telle qu'elle avait pu intervenir en physique depuis le 17^{ème} siècle : les sciences humaines et les sciences du vivant. Or, pour bien saisir ce que ce type de mathématisation a de spécifique, il faut se persuader, selon cet auteur, qu'elle présente deux caractéristiques propres. Il les expose dès le début de son ouvrage de 1996 : le renoncement à l'idéal d'unification des méthodes et des savoirs scientifiques, d'une part, et le recours au modèle au seul sens d'analogie mathématique³, d'autre part. Pour bien comprendre en quoi cette deuxième caractéristique distingue la modélisation mathématique des pratiques de mathématisation antérieures, il faut l'opposer au rôle que les mathématiques jouent en physique et particulièrement en mécanique. Pour ce faire, Israel s'appuie sur un texte de Jean-Marc Lévy-Leblond⁴ dans lequel l'auteur s'interroge sur le lien étroit et spécifique qu'entretiennent physique et mathématiques. Ce dernier met en évidence ce qu'il appelle le rôle « constitutif » des mathématiques en physique. Il faudrait distinguer ce rôle de celui qui ne permettrait de concevoir les mathématiques que comme simple application ou comme outil d'expression ou de langage. La thèse de Lévy-Leblond est que les mathématiques ne sont pas seulement un langage pour la physique. Si tel était le cas, cela voudrait dire qu'il pourrait y avoir d'autres langages possibles pour la physique, et donc aussi un espace d'expression des concepts théoriques de la physique peut-être plus originel et qu'il faudrait ensuite traduire en langage mathématique. En effet, le rôle

¹ [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 194.

² [Israel, G., 1996] et [Israel, G., 2000].

³ [Israel, G., 1996], p. 11.

⁴ [Lévy-Leblond, J.-M., 1982].

d'application ou de simple langage peut, pour sa part, rester toujours secondaire dans la science envisagée. Or, on voit bien que ce n'est pas le cas des mathématiques dans la physique, selon Jean-Marc Lévy-Leblond. Il écrit : « Les mathématiques sont ainsi intériorisées par la physique. »¹ Par la suite, après s'être réclamé de Bachelard pour expliciter ce rôle constitutif des mathématiques, il rectifie néanmoins l'interprétation kantienne que l'on pourrait faussement tirer de sa proposition :

*« Le concept mathématique n'est ni un squelette auquel la physique prête chair, ni une forme abstraite que la physique emplirait d'un contenu concret : il est essentiel de penser le rapport des mathématiques à la physique en termes dynamiques. Plutôt que rapport de constitution, on devrait le penser comme rapport constituant. »*²

Ce texte, assez éclairant donc, même s'il reste très vague sur la mathématisation proprement dite, permet non seulement de distinguer sur ce point la physique des autres sciences, mais également de faire apercevoir en quoi les disciplines frontières (comme « la chimie physique, la géophysique, la biophysique, etc. »³) peuvent se réclamer de la physique, indépendamment de leur objet spécifique. Ces disciplines peuvent en effet avoir été auparavant théorisées autrement que par un recours aux mathématiques physiciennes, comme c'est le cas en chimie, en géologie ou en biologie. Et une forme de mathématisation peut leur venir par leur marge. À la différence de Jean-Marc Lévy-Leblond, ce qui intéresse prioritairement Giorgio Israel concerne davantage les disciplines non physiques en elles-mêmes, directement en leur cœur, non les disciplines frontières : à savoir essentiellement l'économie et la biologie, c'est-à-dire les sciences non-exactes qui ont pu avoir recours aux mathématiques sans pour cela se réduire aux disciplines frontières qu'elles abritent cependant. Revenons à son propos principal.

Pour expliciter le sens de son constat historique, Israel part d'abord d'une caractérisation de la mathématisation propre à la mécanique classique. Il distingue significativement deux types de projets réductionnistes qui ont pu successivement affecter les transferts de méthodes et de concepts entre sciences exactes et sciences de la vie et de l'homme. Tout d'abord, le projet réductionniste a été calqué sur les « hypothèses métaphysiques » et épistémologiques qui ont si bien réussi à la mécanique de Galilée, puis de Newton et de Laplace. Selon notre auteur, ce

¹ [Lévy-Leblond, J.-M., 1982], p. 198.

² [Lévy-Leblond, J.-M., 1982], p. 199. C'est la seule allusion à Kant dans cet article qui, par ailleurs, choisit délibérément de ne pas rappeler l'origine kantienne de l'idée de « constitution » mathématique que pourtant il reprend à son compte et remet en honneur. Il est vrai qu'on n'a plus là tout à fait affaire au rapport de constitution tel qu'il a été pensé par Kant (ce dont témoigne le passage cité), et que cet article semble manifester la volonté de modifier le sens de ce terme par un recours au dialecticisme de principe de Bachelard. D'où le passage de l'idée d'une mathématique « constitutive » à celle d'une mathématique « constituante ». Mais pourquoi alors n'avoir pas choisi ce dernier terme, plus vague, dès le début de l'article si le premier prêtait à confusion à cause de la précision avec laquelle Kant l'avait utilisé ? Selon nous, en ne s'affrontant pas directement à la doctrine kantienne et à ses distinctions précises, ce texte reste très décevant car très vague dans sa thèse principale. Plus généralement, il est significatif que l'on ne puisse s'appuyer, à notre époque, que sur ce type de réflexions générales pour tâcher de penser la mathématisation dans les sciences. C'est en tout cas une preuve supplémentaire de la justesse du constat liminaire de Giorgio Israel (1996, p. 10) : les études historiques sur la mathématisation dans les sciences sont trop peu nombreuses. Nous ajouterions que les études épistémologiques le sont également, et cela notamment à cause de l'anti-kantisme persistant propre à la philosophie des sciences française contemporaine, comme nous aurons l'occasion de le mettre en lumière dans l'annexe B. S'il est vrai qu'il y a aujourd'hui un retour de la physique mathématique, notamment de par le développement récent de la modélisation mathématique et des mathématiques des systèmes dynamiques et du chaos, après l'hégémonie de la physique théorique au début du 20^{ème} siècle, comme le confirme le livre d'Israel, l'épistémologie dialecticiste de Bachelard, fondée en son temps sur l'observation de la seule physique théorique, devrait être aujourd'hui fortement amendée pour nous permettre de penser les formes nouvelles de mathématisation qui interviennent dans cette « nouvelle » physique mathématique. Le dialecticisme n'y suffit plus.

³ [Lévy-Leblond, J.-M., 1982], p. 208.

réductionnisme mécaniste s'appuyait en effet sur quatre hypothèses diversement conciliées entre elles : l'atomisme, le continuisme, le déterminisme et l'approche par cette partie des mathématiques que l'on appelle l'analyse¹. Malgré le paradoxe qu'on pourrait y voir, il faudrait d'ailleurs interpréter le recours aux équations différentielles comme un continuisme associé à un atomisme, ce dernier permettant de construire le premier par un passage à la limite. C'est l'analyse mathématique qui permet une telle conciliation.

Le deuxième type de réductionnisme de la science classique serait intervenu plus tard, dans la théorie analytique de la chaleur de Joseph Fourier. Giorgio Israel affirme que l'on a encore affaire ici à un réductionnisme classique mais qui n'est cependant plus de nature mécaniste². Israel s'explique ainsi le déplacement du réductionnisme mécaniste vers un réductionnisme de type analytique, c'est-à-dire qui ne sera plus inspiré que par l'analyse mathématique :

« Le véritable noyau de la méthode scientifique [depuis l'équation de Newton] est alors l'analyse mathématique, procédé qui, partant de l'étude empirique ou expérimentale des propriétés élémentaires d'une classe de phénomènes physiques, conduit à la formulation des équations différentielles qui les régissent. Par conséquent, le projet de 'donner une représentation mécanique de tout phénomène physique' devient celui de 'donner une représentation analytique de tout phénomène'. Le cœur de l'explication scientifique du monde n'est plus $F = ma$, mais l'idée que tout phénomène peut être ramené, 'réduit' à une équation différentielle. »³

Or ce changement de perspective n'implique pas du tout, selon notre auteur, que la vision unitaire du premier réductionnisme soit abandonnée : il n'y a donc pas véritablement lieu de faire commencer l'histoire de la modélisation mathématique avec Joseph Fourier. Même si, avec ces travaux, le noyau de concepts auxquels on veut réduire toute connaissance scientifique est plus large que précédemment, on doit toujours voir là une forme de réductionnisme puisque seule l'analyse mathématique y a droit de citer. C'est encore un réductionnisme au sens où l'on veut « ramener la description des faits à un système de principes et de méthodes considérées comme le noyau ontologique ou épistémologique de la science »⁴. L'exemple de l'approche de Fourier, en ce sens, tendra à maintenir l'hégémonie de l'analyse mathématique dans la physique comme dans les autres sciences qui voudront se mathématiser par la suite. Parce qu'il porte encore avec lui l'hypothèse déterministe, il pourra ainsi constituer un obstacle aux premiers essais de la mathématisation des phénomènes économiques et humains par le moyen du calcul des probabilités.

En toute logique, après l'exposé de ces rappels historiques, la thèse de Giorgio Israel consiste alors à soutenir que la mathématisation directe dans les sciences non-exactes a pu être longtemps ralentie (malgré l'ancienneté de l'arithmétique politique probabiliste de William Petty) du fait de ce privilège constamment accordé au déterminisme des équations différentielles⁵. Autrement dit, les origines de la modélisation mathématique seraient à percevoir dans ces premières tentatives de rupture avec le déterminisme classique intervenant dans les sciences humaines puis biologiques, entre le 17^{ème} siècle et le 19^{ème} siècle. Mais elles sont restées pour beaucoup des tentatives sans grand succès du fait de cette désaffection pour l'indéterminisme.

¹ [Israel, G., 1996], p. 77.

² D'où le fait que la méthode de Fourier ait pu être interprétée par certains auteurs comme une première forme de modélisation mathématique. Voir *supra*.

³ [Israel, G., 1996], p. 149.

⁴ [Israel, G., 1996], p. 149.

⁵ [Israel, G., 1996], pp. 157-172.

Or, il se trouve que, selon notre auteur, cette situation a progressivement changé du fait de l'évolution qui affecta d'abord la physique elle-même. En effet, au début du 20^{ème} siècle, la physique mathématique classique et déterministe a notamment connu les coups de boutoir de la physique quantique ; ce qui a, pour une part, contribué à la fin de l'hégémonie de la physique mathématique au profit de ce que l'on a appelé la physique théorique. Cette dernière, d'abord développée sous l'impulsion de la physique quantique, introduisait en effet la nécessité de recourir tant à des techniques mathématiques probabilistes qu'à un nouveau rapport à l'expérimentation. À la différence de la physique mathématique qui, pour sa part, recourait de façon plus abstraite¹ et détachée aux expériences, la physique théorique, en revanche, créait littéralement ses concepts sous la contrainte permanente de l'expérimentation². C'est ce fondement quasi exclusif sur l'expérience précisément contrôlée qui caractérise la physique théorique. Par ailleurs, son émancipation à l'égard du seul formalisme différentiel et déterministe autorisait une grande souplesse et une grande diversification dans ses mathématisations. Ce faisant, et en retour, les pratiques expérimentales qui lui étaient étroitement affiliées gagnèrent assez paradoxalement en capacité d'autonomie et d'initiative³. On peut s'expliquer ce fait paradoxal si l'on songe qu'une théorie plus souple, et pourvue de formalismes moins conditionnés par des *a priori*, détermine moins étroitement l'expérimentation et ses modalités, même si en même temps elle se fonde toujours plus profondément sur elle. Précisons d'ailleurs ici, que le travail de Peter Galison, dont il sera question plus bas, a justement confirmé cette autonomisation croissante de la pratique expérimentale dans la physique théorique au cours du 20^{ème} siècle⁴.

Par la suite, toujours selon Giorgio Israel, le fait que le choix des formalismes mathématiques ait été moins déterminé qu'auparavant par des *a priori* ontologiques et épistémologiques s'est lui-même vu renforcé par le développement contemporain, en ce début du 20^{ème} siècle, de l'approche axiomatique et formelle de tous les secteurs des mathématiques, cela sous l'impulsion des travaux de Hilbert et de ses critiques, comme de ses successeurs. Le bourbakisme en France, par exemple, est issu de cette volonté de ne considérer les mathématiques que comme un « réservoir

¹ Nous dirions même « intuitive *a priori* », par référence à la théorie de la connaissance kantienne développée dans la *Critique de la raison pure*, notamment au spectacle des succès newtoniens.

² [Israel, G., 1996], p. 185. Les travaux épistémologiques de Gaston Bachelard (voir surtout [Bachelard, G., 1940, 1983], [Bachelard, G., 1949, 1962] et [Bachelard, G., 1951, 1965]) ont pu, en leur temps, paraître innovants dans l'exacte mesure où ils faisaient pertinemment prendre conscience de ce nouveau rapport très étroit (« dialectique », pour reprendre les termes de Bachelard) entre expérimentation et conceptualisation qu'inaugurerait la nouvelle physique théorique du début du 20^{ème} siècle. C'est donc du fait que, dans ce cas particulier, on n'avait effectivement plus affaire à une physique mathématique, comme c'était auparavant le cas en mécanique classique, que l'épistémologie kantienne a pu sembler définitivement dépassée et que le recours à la construction *a priori* de concepts ait pu sembler tout à fait mystique à Bachelard comme à ses successeurs néo-hégéliens ou néo-marxistes. Nous sommes là, une fois encore, devant le cas d'une épistémologie générale construite opportunément au regard d'un certain état historique d'un certain secteur de la science (la physique théorique) et qui a pu abusivement être déployée et généralisée à d'autres secteurs où pourtant le régime de la conceptualisation et de la mathématisation était tout autre. Avec le recul que nous procure l'histoire des sciences, on aperçoit aujourd'hui combien cette généralisation était abusive. Car comme l'histoire des sciences l'indique avec une certaine ironie, il serait désormais faux de prétendre que cette épistémologie, dont on sait aujourd'hui combien elle est datée et située (et qui a pu conséquemment se présenter comme dialectique à bon compte), ait une applicabilité universelle dans les sciences contemporaines, même si elle vaut encore, dans une certaine mesure, pour la micro-physique théorique. Ce dernier constat nous pousse de nouveau à reconnaître, si besoin était, combien l'épistémologie elle-même partage somme toute assez logiquement avec ce qui constitue son objet d'étude propre ce destin d'appartenir à une « histoire jugée », ainsi que Bachelard l'avait d'abord pensé pour la science seule.

³ [Israel, G., 1996], p. 188.

⁴ Israel (1996) a publié avant Galison (1997) ; et Galison, de son côté, ne semble pas avoir connu les travaux d'Israel, comme cela transparaît dans la bibliographie de [Galison, P., 1997] : le nom d'Israel n'y figure pas. On serait donc là devant le cas d'une convergence entre les résultats de deux problématiques historiques d'abord autonomes ; ce qui tend, selon nous, à accroître raisonnablement leur crédibilité.

de formes abstraites »¹ non nécessairement liées à des intuitions sensibles, mais élaborées en revanche très rigoureusement dans des axiomatiques précises.

Dès lors, selon notre auteur, les conditions sont réunies pour que le privilège de l'analogie mécanique laisse assez rapidement la place, en physique, à celui de l'analogie directement mathématique. C'est la figure de von Neumann qui manifesterait le plus clairement cette prise de conscience du fait que, selon lui, on peut désormais se passer des croyances en la causalité du réel ou en l'objectivité des modèles mathématiques que l'on utilise, croyances qui contraignaient bien trop et bien inutilement les formalismes précédents. Pourtant, selon Giorgio Israel, les positions de von Neumann, qui tendaient à représenter les mathématiques comme un réservoir de « schémas logiques et déductifs », font encore de lui un tenant d'une forme nouvelle de réductionnisme (une troisième forme), ce que notre auteur appelle un « néo-réductionnisme ». Le réductionnisme de von Neumann aurait en effet consisté en une sorte de préférence de principe pour la traduction de toute représentation scientifique en un mécanisme formel. Son travail sur les automates formels, par exemple, confirmerait cette analyse. Par ailleurs, comme le rappelle Israel, von Neumann était fermement hostile à l'usage de processus stochastiques dans les modèles mathématiques du vivant. Comment Israel s'explique-t-il ce qui a pu convaincre von Neumann au point que ce dernier en vienne à tenir une telle position épistémologique ? Selon Israel, la mathématisation par l'axiomatisation mathématique apparaît très puissante à von Neumann car elle permet de lisser² toute difficulté épistémologique en transformant, dès le départ, tout principe physique en un simple axiome. Or, depuis les développements des mathématiques remontant à la fin du siècle précédent, l'axiome ne passe plus pour une thèse ou un postulat mais seulement pour un essai de représentation n'ayant aucune prétention à l'objectivité ontologique. Il faudrait donc rapporter ce nouveau réductionnisme non pas à une ontologie mais, au contraire, à la conviction philosophique néo-positiviste selon laquelle la science n'aurait définitivement plus pour objet d'expliquer mais seulement de décrire. On assisterait là à une valorisation supplémentaire du formel aux dépens du sens et de la signification dans les représentations scientifiques³.

Pour notre part, nous nous devons de signaler ici que les travaux de Peter Galison semblent montrer, au contraire, que, dans le cadre de la fabrication des premières bombes nucléaires, von Neumann, ou, en tout cas, ses proches collaborateurs, ont joué un rôle essentiel dans l'introduction de l'approche stochastique en physique nucléaire, notamment avec les premières simulations numériques. Il est vrai cependant que le contexte n'était pas le même que celui qui intéressa plus tard von Neumann, en biologie, lorsqu'il se pencha sur le problème des automates auto-reproducteurs. En ce qui nous concerne, nous ne sommes pas à même de décider lequel des deux historiens des sciences est le plus fidèle à la perspective réelle de von Neumann. Sans doute von Neumann ne possédait-il pas en fait de position épistémologique univoque quels que soient les domaines, si divers, qu'il ait pu aborder. Mais sans vouloir en décider ici, nous nous contentons prudemment de signaler cette relative discordance entre deux interprétations historiques existantes⁴. En ce qui concerne son collègue Ulam, toutefois, nos propres travaux montrent que le

¹ [Israel, G., 1996], p. 195.

² Israel utilise le verbe « exorciser ». Voir [Israel, G., 1996], p. 198.

³ [Israel, G., 1996], p. 200.

⁴ Si l'on tient toutefois à donner raison à Israel, on peut s'appuyer sur un passage d'un article de M. Cini ("The Context of Discovery and the Context of Validation : the Proposals of von Neumann and Wiener in the Development of 20th Century Physics", *Rivista di storia della scienza*, 1985, vol. 2, n°1, pp. 108-109,) qu'Israel cite plus loin dans son livre : « [Dans la conception de von Neumann,] même le hasard peut rentrer dans un schéma purement logique et peut être vu comme la manifestation de lois définies, générales et atemporelles. Dans la théorie de la mesure de von Neumann le temps a disparu [...] Tout ce qui appartient au monde est donc réduit à une sphère de la légalité logico-mathématique », [Israel, G., 1996], p. 226, note 1.

recours à l'aléatoire ne lui paraissait ni interdit ni réellement significatif ou décisif. Le caractère stochastique de certains modèles (les simulations de Monte-Carlo) lui semblait purement contingent et de peu de valeur en soi. Il ne lui paraissait pas du tout aussi décisif que leur faculté de simuler spatialement la réalité ou de modéliser physiquement des problèmes mathématiques.

Quoi qu'il en soit, selon Israel, cette dernière forme de réductionnisme (qui, ajoutons-le, n'a cependant pas peu fait pour le développement de certains formalismes déterministes dans les sciences de la vie¹) peut sembler avoir été aujourd'hui doublée et quelque peu disqualifiée par un certain retour de la physique mathématique sur la scène de la mathématisation en physique. Depuis les années 1960, la théorie qualitative des équations différentielles a en effet connu un regain d'intérêt avec la prise en compte accrue des phénomènes de non-linéarité, de complexité et de chaos déterministe. La description qualitative et globale, qui autorisait déjà une émancipation à l'égard de l'analyse au profit d'un certain retour de la géométrie², n'a donc plus seulement été le fait de l'approche axiomatique et néo-mécaniste telle que l'avaient proposée des chercheurs comme von Neumann. Les anciens formalismes, comme ceux de l'analyse (pour peu que l'on ne simplifie plus les expressions différentielles en considérant, à tort, que les termes non-linéaires peuvent être négligés³), pouvaient donc être réhabilités et utilisés, mais, cette fois-ci, dans le cadre de ce modélisme mathématique globaliste en plein essor.

Pour conclure sur ce qu'il ne présente que comme une ébauche d'une histoire générale de la modélisation mathématique encore à écrire, Giorgio Israel indique qu'il ne faudrait plus désormais arrimer une telle histoire à la seule histoire des formalismes mathématiques intervenant dans la physique, mais qu'il faudrait considérer que les mathématiques appliquées constituent une véritable discipline autonome, liée aux mathématiques et particulièrement dédiée à la modélisation mathématique⁴.

Dans la troisième partie de son ouvrage, l'auteur se propose pour finir de présenter quelques « tensions essentielles » qui semblent, selon lui, animer l'histoire récente de la modélisation mathématique. C'est à Thomas Kuhn qu'il doit cette expression. Ce dernier voulait désigner par là le conflit permanent, dans l'histoire des sciences, entre la tradition et la tendance à l'innovation. Dans cette dernière partie, Giorgio Israel ne procède donc plus de façon chronologique et présente simplement un certain nombre de couples de notions antagonistes censées avoir animé et ordonné les développements récents de la modélisation : mathématique statique et mathématique du temps, local et global, déterminisme et hasard, ordre et chaos, complexité et simplicité, mathématique « quantitative » et mathématique « qualitative », modèle mécaniste et modèle mécanique (pour la modélisation en biologie), empirisme et métaphore (pour la modélisation en économie). Selon Israel, la relative permanence de ces couples témoignerait de la récurrence de certaines options philosophiques, métaphysiques, donc pas seulement épistémologiques, dans l'histoire de la modélisation et dans l'histoire des sciences en général.

Dans le chapitre qui concerne le conflit entre mathématique statique et mathématique du temps, Israel explique et montre combien les travaux de von Neumann en économie, avec son application de la théorie des jeux à l'hypothèse de l'équilibre général, n'ont finalement que pris la suite de l'approche réductionniste et mécaniste traditionnelle dans ce domaine. En effet, en

¹ Nous pensons ici aux premiers travaux du biologiste théoricien Aristid Lindenmayer. Voir *supra*.

² [Israel, G., 1996], pp. 189-190.

³ [Israel, G., 1996], pp. 204-205.

⁴ Ce dont témoigne en France, par exemple, les travaux de Nicolas Bouleau et de ses collaborateurs. Voir [Bouleau, N., 1998].

centrant les procédures formelles sur l'éviction des processus temporels au profit de la recherche de points fixes, von Neumann n'analyse pas la forme réelle des processus. Israel pense qu'il faut attendre les travaux du mathématicien américain Stephen Smale, dans les années 1960, pour que la physique elle-même cherche à renouer avec ce que ce dernier appelle les « mathématiques du temps », c'est-à-dire avec « la représentation dynamique des phénomènes en tant que 'processus' qui se déroulent au cours du temps »¹. Ce serait notamment le développement des calculs sur ordinateur, le regain d'intérêt pour les phénomènes hydrodynamiques de turbulence, et, plus généralement, pour la météorologie, avec les travaux d'Edward Lorenz, qui auraient été parmi les principaux facteurs d'un renouveau de la physique mathématique et des équations différentielles ordinaires. Dans le chapitre suivant sur « local et global », notre auteur affirme en outre que l'influence de la mécanique classique sur la modélisation mathématique est bien plus forte que celle de la physique moderne². En effet, même si l'approche mécaniste de la première physique mathématique est localiste au sens où elle est constructive des concepts qu'elle emploie, cela de par ses outils analytiques et différentiels, sa perspective métaphysique est restée néanmoins globaliste comme souvent dans la modélisation mathématique. Ainsi, à la différence de ce qui se produit dans la théorie physique de la relativité par exemple, « les conceptions d'espace et de temps qui interviennent dans la modélisation mathématique ont presque toujours un caractère très traditionnel »³. Ainsi en est-il également pour les approches en plein essor par l'analyse globale au moyen des espaces de phase. Pour ce qui concerne la tension essentielle entre déterminisme et hasard, Israel indique que les probabilités elles-mêmes ont d'abord été définies dans un contexte laplacien, c'est-à-dire à partir d'un point de vue purement déterministe : dans ce cadre-là, on présentait prudemment le calcul des probabilités comme « une méthode de perturbation de l'analyse objectiviste »⁴. La modélisation mathématique, en ne se présentant pas d'emblée comme une perspective objective sur les phénomènes, n'aurait, en revanche, pas eu à faire face aux obstacles métaphysiques qu'une interprétation objectiviste de l'aléatoire avait auparavant régulièrement rencontrés, dans les diverses tentatives antérieures de mathématisation des sciences non-exactes. Mais, même si la modélisation semble pouvoir réduire de telles questions à de simples choix de « styles » formels et semble se présenter comme un champ pacifié de pratiques et de formalismes, opposées mais cohabitant cependant en bonne intelligence, ces « styles », précise Israel, « représentent l'adhésion à des options philosophiques que le milieu aseptisé de la modélisation peut atténuer mais non pas annuler »⁵.

Israel en arrive alors à une idée qui lui tient à cœur : avec son apparent renoncement à représenter au plus près le réel et sa capacité à s'en tenir à la seule analogie mathématique, la modélisation mathématique aurait pour effet de menacer les croyances qui étaient jusque là au fondement de la science, en particulier celle qui concerne la nécessité du déterminisme, mais aussi et surtout celle qui voulait voir en l'idéal de la science autre chose qu'un ensemble de langages donnant « du monde des images subjectives »⁶. Selon notre auteur, il y aurait en fait, au cœur de toute entreprise de modélisation, une sorte de mauvaise foi originelle. Celle-ci tiendrait principalement en une contradiction entre la modestie affichée publiquement concernant le choix du formalisme ou du style formel et la conviction souvent irréprouvable, de celui qui manifeste ce

¹ [Israel, G., 1996], p. 230.

² [Israel, G., 1996], p. 235.

³ [Israel, G., 1996], p. 235.

⁴ [Israel, G., 1996], p. 245.

⁵ [Israel, G., 1996], p. 251.

⁶ [Israel, G., 1996], p. 253.

détachement, de tenir là une expression plus objective du réel que ses concurrents¹. Par la suite, dans son chapitre sur mathématique « quantitative » et mathématique « qualitative », notre auteur revient sur le rôle important qu'a joué, selon lui, l'ordinateur, dans l'évolution de cette « tension essentielle » particulière. Avec l'ordinateur, l'analyse qualitative a pu s'effectuer en même temps que l'analyse numérique, comme dans une sorte de prolongement naturel, de par le développement des moyens techniques de visualisation des résultats de calcul :

« Jusque dans les années 1970, rien dans la recherche ne signale une modification du statut de l'analyse numérique subordonnée à la recherche des solutions approchées des problèmes classiques de l'analyse. Ce qui a déterminé un changement radical, ce n'est pas seulement l'augmentation de la vitesse de calcul des ordinateurs – bien que la vitesse d'un calculateur électronique des années 1960 paraisse ridicule par rapport à celle de n'importe quel ordinateur personnel actuel. Le changement profond est venu de l'introduction des techniques de représentation graphique dans de nombreux problèmes mathématiques. L'ordinateur possède aujourd'hui un écran, tout à fait semblable à celui d'une télévision, capable non seulement d'afficher des mots et des chiffres, mais aussi de réaliser des dessins sous nos yeux. Beaucoup de problèmes mathématiques trouvent ainsi une représentation directe ; non seulement des problèmes proprement géométriques, qui peuvent maintenant être dessinés avec une précision jusqu'alors inconnue du chercheur qui les traçait péniblement sur une feuille, mais aussi des problèmes algébriques et analytiques qui s'expriment aujourd'hui sous une forme graphique. »²

Ainsi l'ordinateur peut prêter à ce que Giorgio Israel appelle des « expérimentations mathématiques »³ dont la crédibilité fluctue et reste même douteuse pour nombre de chercheurs, d'autant plus qu'aujourd'hui, à la différence des premiers développements de l'analyse numérique sur ordinateur pour lesquels les programmes informatiques étaient accessibles et publiables, plus personne n'est capable de préciser intégralement les cheminements numériques suivis par les logiciels de plus en plus complexes, qui fonctionnent donc parfois comme autant de boîtes noires aux yeux de l'analyste.

Enfin, dans ses deux derniers chapitres, Giorgio Israel évoque successivement quelques thèmes qui traversent l'histoire de la modélisation en biologie puis en économie. En ce qui concerne la modélisation en biologie, tout d'abord, il y aurait quatre secteurs qui auraient plus particulièrement donné lieu à une mathématisation *via* la modélisation. Ce sont les secteurs propres à la biologie mathématique : dynamique des populations, génétique des populations, théorie mathématique des épidémies et « modélisation mathématique de la physiologie et de la

¹ Israel exprime ce doute à plusieurs reprises, notamment p. 257 : « La pensée néopositiviste a voulu bâtir une image de la science, qui est parfaitement légitime mais qui présente deux défauts : elle ne correspond pas à l'histoire de la science et elle ne s'accorde pas avec ce que pensent les savants militants. Au fond de leur âme, ils restent objectivistes et réalistes [...] En réalité, [dans le cas du dualisme ordre-chaos,] comme dans le cas du dualisme déterminisme-hasard, la modélisation mathématique n'a jamais été totalement agnostique et pragmatique » ; et p. 265 : « Encore une fois, c'est l'idée de la *science comme un langage*, dont la modélisation mathématique représente l'expression la plus développée. Ce point de vue est intéressant et présente peut-être des bases solides. Pour ce qui nous concerne, nous le trouvons même fascinant. Mais il faut bien voir à quoi cela mène : à la destruction pure et simple de l'idée classique de science, de ce qui a fait qu'on l'a considérée comme un savoir à part et supérieur aux autres formes de connaissance – et cela parce qu'elle atteignait une connaissance objective et indiscutable. Les savants qui se réclament d'un point de vue modéliste et annoncent la mort des concepts d'ordre, de loi naturelle, d'objectivité, sont-ils prêts à franchir ce pas ? Ou plutôt se rendent-ils compte qu'ils l'ont déjà fait ? »

² [Israel, G., 1996], p. 294.

³ [Israel, G., 1996], pp. 295-296.

pathologie des organes ou des processus du corps humain »¹. Le dernier secteur serait à mettre à part selon notre auteur, dans la mesure où il a pu présenter un certain nombre de modèles relativement indépendamment du réductionnisme mécaniste qui régnait par ailleurs. Ainsi le modèle de Van der Pol pour les battements du cœur est affranchi de tout recours à une analogie mécanique préalable : il s'agit de la mise en œuvre directe d'une analogie mathématique.

Pour finir sur le travail de Giorgio Israel, il nous faut en venir à l'idée principale qu'il en tire finalement lui-même, suivant en cela l'épigraphe de son livre elle-même extraite d'un ouvrage du kabbaliste Gershom Scholem : la « science est un des multiples langages qui inondent le monde »². Pour notre auteur, un modèle est donc toujours une forme de langage. Selon nous, il rejoint là explicitement une option ontologique et, par voie de conséquence, épistémologique, majoritaire dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, et dont nous tâcherons de suivre la naissance et les avatars dans notre annexe sur l'histoire de la philosophie des modèles en France. Indiquons seulement ici que nous qualifions cette option de « linguisticiste » car elle ne veut concevoir toute pratique scientifique qu'à l'image de cette pratique particulière de l'homme qu'est le langage. Or, nous aurons l'occasion de discerner les raisons précises pour lesquelles une telle épistémologie anthropomorphe n'est plus tout à fait à même d'interpréter l'émergence actuelle de la simulation informatique dans l'histoire récente des modèles. Mais pour rester dans le cadre de cet état des lieux en histoire, poursuivons notre extraction des acquis en histoire récente des modèles.

Peter Galison

Avec un grand souci du détail et de l'érudition, le physicien et historien des sciences américain Peter Galison a récemment retracé l'histoire de la naissance de la simulation numérique telle qu'elle est intervenue, à Los Alamos, d'abord dans le cadre du projet de fabrication de la première bombe nucléaire, puis, de façon plus systématique encore, lors de la conception de la première bombe thermonucléaire. Galison nous intéresse ici tout particulièrement parce qu'il s'est longuement penché sur l'histoire de la simulation dont nous montrons, dans notre travail, combien elle est décisive dans l'histoire récente de la formalisation des plantes.

À la suite des travaux de Thomas Kuhn et des post-kuhniens, sa perspective d'historien contemporain part du constat, assez consensuel dans les années 1980, selon lequel la science et les méthodes scientifiques³ actuelles manifesteraient une certaine désunification. Mais pour ce qui le concerne, Peter Galison tient à montrer que ce fait indéniable ne nous détermine pas pour autant à en venir à une épistémologie purement relativiste. Dans son article de 1996, intégralement consacré aux premières simulations numériques en physique nucléaire, il soutient ainsi, et de façon apparemment paradoxale, que c'est seulement par une interprétation sociologique de type « constructivisme social » qu'il reste possible de comprendre l'unité de la méthode de la science et de ses développements. Rappelons ici comment et à l'aide de quels concepts il lève ce paradoxe. Ce faisant, nous comprendrons de quelle manière il est possible à cet historien contemporain de concevoir et d'interpréter le caractère plurivalent de cette nouvelle pratique scientifique qu'est la simulation numérique.

Après avoir insisté, dans son premier livre⁴, notamment à la suite de l'impulsion donnée par Ian Hacking¹, sur la nécessité pour l'historien des sciences de rendre compte de l'histoire de

¹ [Israel, G., 1996], p. 301.

² [Israel, G., 1996], p. 334.

³ [Galison, P., 1996], p. 118.

⁴ [Galison, P., 1987].

l'expérimentation et des appareils expérimentaux sans en passer toujours prioritairement à travers le filtre de l'histoire des théories, Galison s'est trouvé face à la difficulté de penser le statut épistémologique de la simulation numérique en termes de théories ou d'expérimentation : dans le cas de l'émergence de la simulation numérique, fallait-il raconter la naissance d'un calcul ou d'une pratique expérimentale ? C'est donc parce qu'auparavant il s'était situé délibérément dans ce cadre problématique (favoriser une approche de l'histoire des sciences par l'histoire des instruments et des expérimentations) que Galison devint particulièrement sensible à ce problème auparavant négligé par les historiens de la physique nucléaire. Et c'est dans le cadre de cette interrogation qui lui est propre qu'il forge une notion par laquelle il se propose de désigner une forme nouvelle d'activité scientifique. Pour appuyer sa thèse et afin de régler le problème du statut de la simulation numérique, Galison introduit en effet la notion de « zone transactionnelle » - « *trading zone* ». Une « zone transactionnelle » est une zone d'activités scientifiques intermédiaires sans objet bien défini et située au carrefour entre des disciplines scientifiques plus académiques et aux objets reconnus. Selon ses propres termes, c'est « une arène dans laquelle des activités radicalement différentes peuvent être coordonnées *localement* mais non globalement »². L'étude de l'histoire de la simulation numérique serait donc exemplaire de ce mode local et nouveau de croisements, d'échanges et de traductions entre des activités scientifiques hétérogènes. Elle témoignerait d'un « assemblage chaotique de disciplines »³. Nous allons rapidement indiquer ici la teneur des arguments et des résultats de Galison à ce sujet.

Dans son article de 1996, Peter Galison rappelle d'abord que la méthode de simulation numérique a été mise en œuvre non seulement parce qu'aucune discipline traditionnelle ne pouvait à elle seule prendre en charge de telles investigations, mais surtout parce que la conception d'une bombe thermonucléaire exigeait d'une part des expérimentations soit infaisables, soit beaucoup trop exigeantes en termes de précision dans la mesure et dans l'évaluation de la masse critique, et d'autre part, enfin, conduisait rapidement à des théories mobilisant des équations intégral-différentielles insolubles. C'est donc en toute conscience que Stanislaw Ulam, Enrico Fermi, John von Neumann et Nicholas Metropolis ont conçu le projet d'avoir recours aux calculateurs numériques pour recomposer une « réalité artificielle », selon les termes mêmes de Galison⁴ :

*« Où la théorie et l'expérience échouaient, une sorte de modélisation numérique était nécessaire, et là rien ne pouvait remplacer le calculateur prototype qui venait juste d'entrer en fonction à la fin de l'année 1945 : l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator). »*⁵

Galison rapporte alors la teneur des propos de von Neumann par lesquels celui-ci légitimait le recours à une telle modélisation discrète et stochastique. Son argument consistait à inverser la vision traditionnellement répandue au sujet des équations intégral-différentielles utilisées en hydrodynamique. Selon von Neumann, ce sont elles qui doivent être accusées de distordre le monde réel puisqu'elles se présentent comme des descriptions continuistes alors que l'on

¹ [Hacking, I., 1983, 1989].

² [Galison, P., 1996], p. 119.

³ [Galison, P., 1996], p. 119.

⁴ [Galison, P., 1996], p. 120.

⁵ [Galison, P., 1996], p. 122 : "Where theory and experiment failed, some kind of numerical modeling was necessary, and here nothing could replace the prototype computer just coming into operation in late 1945 : the ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator)".

considère « en réalité »¹ un ensemble discret de molécules. Bien sûr l'ordre de grandeur réel du nombre des molécules n'est pas conservé dans la « réalité artificielle », mais, dans ce type de problème, ce sont surtout les proportions numériques et les localisations relatives qui jouent un rôle. Ainsi ce modèle numérique, dit de Monte-Carlo², faisant intervenir un traitement pas à pas et individualisé des molécules, doublé d'un tirage de nombres pseudo-aléatoires réglant leurs comportements respectifs, passe-t-il, aux yeux d'un de ses promoteurs principaux (von Neumann), non plus pour un calcul mais pour une simulation au même titre que les simulations analogiques d'usage fréquent et plus ancien dans de nombreuses disciplines. Nicholas Metropolis et Stanislaw Ulam confirment par la suite les propos de von Neumann en ajoutant que la simulation numérique s'impose dans la résolution de problèmes à échelle intermédiaire, c'est-à-dire ne pouvant être traités ni au niveau de la mécanique classique analytique ni non plus à celui de la physique statistique où la loi des grands nombres permet des globalisations, ou agrégations, dans les calculs. Or, selon Ulam cette échelle « mésoscopique »³ est notamment celle qui concerne déjà prioritairement cette partie des mathématiques que l'on appelle l'analyse combinatoire. La technique de simulation Monte-Carlo, utilisée d'abord dans la modélisation des processus de diffusion et de réaction des neutrons, s'avère d'application plus large car le type de problème qu'elle résout n'est pas spécifique à la seule physique. On peut tout aussi bien considérer cette méthode comme une méthode d'exploration empirique des mathématiques elles-mêmes. Et c'est là que se manifeste au grand jour la plurivalence de la simulation numérique. Afin d'explicitier davantage cette caractéristique, Peter Galison distingue assez précisément les différentes séries d'arguments en faveur de l'interprétation de la simulation numérique comme expérience ou comme calcul. Et c'est seulement après cet exposé historique (où se mêlent donc l'histoire des sciences et l'histoire des épistémologies des scientifiques) qu'il propose sa propre interprétation épistémologique.

Selon notre auteur, il faut distinguer différents niveaux d'interprétation lorsque l'on s'interroge sur le statut de la simulation. Il y a d'abord le niveau épistémique dans lequel on considère principalement les modalités techniques de traitement de la simulation. Ces modalités sont-elles plus proches de celles de l'expérience ou de celles du calcul ? Il apparaît en fait très vite que la simulation exige, aux yeux de celui qui la pratique, les mêmes traitements techniques que l'expérience : elle demande qu'on se préoccupe des erreurs, de leur suivi mais aussi des techniques de réduction de la variance, puis de la localité, de la répétabilité et de la stabilité du résultat. Toutes ces caractéristiques justifient le fait que l'on puisse parler d'« expérimentation mathématique » selon Herman Kahn, alors employé à la *Rand Corporation*⁴. En outre, le même Herman Kahn va jusqu'à penser que la simulation peut se substituer désormais à l'expérimentation puisqu'elle se présente comme un corrélat plus fiable pour la théorie. En effet, dans une approche de type Monte-Carlo, on est certain de contrôler totalement les données physiques et les hypothèses alors que ce n'est pas le cas pour une expérimentation réelle. Cela a pour conséquence de rendre immédiatement testable la théorie. Et l'expérimentation réelle semble pouvoir être détrônée sur ce point. Au vu de ces arguments, Galison affirme que toutes les assimilations de la simulation à l'expérience dont les arguments sont de cet ordre, sont bien de nature épistémique. C'est-à-dire que les traitements techniques cités plus haut interviennent tous

¹ Selon les termes mêmes de von Neumann, précise Galison. Voir [Galison, P., 1996], p. 125.

² Galison rapporte que cette dénomination aurait été pour la première fois proposée – et publiée en 1949 – par Nicholas Metropolis, en référence à la ville de Monaco bien connue pour ses casinos et le libre accès qu'on y donne aux jeux de hasard.

³ Selon le terme même de Galison : « mesoscopic *terra incognita* », [Galison, P., 1996], p. 126.

⁴ [Galison, P., 1996], p. 142.

au titre de moyens « par lesquels les chercheurs peuvent argumenter en faveur de la validité et de la robustesse de leurs conclusions »¹. Et l'essentiel des arguments avancés se fonde bien sur le fait que la nature des moyens mobilisés pour insérer le résultat d'une expérience dans le réseau des arguments est la même lorsqu'il s'agit d'une simulation numérique.

Cependant, il existe un deuxième niveau d'interprétation en ce qui concerne le statut épistémologique de la simulation numérique : le niveau métaphysique, dans lequel on considère la conformité de cette nouvelle forme de représentation à la réalité sous-jacente supposée. Selon les mots de Galison, les méthodes de Monte-Carlo deviennent, dans cette perspective, autant d'« enquêtes » ontologiques semblant appartenir de plein droit aux discours traditionnels de la philosophie naturelle censés porter sur la véritable nature des choses. Ainsi, par exemple, le chimiste Gilbert King accentue encore l'argument de von Neumann en qualifiant les équations différentielles d'abstractions au regard des « modèles réalistes » que constituent pour lui les simulations numériques. Ces modèles sont plus réalistes car ils offrent des simulacres parfaits de la réalité étant donné qu'à un niveau élémentaire, la réalité se présente, selon King, sous une forme discrète et stochastique. Galison qualifie cette attitude ontologique de « stochasticisme »². Elle est à opposer diamétralement à une forme de platonisme qui voudrait voir en l'équation différentielle l'incarnation d'Idées mathématiques continuistes ordonnant le monde abstraitement et de façon sous-jacente. Selon notre auteur, pour Herman Kahn comme pour Gilbert King, « le processus de diffusion est imité par le processus stochastique »³. L'ordinateur imiterait donc la réalité plus qu'il n'effectuerait un calcul ou une résolution numérique approchée. C'est lui qui serait plus réaliste que ne le sont les modèles mathématiques continuistes. Selon cette perspective, de telles représentations mathématiques sont secondes et devraient être remplacées dès lors qu'une simulation devient envisageable. La simulation par Monte-Carlo peut être alors considérée comme une modélisation mathématique d'un nouveau genre : une modélisation « directe » du phénomène physique, car ne faisant pas intervenir d'équations fonctionnelles à titre d'intermédiaires⁴.

Galison évoque ensuite un troisième et dernier niveau d'interprétation pour le statut de la simulation : le niveau pragmatique selon lequel on doit plutôt considérer que les méthodes de Monte-Carlo se limitent à modéliser les processus stochastiques intervenant dans la représentation mathématique mais pas le processus de diffusion lui-même. La simulation serait donc une technique mathématico-mathématique, une recette mathématique opérant de façon interne aux formalismes mobilisés. Elle n'aurait donc pas le statut d'une représentation directe du réel. Parmi les tenants d'une telle interprétation, on retrouve des chercheurs qui, comme le mathématicien de Princeton, John Tukey, ou comme le mathématicien de Cornell, Mark Kac, tiennent à assurer que la simulation n'est qu'une méthode heuristique voire un pis-aller auquel on a recours dans les cas où aucune autre solution ne se présente, mais auquel il faudrait bien vite renoncer dès lors qu'une mathématisation alternative se proposerait. De façon générale, selon

¹ [Galison, P., 1996], p. 143.

² [Galison, P., 1996], p. 146.

³ [Galison, P., 1996], p. 147.

⁴ [Galison, P., 1996], p. 148. Il est intéressant de remarquer que, pour sa part, lorsque le mathématicien et modélisateur français, Nicolas Bouleau (1999), parle de mathématisation directe, il désigne indistinctement toutes les nouvelles formes de modélisation mathématique, voulant dire par là qu'elles peuvent désormais se dispenser de tout recours préliminaire aux théories propres aux domaines de l'objet modélisé. Autrement dit, est directe, pour Bouleau, toute mathématisation qui peut s'affranchir d'une thèse ontologique ou théorique sur la nature du réel. Il nous semble en revanche, que, dans le passage qui nous occupe ici, Galison s'en tienne à l'idée d'une modélisation directe au sens d'une modélisation mimétique, donc nécessairement assise sur une représentation ontologique particulière, et non pas à l'idée d'une mathématisation directe au sens de Bouleau. Cette dernière, en effet, ne se caractérise pas du tout par un formalisme mimétique, mais au contraire par un renoncement - supposé émancipateur - à toute thèse ontologique. Elle se fonde sur un retrait dans la pure phénoménologie de l'objet modélisé.

cette interprétation, la simulation est apparentée à un simple procédé de résolution numérique et calculatoire. La forme extrême que peut prendre ce niveau pragmatique d'interprétation a été notamment illustrée par les prises de position de deux spécialistes de mathématiques appliquées. Pour John Hammersley et Keith Morton, le fait de recourir à des éléments aléatoires dans les modèles mathématiques est une véritable hérésie à laquelle se livrent de façon coupable certains de leurs collègues des mathématiques théoriques. Selon les chercheurs en mathématiques appliquées, leurs collègues feraient mieux de travailler à parfaire les résolutions analytiques des équations différentielles complexes. En effet, ce qui gêne les spécialistes de mathématiques appliquées, en l'occurrence, c'est le fait que l'on ne puisse pas s'appuyer sur des résultats fiables, c'est-à-dire déterministes, susceptibles de rendre compte des lois physiques, dès lors que l'on fait intervenir des processus stochastiques.

Face à ces désaccords profonds au sujet de la nature de cette nouvelle activité scientifique, l'historien Galison est à même de se poser deux questions : comment s'expliquer le fait qu'elle ait malgré tout résisté ? Et comment même s'expliquer son continuel essor depuis lors ? On aurait pu craindre en effet que cette activité finisse par perdre tout à fait de son crédit du fait de cette cacophonie interprétative. Ce qui est surprenant et significatif est qu'il n'en a pas du tout été ainsi : « la pratique s'est poursuivie tandis que l'interprétation s'effondrait »¹. La thèse de Galison sur ce point peut alors se présenter de la façon suivante : en fonction de leurs spécialités d'origine, tous les chercheurs intéressés par la méthode de Monte-Carlo pouvaient bien être en désaccord sur le sens de cette pratique, ils n'en demeuraient pas moins aptes à communiquer, échanger ensemble à son sujet, ainsi qu'intéressés au fait de l'améliorer sans cesse. Tous n'étaient pas également avertis de la fiabilité mathématique d'une telle approche. Tous ne savaient pas ce que recouvraient exactement la notion mathématique de nombre aléatoire. Mais tous ont participé à ce travail collectif qui a mené au déploiement considérable des méthodes de Monte-Carlo. Un accord sur le sens épistémologique d'une pratique n'est donc pas toujours déterminant pour son déploiement effectif. Nous dirions que le « faire » ensemble prime parfois sur le « penser » ensemble et le partage de la signification. C'est en quoi cette « arène partagée »² doit être conçue, selon Galison, comme un cas exemplaire de « zone de transactions ».

Cependant, pour notre auteur, les méthodes de Monte-Carlo restent bien une forme de *langage* puisqu'elles constituent une arène où peuvent se côtoyer des scientifiques de diverses disciplines et de diverses obédiences épistémologiques. C'est sur cette dimension du dialogue que Galison insiste : cette pratique collective doit donc être conçue comme une sorte de « dialecte » (« *pidgin* » selon le terme anglais) permettant à des sous-cultures scientifiques auparavant étanches, de communiquer entre elles et de collaborer partiellement. Et Galison de constater que, progressivement, dans les années 1960, ce dialecte est devenu un véritable créole, ou « langage hybride », tendant à dessiner les contours d'une nouvelle sous-culture scientifique autonome, c'est-à-dire dispensée « d'être l'annexe d'une autre discipline » et ne nécessitant pas de traduction dans une « langue mère »³. Remarquons donc ici que c'est à nouveau essentiellement en termes de langage que Peter Galison conçoit cette « zone de transactions » propre à l'essor de la simulation numérique.

Même si les résultats auxquels son enquête historique l'a mené sont de nature complexe et relativiste, à la fin de son article de 1996, l'auteur esquisse un panorama de l'évolution de la méthode scientifique. Il n'est pas loin de penser, comme Stanislaw Ulam lui-même, que les

¹ [Galison, P., 1996], p. 151 : "Practice proceeded while interpretation collapsed."

² [Galison, P., 1996], p. 150.

³ Ces expressions sont toutes reprises de la page 153 du même article de 1996.

méthodes de Monte-Carlo sont révélatrices d'une évolution fondamentale dans l'application des mathématiques en science en ce qu'elles inversent le rôle traditionnellement dévolu aux probabilités : auparavant, on résolvait des problèmes de probabilités en recourant aux équations différentielles, désormais, on résout des équations différentielles grâce à des processus stochastiques. Peter Galison prolonge et affermit cette idée en la rattachant à une opposition plus générale entre le « mathématisme européen » traditionnel et les « mathématiques pragmatiques, rendues empiriques (« *empiricized* »), et dans lesquelles l'échantillonnage a le mot final »¹. Dans un passage suggestif, Galison rapproche alors cette simulation directe de la nature, rendue possible par des moyens techniques nouveaux, les ordinateurs, de la représentation telle qu'elle était conçue avant le 16^{ème} siècle en Europe : comme « une relation de ressemblance entre le signe et le signifié »². Cette confusion entre le signe et la chose peut susciter de nombreuses interrogations, car elle nous semble aller en effet à l'encontre de toute cette tradition iconoclaste, et volontiers mathématisante, de l'épistémologie, telle que nous l'exposerons dans l'annexe B.

Peter Galison, de son côté, ne poursuit pas cependant son analyse épistémologique en une analyse anthropologique plus générale. Il en reste au niveau des pratiques scientifiques seules et préfère rattacher ce conflit des interprétations au sujet de la simulation numérique à un phénomène déjà mis en lumière par l'historien des sciences Norwood Russell Hanson : dans l'histoire des sciences, il arrive fréquemment qu'une procédure de calcul innovante finisse par passer progressivement pour une représentation de la réalité, sans doute par commodité et sous l'effet de l'accoutumance³. Plusieurs procédures de calcul sont ainsi passées du statut d'outil à celui de représentation. Ce serait le cas pour la simulation numérique :

¹ [Galison, P., 1996], p. 154.

² Si l'on veut voir se préciser l'allusion à l'épistémè pré-renaissante telle qu'elle apparaît effectivement dans ces propos succincts (qui nous paraissent cependant très suggestifs) sur le rôle du signe dans la simulation numérique, rappelons que, dans *Les mots et les choses*, le philosophe Michel Foucault a exposé longuement et assez précisément une telle interprétation. Voir sur ce point, dans [Foucault, M., 1966, 1990], le chapitre II, en entier, intitulé « La prose du monde ». Voir plus particulièrement la page 49 : « Entre les marques [les « signatures » portées par la forme des choses créées par Dieu et qui nous entourent] et les mots, il n'y a pas la différence de l'observation à l'autorité acceptée, ou du vérifiable à la tradition. Il n'y a partout qu'un même jeu, celui du signe et du similaire, et c'est pourquoi la nature et le verbe peuvent s'entrecroiser à l'infini, formant pour qui sait lire comme un grand texte unique. » Voir également p. 50 : « Le langage [pour le 16^{ème} siècle et avant] fait partie de la grande distribution des similitudes et des signatures. Par conséquent, il doit être étudié lui-même comme une chose de nature. Ses éléments ont, comme les animaux, les plantes ou les étoiles, leurs lois d'affinité et de convenance, leurs analogies obligées [...] Le langage n'est pas ce qu'il est parce qu'il a un sens ; son contenu représentatif, qui aura tant d'importance pour les grammairiens du 17^{ème} et du 18^{ème} siècle qu'il servira de fil directeur à leurs analyses, n'a pas ici de rôle à jouer. *Les mots groupent des syllabes et les syllabes des lettres parce qu'il y a, déposées en celles-ci, des vertus qui les rapprochent et les disjointent, exactement comme dans le monde les marques s'opposent ou s'attirent les unes les autres.* » C'est nous qui soulignons cette dernière phrase car elle explicite clairement, selon nous, ce que Galison veut dire lorsqu'il évoque la ressemblance entre signe et signifié dans la simulation. La fiabilité de la simulation reposerait sur une nouvelle vision unitaire du signe et du monde, de type pré-renaissant : au rebours de toute la sémiotique de la modernité, les signes vaudraient parfois à nouveau comme des choses et pourraient donner lieu à tout autant d'expérimentations effectives. Mais à la différence du 15^{ème} siècle, la garantie de la ressemblance entre signe et signifié n'est plus, pour nos contemporains, assurée par un Dieu, par un créateur fiable, parce qu'unique et univoque, des mots et des choses. Dès lors, nous pouvons prolonger la réflexion de Galison en son aval : qu'est-ce qui, dans la simulation, remplace aujourd'hui une telle instance divine comme garantie de la correspondance – qui confine d'ailleurs à l'identification – entre choses et signes ? Toute réponse univoque paraîtrait désormais plus qu'incertaine. Le manque actuel d'un repère ontologique homogène ou d'une référence théologique commune nous paraît pouvoir expliquer en partie cette plurivalence épistémologique de la simulation numérique telle que Galison l'a mise en lumière, par-delà la communauté de la pratique. C'est sans doute ce qui différencie essentiellement cette pratique propre à notre « post-modernité » qu'est la simulation numérique, des pratiques de connaissances pré-renaissantes fondées sur la « signature » des choses. D'où peut s'expliquer aussi le fait que l'on trouve de nouveau aujourd'hui nombre de penseurs pour nous prévenir contre toute identification magique entre le réel et le virtuel. Serait-ce pour nous engager vers une nouvelle Renaissance puis vers une nouvelle Réforme iconoclaste (pour une étude approfondie de l'iconoclasme dans la Réforme, voir [Christin, O., 1991]) ? Nous ne saurions le dire même si la simulation informatique des plantes ajoute encore à la ressemblance entre signes et choses.

³ Galison s'accorde tout à fait avec les propos antérieurs de Ian Hacking sur l'importance de cette mise en lumière opérée précédemment par Hanson dans *Patterns of Discovery* (1959). Voici les propos de Hacking : « Cependant, N. R.

« L'ordinateur a commencé comme 'outil' - un objet pour la manipulation de machines, d'objets et d'équations. Mais, bit après bit (byte après byte), les concepteurs d'ordinateurs ont déconstruit la notion d'outil elle-même tandis que l'ordinateur finissait par passer non plus pour un outil mais pour la nature elle-même [...] Alors que l'équation aux dérivées partielles était apparue comme le mobilier de haut rang décorant le ciel de Platon, maintenant les méthodes de Monte-Carlo semblent re-présenter véritablement la structure profondément acausale du monde. »¹

À la fin de son article de 1996, Galison revient sur la leçon épistémologique que l'on peut tirer d'une telle histoire : on peut considérer, selon lui, que le constructivisme social est une perspective correcte dans la mesure où l'on a vu que ce n'était pas des catégories transcendantes et purement théoriques qui conditionnaient cette histoire, que ce soit la catégorie de simplicité, mobilisée par la théorie de la vérité-cohérence, ou de conformité au monde, mobilisée par la théorie de la vérité-correspondance. Mais, d'un autre côté, ce que montre le concept de « zone transactionnelle » permet de dépasser tout relativisme qui pourrait découler un peu trop vite d'une telle perspective sociologique. Ce que Galison nous semble vouloir dire ici, c'est que si la science est atomisée du point de vue des conceptions du monde qu'elle semble être à même de proposer, elle ne l'est pas du point de vue des pratiques expérimentales et de simulation. De telles pratiques forment comme autant de passerelles, de lieux d'échanges. Il règne donc dans les sciences contemporaines une forme d'unité pragmatique qui se moque de la désunification théorique c'est-à-dire fondamentale. Peter Galison nous semble ici avoir pris implicitement pour cible la notion d'incommensurabilité des paradigmes telle qu'elle a été mise en œuvre par les post-kuhniens, c'est-à-dire par Paul Feyerabend et quelques sociologues des sciences américains. Il s'inscrit ainsi dans la perspective ouverte notamment par Ian Hacking au début des années 1980, selon laquelle si, d'un point de vue purement représentationnaliste ou théorique, l'historien, le philosophe ou le sociologue des sciences peut considérer qu'il y a incommensurabilité des paradigmes et peut légitimement s'inquiéter de l'unité de la science, d'un point de vue socio-pragmatique en revanche, une telle désunification n'apparaît plus et la question se présente alors comme un faux problème

Hanson a remarqué une caractéristique curieuse de la genèse des idées scientifiques. Une idée neuve est d'abord présentée comme un procédé de calcul plutôt que comme une représentation littérale du monde tel qu'il est. C'est seulement par la suite que la théorie et les entités qu'elle comprend sont abordées de manière de plus en plus réaliste [...] Souvent les auteurs de la nouvelle théorie sont partagés quant au statut à accorder aux nouvelles entités. Ainsi James Clerk Maxwell, l'un des créateurs de la mécanique statistique, était, au début de son travail, bien en peine de dire si un gaz est vraiment composé de petites sphères bondissantes produisant des effets de température. Il considéra d'abord que cette définition n'était qu'un simple modèle qui, heureusement, permettait de comprendre de plus en plus de phénomènes macroscopiques. Puis, progressivement, il devint réaliste. Par la suite, on en vint à considérer la théorie cinétique comme un compte rendu satisfaisant des choses telles qu'elles sont. On constate ainsi qu'en science, il est assez courant que l'anti-réalisme à propos d'une théorie particulière, ou des entités qu'elle implique, laisse place au réalisme », [Hacking, I., 1983, 1989], p. 63. Il faudrait, selon nous, rapprocher cette constatation de celle effectuée depuis longtemps déjà par les historiens et les philosophes des mathématiques lorsqu'ils veulent échapper au choix entre le constructivisme ou le platonisme mathématique : les constructions mathématiques, pratiquées d'abord comme schèmes finissent par valoir comme thèmes, ces thèmes ouvrant alors la voie à une intuition nouvelle, à une « intuition prolongée » au sens de Georges Bouligand. Cette intuition nouvelle préparerait notre regard intuitif à la « découverte » de nouveaux théorèmes, et cela même si leurs objets sont d'abord nés d'une construction. Et c'est sur ces thèmes nouveaux que des schèmes nouveaux pourraient à leur tour solidement se construire. Cette lecture de l'histoire des mathématiques repose donc fondamentalement sur l'idée philosophique selon laquelle l'opposition entre le donné et le construit est toute relative. Les racines d'une telle option philosophique sont, elles-mêmes, à rechercher dans les travaux philosophiques de Husserl.

¹ [Galison, P., 1996], pp. 156-157 : "The computer began as a 'tool' – an object for the manipulation of machines, objects and equations. But bit by bit (byte by byte), computer designers deconstructed the notion of a tool itself as the computer came to stand not for a tool, but for nature itself [...] Where the partial differential equation had appeared as the exalted furniture decorating Plato's heaven, now Monte Carlo methods appeared to re-present truly the deeply acausal structure of the world".

suscité fallacieusement par l'erreur de perspective propre à notre cadre intellectuel, trop souvent encore naïvement platonicien. Le relativisme extrême ne serait la conséquence logique que d'une approche socio-historique qui a d'abord été trop exclusivement, donc fautivement, sensible aux devenir des théorisations et des modèles théoriques dans les sciences. C'est la raison pour laquelle il faudrait faire une place à l'histoire des expériences, des instruments et des expérimentateurs.

Dans son ouvrage majeur paru un an plus tard, en 1997, Peter Galison inscrit cet épisode de la naissance de la simulation numérique dans une histoire matérielle, beaucoup plus vaste, de la microphysique au 20^{ème} siècle. L'objet de son enquête déborde donc largement nos propres préoccupations. Mais nous voudrions cependant indiquer brièvement et commenter la problématique générale de cet ouvrage de manière à saisir plus largement quel est l'horizon historique dans lequel Galison croit bon d'inscrire sa réflexion historique sur la simulation. Selon notre auteur, en effet, il y aurait d'abord eu deux traditions relativement opposées dans les premiers temps de la microphysique contemporaine. Il y aurait eu celle dont le but affiché « était de représenter les processus naturels dans leur intégralité et leur complexité »¹, cela en recourant à des émulsions photographiques ou à des chambres à bulles. C'est celle qu'il nomme « tradition de l'image » du fait qu'elle aurait cherché à produire des représentations mimétiques et homomorphes, c'est-à-dire conservant la forme des processus naturels. Et il y aurait eu une seconde tradition, dite « logique », dont le but aurait été de ne préserver dans ses représentations que les relations logiques entre les événements, et cela en recourant préférentiellement à divers types de compteurs électroniques. Or, Galison montre qu'avec l'avènement de l'ordinateur et de la simulation, numérique, ces deux traditions auraient fusionné au début des années 1980. Cette fusion serait plus spécifiquement intervenue avec l'apparition « d'images de synthèse produites par ordinateur et engendrées par l'électronique »². En particulier, il faudrait comprendre que la simulation en tant qu'image de synthèse aurait rendu possible les derniers développements des méthodes de comptage mises en œuvre à partir d'expérimentations avec la TPC, c'est-à-dire avec la « chambre à projection temporelle » :

*« Sans la simulation fondée sur l'ordinateur, les détecteurs tels que la TPC seraient sourds, aveugles et muets : ils ne pourraient pas acquérir de données, les traiter et produire des résultats. On pourrait exprimer cela en des termes plus forts : sans la simulation sur ordinateur, la culture matérielle de la microphysique de la fin du 20^{ème} siècle n'est pas seulement handicapée, elle n'existe pas. »*³

D'où l'importance qu'il y a pour Galison à interpréter l'émergence de la simulation numérique comme zone intermédiaire. La notion de « zone de transaction », qu'il applique à la simulation, lui est donc notamment venue d'une prise en compte de ce fait majeur de l'histoire de la microphysique contemporaine : la fusion entre les deux perspectives traditionnelles de l'image et de la logique.

Dans un chapitre détaillé de ce livre de 1997, Galison reprend l'enquête historico-épistémologique déjà partiellement publiée dans l'article de 1996. Mais il y restitue avec plus de

¹ [Galison, P., 1997], p. 19.

² [Galison, P., 1997], p. 21.

³ [Galison, P., 1997], p. 689 : "Without the computer-based simulation, detectors like the TPC were deaf, blind and dumb : they could not acquire data, process the, or produce results. This could be put in still stronger terms : without the computer-based simulation, the material culture of late-twentieth-century microphysics is not merely inconvenienced – it does not exist."

détails le fonctionnement d'une simulation numérique, à la Monte-Carlo, d'un processus de diffusion et de réaction de neutrons tel qu'il s'effectue dans une explosion nucléaire. Galison montre pourquoi l'on a pu effectivement considérer ce calcul comme identique à la mise en œuvre d'une « bombe artificielle ». En effet, la formalisation qu'apporte avec elle la simulation numérique impose de suivre à la trace et individuellement chaque « neutron artificiel »¹. Ce calcul peut donc passer pour une réplique de la réalité dans la mesure où il est la réplique de l'histoire des états et des positions des particules. Or cette réplique patiente et mimétique est nécessaire parce qu'on ne peut se livrer à des artifices calculatoires simplificateurs qui permettraient de compresser cette histoire en la limitant aux états de début et de fin du processus. C'est l'occasion pour Galison de rappeler que l'interprétation ne prime pas sur la pratique, au contraire. Il faut selon lui reconnaître une certaine autonomie au développement des pratiques expérimentales par rapport à la théorie. Il est cependant significatif que notre auteur ne choisisse pas tout à fait le même verbe qu'en 1996 pour conclure, avec la même idée, son paragraphe : « la pratique s'est poursuivie tandis que l'interprétation éclatait »², écrit-il en 1997. Dans la même phrase, le « *collapsed* » de l'article de 1996 est devenu « *splintered* » en 1997 : « éclatait » a remplacé « s'effondrait ». On peut s'expliquer cette correction si l'on se souvient du contexte de l'article de 1996 : il s'agissait de contribuer à un cycle de conférences sur la question de la désunification de la science. Or, l'enjeu pour Galison était de montrer, de façon assez conquérante au besoin, que la théorie, plus précisément, que l'interprétation théorique des pratiques pouvait passer au second plan dans l'histoire des sciences et qu'elle devait même être considérée, dans certains cas, comme moribonde. Alors que dans l'ouvrage de 1997, il s'agit plutôt d'asseoir en priorité la notion de « zone de transactions », en insistant sur l'*éclatement* du sens des pratiques en diverses interprétations mais sans aller jusqu'à dire qu'elles sont de nul effet sur l'évolution de ces mêmes pratiques.

Dans ce glissement de vocabulaire, sans doute voulu et très maîtrisé par son auteur, nous voudrions voir percer une des deux limites, sans doute mineures, de ce travail monumental. En effet, Peter Galison, après avoir expliqué combien l'équipe de Los Alamos était intellectuellement, c'est-à-dire épistémologiquement mieux disposée qu'une autre à développer la méthode de Monte-Carlo et surtout à l'interpréter consciemment et de façon militante comme une pratique en rupture avec les pratiques de calcul précédentes, utilise ensuite cette histoire, ses avatars et ce qu'il en est ressorti pour minimiser, voire parfois pour tenter d'annuler, spécifiquement dans l'article de 1996, le rôle des croyances ontologiques ou épistémologiques particulières dans le développement de nouvelles pratiques scientifiques sous prétexte que, par la suite, cette nouvelle pratique ne rencontre pas une épistémologie qui permet de tenir un discours univoque sur elle. Or, il nous semble que le discours du Galison-épistémologue récuse par là quelque peu ce que l'enquête du Galison-historien a mis au jour : la nécessaire prise en compte du contexte épistémologique en histoire des sciences lorsque l'on veut comprendre comment une pratique nouvelle s'est mise en place. Comment faire sortir le discours épistémologique de Galison de cette contradiction ? Est-ce possible à partir des seuls travaux, au demeurant considérables, de cet auteur ?

Nous pensons que cela est possible si l'on se livre à une rectification minime de perspective. Galison a certes montré abondamment qu'avec l'émergence de la simulation numérique, nous sommes clairement devant le cas d'une sous-détermination de l'option épistémologique par la

¹ [Galison, P., 1997], pp. 711-713.

² [Galison, P., 1997], p. 746 : "Practice proceeded while interpretation splintered." À comparer avec [Galison, P., 1996], p. 151.

pratique scientifique. Mais il nous faut remarquer que cette sous-détermination se produit à l'intérieur d'un horizon épistémologique déterminé : l'horizon épistémologique normé par avance selon le seul axe positivisme/antipositivisme tel qu'il a été dessiné par Galison lui-même au début de son enquête. Or, on pourrait tout aussi bien considérer que c'est cet horizon seul qui se révèle en effet inadéquat pour penser la simulation, mais pas le rôle même des options épistémologiques en général. Galison semblerait donc confondre un horizon épistémologique particulier, une *épistémè* pour dire les choses un peu trop brièvement, avec l'épistémologie en général, prise en tant que fonction intervenant nécessairement dans la construction des pratiques scientifiques, fonction que le Galison-historien lui-même nous a montrée comme essentielle dans le devenir des pratiques. Si tel horizon épistémologique paraît littéralement désorienté devant une nouvelle pratique, nous ne sommes pas nécessairement devant le cas d'une faillite du rôle de l'épistémologie *en général* dans l'histoire de la science. Il n'est donc pas nécessaire de disqualifier unilatéralement toute interprétation épistémologique formant un contexte favorable à la naissance d'une pratique sous prétexte que les interprétations doublant par la suite cette pratique sont souvent en effet de peu de poids dans son développement ultérieur.

À sa décharge, nous devons noter que Galison complexifie par ailleurs encore davantage son épistémologie de l'histoire des sciences puisque, à la fin de son ouvrage, il propose la notion suggestive d'« intercalation ». Selon la perspective qu'introduit cette dernière notion, il faudrait considérer que l'histoire des sciences est constituée de trois histoires qui se frottent les unes aux autres sans jamais marcher exactement du même pas : l'histoire des instruments, l'histoire des théories et l'histoire des expériences. Toutes les trois possèdent une autonomie relative que les historiens des sciences devraient davantage prendre au sérieux selon les préconisations de Galison. Par ailleurs, les « zones de transactions » opéreraient çà et là, et de proche en proche, à titre de passerelles entre ces sous-cultures différentes et relativement autonomes. Elles seraient comme autant de lieux de communication, comme autant de frontières langagières délimitant en même temps qu'articulant entre elles ces sous-cultures. En tant que lieu de langage par excellence, et donc de traduction, une zone de transaction donnerait naissance à des dialectes puis à de véritables créoles, les créoles n'ayant pas besoin de savoir désigner la totalité des objets culturels exprimés par les langues qu'ils bordent mais seulement ceux qui circulent aux frontières avec les autres sous-cultures et qui servent à leur interaction.

Nous voyons donc bien que, selon Galison, la simulation numérique serait essentiellement à rapporter à un *espace linguistique* dont la grammaire serait fondée dans les règles mêmes de la mise en pratique de la simulation. Elle serait un lieu de circulation de concepts et de pratiques servant à relier spécifiquement les langages différents des expérimentateurs et des théoriciens. Or, malgré et même sans doute grâce au caractère pénétrant de ces analyses, c'est sur ce second point qu'il nous semble possible de formuler une critique à l'encontre de cette épistémologie différenciée, car intercalante, de l'histoire des sciences. Aujourd'hui encore, faut-il cantonner la simulation dans le rôle d'un espace linguistique interstitiel ? Galison lui-même semble s'orienter parfois vers l'idée que la simulation a fini en fait par créer une véritable sous-culture, elle aussi relativement autonome. Mais, dans d'autres passages, il s'en tient au contraire à l'idée selon laquelle elle en resterait au stade d'une culture créole, à l'interface entre des cultures dominantes. Si ce constat peut valoir jusque dans les années 1970, est-ce encore le cas pour les dernières décennies ? N'y a-t-il pas lieu de repérer là encore une attitude trop exclusivement linguisticiste

dans cette épistémologie de l'histoire des sciences contemporaines¹ ? En effet, si nous faisons droit à notre remarque précédente selon laquelle Galison a en fait montré qu'on ne peut faire l'économie d'une histoire de l'épistémologie des scientifiques lorsque l'on se livre à une histoire des sciences, quand bien même il s'agit de l'histoire de la simulation, n'est-il pas en conséquence réducteur de ne traiter la pratique de la simulation que comme celle d'un langage déraciné et hybride sans réel besoin de fondement épistémologique, même fictif ou mythique ? Toute pratique scientifique est-elle réductible à une circulation de signes au point qu'elle puisse se passer de mythe sur le sens, l'origine et la légitimité de ses mots ? Nous ne le croyons pas. Si l'on veut se fonder sur l'anthropologie des créoles pour s'expliquer certaines pratiques scientifiques, comme le fait Galison à la fin de son livre de 1997², il ne nous paraît justement pas possible de nier l'épaisseur culturelle autonome qui se constitue bien vite en même temps que le langage hybride. Et même si l'on veut continuer à nier la profondeur culturelle des peuples à expression créole, on ne peut nier que ces cultures ou sous cultures sont avides de mythification et d'enracinements même artificiels, même empruntés, ainsi que le montre la littérature d'auteurs contemporains comme Patrick Chamoiseau, par exemple.

Par conséquent, pour être plus fidèle à la magistrale leçon d'histoire que donne l'enquête minutieuse de Galison, il nous semble qu'il faudrait intercaler une quatrième histoire et donc une quatrième sous-culture démarquant sans cesse l'histoire des sciences sans jamais être totalement congédiée par elle : celles des croyances ou des horizons épistémologiques, ou *épistémè*, des scientifiques ou, plus généralement, celles des croyances épistémologiques propres à l'esprit du temps considéré. Ainsi, il serait tout à fait compréhensible que, parfois, voire le plus souvent, une pratique scientifique devance en quelque sorte l'épistémologie qui pourrait la penser de façon satisfaisante et univoque (cela n'a-t-il pas été le cas pour la mathématisation de la mécanique classique jusqu'à ce que Kant propose une sorte de « solution épistémologique », avec l'idée d'une construction des concepts dans l'intuition ?), de même qu'une épistémologie pourrait se retrouver « en avance » par rapport aux théories, aux instruments ou aux pratiques, et faire ainsi figure d'idéologie, au sens de Canguilhem³. Avec l'actuel développement des réflexions épistémologiques sur la simulation informatique, nous n'aurions donc pas nécessairement affaire à un combat d'arrière-garde, mais plutôt à la manifestation, dans une phase encore actuellement embryonnaire, d'un besoin d'explicitation et de légitimation épistémologiques d'une pratique particulièrement désorientante. Il ne faudrait peut-être pas tirer tout de suite et prématurément du constat, par ailleurs indéniable, d'une désorientation actuelle de l'épistémologie à l'existence avérée et définitive d'une épistémologie de la désorientation.

¹ Cela, malgré la dénégaration pourtant assez explicite de Galison : "By invoking pidgins and creoles, I do not mean to 'reduce' the handling of machine to discourse. My intention is to *expand* the notion of contact language to include *structured symbolic systems* that would normally be included within the domain of 'natural' language" ; notre traduction : « En invoquant les pidgins et les créoles, je ne veux pas dire qu'il faille 'réduire' la manipulation de machines aux discours. Mon intention est d'*étendre* la notion de langage de contact de façon à inclure des *systèmes symboliques structurés* qui seraient normalement inclus dans le domaine du langage 'naturel' », *ibid.*, p. 835. C'est l'auteur qui souligne. Cependant, dans la suite, Galison n'échappe pas véritablement à cette réduction de la pratique concrète à une pratique de discours, puisqu'il croit pouvoir saisir, par ce recours à la métaphore linguistique, ce qu'il croit être l'essentiel du rôle qui est dévolu aux zones de transactions.

² Dans les pages 835 à 838.

³ Voir [Canguilhem, G., 1977, 2000], pp. 33-45. Ainsi est-ce partiellement le cas du projet d'axiomatisation de la biologie chez Woodger (1937).

Gerald Holton

En ce qui concerne le dernier point, on pourrait nous objecter que le concept de thème de l'imagination scientifique ou « thème », déjà introduit par l'historien des sciences américain Gerald Holton dans les années 1970¹, recouvre ce que nous voudrions voir également à l'œuvre au titre d'options épistémologiques voire ontologiques dans la pratique scientifique. En ce cas, il convient de s'enquérir d'abord brièvement du sens précis que Holton donne à ce concept, de façon à être mieux à même de juger de la pertinence de son usage dans le cas de l'histoire des formalismes.

Par le terme de « thème », Gerald Holton entend en effet désigner toute conception première, relativement indéradicable et auquel adhère fortement et de façon assez irrationnelle un scientifique particulier, dans sa pratique « privée » de la science. Ces « thèmes » ou conceptions premières peuvent se présenter sous trois modes différents² : premièrement, sur le mode d'un concept préférentiel indéradicable ou « concept thématique », par exemple, les concepts de symétrie ou de continu ; deuxièmement sur le mode d'un « thème méthodologique », par exemple l'expression préférentielle des lois « en termes d'invariances, d'extremums ou d'impossibilités »³ ; troisièmement sur le mode d'une « proposition thématique ou hypothèse thématique », « telles que l'hypothèse de Newton, quant à l'immobilité du centre de l'univers, ou les deux principes de la théorie de la relativité restreinte »⁴. Gerald Holton donne alors d'autres exemples de thèmes en précisant qu'ils se présentent souvent sous forme de couples antithétiques : « évolution et involution, invariance et variation, hiérarchie et unité, l'efficacité des mathématiques (de la géométrie, par exemple) opposée à l'efficacité des modèles mécanistes en tant qu'instruments d'interprétation »⁵.

Or, il est important de bien comprendre la signification du choix du mot « thème » dans ce cadre-là. En effet, ces « thèmes » appartenant à l'imagination scientifique commune, mais particularisés préférentiellement dans l'esprit de chaque scientifique, ne sont pas encore tout à fait des thèses : ils n'affirment pas directement ni frontalement une existence ou une inexistence ou bien encore une nécessité concernant un être ou un type d'êtres. Ils ne posent pas ni ne décident *a priori* ; ils sont des « idées directrices »⁶ au sens donné à cette expression dans les études littéraires : ils correspondent à des termes dans lesquels on préfère exprimer ce que l'on veut dire, donc à une stylisation particulière de l'espace de l'imagination. Ainsi, celui qui est davantage porté vers tels thèmes acceptera de les perdre de vue un moment ; mais c'est pour se promettre de les rejoindre dès que possible. Ils ne sont donc pas omniprésents, conditionnants ou infrastructurels, ils sont simplement récurrents. Ce qui caractérise un thème, c'est donc avant tout sa récurrence, c'est le fait qu'il polarise l'imagination, c'est-à-dire l'espace de l'invention intellectuelle, non le fait qu'il conditionne logiquement, effectivement et en dernière analyse les formulations du savoir. Les « thèmes » sont donc plutôt des tics de pensée, des tropismes de l'imagination créatrice, des récurrences intellectuelles ou bien encore des « plis » de l'intelligence scientifique qui se prennent,

¹ Voir [Holton, 1973, 1978, 1981], pp. 7-47.

² [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 28.

³ [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 28.

⁴ [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 28.

⁵ [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 30.

⁶ Dans les ouvrages introduisant aux études littéraires auxquelles Holton se réfère explicitement, la notion de « thème » (qui donne lieu à des « analyses thématiques » d'œuvres, c'est-à-dire encore à ce qu'on appelle des « commentaires composés ») est en effet souvent présentée comme synonyme de l'expression « idée directrice ». Il ne faudrait bien sûr pas confondre cette expression, dont le sens est plus souple et plurivoque, avec celle d'« idée régulatrice » qui désigne chez Kant une idée, ou idéal, de la raison pure, ne possédant donc aucun contenu mais se présentant comme la promesse univoque, aux délais toujours repoussés, d'un tel remplissement. Sa fonction est d'orienter et réguler continûment le fonctionnement de la connaissance d'entendement.

se communiquent assez peu, mais se conservent assez durablement chez une même personne. C'est la raison pour laquelle Gerald Holton tient à les distinguer fortement des « archétypes jungiens » (ils ne sont pas universels et totalement anhistoriques), mais aussi de la métaphysique, des « paradigmes et des visions du monde »¹. En particulier, en reprenant la terminologie de Thomas Kuhn, Holton affirme que ce qui distingue les « thémata » des paradigmes tient au fait que « les thémata subsistent d'un bout à l'autre des époques de révolution »² au contraire des paradigmes. Il ajoute : « à un degré bien plus poussé que ce n'est le cas des paradigmes ou des visions du monde, les options thématiques semblent provenir non seulement du milieu social, ou de la 'communauté' du scientifique, mais bien plus encore de l'individu »³. L'existence des thémata témoignerait donc d'une certaine autonomie, si ce n'est d'une certaine prévalence, de la vie psychique du sujet individuel producteur de science par rapport aux influences extérieures. Nous rejoindrions donc ici ce que nous voulions voir précédemment apparaître sous la forme d'une quatrième histoire à l'intérieur de l'histoire des sciences dite intégrative : une histoire des croyances et des horizons épistémologiques des scientifiques comme, plus largement, de leurs contemporains. Or, c'est bien là que l'on peut comprendre ce que commande nécessairement une telle lecture de l'histoire des sciences : un certain retour au psychologisme, c'est-à-dire à la prise en compte intégrative du vécu individuel du sens dans la pratique scientifique. C'est ce psychologisme subjectiviste qui a été depuis déjà très longtemps congédié dans l'épistémologie historique française contemporaine : d'abord par Bachelard, puis par Cavailles (s'autorisant sur ce point de Husserl), par les néo-marxistes (comme Althusser et Lecourt), par les structuralistes puis, dernièrement, par l'approche pragmatique de l'histoire des sciences et enfin par le programme fort de la sociologie des sciences. Avec sa notion d'« activité scientifique privée »⁴, Gerald Holton essaie, au contraire, d'imposer l'idée qu'il est toujours pertinent de s'interroger également sur les vécus particuliers, les « psychobiographies » des producteurs et des acteurs de la science.

Or, l'hypothèse sous-jacente à ce type d'approche est, comme l'a bien compris le traducteur principal de Holton, Jean-François Robert⁵, l'affirmation d'une certaine unité et d'une certaine cohérence propre à chaque esprit humain par-delà ses manifestations sociales. Pour exposer l'hypothèse philosophique qui est la sienne, dans cette approche particulière et unifiée de l'esprit du scientifique, Holton lui-même ne peut mieux faire que de citer l'extrait d'un texte de l'historien des philosophies religieuses, Harry A. Wolfson :

« Les mots, en général, du fait même qu'ils sont de par nature limités, cèlent la pensée autant qu'ils la décèlent ; et les paroles expresses des philosophes, si excellentes et prégnantes qu'elles soient, ne sont guère qu'autant de flotteurs, balisant le site inféré du non-dit et des pensées englouties. L'objet de la recherche historique en philosophie est donc de mettre au jour ces pensées, ce non-dit ; de restituer les procès latents de raisonnement qui sous-tendent toujours les paroles expresses du discours ; et de déterminer le sens véridique de ce discours, en retrouvant son histoire – comment il advint que cela fut dit, et pourquoi l'avoir dit de telle manière. »⁶

¹ [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 46.

² [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 46.

³ [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 46.

⁴ Voir la définition de Holton : « Ce que nous appelons 'activité scientifique privée' dans ce contexte renvoie essentiellement aux aspects de 'l'instant de genèse' de la découverte, dont il est d'ordinaire convenu qu'il ne sera pas fait état dans la 'science publique' qu'enregistrent revues scientifiques et monographies », [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 23, note 2.

⁵ Voir [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 18.

⁶ Harry A. Wolfson, in *Philosophical Foundations of Religious Philosophy in Judaism, Christianity and Islam*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1947, vol. I, p. 107 ; cité par [Holton, G., 1973, 1978, 1981], p. 11.

À la lecture de ce texte, on comprend que les recherches de Holton soient principalement axées sur la découverte de ce qu'il appelle les « raisons profondes » qui ont pu animé Copernic, Kepler, Einstein ou d'autres grands acteurs de la science. Or, c'est bien le recours à cette « profondeur » du sujet qui est récusé dans la philosophie des sciences française d'après-guerre. Elle partage en cela, qu'elle le veuille ou non¹, l'esprit « anti-interioriste » d'un Jean-Paul Sartre et de son existentialisme, bien que, certes, pas toujours pour les mêmes raisons que lui. Rappelons tout de même que, dans des termes fort influents, ce dernier avait condamné l'idée que le « sujet » créateur puisse contenir plus que ce qu'il fait : « Il n'y a pas de génie autre que celui qui s'exprime dans des œuvres d'art : le génie de Proust, c'est la totalité des œuvres de Proust ; le génie de Racine, c'est la série de ses tragédies, en, dehors de cela, il n'y a rien. »²

Nous devons donc prendre conscience que si, dans le cadre d'une histoire des sciences contemporaines, on veut avoir recours malgré tout aux « options épistémologiques » ou aux « thémata » des acteurs de la science, on s'inscrit dans une démarche aujourd'hui assez minoritaire³, allant à l'encontre de l'« esprit du temps » dont on veut pouvoir rendre compte cependant, et qui vise à réinvestir le sujet et ses ressorts cachés. Or, cela est-il utile, voire simplement possible ou souhaitable, si l'on aborde l'histoire particulière de la modélisation mathématique ? C'est une question que nous nous sommes immanquablement posée. Le champ de la modélisation doit selon nous se prêter plus qu'un autre à une analyse thématique voire stylistique du type de celle que prône Holton. Cependant, comme notre enquête ne définit pas son cadre d'étude par des « événements » singuliers, des inventions ou des découvertes particulières, comme le fait en revanche Holton, mais plutôt par le champ d'une pratique et de ses évolutions différenciées, une approche micro-psychologique et monobiographique à la façon de Holton, donc très axée sur les « idiosyncrasies » des individus, nous serait d'une faible utilité. Pour notre part, nous essayons alors de voir si, en revanche, l'idée d'une adhésion collective, relativement durable, de certains micro-groupes sociaux à certaines options épistémologiques, voire ontologiques, donc à une certaine stylistique modélisante (au delà donc du « thématique » qui, dans la perspective de Holton, intervient seulement dans le travail individuel) peut être également confirmée et développée. Dans cet ordre d'idée, il ne saurait être question d'utiliser de façon inchangée les notions kuhniennes de « paradigme » ou de « matrice conceptuelle » puisque, dans le cas particulier de l'histoire de la modélisation, on ne pourrait logiquement corréler ces notions à aucune idée précise de « science normale », et cela même s'il existe des styles dominants, à un moment donné de l'histoire de la modélisation. C'est en revanche ce genre de domination, mais aussi et surtout les coexistences pacifiques « normales »⁴ entre les différentes stylisations et les évolutions qui s'ensuivent que l'historien devrait être justement à même d'expliquer, sans user pour ce faire du terme de « révolution » mais peut-être seulement de celui de « réforme » puisque seules quelques règles du jeu scientifique sont alors modifiées, non le jeu lui-même dans son ensemble. Nous formulerions en revanche l'hypothèse que ces réformes à l'intérieur des

¹ Bachelard a fortement critiqué l'« existentialisme » dans *Le rationalisme appliqué*, par exemple.

² [Sartre, J.-P., 1946, 1996], p. 52.

³ Bien que les célèbres travaux, déjà assez anciens, de Shapin et Schaffer, sur Hobbes, Boyle et la pompe à air, aient inauguré une forme d'histoire à la fois sociologique et compréhensive des techniques et des sciences, et où la philosophie occupe donc une place de choix. Voir [Shapin, S. et Schaffer, S., 1985]. Notre propre travail ne prétendant pas rivaliser avec la finesse et la richesse de l'analyse de ces auteurs, il nous paraît en revanche hautement souhaitable que certains travaux d'histoire des sciences *contemporaines* tendent à adopter cette même perspective, même si cela constitue un véritable défi à l'actuelle compartimentation (réelle ou supposée) des savoirs.

⁴ L'existence de telles « coexistences pacifiques normales » entre divers styles de modélisation marquerait bien la non pertinence du concept de « science normale » dès lors que l'on veut étudier l'évolution des pratiques de modélisation.

préférences stylistiques ne pourraient être souvent accomplies que par d'autres individus que ceux qui soutenaient l'état précédent des rapports entre les différents styles de modélisation. Notre étude nous a montré que les acteurs conservent en général une forte inertie dans leurs options ontologiques, cela même si leurs options épistémologiques semblent parfois, mais rarement, se subtiliser et varier (comme chez Rashevsky par exemple). Ceci montre que les options épistémologiques restent dominées et régies par les options ontologiques plus que l'inverse n'est vrai.

Moyennant une légère rectification nous permettant de passer à l'échelle des groupes ou des écoles de modélisation, nous allons donc dans le sens de l'argument de Holton précédemment cité : les « options ontologiques » intervenant dans les préférences stylistiques en modélisation mathématique, à l'instar des « thémata » et à la différence des paradigmes, seraient relativement indéradicables chez les individus concernés, quel que soit le changement de fortune relative des différentes stylistiques de modélisation au cours de l'histoire de la science et de ses réformes. Cela nous autorise donc à adopter par moments une approche psychologique ou subjectiviste (lorsqu'il s'agit de s'expliquer, par exemple, ce qui a formé la conviction et les préférences de quelques acteurs de poids, spécialement et en dernier recours, lorsque l'on se sent mis en demeure d'expliquer ou de comprendre une préférence stylistique qui nous paraîtrait autrement purement contingente ou accidentelle) et, à d'autres moments, une approche davantage sociologique, notamment lorsqu'il s'agit de rendre compte des influences sociales et de tout autre facteur extérieur ayant favorisé le déploiement d'un nouveau style de modélisation. Un nouveau style de modélisation ou un nouveau rapport hiérarchique, ou de mutuel conditionnement, entre divers styles de modélisation renverrait donc, notamment, mais pas seulement bien sûr, à l'apparition d'une expression techniquement, socialement et conceptuellement nouvelle d'une option épistémologique ou ontologique cependant ancienne et récurrente sous sa forme stylistique.

Tels seraient donc selon nous, et à première vue, les quelques légers amendements qu'il faut apporter à l'approche de Galison afin de rendre compte au mieux, comme tel a été notre objectif ici, d'une histoire des transferts de concepts formels et de pratiques de modélisation mathématique entre quelques sciences, et notamment entre physique et sciences de la vie, au cours du 20ème siècle. Ainsi, nous avons proposé d'introduire la notion d'*horizon d'homogénéisation* pour prendre en compte le fait que les histoires intercalées font certes paraître des zones de transaction, mais que ces transactions font toujours elles-mêmes fond sur un accord ontologique minimal. Cet accord ontologique renvoie souvent à un *thème* majeur d'une école de modélisation ou d'une école de pensée épistémologique. Notre étude de l'épistémologie de la dispersion formelle nous a par exemple montré combien cette épistémologie, qui pourrait se présenter pourtant comme la plus neutre et la plus objective, parce que la moins intrusive et la moins prévenue, s'enracine encore dans des convictions ontologiques qui s'autorisent du caractère complexe et irréprésentable de la nature.

ANNEXE B

Quelques jalons pour une Histoire de la philosophie des modèles au 20^{ème} siècle

Dans les paragraphes qui suivront, nous procéderons à un exposé analytique et généalogique cursif des différentes positions existantes concernant le statut des modèles. Notre analyse se focalisera sur le contexte français¹. Nous tenons en effet à privilégier ces sources du fait qu'une grande partie de notre histoire concerne plus spécifiquement des travaux scientifiques produits dans ce même contexte et qui se trouvent avoir interagi avec les philosophies des modèles françaises. De plus, l'histoire de la philosophie des modèles au 20^{ème} siècle dans le contexte du positivisme logique anglo-saxon a déjà été rapportée et brillamment synthétisée par Margaret Morrison et Mary S. Morgan dans leur introduction à *Models as Mediators*². Rappelons qu'elles proposent de voir trois périodes dans cette philosophie des modèles : une période syntaxique où le modèle est pensé comme un construit formel purement isomorphe syntaxiquement à la réalité qu'il décrit et ayant la nature de substitut d'une théorie (le premier Carnap, le premier Wittgenstein) ; une période sémantique où le modèle, en conformité avec la théorie des modèles notamment développée par Tarski (à partir de 1936) et reprise par Suppes (1961), est pensé comme l'interprétant plus concret d'un système formel abstrait (voir aussi le second Carnap) ; une période pragmatique dans laquelle, après les travaux d'Austin notamment (1962), le modèle est perçu comme un médiateur entre des discours en fonctionnement et en interférence, et est non réductible à l'un quelconque de ces discours, d'où la certaine action pragmatique du modèle (retour au second Wittgenstein). Les auteurs de cette périodisation reconnaissent d'elles-mêmes appartenir à cette troisième phase, d'où le titre de leur ouvrage collectif. Nous nous permettons ici de constater que, rétrospectivement et très schématiquement, la philosophie des modèles du positivisme logique n'a donc fait que suivre les différentes dimensions, reconnues depuis Humboldt³, du phénomène linguistique. D'où notre question liminaire : qu'en a-t-il été de la philosophie des modèles française ? A-t-elle su échapper à cette réduction anthropomorphe du modèle scientifique au langage humain ?

Une fois que nous disposerons d'une vision assez large sur les états passés et sur l'état présent de la question des modèles en France, nous serons à même de répondre à cette question de savoir si un accord épistémologique minimal a vu le jour avec la perspective du positivisme logique, et, si tel est bien le cas, de quelle nature exacte cet accord peut être. Pour des raisons de commodité, par l'expression « question des modèles », nous choisissons de désigner la question de leur statut épistémologique, qu'on interprète ce statut comme l'équivalent de celui d'une théorie,

¹ Pour une étude détaillée de l'émergence de la philosophie des sciences conventionnaliste en France au tournant du 19^{ème} et du 20^{ème} siècle, nous renvoyons aux études d'Anastasios Brenner, en particulier [Brenner, A., 2003]. Pour notre part, nous concentrerons ici notre analyse sur le rôle qui est conféré aux modèles dans des philosophies plus contemporaines et touchant des sciences plus récentes.

² [Morgan, M. S. et Morrison, M., 1999], pp. 1-9.

³ Voir [Habermas, J., 1999b, 2001], pp. 13-23.

d'une représentation, d'une figuration, d'une interprétation de théorie, d'une illustration, d'une fiction heuristique, d'une expérience de pensée, d'un outil théorique (pour le calcul), d'un outil expérimental (pour le traitement des données), d'une sorte d'expérience ou d'une expérience authentique¹. Il nous sera ainsi possible, croyons-nous, de mettre au jour une caractéristique partagée par nombre d'épistémologies contemporaines, ce qui pourrait bien nous autoriser à parler d'un « esprit du temps », spécifiquement relayé dans le domaine de la philosophie des sciences de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. C'est à cet esprit du temps que les nouvelles simulations s'affrontent aujourd'hui.

Il nous serait évidemment impossible et peu utile de résumer ici l'ensemble des doctrines propres aux philosophies des sciences contemporaines françaises. De surcroît, dans *L'Âge de l'épistémologie*, la philosophe Anne-Françoise Schmid a déjà mis en perspective l'histoire récente de l'épistémologie, notamment dans ses rapports avec le développement des modèles en science. Partant d'une reconnaissance de la diversité des fonctions dévolues aux modèles, ce travail montre bien qu'avec l'émergence et la généralisation de cette pratique, dues, selon son auteur, au développement conjoint de la technologie et des sciences du « génie » ou de l'ingénieur, l'épistémologie quitte une période au cours de laquelle elle polarisait trop exclusivement son attention sur le couple théorie/expérience et sur la problématique corrélative de la vérification/falsification. Le modèle, après avoir été considéré comme un « outil d'interprétation de la théorie »², puis comme une « élaboration abstraite du réel »³ devrait davantage être conçu comme un instrument d'intégration de connaissances hétérogènes⁴. Prenant alors conscience de cette nouvelle donne, l'épistémologie pourrait devenir « quelque chose comme une science des jonctions »⁵. Cette lecture générale nous paraît tout à fait pertinente. Et il nous semble que l'on peut même la prolonger et la préciser sur un point, si l'on observe que la longue réticence à l'égard des modèles, elle-même étroitement liée à l'accusation réitérée d'idéalisme dans la philosophie française, n'est pas seulement due au fait qu'une telle accusation permet de neutraliser un peu verbalement les positions d'un adversaire philosophe⁶. Car on peut montrer que l'accusation d'idéalisme n'est pas sans lien avec un certain refus des images et des simulations, en général. Mais avant d'aller plus loin sur ce sujet, et afin de faire une lecture plus spécifique encore de la philosophie des sciences française, indiquons que deux questions directrices constantes nous serviront ici à sélectionner plus particulièrement les points qui nous intéressent, dans ces épistémologies qui se sont particulièrement penchées sur la question des modèles. Il s'agira tout d'abord de la question du statut argumentatif et épistémique des modèles : comment notre auteur l'évalue-t-il ? Et pour quelles raisons ? Dans cet horizon-là, nous aurons affaire à un certain nombre de caractérisations divergentes, conformément à la liste que nous venons de préciser. Il s'agira ensuite de conserver en mémoire une autre question : celle du statut de la simulation par ordinateur. Cette question est différente de la première dans la mesure où l'apparition de la

¹ Cette liste, assez exhaustive à notre connaissance, représente donc pratiquement un continuum sur lequel le statut des modèles a été diversement projeté.

² [Schmid, A. F., 1998], p. 122.

³ [Schmid, A. F., 1998], p. 131.

⁴ Mais l'auteur ne va pas jusqu'à distinguer les simulations numériques, les simulations informatiques, les modèles monoformalisés et les modèles pluriformalisés. Ce qui nous paraît essentiel.

⁵ [Schmid, A. F., 1998], p. 145.

⁶ « L'épistémologie est ainsi faite qu'elle ménage en elle les positions les plus contraires, et que la lutte contre l'idéologie pourrait parfois bien risquer d'être simplement une lutte contre des positions simplement 'adverses' », [Schmid, A. F., 1998], p. 132. Dans la suite, nous tâcherons de montrer que ce terme d'idéologie (récurrent dans les années 1960 surtout) est peut-être plus significatif encore, et qu'il peut passer pour une sorte de double, en forme de *lapsus*, du terme d'idolâtrie.

simulation par ordinateur semble dépendre non seulement de la première question (celle du statut du modèle) mais également d'une autre question, plus ancienne et plus générale en philosophie des sciences, celle de la nature et du rôle des représentations scientifiques. En effet, si le modèle a semblé, pendant un temps, pouvoir échapper aux accusations de se prêter à l'idolâtrie (parce que devenant plus formel et mathématique), la simulation, avec sa nette tendance à ne reproduire que les apparences ou la surface des choses, peut-elle toujours se dérober à cette critique ? La simulation n'est-elle pas en effet une nouvelle idole, autrement dit une représentation trompeuse, donc par nature anti-scientifique ? Cette question est devenue progressivement plus prégnante dans la philosophie des sciences, au milieu des années 1980, mais malheureusement davantage portée par l'effet spectaculaire du progrès des images de synthèse et des mondes virtuels que par une réelle connaissance et prise en compte de l'évolution des méthodes de la science, comme nous le verrons.

Quoi qu'il en soit, l'ancienne critique de toute interprétation des modèles comme figurations du réel n'est-elle pas alors de nos jours simplement déplacée et reconduite sous la forme d'une critique de la simulation comme duplication mensongère ? Si l'auteur que l'on analyse considère la simulation comme une forme de modèle ou comme la continuation d'un modèle, sans plus, cette deuxième question de l'idolâtrie ne se posera pas pour lui. Mais notre auteur peut au contraire voir dans la simulation une forme nouvelle de représentation scientifique. Dans ce dernier cas, interprète-t-il cette forme de représentation comme un redoublement du réel (ce qui permettrait de s'expliquer la conception de véritables « expériences virtuelles » selon une expression que l'on retrouve de plus en plus dans les articles scientifiques) ou simplement encore comme une figuration créative transfigurant l'expérience immédiate (une figuration médiatisante ou « dépayssante » comme le suggère Gilles-Gaston Granger¹) servant à mieux asseoir la construction théorique ? Avec de telles questions, nous aurons l'occasion de mettre en lumière la teneur de la plupart des discours critiques que les philosophes ont tenu à ce sujet, ainsi que certains des rapports que ces discours entretiennent les uns avec les autres.

L'iconoclasme : une tradition philosophique bien ancrée en France

Si l'on se penche sur l'apport de l'épistémologie française à la question du statut des modèles, on découvre, selon nous, une remarquable² constance dans un ensemble d'arguments qui peuvent, par ailleurs, paraître hétéroclites ou de simple circonstance. Que l'on revienne en effet sur la critique des modèles mécaniques (Duhem, P., 1914) ou des images figées en science (Bachelard, G., 1951) ou des modèles cybernétiques (Canguilhem, G., 1963) ou du positivisme en général (Althusser, L., 1967) (Badiou, A., 1969) ou de la représentation répliquante (Dagognet, F., 1973) ou du modèle comme simple figuration (Bachelard, S., 1979), on assiste invariablement à une dévalorisation constante de l'image reproductrice, dans le processus de la connaissance scientifique. La mise au jour de cette constante préférence implicite est récente. L'accord implicite entre ces épistémologies n'apparaît de façon éclatante qu'à travers leur relatif et commun échec dans leurs tentatives de penser la simulation informatique, nouvelle venue sur la scène scientifique. Leur inspiration philosophique commune (un certain iconoclasme, c'est-à-dire un refus de l'image reproductrice), déjà aperçue et partiellement critiquée par François Dagognet

¹ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 90. Dans ce passage, pour Gilles-Gaston Granger, la machine à traduire « coupe l'objet linguistique des significations vécues ». Il s'explique : « En le dépayssant radicalement, pour ainsi dire, il confère à son caractère structural l'autonomie qu'exige une véritable objectivation », [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 91.

² Et, à notre connaissance, inaperçue jusqu'à présent.

(partiellement parce que nous verrons en effet que ses travaux conservent quelques traces d'iconoclasme), n'a donc pu paraître en pleine lumière et dans sa radicalité qu'en même temps que sa caducité, notamment au vu des pratiques de la science récente.

Avant d'en dire davantage, rappelons donc quels furent les arguments de ces auteurs et montrons que l'iconoclasme, ancré dans une longue tradition philosophique¹, y joua un rôle permanent quoiqu'à chaque fois d'une façon plus indirecte et plus subtile. C'est en retraçant ici les avatars contemporains de l'iconoclasme dans la philosophie des sciences française que nous apercevrons comment il a pu se subtiliser de manière à rester un obstacle pour la pensée de la simulation informatique, dès lors qu'elle sert comme instrument scientifique à part entière et pas seulement comme langage. Il nous sera alors possible de montrer que c'est plutôt sous la forme de déplacements conceptuels que ces avatars peuvent être à chaque fois expliqués et non pas nécessairement au titre de dépassements conceptuels². Cela tendra à accréditer notre hypothèse selon laquelle un « esprit du temps » relativement stable tend à s'exprimer constamment et cela à travers les diverses épistémologies de notre temps. Nous empruntons assez librement ici à Jean-François Lyotard cette notion philosophique de « déplacement conceptuel » non pas au titre de thème philosophique mais au titre d'outil méthodologique pour servir à l'histoire des philosophies des sciences prises sous l'angle de leur traitement respectif des modèles. Au regard des filiations et des ruptures supposées entre les épistémologies contemporaines, nous aurons l'occasion à maintes reprises de voir s'opérer ce type de déplacement. Rappelons que Lyotard oppose le déplacement au dépassement, cette dernière notion étant d'inspiration hégélienne, comme il oppose la dérive à la critique, l'événement à la négativité³. On nous objectera peut-être que c'est là partir du principe injustifié qu'en histoire de la philosophie des sciences, il n'y aurait pas de rupture. Loin de nous l'idée de prétendre généraliser l'application de cet outil méthodologique qu'est la notion de déplacement. Nous prétendons simplement confirmer plus rigoureusement, mais aussi de façon plus adaptée à l'époque concernée, notre hypothèse selon laquelle, des premiers travaux de Gaston Bachelard, remontant au début des années 1930, jusqu'au milieu des années 1990, avec les travaux de Gilles-Gaston Granger, Michel Serres, François Dagognet, Daniel Parrochia ou Philippe Quéau, nous assistons à l'affinement d'une position épistémologique assez uniforme d'inspiration, notamment quant à la question des modèles. C'est cette position évolutive, mais relativement unitaire, qu'il faudra alors confronter à notre question de la mathématisation et de la représentation fragmentée par la simulation.

¹ François Dagognet est revenu à maintes reprises, dans ses écrits, sur la filiation platonicienne, cartésienne, rousseauiste puis bergsonienne de cet iconoclasme des philosophes. Voir par exemple [Dagognet, F., 1984a], chapitre I, en entier.

² La caractérisation de prétendus dépassements nous autoriserait un peu trop vite à nous limiter au dernier épistémologue en date, censé récapituler et dépasser tous ses prédécesseurs, ou même à lui donner raison sous ce seul prétexte.

³ In *Dérive à partir de Marx et Freud*, Paris, 10/18, 1973, pp. 15-16, cité par [Brügger, N., Frandsenn, F. et Pirotte, D., 1993], p. 15. On lit également dans *Pérégrinations*, Paris, Galilée, 1990, cité par [Brügger, N., Frandsenn, F. et Pirotte, D., 1993], p. 15 : « Les pensées sont des nuages. La périphérie d'un nuage n'est pas mesurable exactement, c'est une ligne fractale de Mandelbrot. Les pensées sont poussées ou tirées à des vitesses variables. Elles ont de la profondeur mais le cœur et la peau sont faits du même grain. Les pensées ne cessent pas de changer de position l'une vers l'autre. » La notion de « déplacement » a été introduite par Lyotard dans le cadre d'une critique du marxisme d'inspiration hégélienne. C'est la raison pour laquelle elle se présente comme infléchissant, ou déplaçant, la notion dialectique de « dépassement ». Nous pensons que cette notion, sans bien sûr permettre une ressaisie des pensées et des savoirs du passé dans le détail de leurs déterminations, rend tout au moins justice à leur dimension d'événements intellectuels, tout en permettant leur inscription dans une histoire compréhensive.

La critique des modèles mécaniques chez Pierre Duhem

Si Pierre Duhem n'a bien sûr pas réfléchi sur la simulation par ordinateur, il est connu pour avoir sévèrement critiqué le recours aux modèles mécaniques et pour avoir attribué la diversité de leurs usages à une certaine différence d'esprit entre les français et les anglais. Il ne nous appartient pas de discuter la pertinence de cette hypothèse psycho-sociologique¹ que l'on peut juger brutale ou simpliste. Resserrons plutôt ici l'argument sur ce qui le soutient. C'est en effet le rôle que tient l'imagination par rapport à la raison qui en constitue le cœur. Duhem critique le modèle mécanique en ce qu'il n'a pour fonction que d'exposer de façon sensible et imagée des lois empiriques. Cela a pour conséquence de ne plus nécessiter de la part du scientifique ni de l'étudiant ce travail intellectuel de synthèse que Duhem juge indispensable pour que l'on parvienne à véritablement connaître. Un modèle mécanique empêche l'esprit de synthétiser et de se rendre maniable ce qu'il conçoit. Il en est dès lors ralenti car embarrassé. L'imagination, dans ce contexte, est alors supposée gêner, ralentir et empêcher l'unité de vue et la synthèse de la pensée. Un esprit large, ample ou de géométrie, à la différence d'un esprit étroit, profond et abstrait, se rend ainsi coupable d'une « défaillance de la faculté d'abstraire »². C'est donc en tant qu'il les conçoit comme des images visibles ou, plus généralement, comme des images sensibles, que Duhem rejette les modèles mécaniques. À l'inverse, il admet très bien que l'on ait recours à ce qu'il appelle des « analogies mathématiques ». Mais, très significativement, il tient à préciser qu'il ne s'agit là aucunement de modèles, à la différence de Maxwell qui n'hésitait cependant pas à parler dans les deux cas d'« analogies physiques ». Pour se distinguer de Maxwell et Boltzmann, Duhem tient donc à séparer essentiellement analogie physique et analogie mathématique, en situant son regard discriminant à la racine même des facultés intellectuelles mises en œuvre pour saisir ces analogies. C'est donc en tant qu'il risque de ne passer que pour une image du réel, une simple figuration, que le modèle mécanique doit être critiqué. Une telle figuration ne serait pas nécessairement fausse. Duhem ne pose pas le problème en ces termes-là. Elle serait inconvenue, donc à rejeter. En outre, parler des modèles comme d'images du réel a l'inconvénient majeur de donner une idée en revanche radicalement fautive de la nature et de l'objectif du travail du physicien. La science physique doit viser à terme la suppression de toute représentation sensible pour ne s'exposer de façon économe que sous une forme unifiée, théorique et formelle, selon Duhem.

Gaston Bachelard et la dialectisation des images figées³

Par la suite, dans la première moitié du vingtième siècle, l'épistémologue doit s'accommoder du fait que les modèles ont malgré tout persisté et se sont même développés. L'exemple des curieux avatars du modèle de l'atome de Bohr revient ainsi sous maintes plumes⁴. Peut-on encore demeurer iconoclaste à ce compte-là ? C'est encore possible si l'on ne critique plus directement le caractère sensible de l'image mais son caractère d'être donné, d'une part, d'autre part son caractère figé et enfin son caractère de ne prêter qu'à une cohésion mais pas à une cohérence. Aussi pour Bachelard, dans un premier temps (1938)⁵, c'est parce que « rien n'est donné » et

¹ Selon la terminologie de Suzanne Bachelard (1979), p. 4.

² [Duhem, P., 1914], p. 105.

³ Nous serons très succinct ici sur Gaston Bachelard. Pour un travail plus approfondi, voir [Varenne, F., 2004a].

⁴ Par exemple in [Bachelard, G., 1951, 1965], pp. 68-69, [Lecourt, D., 1972], p. 49 et [Bachelard, S., 1979], p. 11.

⁵ [Bachelard, G., 1938, 1980], p. 14.

« que tout est construit » que l'image sensible immédiate doit être mise à distance et niée¹. Ainsi, « la raison n'a pas le droit de majorer une expérience immédiate » car « le *surobjet* est très exactement une non-image »². Par la suite, Bachelard insistera plutôt sur le fait que l'image est toujours une « image vécue »³ et que c'est la raison pour laquelle elle est figée. Le vécu est figé alors que la raison connaissante est ouverte, dialectique et appliquée. La science a besoin de catégories ouvertes ; or l'image ou le modèle sont du côté de la fermeture de la pensée. Enfin, Bachelard insistera sur le fait qu'une représentation imagée produit l'impression d'une cohésion extérieure entre des choses hétéroclites dépourvues de réelle cohérence. Cette absence de cohérence fait que l'image est non formalisable, donc non connaissable rationnellement : « On ne formalise pas l'incohérent. On ne peut faire monter à la coexistence ce qui s'éparpille en coexistences hétéroclites. »⁴ On voit bien là combien, sur tous ces points, Bachelard se distingue de Duhem. Mais, il est étonnant et significatif de s'apercevoir que, finalement, c'est pour un ensemble de raisons presque symétriques de celles de Duhem que Bachelard en vient néanmoins à cantonner, tout comme lui, le modèle au rôle d'un adjuvant transitoire : pour Duhem, la raison doit rassembler, abrégé et synthétiser en s'élevant dans l'abstraction et en refusant l'image ; pour Bachelard, la raison doit ouvrir ses catégories parce que le rapport au réel est action, réalisation et non donation. Pour cela, elle doit nier l'image qui est donation première, fixité, fermeture et fausse interdépendance. La raison s'applique, pour Bachelard, mais dialectiquement, c'est-à-dire en niant le donné pour affirmer le construit ; et la principale cible de ces flèches dialectiques demeure toujours et encore l'image figée.

Henri Lefebvre et le refus de l'image mortifère

Evoquons succinctement la figure d'Henri Lefebvre. Cet auteur mériterait que l'on se consacre davantage à son œuvre, mais comme son influence fut assez limitée en son temps, notamment du fait de l'occupation quasi exclusive de la scène marxiste française par Louis Althusser ou Roger Garaudy, ses analyses concernant la société de la *mimèsis* furent assez peu relayées dans les milieux scientifiques, mis à part en anthropologie et en sociologie urbaine. Indiquons très brièvement que Lefebvre fait porter sa critique des modèles formels en science (essentiellement les modèles cybernétiques et théorico-structuralistes qui lui sont contemporains) sur le fait, très général et sociétal, que la *praxis*⁵ tendrait de nos jours à s'enfermer et se laisser mourir dans les reproductions de toutes sortes, à tous les niveaux : imitations, simulations, simulacres sociaux et techniques⁶. Image et modèle tombent ainsi l'un et l'autre sous le coup de l'offensive de Lefebvre. Car ce qu'il y a de proprement vital, réel et vrai dans la *praxis* se verrait singé par les images et les modèles, de sorte que les hommes s'éloigneraient en fait davantage de ce réel, persuadés qu'ils sont, à travers ces pratiques de *mimèsis*, de s'en être rendus les maîtres. À l'encontre de cette tendance générale et afin que la *praxis* se revivifie, Lefebvre prône « un rassemblement des

¹ Cela dans le but de connaître et non, bien sûr, de poétiser.

² [Bachelard, G., 1940, 1983], pp. 139 et 144.

³ [Bachelard, G., 1951, 1965], p. 68.

⁴ [Bachelard, G., 1949, 1962], p. 41.

⁵ Ce terme désigne chez Lefebvre « l'activité proprement sociale, c'est-à-dire les rapports entre les êtres humains, distingués par une abstraction légitime des rapports avec la nature et la matière (technique et « *poièsis* ») » in [Lefebvre, H., 1965, 2000], p. 27.

⁶ Si les arguments fondamentaux de Lefebvre ne furent pratiquement pas considérés directement par la philosophie des sciences françaises intéressée par les modèles – alors que leurs conséquences critiques et sociologiques furent en revanche très relayées par l'épistémologie des sciences humaines, notamment en urbanisme et en sociologie –, leur influence sur la réflexion que Jean Baudrillard mène sur la civilisation des simulacres est indéniable. Voir [Baudrillard, J., 1978], *passim*.

« résidus » »¹, c'est-à-dire de tout ce qui, peu ou prou, est manqué par la modélisation et la simulation, et demeure comme résidu de toutes ces opérations mimétiques. Ce que craint donc Lefebvre, c'est que l'image morte saisisse le vif de ce qu'elle mime². L'iconoclasme de Lefebvre est finalement assez classique³ en ce qu'il assimile l'image, comme Hegel auparavant la catégorie kantienne, à une saisie mortifère, donc partielle et trompeuse, de ce qui est vif et authentiquement vivant.

Le modèle cybernétique ne doit pas être une « figuration » selon Georges Canguilhem

La génération de Canguilhem et de ses élèves se verra par la suite confrontée de plein fouet au fort développement des modèles cybernétiques dans les années 1950-1960, notamment en biologie. La position philosophique de Canguilhem quant aux modèles se présente en deux temps. D'une part, et dans la lignée de Bachelard, c'est en procédant à une réévaluation de la fonction de représentation ordinairement attribuée aux modèles qu'il va parvenir à penser et à accepter leur développement considérable : les modèles seront réputés valoir essentiellement comme outils heuristiques dans la construction de la science et non point du tout comme représentations ou figurations. Cet argument présente ainsi une forme affaiblie du rationalisme dialectique de Bachelard. La tâche principale de l'épistémologue consistera à s'accommoder du recours au modèle mais à rappeler sans cesse aux scientifiques qu'il ne doit pas les séduire au point qu'ils en fassent un substitut du réel ou un fétiche. D'autre part, le changement de nature qui, à la même époque, affecte les modèles (ils deviennent quasi-exclusivement mathématiques) encourage Canguilhem à soutenir la thèse interprétative de la légitimité purement formelle des modèles ; ce qui le remet ainsi dans les pas mêmes de Duhem : les modèles ne valent que par leur trame formelle car ils s'appuient sur un isomorphisme, sur un rapport purement formel donc. Dès lors, et assez logiquement, l'épistémologie française, faisant traditionnellement la part belle aux progrès des formalisations mathématiques, peut ainsi faire volte-face sur la question des modèles et les accepter dans la mesure même où ils semblent ne plus présenter qu'une nature purement formelle, linguistique, et qu'une fonction purement heuristique. Ainsi, la critique de Duhem peut revenir sous une nouvelle forme : « illustration n'est pas figuration »⁴ prévient Canguilhem. Par un effet de déplacement induit par le spectacle des développements irrépressibles du modélisme en science, le terme d'« illustration » devient synonyme, chez Canguilhem, de ce que Duhem appelait auparavant l'« analogie mathématique ». Par là, Canguilhem prend acte du fait qu'à son époque, le terme de « modèle » désigne tout à la fois des analogues matériels (modèles physiques) et des systèmes de formulations mathématiques polyvalents⁵ (modèles mathématiques). Il y a donc un moyen pour Canguilhem de réhabiliter les modèles mais à condition de les apparenter à des analogies seulement mathématiques. Les modèles ne seraient ainsi légitimés que par leurs

¹ [Lefebvre, H., 1965, 2000], p. 31.

² « Cette fois, la mort imite la vie : elle la caricature », [Lefebvre, H., 1965, 2000], p. 224.

³ La critique du caractère mortifère de l'image peut classiquement être ici apparentée à la critique des catégories kantienne par Hegel : elles figent ce qui est par nature vivant. Selon nous, ce déplacement propre à la pensée de Lefebvre – et qui pourrait paraître à première vue paradoxal – s'autorise du spectacle contemporain d'une emprise inédite et apparemment totale de la technique et de son cortège de concepts supposés figeants sur les images et les modèles : télévision, automates, modèles cybernétiques, etc. Le concept aurait de nos jours saisi l'image et lui aurait délivré le poison mortel que Hegel avait su déceler naguère en lui. Dès lors la critique philosophique qui, du temps de Hegel, avait d'abord porté sur les seules formes conceptuelles peut s'étendre légitimement aux images construites par la technique et la science contemporaines et ainsi s'épanouir dans un nouvel iconoclasme.

⁴ [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 313. Suzanne Bachelard reprendra mot pour mot cette phrase : « l'illustration n'est pas la figuration », (1979) p. 8. Daniel Parrochia écrira également : « illustration n'étant pas figuration » (1990), p. 221.

⁵ Car valant dans différents domaines scientifiques.

squelettes formels : on retrouve donc bien là, malgré tout et sous une forme déplacée, le privilège que Duhem avait déjà conféré à l'abstraction. Mais c'est l'argument soutenant ici cette valorisation qui est nouveau et qui, sous cette forme originelle, sera souvent répercuté par la suite : Canguilhem rappelle que le 19^{ème} siècle, avec Fourier, avait fait la découverte de « la polyvalence des théories mathématiques par rapport au réel »¹. Fourier, en étudiant les théories mathématiques pour elles-mêmes, aurait fait surgir « des analogies sur des terrains expérimentaux *a priori* sans rapports »². Selon la lecture de cette philosophie des sciences, le modèle est donc toléré mais dans la mesure même où il est désincarné. L'iconoclasme s'accommode ainsi des récents développements de la science en se réfugiant dans un mathématisme de la structure, déjà bien en vogue en France, notamment dans la perspective bourbakiste. Comme conséquence de cela, les modèles cybernétiques de la biologie ne peuvent être que des « simulateurs », c'est-à-dire des automates qui imitent les seules performances visibles du simulé et non sa constitution, ni même sa logique interne. En effet, « il n'y a d'analogie valable [entendons mathématique] qu'au sein d'une théorie » puisqu'il faut pour cela pouvoir établir une application isomorphe terme à terme entre la théorie mathématique et le domaine expérimental concerné. Or (et c'est bien là que se tient la différence entre l'emploi des modèles en physique et leur emploi en biologie selon Canguilhem), il n'y a pas, à proprement parler, de biologie mathématique et théorique : « les modèles conduisent à l'établissement de correspondances analogiques au niveau d'objets [...] concrètement désignés » et non pas au niveau des éléments théoriques constitutifs de ces mêmes objets, éléments qui pourraient expliquer et anticiper l'expérience. Pour Canguilhem, les modèles en biologie restent donc des simulateurs parce qu'ils ne permettent pas la constitution *a priori* de concepts théoriques. Il ne s'y trouve pas de construction mathématique et *a priori* de concepts théoriques³. Il n'y a de construction qu'analogique. Les modèles ne peuvent rester que de surface pourrait-on dire ; et ils servent simplement à présenter des « totalités indécomposables » sur lesquelles on peut procéder à des substituts d'expérimentations parce qu'ils sont en eux-mêmes des « substituts de représentation »⁴. Et c'est là que peut s'imiscer l'idéologie. Ce faisant, Canguilhem maintient ouverte, quoique étroitement, la voie à une légitimation du recours au modèle en biologie, à titre d'objet expérimental substitutif.

La critique de toute forme d'idéalisme : Louis Althusser et Alain Badiou

Dans notre chapitre sur l'école de modélisation française, nous avons déjà présenté dans ses grandes lignes, cette épistémologie néo-marxiste des modèles. Nous y reviendrons ici juste pour en rappeler l'idée centrale : la modélisation, entendue comme forme particulière de recours aux images, est accusée de positivisme et donc d'idéalisme philosophique. L'hypothèse épistémologique est liée à une option ontologique : la nature de la science comme celle de son objet doivent être dialectiques. C'est ainsi, selon le terme d'Althusser, que la philosophie doit *fonctionner*.

En 1969, Alain Badiou adapte la même argumentation à la théorie mathématique des modèles. Selon lui, « pour l'épistémologie des modèles, la science n'est pas un procès de transformation pratique du réel, mais la fabrication d'une image plausible »⁵ déterminée par des

¹ [Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], p. 312.

² [Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], p. 312.

³ Ce vocabulaire kantien nous paraît en effet légitimement appelé par le passage de l'article de Canguilhem que nous analysons ici.

⁴ [Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], p. 311.

⁵ [Badiou, A., 1969], p. 14.

intérêts de classe : « le modèle appartient à la métathéorie sécurisante d'une conjoncture »¹. Donc les modèles « ne sont pas des constructions intra-scientifiques »². Finalement, comme Bachelard qui luttait contre le modèle-image qui fascine et fige la recherche³, Alain Badiou pense que l'image est appelée à être dialectisée. Elle ne vaut qu'en ce qu'elle est niée. Ainsi, on retrouve là un thème assez courant et constant dès lors qu'il s'agit de marginaliser l'image reproductrice en science. Aux formalismes des époques syntaxiques ou sémantiques du positivisme logique, l'épistémologie française répond par un « praxisme » inspiré de Marx.

Les modèles-signes et leur circulation selon Michel Serres

Michel Serres est un philosophe habité par le besoin de vivre des ruptures par rapport à la culture de son temps, tant philosophique que scientifique. Et c'est en science qu'il croit reconnaître les premiers signes d'une sorte de rédemption, voire d'auto-purification et d'expiation, qu'il attend de la part de cette culture, spécialement depuis l'horreur des camps et d'Hiroshima⁴. Il perçoit chez Bourbaki comme chez Léon Brillouin, l'auteur de *La science et la théorie de l'information*, paru en 1959, l'amorce d'une épistémologie intra-scientifique et fondée seulement sur des rapports de structures, façon pour lui propice de faire oublier le fond substantiel d'une culture qui lui pèse, en y demeurant pourtant, mais en ne lui conservant que ses formes⁵. En 1968, paraît alors sa thèse détonante : *Le système de Leibniz et ses modèles mathématiques*⁶. L'hypothèse principale de ce travail est la grande proximité qu'il semble y avoir, selon son auteur, entre les théories mathématiques contemporaines (particulièrement la théorie des modèles⁷) et le système

¹ [Badiou, A., 1969], p. 15.

² [Badiou, A., 1969], p. 15.

³ [Bachelard, G., 1951, 1965], pp. 68-70.

⁴ Voir [Serres, M. et Latour, B., 1992, 1994], p. 29 : « Je demande à mes lecteurs d'entendre exploser ce problème dans toutes les pages de mes livres. Hiroshima reste l'unique objet de ma philosophie. »

⁵ Sans vouloir prétendre expliquer totalement et naïvement le contenu d'une philosophie par le contexte de sa naissance, il nous paraît cependant possible de mieux comprendre cette soit assez générale de structures et de formalismes – soit qui s'est particulièrement manifestée après la guerre, mais non point dans l'immédiate après-guerre – si l'on fait l'hypothèse que la pensée se trouvait là en situation de continuer à se développer tout en détestant ses productions récentes ainsi que ses racines si coupables de les avoir rendues possibles. Assez vite (une fois passée la génération de Sartre), à partir des années 1950, elle aurait travaillé à la liquidation de ses propres contenus, de ses vécus, de ses enracinements. Elle aurait par exemple eu le choix soit d'accuser et de répudier directement la langue allemande (comme Wladimir Jankélévitch), soit de vider la pensée marxiste de ses résidus non purement théoriques et formels (comme l'anti-humanisme d'Althusser) soit de marxiser ou formaliser la phénoménologie pour n'avoir plus à suivre Heidegger (comme Jean-Toussaint Desanti et Gilles-Gaston Granger), soit d'épouser passionnément les paradigmes de l'information et de la sémantique formelle alors naissants (comme Gilles-Gaston Granger à nouveau et comme Michel Serres avec son hermétisme). On peut trouver chez [Breton, P. et Proulx, S., 1989], pp. 213-222, une lecture psychologisante du même type et qui décèle chez Norbert Wiener, fondateur de la cybernétique, ce souci conscient de répudier toute une culture meurtrière en reconstruisant une vision du monde déshumanisée, laissant ainsi la société aux prises avec les seuls automates, désormais plus dignes de confiance et paradoxalement plus humains. Dans un même esprit, François Dosse suggère également que le structuralisme correspond à « un moment de l'histoire occidentale de détestation de soi », [Dosse, F., 1992, 1995], p. 16. Selon nous, le développement de l'épistémologie française d'après-guerre fournit une sorte de manifestation localisée mais très représentative de cette détestation de soi, comme nous allons le voir encore dans la suite. Il est somme toute assez logique qu'une telle tendance à la liquidation des contenus ait plus particulièrement régné dans une discipline intellectuelle où l'on prend traditionnellement comme objet (et donc où l'on prend en quelque sorte moralement et psychologiquement en charge) le développement de la culture et des savoirs : l'épistémologie. Pour finir à ce sujet, signalons l'essai anthropologique de Pascal Bruckner (1983, 1986) qui semble aller dans le même sens puisqu'il stigmatise la culture de la culpabilité qui serait propre à l'Occident et qui se serait plus fortement manifestée en cette fin du 20^{ème} siècle. Son auteur nous paraît cependant avoir manqué de précision et de rigueur historique. À un niveau très général, il veut voir l'origine d'une telle culpabilité dans une certaine essence de la culture occidentale. Ce qui nous paraît très contestable et inutilement généralisateur, cela au vu des indices plus précis et mieux différenciés dont nous pouvons disposer.

⁶ [Serres, M., 1968].

⁷ « Soit L un langage formel, F une formule de L, et I une interprétation du langage L. On dit que I est un modèle de la formule F si cette formule est vraie pour l'interprétation I », [Wagner, P., 2002], p. 19. « L'interprétation d'un langage est

philosophique de Leibniz. Rappelons que, selon Michel Serres, le système de Leibniz, dans et malgré son éparpillement, témoignerait de la présence d'une « structure » formelle commune dotée de nombreux « modèles » (au sens donc de la théorie mathématique des modèles) qui la rendraient vraie dans de nombreux domaines hétérogènes : métaphysique, arithmétique, morale, droit, politique, etc. Dans ses travaux ultérieurs, Michel Serres a utilisé cette même assimilation, mais dans le sens inverse, afin de réfléchir, à partir de la pensée de Leibniz, sur les savoirs contemporains : « Par des chemins qu'il projetait aveuglément, les sciences en sont venues à un état que Leibniz décrivait : elles forment ou tendent à former, un 'corps continu comme un océan', qu'il est arbitraire de diviser en mers Ethiopique, Calédonienne, etc. »¹ C'est alors l'occasion pour Michel Serres d'affirmer la caducité de la référence sémantique en science : les concepts scientifiques ne valent pas en ce qu'ils se réfèrent à des objets mais en ce qu'ils font circuler de façon réticulaire une information sans contenu. Il faudrait alors reconnaître que la philosophie des sciences est devenue une « philosophie de la communication sans substance, c'est-à-dire sans fixité ni référence »². Michel Serres vise ici le remplacement de la consistance des signes et des représentations scientifiques par leur seule résistance et leur relative invariance. Exister valablement pour une représentation scientifique consiste donc dans le seul fait de pouvoir résister aux transformations que pourrait lui occasionner sa communication. Etre pour une représentation, c'est agir pour se conserver à travers toutes les « ductions » : induction, déduction, production, traduction. On voit là combien, conformément au diagnostic de François Dosse, l'ontologie résistiviste de Bruno Latour pourra par la suite trouver en Michel Serres une de ses sources d'inspiration³. Mais pour Michel Serres, l'enjeu est tout d'abord de parvenir à détruire les vieilles hiérarchies cartésienne, kantienne et comtienne des savoirs⁴. Michel Serres se persuade ainsi que deux écoles de pensée se sont toujours combattues dans l'histoire des idées, toutes deux transgressant les prétendues frontières entre sciences et philosophie :

« Aristote oppose à Platon, Leibniz à Descartes, Cournot à Auguste Comte, etc., avec toutes les variantes que l'on voudra et les précisions nécessaires, une conception élémentaire et grammaticale du savoir à une canonisation de l'exercice visuel. À une géométrie que l'intuition domine répond une algèbre qu'une logique organise [...] Les sciences contemporaines sont filles de la première lignée : formalistes, analytiques, référées chacune, à un alphabet d'éléments, grammaticales, signalétiques... Leur air de famille est si prononcé qu'on se prend de nouveau à rêver d'une mathesis universalis [...] La mathématique a voulu prendre l'intuition et lui tordre son cou [...] l'ancien sensorium est soumis au calcul. »⁵

définie par la donnée d'un ensemble (appelé « ensemble de base »), et par une interprétation adéquate de chaque symbole [du système formel] dans cet ensemble de base », *Ibid.*, p. 17. Pierre Wagner précise que le premier résultat qui relève de cette théorie est le théorème de Löwenheim (1915) tandis que son affirmation comme théorie à part entière remonterait seulement au début des années 1950. L'expression « théorie des modèles », due à Tarski, remonte à 1954. *Ibid.*, p. 20.

¹ [Serres, M., 1972], pp. 9-10. Voir également : « La situation analysée ici est bien de type leibnizien [...] », *Ibid.*, p. 28. Ou encore : « [Le système de la science] est donc un système au sens leibnizien, comme on a dit, harmonique, sans pré-établissement », *Ibid.*, pp. 35-36.

² [Serres, M., 1972], p. 13. Plus loin, M. Serres ajoute : « J'ai tenté de montrer que cette variation [sur le terme *epochè*] était épuisée, que le problème de la référence était, au sens technique, un problème fini. Le nouvel esprit [scientifique], c'est la pensée sans référence ; *le transport est la pensée même*, l'invention efficace dans son éveil et l'étrange de ses aurores », *Ibid.*, pp. 15-16. C'est nous qui soulignons.

³ L'historien des sciences humaines, François Dosse, intègre ainsi Bruno Latour, aux côtés de Michel Callon, dans la filiation intellectuelle directe de Michel Serres [Dosse, F., 1995, 1997], pp. 121 *sqq.* Nous reviendrons plus loin sur cet auteur.

⁴ [Serres, M., 1972], chapitre 1, *passim*.

⁵ [Serres, M., 1974], pp. 16-17.

La critique du recours à l'image reproductrice ou intuitive en science est donc, on le voit, la substance même du propos de Michel Serres. C'est pourquoi, même s'il ne le précise pas explicitement, il ne fait aucun doute pour lui que la notion de modèle ne peut être entendue que dans son sens mathématique tardif. L'iconoclasme est donc de principe dans ses premiers travaux. Ajoutons qu'en l'occurrence, le déplacement par rapport à Bachelard est à situer dans une nouvelle loi des trois époques, plus précisément dans le passage de ce qu'il appelle l'état subjectif-objectif supposé représenter la lecture bachelardienne à l'état objectif-objectif¹ supposé la dépasser. Ce dernier qualificatif désigne un état où la science devient exclusivement attentive aux marques que portent les choses sur elles, telles des inscriptions, des structures écrites, « indépendantes[s] des ce[s] chose[s] »² elles-mêmes. Cet état « tente de déchiffrer le langage des objets appliqués aux objets, en reconstituant, quand il se peut, ce langage objectif »³. La science est donc vouée à intercepter, interférer⁴ avec des messages insignifiants, mais circulant entre les objets, d'objet à objet, et à destination préférentielle d'aucun sujet. La critique bachelardienne, par contraste, restait donc trop axée sur le sujet. C'est-à-dire que les procédures à la fois théoriques et technico-expérimentales (la phénoménotechnique) servant à construire l'objet de la science bachelardienne peuvent encore s'interpréter comme la simple inversion de la faveur accordée naguère par Descartes au sensible en une faveur accordée à l'intelligible, avec l'inconvénient de désigner une fois encore ces procédures comme accessibles au seul sujet et à destination de lui seul : d'où la qualification d'état subjectif-objectif. La déformation de l'iconoclasme de Bachelard vers celui de Michel Serres se produit très précisément selon l'axe de contestation suivant : immanence aux choses mêmes des messages susceptibles de colporter un savoir sur ces choses (Serres) *versus* transcendance du sujet travaillant le monde pour constituer les choses malgré tout encore comme objets d'intellections, et cela quand bien même le pluralisme et le relativisme de ces intellections seraient reconnus (Bachelard).

Notons toutefois que, dans des travaux plus récents⁵, Michel Serres semble accorder plus d'importance aux images reproductrices, notamment au vu du développement considérable des images de synthèse. Michel Serres rappelle que certaines de ces images sont en effet construites intégralement à partir de signaux de diverses natures, comme les images satellites, par exemple. Ce sont des objets de synthèse aux colorations et aux formes multiples, plus complexes que ce que nous pourrions réellement voir d'un satellite avec nos seuls yeux⁶ ou à partir de la traduction sensible d'un seul type de signal physique. Elles s'offrent à notre intuition sensible comme objet global en vue d'une interprétation ou de l'application de modèles. Michel Serres insiste sur le fait nouveau que, dans ces images, l'exhaustivité prend le pas sur l'abstraction, au rebours de toute

¹ [Serres, M., 1972], p. 14.

² [Serres, M., 1972], p. 94.

³ [Serres, M., 1972], p. 95.

⁴ Cet usage d'allure métaphorique - quoique presque directement repris de sa thématization scientifique, d'où l'idée d'une épistémologie intra-scientifique propre à Serres - de la notion d'« interférence » s'autorise notamment des études de Léon Brillouin sur les interféromètres et plus généralement sur les supposées limites théoriques de toute expérience scientifique : « Nous avons étudié un certain nombre d'expériences et nous sommes parvenus au résultat général qu'est le principe de néguentropie de l'information qui exprime que toute information résultant d'observations physiques doit être payée par un accroissement d'entropie », [Brillouin, L., 1959, 1988], p. 221. Rappelons que, depuis l'époque de Brillouin, ce résultat a été fortement contesté. Il a notamment été avancé l'idée que la création de néguentropie serait due à l'effacement d'information qui est nécessité par toute acquisition d'information, non à cette acquisition elle-même. Pour ces mises au point, voir les travaux de Rolf Landauer, Charles Bennett et Seth Lloyd. De ce dernier auteur, on pourra consulter un article paru dans « Physical Review A », November 1997. Voir également [Segal, J., 2004], pp. 622-628.

⁵ [Serres, M., 1997], préface.

⁶ Il s'agit donc d'une forme de sur-reproduction et non d'une représentation sélective.

une tradition de représentations scientifiques. Dans ces objets de synthèse, le caractère imagé et sensible qui sollicite notre intuition visuelle est de nouveau là. Ce genre de représentation scientifique ne peut donc plus être considéré comme simplement abstraitif ou condensant. Au contraire, ces objets sont surinformés pour notre intuition. En utilisant à rebours la terminologie bachelardienne, nous pourrions dire que ce sont des « sur-objets » sur-sensibles ; car s'ils dépassent le statut de l'objet sensible habituel, ce n'est pas en tant qu'ils nient ou dialectisent sa sensibilité, mais en tant qu'ils nous rendent nouvellement sensible sa complexité cachée. Dans ce changement de perspective nous voulons voir un revirement majeur dans la pensée de Michel Serres face à la réalité d'une technique et d'une méthode désormais bien présentes et incontestables : la simulation, l'imagerie virtuelle et la réalité augmentée. On ne peut plus dire que l'informatique est condamnée à n'étendre que la métaphore informationnelle et communicationnelle à toute pratique scientifique.

Suzanne Bachelard et le mariage de la phénoménologie avec la dialectique iconoclaste

La contribution de Suzanne Bachelard au colloque *Élaboration et justification des modèles* organisé, en 1978, par Pierre Delattre et Michel Thellier, souvent citée et reprise dans ses conclusions¹, constituera un point de repère épistémologique dans le paysage français de la réflexion sur les modèles. Dans une perspective d'épistémologie historique, elle y reprend les thèses déjà développées par les auteurs que nous avons évoqués, mais en explicitant et en déplaçant un certain nombre des attendus qu'elles recèlent. Tout d'abord, la thèse de la découverte de la polyvalence des théories devient cette fois-ci fondamentale. Et Suzanne Bachelard l'associe clairement sur ce que nous appellerions volontiers une vision mathématisante de la construction des sciences de la nature. En effet, elle tient à préciser que, parallèlement à la diversification des domaines de la physique déjà largement reconnue par les historiens des sciences (« électrostatique, électrodynamique, thermodynamique, électromagnétisme »²), se produisait, avec la « découverte » des géométries non-euclidiennes puis de leurs modèles euclidiens, un éclatement de la classification traditionnelle des sciences mathématiques ; ce qui aurait constitué un choc en retour sur la modélisation mathématique tous azimuts de la physique qui lui succéda. Suzanne Bachelard en conçoit alors l'idée que « c'est la polyvalence théorique qui légitime la substitution à une étude expérimentale compliquée d'une autre étude expérimentale plus accessible ». De là elle déduit le caractère essentiellement « ostensif » de tout modèle, qu'il soit abstrait ou concret. Cela lui permet d'unir sous une même fonction les modèles des sciences de la nature et ceux de la théorie mathématique des modèles. Dès lors, il semble que l'on soit très proche d'une conciliation avec ce que nous avons déjà indiqué comme étant la problématique proprement anglo-saxonne de la maîtrise mathématique : à savoir celle de la maîtrise *des* mathématiques par notre pensée et pas seulement celle de la maîtrise *du* monde *par* les mathématiques. Un tel souci était encore présent, en 1967, chez le physicien Louis de Broglie puisqu'il demandait à la microphysique contemporaine de se livrer à nouveau à l'usage de « représentations concrètes »³. Mais Suzanne Bachelard s'empresse très vite de retomber dans la

¹ Elle est notamment citée par [Parain-Vial, J., 1983, 1985], p. 139, [Parrochia, D., 1990], p. 219 et [Orange, C., 1997], pp. 27 *sqq.*

² [Bachelard, S., 1979], p. 4.

³ Voir ce propos conclusif de Louis de Broglie : « La représentation concrète de la réalité physique dans le cadre de l'espace et du temps avec connexion causale a été à l'origine de tous les progrès de la science moderne : elle est conforme aux tendances profondes de notre esprit et nous cessons de bien comprendre si nous nous en écartons », [Broglie (de), L., 1967], p. 724.

valorisation de l'abstraction mathématique en précisant par exemple que « le modèle qui donne à voir ne donne à voir qu'à l'initié qui connaît le support conceptuel qui justifie ce modèle »¹. Autrement dit, le pouvoir « ostensif » des modèles n'est perceptible que par une petite élite d'hommes qui ont su s'abstraire d'abord et avant tout du sens commun. Et elle en conclut : « On peut dire finalement qu'il *n'y a pas* de modèle figuratif. »² Elle s'explique encore : « Le modèle n'est en aucun cas *imitation* des phénomènes. »³ Plus exactement, il imite de manière sélective : « Le modèle, copie du réel, serait ou trivial dans la mesure où ce réel est dominé par la connaissance scientifique, ou chimérique dans la mesure ou de l'inconnu ou du mal connu subsiste. » D'où l'idée que « loin de fonctionner comme une copie, le modèle fonctionne comme opérateur sélectif »⁴.

Le modèle mathématique dans les sciences comme dans les mathématiques elles-mêmes est donc défini à partir de sa fonction de sélection, de simplification et, par conséquent, de la fonction de monstration qui en résulte. C'est un schéma théorique simplifié, une fiction mathématique sélective et orientée. Car cette thèse doit en effet logiquement mener à un modélisme perspectiviste et égalitaire si l'on peut dire, les modèles étant tout aussi acceptables les uns que les autres et aussi nombreux que les points de vue ou que les objectifs que l'on se fixe. Mieux que cela : le fait que le modèle ne soit pas identique à ce qu'il modélise⁵, qu'il ne soit pas trivial en ce sens, participe en creux à l'élaboration du savoir, car il stimule des programmes de recherches expérimentales ou théoriques nouvelles. En ce sens, le modèle est un « *médiatiseur* » selon le terme même de Suzanne Bachelard qui reprend à son compte, en cette occasion, la qualification d'« abstrait-concret » introduite par Gaston Bachelard. Or il peut tenir cette fonction parce qu'il a pour vocation d'être saisissable dans son ensemble par notre esprit, selon l'expression de Jean Perrin reprise par l'auteur⁶.

À la fin de son article, Suzanne Bachelard évoque très succinctement la simulation informatique et la reconnaissance des formes mais en les cantonnant significativement à l'analyse de données et au déploiement de modèles mathématiques. Pour elle, il n'est pas de simulation informatique sans modèle mathématique : « même la visualisation informatique, qui pourtant est marquée par le label de l'immédiateté de la sensation, repose sur une lourde assise théorique »⁷. Elle se rend ainsi coupable de confondre la théorie qui autorise l'analyse de données (car leur donnant une place dans un système formel) et le modèle sous-jacent à la synthèse informatique d'images et qui est loin de valoir comme théorie. Finalement, moyennant cette confusion, la visualisation du modèle ne serait donc qu'une confirmation et une manifestation tout à fait marginale de sa nature d'« abstrait-concret », déjà exposée précédemment. La simulation informatique ne ferait que confirmer le diagnostic selon lequel les modèles mathématiques seraient essentiellement des opérateurs formels de sélection servant l'objectif de nous faire parvenir à une conception plus claire, quand bien même elle en serait caricaturale, des processus réellement à l'œuvre.

¹ [Bachelard, S., 1979], p. 8.

² [Bachelard, S., 1979], p. 8. C'est l'auteur qui souligne.

³ [Bachelard, S., 1979], p. 8. C'est l'auteur qui souligne.

⁴ [Bachelard, S., 1979], p. 9.

⁵ Ce que Mary Hesse appelait l'« analogie négative ».

⁶ [Bachelard, S., 1979], p. 13.

⁷ [Bachelard, S., 1979], p. 14.

François Dagognet et la nécessaire « transfiguration » dans toute figuration

On pourrait s'étonner de voir figurer François Dagognet dans un exposé analytique et généalogique des positions iconoclastes en philosophie des sciences et des modèles. Nous ne nous cacherons pas le fait que ce philosophe a en effet grandement contribué à la prise de conscience générale et à la mise au jour de ce « vice » dont il a lui-même montré combien il pouvait être consubstantiel à nombre d'entreprises philosophiques. Etant entendu qu'*a priori* notre tâche se présente ici comme plus ardue, nous essaierons de restituer le sens précis de la réhabilitation philosophique proposée par François Dagognet : tout d'abord à la lumière des critiques qu'il a formulées à l'encontre des philosophes iconoclastes, ensuite, à la lumière des arguments qu'il a fournis pour constituer une philosophie de l'image alternative et à part entière. Notre objectif est de nous rendre à même de déceler la teneur précise de l'iconoclasme résiduel que nous lui supposons.

Commençons donc par ses critiques de la tradition iconoclaste. Un des premiers arguments de François Dagognet consiste à faire remarquer que les philosophes des sciences iconoclastes auraient tort d'exagérer l'importance de « la mobilité, de la fluence du savoir »¹ à l'encontre de la désespérante stabilité de l'image. Ce serait en effet parfois à bon droit que la représentation scientifique figerait : comme le tableau de la classification des éléments de Mendeleïev, elle peut devenir une « Table de la loi », une référence durable. C'est pourquoi, en l'occurrence, ce tableau trône encore dans tout laboratoire. De plus, vouloir à toutes forces que le savoir soit héraclitéen, c'est en fait se rendre coupable de le dissoudre et de le dévaloriser sous prétexte de le glorifier². Par cette indication, nous sommes donc à même de comprendre que c'est notamment l'argument bachelardien et néo-marxiste de la fixité de toute image qui est ici attaqué. Pour François Dagognet, on ne peut donc être iconoclaste sous le seul prétexte que l'image fige ce qu'elle représente, car il arrive au savoir de prendre durablement cette forme figée qu'on lui dénie.

Ensuite, ces philosophes peuvent également objecter que l'image « raccourcit »³ ce qu'elle représente. La représentation imagée est réputée être l'équivalent d'un rangement « commode, mais superficiel et réducteur »⁴. Or, là encore, l'exemple du tableau de Mendeleïev indique combien une classification peut être non pas un classement de ce que l'on connaît déjà, mais bien une « classification qui nous livre elle-même les vraies connaissances et réussit à descendre à la racine des éléments regroupés »⁵. Comme l'indiquent l'histoire et les avatars de ce tableau des éléments chimiques, on a ici affaire à une représentation qui devance le savoir et oriente les recherches. François Dagognet nous invite à percevoir ici la profondeur de certaines représentations figuratives en science. Nous reviendrons plus loin sur la théorie de l'image qui lui est propre et nous verrons combien elle prend acte de cette faculté de révélateur du réel que peut parfois posséder une image. Poursuivons encore sur ses arguments anti-iconoclastes.

François Dagognet prolonge son argumentaire en visant plus particulièrement ceux qui prétendent que l'image manifeste toujours une idéologie. En effet, notre auteur précise que, selon les « théories marxistes trop traditionnelles »⁶, toute image serait censée figer les réelles forces de production par des forces réactives de reproduction, en installant une forme de *statu quo*. Mais

¹ [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 197.

² « On prétend bien le sauver, mais on le noie en réalité dans son propre flot », [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 197.

³ [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 206.

⁴ [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 207.

⁵ [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 207.

⁶ [Dagognet, F., 1973], p. 9.

François Dagognet tient à mettre au jour et à réhabiliter ce qui, selon lui, constitue la cible implicite de tout argument marxiste qui viserait l'image-idéologie : la permanence suspecte de l'outil¹. Selon notre auteur, ce serait parce que l'image reproductrice, tel l'outil du travailleur, demeure la même et identique à soi, à travers tous les processus de production, qui pourtant la mobilisent, qu'elle serait ainsi dénigrée. Un tel outil qui sort indemne de son usage est en effet suspecté de ne servir que d'auxiliaire de peu de poids, dans tous ces processus. Or, là encore, la thèse de la reproduction figeante n'est pas tenable pour François Dagognet, car on ne devrait pas valoriser le processus seul au détriment de l'outil qui le sert : l'un et l'autre doivent être considérés. Image et modèle sont des outils qu'il ne faut pas sous-estimer.

François Dagognet rappelle également que, pour Rousseau par exemple, tout redoublement, toute transposition, toute reproduction ou représentation (scientifique, artistique ou politique) nous dépossède de l'original et nous exile ainsi de l'authentique². Il signale combien cette peur de l'exil, déjà présente chez Platon, s'origine dans l'effroi qu'éprouve l'homme face à son propre redoublement, à sa propre image dans le miroir³. Ce même exil devient chez Bergson une désappropriation de notre pensée par les images et est, comme tel, également condamné : « Les images ne seront en effet jamais que des choses et la pensée est un mouvement. »⁴ François Dagognet, voulant défendre l'écriture ainsi que toute forme de graphie, rétorque alors : « De ce que le vocalisé s'insinue dans le texte, il ne s'ensuit pas que l'imprimé ne le dépasse pas. »⁵ L'image tient sa force non pas de ce qu'elle serait à même de traduire dans l'espace, totalement et sans restes, toute forme de vocalisation vécue dans le temps, mais plutôt au fait qu'elle déploie nouvellement ce vécu et l'ouvre à des dimensions inédites. Or ce déploiement spatialisé de l'« intérieur » temporel est nécessaire à l'œuvre de civilisation, selon François Dagognet. C'est la seule manière d'échapper à notre narcissisme : « Pour Freud lui-même la culture va de pair avec la dévocalisation, une décorporité contre laquelle l'enfant et l'homme regimbent. »⁶ L'iconoclasme est donc ici considéré comme le fruit d'une philosophie du refus de la civilisation, voire du refus de l'accession des hommes à la majorité intellectuelle. Dans cet argument précis, la critique de l'iconoclasme est donc plutôt de nature anthropologique et politique.

Le dernier argument anti-iconoclaste que l'on peut trouver chez François Dagognet s'attaque spécifiquement à l'idée philosophique commune selon laquelle toute duplication serait le véhicule d'une tricherie. Mais François Dagognet rétorque en substance qu'il ne faut pas confondre image et simulation ou dissimulation. C'est alors l'occasion pour notre auteur de fustiger à maintes reprises la simulation⁷. Il faut d'abord reconnaître selon lui (en conformité avec le vieil argument du début du *Cratyle*) qu'on ne saurait faire d'une image, en l'occurrence d'un meuble copié sur l'authentique, une « dissimulation-simulation » : « on ne peut ni ne sait décalquer [...] »⁸. La copie parfaite est logiquement impossible, François Dagognet en convient. Donc notre iconoclaste, qui condamnerait toute image sous prétexte qu'elle fait semblant d'être ce qu'elle n'est pas, se rendrait coupable d'une assimilation erronée entre image et simulation. Autrement dit, il a tort parce que toute image n'est pas condamnée à n'être qu'une simulation.

¹ [Dagognet, F., 1973], p. 9.

² [Dagognet, F., 1973], chapitre I et [Dagognet, F., 1984a], pp. 31-35.

³ [Dagognet, F., 1984a], pp. 20-22.

⁴ [Bergson, H., 1896, 1939, 1993], p. 139, cité par [Dagognet, F., 1973], p. 26.

⁵ [Dagognet, F., 1973], p. 26.

⁶ [Dagognet, F., 1973], p. 40.

⁷ [Dagognet, F., 1984a], pp. 174, 235, 241 et 247.

⁸ [Dagognet, F., 1984a], pp. 174-175.

Ces dernières indications peuvent nous mener maintenant au versant constructif de la philosophie de l'image propre à François Dagognet.

- Tout d'abord, revient, comme un *Leitmotiv* et dans toutes ses œuvres, l'idée qu'une image pertinente, qu'elle soit scientifique ou artistique, a toujours pour fonction de condenser ce qu'elle représente. Elle condense, concentre et, en même temps, elle allège, elle rend maniable¹.

- Ce qui nous mène à la seconde caractéristique de l'image pertinente : elle rend maniable parce qu'elle sert à la communication du savoir entre les hommes et donc aussi à son apprentissage². François Dagognet tient donc la communicabilité comme essentielle à l'intelligibilité elle-même.

- L'allègement de la représentation tel qu'il est assuré par la constitution d'une image pertinente améliore également la mémorisation, le stockage d'une information toujours croissante en volume.

- De plus, cette condensation n'étant pas un pur redoublement, elle produit inévitablement des effets de « transfiguration »³, de « transposition » par quoi elle peut « révéler » le réel plus encore que le dédoubler : « L'être, bloqué sur lui-même et enfoui sous ses propres enveloppes, nous échappe mais il s'agira de le déplier et de l'insérer, coûte que coûte, dans un réseau spatial qui le révèle à lui-même, en autorise la surprenante, l'illuminante lecture. »⁴

Or, c'est là que l'on commence à bien percevoir le sens général du combat mené par François Dagognet : en réhabilitant l'image, il s'agit en fait de réhabiliter le rôle de la spatialisation qui peut bien d'ailleurs n'être que temporaire dans l'histoire d'une science, le rôle de l'étalement spatial aux côtés, et non à l'encontre, de l'intellection conceptuelle ou mathématique trop souvent supposée, par ailleurs, ne se projeter sur aucun espace représentatif. Il s'agit de réhabiliter l'espace par rapport aux prérogatives exorbitantes données au temps dans les philosophies des sciences trop exclusivement centrées sur la conceptualisation. Davantage, et parallèlement, il s'agit de poursuivre le combat pour la réhabilitation, voire pour l'exclusive habilitation⁵, de l'extériorité contre les privilèges accordés jusqu'à présent à l'intériorité, combat déjà fortement illustré par Wittgenstein en son temps⁶ ou bien, dans d'autres approches, par Nietzsche et Freud. Nous n'avons pas à juger de la valeur de ce projet philosophique d'ensemble. Mais ces remarques vont nous conduire à comprendre le sens et la teneur de ce que nous serons bientôt obligé de nommer un iconoclasme résiduel.

Car on ne valorise pas la fonction de condensation et de transfiguration sans dommage pour la fonction de reproduction propre à l'image. On le voit, il demeure, chez François Dagognet, un dédain répété pour le redoublement, pour l'« image pléonastique »⁷ au profit de l'« icône » qui resserre, ramasse et finalement devance et « surréalise » ce qu'elle condense dans une fonction heuristique essentielle⁸. « Qui prend tout ne retient rien »⁹ précise-t-il. Or, de l'« icône » seule peut

¹ Par exemple : [Dagognet, F., 1969, 2002], pp. 6, 90, 97, 193 ; [Dagognet, F., 1973], pp. 11, 48, 56, 63.

² [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 210 et *passim*.

³ [Dagognet, F., 1973], p. 43. On notera l'origine et la connotation religieuses de ce terme.

⁴ [Dagognet, F., 1973], p. 13. C'est nous qui soulignons.

⁵ [Dagognet, F., 1984a], p. 208 : « Rien n'échappera donc à ceux qui recourent à des méthodes comptables et extérioristes. »

⁶ Voir [Bouveresse, J., 1974, 1987]. Les derniers travaux de Dagognet en témoignent encore incontestablement : voir [Dagognet, F., 2001], intitulé significativement *Philosophie d'un retournement*.

⁷ « [L'organe dans un organisme] n'est surtout pas ce qu'il est : un volume plus ou moins conique, charnu et contractile. Le redoubler n'apprend rien. Et nous n'avons pas cessé d'opposer à l'« image » pléonastique l'« icône » abstraite et abrégative », [Dagognet, F., 1973], p. 109.

⁸ [Dagognet, F., 1984a], p. 243 : « Dans le domaine scientifique si proche [de l'art du tableau en peinture], la carte réussit la même métamorphose : apparemment réductrice, en vérité heuristique et révélatrice. »

⁹ [Dagognet, F., 1973], p. 64.

sortir du plus à partir du moins¹ car une nouvelle représentation est là pour conférer une nouvelle intelligibilité² fécondante. C'est précisément la raison pour laquelle l'image comme l'écriture doit être désincarnante, dématérialisante : il lui faut une « immatérialité opératoire »³. En ce qui concerne l'écriture par exemple, « il faut justement dématérialiser le premier logos⁴, maintenir les énoncés mais ne pas conserver les supports ». Dans ce contexte précis, François Dagognet en vient à expliciter sa vision de la science dans une affirmation assez suggestive et à connotation nettement néo-testamentaire : « La science veut aussi que nous ne possédions le monde qu'à la condition de le perdre ; elle nous oblige à renoncer à son immédiateté. »⁵ C'est là que l'influence hégélienne demeure patente et que l'on voit poindre un des présupposés massifs de cette philosophie : le rôle essentiel du langage sous sa forme dialectisante⁶, le langage étant supposé présider à l'entreprise de concrétisation de l'idée, inséparable de l'entreprise corrélatrice de spiritualisation de la matière⁷. À la lecture de la longue profession de foi hégélienne de 1984⁸, nous sommes donc fondé à bon droit à soupçonner, là encore, une forme de déplacement conceptuel. Ce qui, chez Hegel, était le « contenu », l'« individuel » ou la « matière », et était supposé nécessaire à la manifestation de l'essence telle que conçue dans le cadre d'une théorie de l'œuvre d'art, devient, chez François Dagognet, le nécessaire moment de l'« extériorité », du déploiement spatial, dans le cadre plus général de toute une théorie fragmentaire, et dispersée-spatialisée à dessein dans son œuvre, de la connaissance par l'image. Cette théorie « dialecticiste » de la connaissance transparaît néanmoins sans grande ambiguïté dans le texte de 1984. Pour la résumer brièvement, indiquons que François Dagognet ne croit pas à l'intuition directe des essences ou des idées : c'est bien au fond ce contre quoi il lutte quand il attaque la métaphysique et la théologie⁹. Par là sont évidemment visés le bergsonisme encore quelque peu en honneur lors de la période de formation de François Dagognet, mais aussi et surtout la phénoménologie toujours et encore vivace dans sa tradition française¹⁰. Le fait de connaître implique

¹ [Dagognet, F., 1973], p. 48.

² [Dagognet, F., 1973], p. 13.

³ [Dagognet, F., 1973], p. 44.

⁴ C'est-à-dire les idéogrammes ainsi que les premières écritures encore trop charnues parce que trop phonétisées.

⁵ [Dagognet, F., 1973], p. 45.

⁶ Car réconciliant « l'idéalisme et le réalisme » : voir [Dagognet, F., 1984a], pp. 161, 163, 243 et 250. Dans le même ordre d'idées, Daniel Parrochia convient pour sa part que l'approche philosophique de Dagognet s'apparente finalement à un « rationalisme dialectique ouvert », in [Damien, R., 1998], p. 289.

⁷ Sur le rôle essentiel du langage chez Hegel (car fédérant et légitimant toute sa doctrine), nous suivons la lecture lumineuse de Claude Bruaire telle qu'elle est notamment exposée dans son article « Hegel » de l'*Encyclopaedia Universalis*, édition 1989. Bien que nous ne soyons pas spécialiste de Hegel, il nous est apparu que sa fameuse formule (« le réel est rationnel ») doit pouvoir dire deux choses si on la rapporte aux deux sens complémentaires du mot *logos* : le discours, la parole d'une part et, d'autre part, la raison. Cette formule peut signifier d'une part que le réel est dicible, notamment par le biais de notre raison. Autrement dit, le réel nous est intelligible ; c'est l'interprétation la plus souvent seule retenue. D'autre part, cette formule peut vouloir dire que le réel est parlant, qu'il est une parole, qu'il est toujours déjà du langage, et pas seulement une figure de la Raison en marche. Les philosophies que nous proposons de qualifier de « linguisticistes » (Serres, Dagognet et quelques uns de leurs élèves) seraient donc restées essentiellement fidèles à ce second pôle méconnu de l'hégélianisme. Selon nous, la reconnaissance explicite de la thématique christique de la Parole, mêlée à celle de l'incarnation, prend donc ici toute son importance si l'on veut saisir la pensée hégélienne dans ses linéaments, sans pour autant se laisser piéger par elle. Sur les relais de l'iconoclasme occidental présents chez Hegel, on peut lire [Besançon, A., 1994], pp. 277-306. Les philosophies actuelles de « l'information », de la « communication » ou des « réseaux » prolongent donc sur ce point précis une des options ontologiques de Hegel (le linguisticisme) quand bien même elles se défendent d'en prolonger l'optimisme rationaliste à visée totalisante. Par linguisticisme, nous entendons désigner toute approche épistémologique qui considère que toute représentation scientifique est de nature linguistique ou peut se ramener à du langage. Le langage ou l'écriture y est alors systématiquement pris comme modèle de toute représentation scientifique, quelle qu'elle soit.

⁸ [Dagognet, F., 1984a], pp. 154-157.

⁹ [Dagognet, F., 1984a], p. 231.

¹⁰ Michel Serres confirme que, dans les années 1950, à la sortie de l'Ecole Normale, deux « autoroutes » seulement s'offraient aux jeunes philosophes : la phénoménologie ou le marxisme. Voir [Serres, M. et Latour, B., 1992, 1994], p. 18. François Dagognet, en ce qui le concerne, nous paraît avoir opté pour un hégélianisme qu'il a adapté lui-même par un

obligatoirement, pour lui, la médiation d'un acte et d'un langage qui permettent de ramasser, condenser et focaliser le confus, le divers, le bruité. « Le psychisme souffre de la dilution et travaille toujours à réunir »¹ précise-t-il. On comprend pourquoi la naissance des images de synthèse numériques ne lui évoque que l'idée d'un accroissement supplémentaire de notre capacité à comprimer et à traiter des informations. Plus généralement, la sensation est toujours déjà une image condensante, pour lui, et non pas justement une simulation dans le sens précisé précédemment, c'est-à-dire une « image pléonastique ». Comme pour Bachelard, selon François Dagognet, d'abord on sait, ensuite on voit : « on ne voit, en effet, que ce qu'on sait et qu'on attend. »² On comprend aussi pourquoi il ne peut pas, à la rigueur, y avoir de redoublement ou de duplication. Toute simulation est une duplication imparfaite qui veut dissimuler son caractère d'image interprétative. À ce titre, elle est toujours trompeuse. Est-on finalement si loin que cela de la critique platonicienne des simulacres ?

Pour en venir à notre objectif principal, nous pensons que c'est dans ce genre de position que se maintient, de façon résiduelle, une forme particulière d'iconoclasme, elle-même assise sur une conception (que nous qualifierons de « dialecticiste »³) de la science, notamment telle qu'elle a été assez longuement et communément admise dans la philosophie des sciences française au 20^{ème} siècle. Ainsi, toujours selon ses termes, notre auteur récuse-t-il toute simulation ou représentation triviale de la « facticité » des choses :

*« La figuration, ici, n'est pas la doublure de leur état [l'état des pierres et des terres qui ont été représentées par Haüy et Miller] ni la photographie de leur 'en-deçà' - que les rayons X devaient cependant dévoiler et confirmer – mais, davantage, opérationnelle et surtout syntaxique, comme nous y avons insisté, elle tend à focaliser la matière répandue et à la théoriser. Corps idéal, nœud d'interrelations, moyen souverain d'intelligibilité, elle transcrit le dynamisme des qualités et le détache de la facticité, pour l'insérer dans un 'tissu' que la géométrie et l'algèbre assumeront et complèteront. »*⁴

On ne compte pas non plus également les passages où François Dagognet, tout en chantant la naissance des technologies photographiques, critique et minimise le rôle et le sens de la photographie comme pure représentation mimétique⁵. C'est pourquoi, selon lui, toute représentation picturale, doit toujours au moins transgresser les « métriques »⁶, c'est-à-dire les dimensions relatives originelles.

travail considérable de défrichage et de culture de la science en son sein même. Ce qui lui a, entre autres, donné les moyens d'élargir la réflexion sur les représentations scientifiques - qui, jusqu'alors, avaient été trop souvent réduites à la simple unilinéarité du signe - en l'ouvrant à la multidimensionnalité des graphes, des schémas et des réseaux. Voir les actes du colloque qui lui a été consacré [Damien, R., 1998].

¹ [Dagognet, F., 1984a], p. 145.

² [Dagognet, F., 1984a], p. 245.

³ Nous qualifierons de « dialecticiste » cette forme de néo-hégélianisme élargi, adapté à une réflexion sur la réelle diversité des représentations scientifiques. C'est avec Bachelard que cette approche devient dominante dans l'épistémologie française. Mais, comme on le voit, le dialecticiste reste aussi et fondamentalement un cas particulier de linguisticisme.

⁴ [Dagognet, F., 1984a], p. 148. C'est nous qui soulignons. Voir aussi [Dagognet, F., 1984a], p. 247 : « Ainsi l'image projective délivre bien le réel de son aspect massif et *dissimulateur* [...] » À noter également le ton quelque peu méprisant de [Dagognet, F., 1984a], p. 141 : « On est très éloigné d'un simple reflet ou d'une quelconque *simulation*. » C'est nous qui soulignons.

⁵ Voir par exemple [Dagognet, F., 1984a], p. 154 : « nous tenons l'œuvre d'art pour une méta-photographie. »

⁶ [Dagognet, F., 1984a], p. 145 : « Comme la suite le confirmera encore, nous donnons au mot 'image' une acception personnelle large : ce qui, assurément, reproduit de quelque manière, mais sans maintenir toutes les qualités de ce qui est répété ; ainsi, elle ne conservera pas les métriques. Toute image rapetisse, et, par là, améliore un ensemble de données mieux soudées » [suit une note sur le microscope et le télescope qui prélèvent et ainsi rendent visible] ; *ibid.*,

C'est donc seulement en tant qu'elle inscrit le réel dans des trames, des tissus, des réseaux représentatifs, discursifs et opératoires que l'image peut être légitimée par la pratique scientifique. François Dagognet réhabilite donc peut-être ici l'image mais en concédant, en quelque sorte, l'essentiel à ses adversaires (notamment les néo-marxistes mais aussi Bachelard, en un sens), puisqu'il se place sur leur propre terrain en véhiculant leur propre hypothèse : la représentation ne peut avoir de fonction que directement discursive ou dialectique mais non pas celle d'une donation en première instance. Plus précisément, il réhabilite l'image certes, mais en ne procédant pour cela qu'à un simple élargissement de la fonction d'abstraction, et en insérant ensuite l'image dans cet élargissement au titre d'une fonction discursive généralisée et pluridimensionnelle. L'image ne vaudrait donc finalement qu'en tant qu'elle déploierait la fonction d'abstraction dans des dimensions graphiques plurielles car spatialisées et plus seulement dans une dimension temporalisée donc unilinéaire comme les mathématiques, ce que les épistémologues antérieurs auraient minoré. L'abstraction est certes pluridimensionnelle, pour François Dagognet. Mais, dans le même geste, en pleine conformité avec une vision hégélienne, il maintient l'image, en tant que modèle discursif purement formel, du seul côté de la connaissance intellectuelle, elle-même supposée par ailleurs être en constant rapport dialectique avec l'être donné.

Dans cette philosophie, on le voit, la simulation informatique ne pourra, par principe, jamais être considérée sur le même plan qu'un donné expérimental car il y est entendu que la nature d'une image reste purement celle d'un discours, d'une langue, d'une écriture, d'une graphie ou d'un système de symboles : elle reste discursive voire linguistique au sens large. Cette philosophie ne permettra aucunement de penser une sorte d'intuition par simulation¹ puisque, de par son anti-kantisme et son anti-intuitivisme résolu et de principe, elle dialectise d'emblée toute forme de sensation, de sensibilité ou de donation. C'est-à-dire qu'elle l'enrôle de force dans le discursif opératoire et condensant. C'est la raison pour laquelle la simulation informatique à visée seulement reproductive, par exemple, restera un non-sens scientifique pour elle, alors même que ce type de simulation intervient pourtant aujourd'hui de plus en plus au titre d'expérimentation virtuelle.

Pour finir, nous voudrions suggérer une interprétation, cette fois-ci psychosociologique et historique, de ce que nous avons caractérisé comme l'iconoclasme résiduel de François Dagognet. Comment se fait-il en effet qu'une philosophie principalement axée sur la réhabilitation de l'image dans notre culture occidentale, à tous les niveaux et dans toutes ses manifestations, échoue finalement à intégrer correctement en elle une épistémologie de la simulation scientifique ? L'interprétation que nous proposerons ici nous paraît d'autant plus convaincante, on le verra, qu'elle peut aussi valoir pour l'iconoclasme du premier Michel Serres, comme pour celui (plus subtil, parce que plus précis conceptuellement, et mieux informé des productions de la science contemporaine) des premiers travaux de Gilles-Gaston Granger, travaux que nous évoquerons dans la suite. Cette explication pourra donc valoir à l'échelle de ce que nous pourrions appeler un « esprit du temps » épistémologique de l'après-guerre. Dans le cas particulier de François

242 : « L'important, pour nous, vient de ce que les aspects connus et surtout les propriétés métriques ont été abandonnées [...] » ; *ibid.*, p. 249 : « Dagognet et la guerre, Gros et l'archéologie, on saisit l'importance des 'reproductions' fidèles, bien que non-métriques. »

¹ Telle qu'elle est possible aujourd'hui avec la modélisation fractionnée et la simulation pluriformalisée à valeur d'expérimentation. Voir les premiers travaux de Philippe de Reffye et ceux de Jean Dauzat. En ce sens, la simulation informatique pluriformalisée nous semble bien mettre en œuvre une sorte de pensée « figurale » (Lyotard) ou « visuelle » (Didi-Hubermann), qui ne conserve plus rien de *sémiotique*, de *linguistique* ou d'*iconographique*. Voir [Varenne, F., 2003b]. Dire cela n'est pas promettre pour autant on ne sait quelle rencontre mystique ni hypothétique contemplation ou donation de la chose en soi en « chair et en os », par le biais de la simulation. Les habituels boucliers de l'anti-idolâtrie ne devraient donc pas trop prestement se dresser devant cette nouvelle méthode scientifique.

Dagognet, il nous paraît en effet symptomatique de constater combien cet auteur néglige le plus souvent l'origine théologique et judéo-chrétienne de l'interdit de l'image pour ne le voir naître que dans la philosophie, spécialement la philosophie grecque¹. Nous pensons qu'il s'agit là d'un *lapsus* qui mérite un essai d'interprétation. Réfléchissant sur la crise de la représentation que la culture occidentale a connu au tournant du 19^{ème} et du 20^{ème} siècle et revenant sur les termes hébraïques que le grec *eidolon* a traduits, le philosophe Jean-Luc Nancy rappelle pourtant que l'iconoclasme biblique n'est pas du tout un refus de la copie, de l'image ou de l'imitation. Il ne s'agit pas là essentiellement de refouler l'effroi ressenti devant son propre redoublement. Cet iconoclasme vise plus précisément l'interdiction d'une production qui soit la reproduction, donc la maîtrise, d'une présence. Il peut y avoir des images mais pas de sculptures, telles que le veau d'or par exemple, qui, par leur tridimensionnalité concrète, objectale et donc simulante, jetteraient le trouble et donneraient la fausse impression d'une présence réelle du divin. Or, et c'est là le point central de cet iconoclasme : il ne revient pas aux hommes de se rendre Dieu présent. Il s'agit donc clairement ici « du motif d'un Dieu qui ne s'en prend nullement à l'image, mais qui ne donne sa vérité que dans le retrait de sa présence »². Dieu n'a donc de sens que sur le fond de son absence au monde puisque sa création ne s'est manifestée que par son départ d'elle. Se livrer à la production d'une image qui donnerait l'illusion d'une présence, voilà donc ce qui est sacrilège. En revanche toute représentation qui indique respectueusement en elle-même qu'elle ne nous présente pas ce qu'elle nous représente, qui laisse donc pressentir que quelque chose de la chose représentée y demeure absent, toute représentation de ce type, telle l'icône avec son iconographie³, sera considérée comme acceptable. Fidèle à la tradition biblique, comme Hegel du reste, c'est bien encore ce genre de représentation seul qu'autorise François Dagognet en imposant qu'elle soit toujours transfigurante, condensante mais surtout pas redoublante⁴.

En conséquence, nous croyons que les arguments actuels qui marginalisent ou rejettent plus ou moins le recours à la pure et simple simulation manifestent le refoulement d'un deuil, inaccompli quant à lui, de cet iconoclasme biblique. En ne réglant son compte qu'à celui que l'on préfère hisser au rang de seul adversaire, on s'autorise à éluder l'autre iconoclasme qui reste

¹ Voir [Dagognet, F., 1984], chapitre I.

² [Nancy, J.-L., 2001], p. 18.

³ Il est à noter qu'un des livres de François Dagognet qui réhabilite l'image s'intitule précisément *Écriture et iconographie* (1973). C'est-à-dire que le terme d'écriture y est employé deux fois, la deuxième fois pour désigner la représentation entendue comme toujours essentiellement « graphique », c'est-à-dire scripturaire.

⁴ Jean-Luc Nancy rappelle que la crise de la représentation a précisément atteint son comble dans la *Weltanschauung* nazie, et avant tout nommément dans celle de Hitler dont il cite abondamment le livre *Mein Kampf*. Il montre que le nazisme, en tant que production idéologique, avait et était essentiellement une conception claire, calculée et délirante de la représentation sans reste, spécifiquement de la représentation achevée de l'humanité à elle-même, brisant par-là le pacte iconoclaste d'origine biblique qui visait à récuser toute représentation voulant passer pour une présence authentique : « Le corps aryen est une idée identique à une présence, ou la présence sans reste d'une idée : assez exactement ce que l'Occident avait depuis des siècles pensé comme l'idole. » Plus loin, Jean-Luc Nancy nous permet de comprendre, dans cette perspective, les raisons pour lesquelles les nazis se livrèrent à de multiples parades, inséparables de l'ordre qu'ils instaurèrent : il y perçoit justement le signe d'une « présence totale et saturée, cette réplétion ou cet assouvissement de présence », *ibid.*, p. 25. L'ordre nazi commande donc une sorte de « surreprésentation » qui oblitère dans une pure présence, y compris de la mort même infligée en masse et regardée froidement en face, l'économie biblique de l'icône. Sans que l'on prétende aucunement voir là une explication unique ou définitive de ce cataclysme humain, on conçoit néanmoins que les sciences humaines que sont les épistémologies – étant sciences des productions intellectuelles humaines – aient mis tant de temps à se remettre – si même elles s'en sont aujourd'hui remises – de cette surexposition de la présence dans la culture occidentale. Sur ce point, nous pensons que les analyses de Régis Debray ne vont pas assez loin, voire sont excessivement nivelantes, au regard de l'histoire. Elles tendent, elles-aussi, à évacuer une réflexion en profondeur sur le statut de l'image en Occident après Auschwitz. Cela tient sans doute au fait que son propos n'est délibérément pas historique : « Le médiologue n'a pas les mêmes critères que l'historien », [Debray, R., 1992], p. 306. Quoi qu'il en soit, au vu de ce que nous avons rappelé de l'iconoclasme biblique, il nous paraît fortement contestable de considérer que, de la naissance de l'écriture à celle de l'imprimerie, les hommes aient vécu sous le régime de l'« idole », *ibid.*, pp. 292-293.

encore actif de façon latente dans la culture épistémologique. Ainsi, pour cette culture, l'image scientifique doit être transfigurante pour que l'on ne croit surtout pas à une présence du réel dans le virtuel. L'angoisse devant notre actuelle maîtrise (rendue possible par la maîtrise du virtuel) de la présence des choses en « chair et en os » est plus grande, plus secrètement active et mieux refoulée encore que celle qui nous gagne devant leur simple recopie. Nous renvoyons sur ce point précis à l'analyse que nous ferons ci-dessous des travaux de Philippe Quéau. Pour l'épistémologie contemporaine, la simulation réaliste, celle qui peut se faire passer pour le réel, resterait donc un interdit inconscient, mais rationalisé *a posteriori*, soit sous la forme d'une impossibilité logique (avec l'argument du *Cratyle*), soit sous l'accusation de trivialité, d'inutilité, de vulgarité ou de non-sens : ainsi en est-il pour Suzanne Bachelard ou François Dagognet. Un tel déni empêche ces épistémologies de concevoir le rôle que les simulations peuvent jouer actuellement en tant que véritables expériences d'un nouveau type¹.

Gilles-Gaston Granger : des « styles » au « virtuel »

Gilles-Gaston Granger a produit un travail d'épistémologie économique qui a fait date et reste encore influent aujourd'hui. À la fin des années 1950, et dans la suite immédiate de ses réflexions sur la « Méthodologie économique » qui avaient fait l'objet de sa thèse, il se présente comme désireux de produire une épistémologie comparative des sciences en général, et cela avant tout pour servir à la question de l'axiomatisation et de la formalisation en sciences humaines. C'est d'abord son ouvrage de 1960, *Pensée formelle et sciences de l'homme*, qui va nous intéresser ici puisque la question de la modélisation y est maintes fois abordée. Tout au long de ce livre, Gilles-Gaston Granger tient à montrer que les diverses approches contemporaines du fait humain, qu'elles soient phénoménologiques ou herméneutiques d'une part, formalistes, nominalistes, ou néo-positivistes d'autre part, ne peuvent conduire à des sciences humaines effectives. C'est à partir d'exemples exposés en détail et tirés de la linguistique, de l'économie, de la recherche opérationnelle, de la psychosociologie et de la sociologie, qu'il analyse les constructions conceptuelles spécifiques aux sciences humaines. C'est à cette seule condition qu'on peut concevoir le véritable travail de conceptualisation et de formalisation auquel elles se livrent. Pour disqualifier les herméneutes, il fait ainsi valoir les arguments critiques de Cavaillès contre une philosophie de la conscience qui voudrait se faire passer pour une épistémologie. Contre les formalistes, contre le premier Wittgenstein et les néo-positivistes anglo-saxons notamment, il rappelle qu'il est caricatural de « réduire la science à un langage »² parce que l'on s'interdit par là de comprendre comment on peut avoir une prise sur les choses. Il préfère penser que toute science *appartient* à un langage puisque précisément elle résulte d'un effort proprement humain de médiation des expériences immédiates que nous avons des choses par le moyen du langage. Ainsi notre auteur est l'un des rares épistémologues de son époque à préciser véritablement le rapport qu'il veut voir à l'œuvre entre science et langage. Toujours est-il que cet argument, encore éminemment linguisticiste, de la médiation obligée, est en même temps celui qui lui permet de récuser tout autant le recours aux données sensibles et aux vécus immédiats dans la constitution d'une science humaine : « la science appréhende des objets en construisant des

¹ Ces remarques nous confirment dans l'idée qu'il serait sans doute temps, aujourd'hui, de prolonger le travail de Bachelard par une *psychanalyse de la connaissance épistémologique*, et pas seulement par une sempiternelle chasse aux idéologies (idéologies idéalistes, de la communication, des réseaux, etc.) qui ne fait que retomber toujours dans un piège qu'elle croit pourtant avoir perçu. D'où l'on voit aussi l'importance d'une histoire compréhensive, psychologique, et pas seulement sociale, des productions intellectuelles et techniques.

² [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 13.

systèmes de formes *dans un langage*, et non pas directement sur des données sensibles. »¹ Suivent alors de nombreux passages où notre auteur tient à dénier tout recours à l'intuition sensible ou à la compréhension en sciences humaines². Son attitude linguisticiste est ainsi clairement rapportée à un anti-intuitivisme anti-kantien d'origine hégélienne : la science commence par la négation de l'immédiateté. Néanmoins, comme nous le verrons, notre auteur doit conserver une place au « transcendantal » dans sa théorie de la science, même s'il refuse d'en revenir au sujet kantien. L'objet de son étude, la formalisation, lui commande en effet d'expliquer comment et à quelles fins on peut diversement formaliser dans les trois grands champs respectifs de la science : mathématiques, sciences de la nature et sciences de l'homme.

Par la suite, et en s'aidant d'exemples, notre auteur montre que tout l'enjeu d'une objectivation et d'une formalisation réussies en sciences humaines repose justement sur une émancipation radicale à l'égard du vécu humain. Il s'inscrit donc en faux par rapport à toute science humaine qui se voudrait d'emblée compréhensive puisqu'il récuse toute constitution directe d'un discours scientifique à partir des vécus humains. En linguistique, par exemple, on ne parvient à modéliser que si l'on se libère des découpages tels qu'ils nous apparaissent ordinairement et avec évidence dans notre usage quotidien de la langue. Le principal obstacle que rencontre l'objectivation en sciences humaines tient, selon lui, aux résidus d'affectivité et d'intuition que l'on laisse dans les découpages naïfs des phénomènes. C'est pourquoi le modèle, de nature langagière, sert à « se libérer des vécus humains »³. Le modèle sert ainsi d'« unité technique »⁴ intégrée sur laquelle et par laquelle on peut concevoir des interventions empiriques mieux informées au sujet des faits humains. Paradoxalement, mais de façon compréhensible, le formel est donc ce qui permet l'application⁵. Il n'est pas une image. Il est un discours à objectif pratique. Les objets formels des sciences humaines sont en effet conçus comme des « systèmes d'intervention », des « ensembles de contrôle »⁶. Comme cette interprétation du modèle dans les sciences en général ne le caractérise pas comme une représentation de plein droit, Gilles-Gaston Granger peut en déduire que la formalisation ou la modélisation du fait humain n'aura pas pour conséquence d'écraser les hommes en les représentant sous la forme d'être mécaniques⁷. Cet argument lui permet de rejeter comme infondée une de nos craintes contemporaines en ce domaine : le recours aux modèles ne commande pas systématiquement toute une vision métaphysique réductrice et totalitaire de l'homme.

Mais comment s'émanciper des vécus de conscience pour aboutir à une formalisation véritablement scientifique de l'humain ? Au vu des réussites de la linguistique formelle non intuitive, de la recherche opérationnelle et de la macroéconomie, notre auteur se convainc qu'il faut approcher le fait humain avec un « point de vue global »⁸. Ensuite seulement, on est autorisé à analyser les divers comportements de ces phénomènes globaux. C'est bien le grand

¹ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 13.

² Par là sont bien évidemment visées les écoles allemandes de sociologie compréhensive - Dilthey, Weber, Simmel -, remises pourtant à l'ordre du jour, à la même époque, par Raymond Aron. Il n'est pas indifférent, comme on l'a déjà vu avec notre remarque précédente sur Louis de Broglie, que la conception formaliste et linguisticiste des modèles propre à Granger refuse précisément toute tentative de « compréhension » en science humaine. En effet, c'est pour lui une évidence implicite et qui ne fait plus débat, que la nécessité de la compréhension soit justement déjà neutralisée dans les derniers développements des sciences de la nature, spécialement en physique. Or elles constituent indéniablement une sorte de modèle, à infléchir certes, mais à suivre. L'influence bachelardienne sur ce point précis est patente.

³ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 104.

⁴ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 100.

⁵ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 91.

⁶ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 101.

⁷ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 104.

⁸ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 100.

enseignement qu'il veut voir à l'œuvre dans l'essor des méthodes d'analyse factorielle et d'analyse en composantes principales. Elles permettent de faire émerger, à partir des données, tout un système abstrait, donc non-intuitif, et sous-jacent. Ainsi en est-il spécialement de l'analyse factorielle en psychologie. Elle permet au psychologue de ne pas préjuger de la structuration sous-jacente des différents types de comportement, mais, au contraire, elle la fait apparaître après les mesures, grâce à l'analyse statistique. Il y a ainsi un moyen d'objectiver la qualité, chose que beaucoup considèrent comme impossible aux sciences humaines. Or, notre auteur montre aussi par là que la mathématisation ne se réduit pas à la quantification. Il faut comprendre que la science est une recherche de structures interprétées comme autant de systèmes de signes, ces signes valant d'abord par leurs seules différences mutuelles et ensuite par les opérations qu'ils autorisent. Cette dialectique de la qualité perçue à échelle globale permet de construire progressivement des systèmes de différences purement formelles menant à leur tour à des arborescences ou même à des calculs. Notons qu'en ce qui concerne l'interprétation du système de signe comme jeu des différences indifférentes, ce n'est pas, significativement, la leçon de Saussure que Gilles-Gaston Granger retient ici, mais bien, encore une fois, celle de Hegel, il est vrai, rectifiée.

Ces réflexions le conduisent tout naturellement à concevoir la modélisation comme d'abord descriptive ou « positiviste » avant d'être théorique. On recueille des données à une échelle idoine, échelle que l'on découvre par tâtonnements. Et ces données, moyennant un travail que l'on effectue sur elles, doivent permettre de construire un modèle mathématique. Ainsi le modèle est toujours le résultat d'une analyse de données qui a modifié, « transmuté », selon le terme de notre auteur, la nature des données premières afin de nous les rendre neutres¹. Ces données modifiées deviennent à leur tour susceptibles de rentrer dans la structuration formelle objective que l'on se propose, le modèle. Le modèle en sciences humaines passe donc pour une proposition d'explication, neutralisée et formalisée à une certaine échelle, de certains faits humains. Ainsi il devient inattaquable par les idéologies, ou par le vécu intuitif ou émotif immédiat des hommes. Le sens ne disparaît pas dans ce traitement par modèles du fait humain, mais il est transmuté et il se donne d'un nouveau point de vue, plus objectif et opératoire. On n'y vide donc pas l'humain de son sens. Mais il est vrai que l'ordre habituel du sens y est supprimé. Ainsi notre auteur écrit-il :

« Le savant, qui vise à construire des modèles du phénomène ne saurait donc confondre cet ordre du sens [habituel] avec l'ordre du schéma abstrait qu'il prétend établir. Il faudrait renverser ici la phrase de M. Merleau-Ponty qui définit le propos du phénoménologue : 'Il s'agit de décrire, et non pas d'expliquer et d'analyser' ; il s'agit au contraire ici d'expliquer et d'analyser, et non pas de décrire, si décrire c'est comprendre des significations. Cette réduction opérée, le fait humain devient objet de science ; non pas qu'il se trouve ramené aux simples dimensions de la chose, mais son épaisseur de signification elle-même se trouve, autant qu'il se peut, conservée, neutralisée, objectivée enfin. »²

Il est donc essentiel que le modèle ne ressemble aucunement au fait humain tel qu'on en prend connaissance dans notre vie et tel qu'il est valorisé par la phénoménologie contemporaine. Voilà donc l'iconoclasme auquel le mène sa conception linguisticiste de la construction de la science. Le modèle vaut en ce qu'il transfigure l'expérience immédiate. Il ne doit aucunement reproduire ni même seulement décrire le fait humain. Il est essentiel à la constitution de véritables

¹ C'est donc le déracinement occasionné par la modélisation statistique qui permet la neutralité.

² [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 131.

sciences humaines, car il est justement le fruit d'une analyse qui neutralise le sens humain premier. On conçoit alors combien cette interprétation du modèle en sciences humaines interdit par avance la conception de simulations informatiques photo-réalistes et spatialisées telles que celles qui apparaîtront au début des années 1990 en géographie. On pourrait cependant faire crédit à notre auteur du fait qu'il s'est surtout intéressé à la linguistique et à l'économie, sciences qui portent donc à l'époque essentiellement sur des discours ou sur des échanges de symboles ou de marchandises, c'est-à-dire sur des communications de signes ou de matières, phénomènes « abstraits » car *a priori* peu spatialisés. Mais notre auteur se rend fautif selon nous lorsque, sous l'influence de la théorie de la communication de Shannon, celle de l'information de Brillouin et la cybernétique de Wiener¹, il s'autorise à généraliser les résultats précédents aux autres sciences humaines. Cela est perceptible lorsqu'il affirme que tous les modèles en sciences humaines ne peuvent être que de deux sortes : énergétiques ou cybernétiques², les uns s'occupant des flux d'énergies, les autres des flux d'informations.

Pour terminer sur cette œuvre, nous voudrions indiquer un passage qui nous semble témoigner en creux d'un malaise profond et persistant à l'égard de la prise en considération de l'affectivité humaine et du vécu significatif des hommes telle qu'elle devrait intervenir pourtant dans les sciences humaines. La page d'où elles sont extraites tranche dans toute l'œuvre parce que cette dernière conserve en général une grande neutralité dans le ton et une certaine austérité dans l'expression. Les termes employés peuvent servir à nous faire comprendre combien la soif de formalisme trouvait alors sa motivation dans des ressorts cachés de la conscience épistémologique :

« S'il faut demander aux mathématiques les exemples les plus parfaits de pensée conceptuelle triomphante, pour obtenir des échantillons de pensée conceptuelle militante et souffrante³, c'est aux sciences de l'homme qu'il faut d'abord s'adresser. Dans le domaine mathématique, les notions sont spontanément traitées – sinon pensées – comme complexes structuraux, que l'axiomatisation révèle dans une sorte d'apothéose. C'est l'univers de la Grâce. Le domaine du fait humain, scientifiquement parlant, c'est l'univers du Pêché ; il y faut une volonté d'axiomatisation consciente pour mettre à nu le concept. »⁴

Les notions théologiques (« révèle », « souffrante », « apothéose », « Grâce », « Pêché ») mais aussi charnelles (« à nu ») qui interviennent ici sont les uniques occurrences de ces lexiques dans le texte. Mais par la suite, Gilles-Gaston Granger explicite quand même ce qu'il vise ici énigmatiquement derrière le terme de Pêché⁵ : c'est l'idéalisme philosophique et épistémologique qui commet le Pêché de croire que dans la conscience peut se manifester, directement et sans médiation, la présence d'une essence⁶. Cette centration sur l'Ego, cette fusion entre la conscience et la présence, voilà ce qui insupporte Gilles-Gaston Granger ; à tel point qu'il ne cesse de revenir sur la nécessaire négation de toute intuition⁷.

¹ Tous ces auteurs ont également fortement impressionné Michel Serres et François Dagognet comme on l'a vu.

² [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 146.

³ Granger fait bien sûr ici allusion au travail qu'exige la conceptualisation et qui la distingue totalement d'une pure contemplation.

⁴ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 179.

⁵ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 180.

⁶ Voir *infra* notre analyse de la crise de la représentation et son rapport avec le nazisme.

⁷ Voir [Granger, G.-G., 1960, 1967], pp. 12, 13, 63, par exemple. Voir aussi la page 143 : « [La médiation scientifique] tourne le dos à la saisie directe des significations qui oriente le plus souvent la pratique quotidienne empirique, mais

On reconnaît là un argument semblable à ceux qu'emploie François Dagognet contre les phénoménologues et les mystiques. Le Péché est à discerner dans cette espèce d'auto-érotisme que pratique coupablement la conscience connaissant voulant reconnaître une présence en elle et s'identifier à elle dans le même mouvement pervers. L'intuition est pécheresse ; et c'est à ce titre qu'il faut la condamner, pour Gilles-Gaston Granger. Mais comment s'expliquer la force affective et quelque peu échevelée de ce passage ? Selon nous, la préférence instinctive et quasi-générale pour le retour à une interprétation de toute connaissance comme médiation *via* le langage, dans l'épistémologie française de l'après-guerre, vaudrait comme un châtiment, comme une expiation (qu'elle prend inconsciemment en charge en vue d'une rédemption), que la culture de l'époque s'inflige *volens nolens*, face à l'état d'idéalisme et d'idolâtrie du présent et du passé récent de nos soci  t  s¹. C'est sur ce point précisément que l'iconoclasme biblique, et non hellénique, est restauré et fait encore écho dans cette œuvre épistémologique qui glorifie la forme et les structures, en sauvant le fond par la fuite en avant de la *praxis*². Voici encore comment, dans cette même page, notre auteur résume le rôle de l'axiomatisation en sciences humaines :

« *L'essai d'axiomatisation est alors tâtonnement préalable, la préparation nécessaire d'un champ opératoire par une asepsie³ drastique, et certainement agressive, des notions communes.* »⁴

Ainsi, avec la nouvelle méthode de la modélisation formelle, les sciences humaines ne peuvent (ne doivent ?) pas se priver d'une certaine agressivité à l'égard des faits humains et de

c'est pour préparer un modèle des phénomènes qui charpentera plus efficacement une pratique concertée, organisée, rationnelle. »

¹ Rappelons ici pour mémoire le contenu du passage où Freud résume ses principales réflexions sur le fonctionnement du tabou dans les « peuples primitifs » : « Le tabou est une prohibition très ancienne, imposée du dehors – par une autorité – et dirigée contre les désirs les plus intenses de l'homme. La tendance à la transgresser persiste dans son inconscient ; les hommes qui obéissent au tabou sont ambivalents à l'égard de ce qui est tabou. La force magique, attribuée au tabou, se réduit au pouvoir qu'il possède d'induire l'homme en tentation ; elle se comporte comme une contagion, parce que l'exemple est toujours contagieux et que le désir défendu se déplace dans l'inconscient sur un autre objet [voir notre analyse précédente des déplacements conceptuels en épistémologie]. L'expiation de la violation d'un tabou par une renonciation [dans notre cas : se/c   « couper » du vécu humain] prouve que c'est une renonciation qui est à la base du tabou », [Freud, S., 1913, 1965, 1979], pp. 46-47.

² Si l'on veut encore se persuader que ce genre de *lapsus* peut apparaître, même dans les propos d'un épistémologue, on peut se référer à la page 90 de cet ouvrage où apparaissent ensemble les notions de « découpage » - dans le vif pourrait-on dire - du fait humain, découpage nécessaire à toute formalisation – et dont l'agressivité sera assumée explicitement page 179, voir *infra* - et celle de « coupure » - bien avant le *lapsus* althuss  rien du même nom, déplaçant le concept bachelardien de « rupture », et qui désignera lui aussi la découpe d'une culture : « Le *visible speech* [technique de visualisation automatique de la parole après analyse phonologique], au contraire, en introduisant audacieusement la machine comme moyen de transcription, coupe l'objet linguistique des significations vécues. En le dépaysant radicalement, pour ainsi dire, il confère à son caractère structural l'autonomie qu'exige une véritable objectivation », *ibid.*, pp. 90-91. Voir aussi [Granger, G.-G., 1968], p. 169 : « Une coupure est cependant apparue à la plupart des linguistes entre l'organisation syntaxique et l'organisation sémantique. » Enfin, sur la cure psychanalytique comme « coupure » significative dans le discours qu'est l'inconscient, voir les travaux antérieurs (1948) de Jacques Lacan, notamment dans les *Ecrits*, Tome I : « L'agressivité en psychanalyse », pp. 100-123, plus particulièrement, ce passage explicite et très lucide –   crit donc trois ans après la fin de la guerre -, p. 122 : « [...] la guerre, après nous avoir appris beaucoup sur l'origine des névroses, se montre peut-être trop exigeante en fait de sujets toujours plus neutres dans une agressivité dont le pathétique est indésirable. » De par sa position de clinicien, Lacan était sans doute le plus lucide : il avait senti que ce lexique de la « coupure » était révélateur d'une pulsion d'autocastration propre à la culture occidentale de son temps.

³ Notons ici le choix de termes imagés, très durs en effet, puisque, dans le contexte médical auquel il est fait allusion, l'asepsie désigne toute forme de stérilisation, d'éradication d'agents infectieux.

⁴ [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 179. Dans sa préface à la seconde édition de 1967, afin d'affirmer sa perspective formaliste, notre auteur rappelle explicitement que l'on doit désormais considérer tout fait humain comme une « machine fonctionnelle » (*ibid.*, p. 162), pourvue de structurations symboliques ou énergétiques diversement emboîtées et pas toujours réductibles les unes aux autres.

l'humanité dans son ensemble dès lors qu'elle persiste à demeurer dans la maladie de l'idolâtrie, phénomène humain dont on sait bien depuis la dernière guerre à quoi il peut mener.

Par la suite, Gilles-Gaston Granger poursuit son enquête dans la direction de la *praxis* des formalismes. Dans *Essai d'une philosophie du style*, il procède ainsi à l'exposé analytique de trois différents styles mathématiques. Un « style » avait été défini, dans l'ouvrage de 1960, comme un dosage particulier entre langage formalisé et langue usuelle dans la construction d'un savoir scientifique. En effet, il ne fait pas de doute pour Gilles-Gaston Granger que l'on ne pourra jamais réduire totalement la présence de la langue usuelle dans la pensée scientifique, y compris dans les sciences les plus abstraites. La formalisation totale y est plus un idéal régulateur qu'une règle constitutive. Cette nécessaire collaboration¹ entre les deux langages est donc bien un caractère proprement transcendantal de la pensée scientifique², en un sens assez différent de celui de Kant cependant, puisqu'il fait place, par principe, à l'articulation évolutive et historiquement conditionnée des formes et des pratiques dans la science. De plus, l'intuition y a été liquidée et elle a été remplacée par l'hétérogénéité fécondante et dynamique des langages entre eux, langages censés manifester la pensée scientifique en acte³. Dès 1960 donc, et bien avant l'actuelle sociologie des sciences, Gilles-Gaston Granger comprend le recours aux modèles mathématiques comme justiciable d'une pragmatique des styles formels, ce terme étant pris en un sens assez voisin de la pragmatique des linguistes⁴ qu'il n'ignorait pas. Les questions épistémologiques deviennent donc des problèmes intra-linguistiques, au sens, il est vrai d'une analyse linguistique élargie. C'est ce qui se confirme nettement à la lecture du livre de 1968 sur le style. L'approche exclusive de la pensée scientifique par la pragmatique et le travail permet ainsi à notre auteur de régler le vieux problème de la science de l'individuel, problème remontant dans sa formulation précise à Aristote.

¹ Granger appelle aussi ce phénomène discursif une « langue mixte » : [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 43. Voici comment il justifie son omniprésence dans toutes les sciences : « C'est par son moyen [le moyen de la langue vernaculaire ou usuelle] que sont décrites intuitivement les expériences, que sont indiquées les règles d'emploi des symbolismes, et d'une manière plus précise même, que sont exposés les mouvements d'une syntaxe logique permettant l'enchaînement des segments du langage formel », *ibid.*, p. 43. Il est significatif que, sur ce point, notre auteur ait recours à un argument finalement très proche de celui des néo-positivistes qui lui sont contemporains - Hempel et Nagel -, notamment lorsque ces derniers légitiment la nécessaire existence des règles de correspondances entre expérimentations et concepts théoriques. Voir [Nagel, 1960, 1979], pp. 97-105. Simplement notre auteur choisit ici pour sa part de rapporter cette nécessité à une essentielle *praxis* propre à la pensée scientifique et qui lui serait constitutive en tant que construction de langages. C'est pourquoi, dans cette perspective linguisticiste – ouverte à la « pragmatique » de la langue, terme employé p. 43 -, il va par la suite axer l'analyse de cette *praxis* sur l'analyse des divers styles linguistiques des sciences.

² [Granger, G.-G., 1968], p. 44.

³ Voir par exemple [Granger, G.-G., 1968], p. 113 : « On pourrait à cet égard [...] dire que l'activité linguistique sous tous ses aspects se substitue dans cette épistémologie à la *perception* kantienne. »

⁴ « Sont 'pragmatiques' les traits qui donnent à un fragment linguistique une fonction dans un acte ou un jeu de communication », selon la définition de Francis Jacques publiée dans l'article « pragmatique » de *l'Encyclopaedia Universalis*, édition 1989 sur CD-Rom, 1995. Ainsi, dans le même article, il commente : « la philosophie des sciences reconnaît de plus en plus nettement que les concepts tels que 'soutenir une théorie', 'considérer un énoncé comme une loi', 'utiliser un argument à l'égard de quelqu'un pour expliquer un fait' sont des relations pragmatiques. » On voit alors immédiatement où peut se trouver une confusion majeure, actuellement encore fortement entretenue en sociologie des sciences, entre la *praxis* philosophique et la pragmatique linguistique appliquée à l'épistémologie. Les choses qui font, en science, l'objet d'expérimentations, sont-elles des faits de langage ? Les choses parlent-elles d'elles-mêmes ? Les productions de faits sont-elles toujours réductibles à des productions rhétoriques ? Il nous semble que c'est encore l'un des présupposés implicites majeurs et inaperçus de la philosophie des sciences contemporaines, depuis le premier Michel Serres jusqu'au programme fort de la sociologie des sciences. Si l'on reste en effet inconsciemment dans cette perspective linguisticiste – comme c'est toujours le cas de ces philosophies -, on fera allègrement la confusion entre la *praxis*, au sens marxiste de travail de communication-action avec et sur les hommes compris comme êtres de langages, et la pragmatique scientifique comme communication-dialogue-dialectique avec les objets de science, puisque ces objets de sciences sont toujours déjà des êtres langagiers : ils sont *du* langage, ils nous « parlent » donc en un sens puisqu'ils sont toujours le fruit d'une médiation de la conscience, au sens de Hegel, ou de Marx si l'on préfère. En 1968, même s'il s'en défend - op. cit., p. 4 -, il n'a pas encore véritablement échappé aux confusions du « panglotisme » de l'analyse structurale - selon son propre terme -, du fait même de son linguisticisme de principe.

Reprenant une indication rapide d'Aristote sur l'acte de perception, Gilles-Gaston Granger part du principe que c'est seulement dans l'acte d'intervention sur l'individu que la science peut être considérée comme visant aussi l'individuel. Il n'y a donc pas de science spéculative de l'individuel certes, mais il y a bien une pensée scientifique stylisée qui s'adresse à l'individuel en *opérant* sur lui ; et c'est la seule science qui soit légitime. Il faut pour cela considérer que les scientifiques sont des acteurs et non pas de simples récepteurs de signes¹. Si l'on veut donc penser une science de l'individuel, ce qui est, selon Gilles-Gaston Granger, particulièrement nécessaire au fondement d'une science humaine rigoureuse, il faut la rapporter à sa pragmatique circonstancielle, à sa pratique dans laquelle s'exprime un style précisément individué lui-même et inimitable malgré les formalismes qui y interviennent. Par la suite, lorsque Gilles-Gaston Granger se trouve face à la difficulté du caractère apparemment bien peu pragmatique des langages formalisés (puisqu'étant devenus très complexes, ils ne peuvent pas véritablement servir comme moyens de communication), il ne renonce pourtant pas à son principe linguisticiste et répond que l'important, pour ces langages, est de montrer la simple *possibilité* de leur utilisation au titre de moyens de communication. Et une note en bas de page ajoute que cette virtualité ne devient réalité qu'avec les machines programmables. C'est donc là qu'il fait intervenir la notion de virtuel qu'il thématise bien plus tard² : « Etrange langage, dont la fonction communicative n'est le plus souvent que virtuelle, et dont la présence est celle d'une ombre, ou si l'on préfère, d'une divinité. »³ L'iconoclasme biblique est donc bien sauf, encore une fois, dans cette épistémologie, puisque la divinité (mathématique, mais ici le choix des mots fait *lapsus*, une fois de plus) y est respectée dans la représentation même de son absence. Le caractère d'« expiation » propre au moment visant à neutraliser le vécu à l'aide des formalismes devient, dans cet ouvrage, de plus en plus explicite. Après avoir rappelé que l'approche formelle en sciences humaines commande que l'on ne considère d'abord de l'action humaine que ses effets, il convient qu'une « politique aussi brutale » ne se justifie que par la promesse d'une réconciliation à terme entre le concret et le rationnel. Le ton devient alors franchement hégélien si ce n'est prophétique :

« Mais si l'on veut que cette saisie [du fait humain] s'intègre à une connaissance scientifique, et devienne autre chose qu'une modification fugace et illusoire de l'expérience d'un Ego, devienne un savoir historique, concret mais rationnel⁴, une phase de renoncement provisoire est nécessaire.

¹ [Granger, G.-G., 1968], p. 15. Notre auteur définit alors son approche comme un pas en « direction d'une étude concrète des œuvres », *ibid.*, p. 16, « le style [permettant] de penser les rapports de la théorie et de la pratique », *ibid.*, p. 16.

² Voir [Granger, G.-G., 1995], p. 231 : « Ce que nous appelons le *virtuel* dans la démarche scientifique est une figure – une représentation – des choses et des faits détachée des conditions d'une expérience complète, c'est-à-dire d'une saisie individualisée, singulière, vécue comme présente. » Il faut noter – comme cela est perceptible ici – que dans les textes les plus récents de notre auteur, le linguisticisme des premières années a totalement disparu et que la notion de « représentation » y est préférée à celle de « langage » ou de « structure ». La science devient ainsi une « ontologie virtuelle », *ibid.*, p. 234. Le retour de telles notions manifeste bien ce que François Dosse appelle par ailleurs, pour ce qui concerne la récente histoire des sciences humaines, le « retour du sujet », [Dosse, F., 1995]. Pour notre part, nous précisons encore cette qualification lorsqu'elle est rapportée spécifiquement à l'épistémologie et nous dirions : le retour du kantisme – de l'idée d'un sujet qui a des représentations – et de sa notion d'intuition *a priori* – même si Granger refuse de penser la construction du *virtuel* par l'imaginaire, *ibid.*, p. 14 –, voire un retour de l'ontologie. Sur le retour de l'intuition chez Granger via l'acceptation d'un certain intuitionnisme dans les mathématiques et dans les sciences de la nature, intuitionnisme conçu non comme intuition d'objets mais comme renvoyant à des « actes de pensée saisis comme effectivement exécutables, et capables d'exhiber des objets », on peut se référer à [Granger, G.-G., 1992], pp. 145-173. Il n'y reste pratiquement rien de la pragmatique, à part ces « actes de pensée ». Il est curieux de constater que l'ouvrage collectif consacré à la pensée de notre auteur, dirigé par Joëlle Proust et Elisabeth Schwartz (1995), fasse très peu de cas de ce que nous percevons ici comme une évolution intellectuelle décisive et significative.

³ [Granger, G.-G., 1968], p. 117.

⁴ Allusion à l'« universel concret » de Hegel.

*C'est cette phase que réalise dans les sciences de l'homme le moment stylistique de la neutralisation de l'action. »*¹

Dans ce texte, sous l'expression de « renoncement provisoire », s'exprime la même conviction hégélienne que celle que nous avons précédemment perçue et analysée chez François Dagognet², cela alors même que ces deux épistémologues développent des approches très différentes, comme on le voit. Au passage et dans la suite, cette perspective dialecticiste et historiciste permet à Gilles-Gaston Granger d'égratigner Althusser et son *Pour Marx*. En qualifiant indirectement de simple « exégèse » la relecture puriste de Marx, il lui oppose la véritable épistémologie, représentée par sa propre approche et qui, elle, ne s'arrête pas au moment ponctuel de l'énonciation d'un style nouveau pour en faire ressortir la valeur scientifique, mais s'intéresse à son devenir historique. Althusser se voit ainsi accusé de substituer une nouvelle « Eglise » à l'ancienne et de s'en proclamer le « théologien » officiel³.

Gilles-Gaston Granger revient alors sur la technique des modèles et sur la capacité qu'elle offre de penser correctement la stratification⁴ de la structure dans les sciences, cette sorte d'arborescence entre schèmes et thèmes, mais qui ne se résout pas toujours en réductibilités réciproques⁵. Le formalisme de Gilles-Gaston Granger reste donc sur ce point foncièrement anti-réductionniste. C'est la raison pour laquelle il trouve très novatrice la méthode des modèles purement descriptifs, dits « boîtes noires », dans les sciences de l'homme. Elle tranche vigoureusement avec l'« idéal d'une connaissance positive »⁶ qui voudrait que l'on reproduise à la fois les performances visibles d'un système et son fonctionnement interne. La méthode des modèles est sur ce point qualifiée de « plus modeste » puisqu'elle recourt le plus souvent à des « boîtes noires » qui ne sont valables qu'à un certain niveau de perception et d'« utilisation », c'est-à-dire justement à un certain niveau pragmatique, conformément à l'approche épistémologique générale de Gilles-Gaston Granger. Par là est confirmé aussi le diagnostic, qui avait été fait par lui dès 1955, selon lequel la théorie économique ne doit pas se priver de produire une macroéconomie, même et surtout si ce niveau d'analyse n'est pas réductible à la microéconomie. C'est bien là une preuve supplémentaire de la direction dans laquelle l'épistémologie peut désormais encourager la science : la pleine reconnaissance et acceptation de la stratification irréductible des formalismes. Or, cette reconnaissance passe bien par la reconnaissance préalable de la nature finalement pragmatique de la médiation entre forme et contenu, entre abstrait et concret, dans toute pensée scientifique. Il n'y a donc pas là une franche

¹ [Granger, G.-G., 1968], p. 221. Plus bas, Granger parlera du « sacrifice des significations » auquel ne veulent pas consentir le marxisme et la psychanalyse, au contraire de l'approche formelle, ce qui en fait des sciences humaines pour le moment « régressives » et non réellement scientifiques, *ibid.*, p. 252. Le rejet explicite de la psychanalyse non encore formalisée nous paraît ici hautement significatif. Nous avons déjà indiqué combien l'approche épistémologique de Granger, refusant par principe de prendre conscience de ses propres ressorts cachés, comme des ressorts cachés de toute motivation humaine, avait pu, tout en s'en défendant, en être finalement la victime.

² [Dagognet, F., 1973], p. 45.

³ [Granger, G.-G., 1968], p. 251.

⁴ Voir [Granger, G.-G., 1968], p. 254 : « Stratification dont on pourrait croire qu'elle n'est qu'un expédient technique pur et simple pour pallier l'insuffisance de nos outils actuels. Nous pensons au contraire qu'elle est essentielle à la nature même des rapports du concret à l'abstrait. » Comme nous le verrons, c'est bien dans ce genre de propos que nous pensons déceler la grande perspicacité épistémologique de Gilles-Gaston Granger. En effet, la simulation informatique, telle qu'elle se développera dans les années 1970 et 1980, va justement rendre présente, sensible, cette imbrication, cette stratification irrésolue des formalismes.

⁵ [Granger, G.-G., 1968], p. 254.

⁶ [Granger, G.-G., 1968], p. 271.

rupture par rapport à la méthode scientifique classique, mais seulement une évolution¹, un déplacement qui nous fait voir plus adéquatement ce qu'est une pensée scientifique en action. D'ailleurs pour confirmer son interprétation, Gilles-Gaston Granger admet qu'il n'y a qu'une différence de degré et non de nature entre la méthode des modèles et celle qui visait une théorisation constitutive intégrale : « En fait, ce qui sépare un modèle scientifique [explicatif et théorique] d'un simple artifice de substitution [boîte noire de l'ingénieur], c'est seulement le degré d'adéquation de l'un et l'autre à l'ensemble des données phénoménales. »² Le déracinement n'est que de degré, dirions-nous. C'est alors l'occasion d'en conclure à une précision sur le rapport entre science et technique :

*« L'orientation scientifique se distingue de l'orientation technique simplement en ceci qu'elle ne se contente pas de reproduire convenablement la transformation des entrées en sorties, mais qu'elle veut repousser de plus en plus avant dans l'organisation du modèle l'apparition de ces 'boîtes noires'. L'un des aspects de la dialectique scientifique peut être au reste décrit comme un processus de réduction des boîtes noires : ainsi le passage de la macrophysique à la physique atomique, de la physique atomique à la physique du noyau. »*³

Suite à un renversement que l'on peut désormais s'expliquer, la méthode scientifique dans son ensemble est donc finalement à penser à partir de la méthode des modèles du type boîtes noires. Cette dernière représenterait le niveau élémentaire d'une formalisation, niveau par lequel il faudrait nécessairement passer dans toute science, *a fortiori* dans les sciences humaines. Dans la conclusion, Gilles-Gaston Granger réaffirme ainsi sa définition de la science comme « construction de modèles abstraits »⁴. Du côté des sciences de la nature cependant, le modèle abstrait est considéré comme possédant toujours finalement la fonction essentielle d'une « réduction de l'opacité et de la polyvalence du phénomène vécu à un schéma »⁵. Il s'oppose à l'usage du modèle propre à l'historien et qui vise à « recomposer la vie, l'expérience elle-même, l'événement »⁶. Car même si l'histoire s'aide de structures, elle reconduit toujours les structures à l'événement. Elle cherche à faire converger ces mêmes structures vers l'incidence de l'événement et du vécu. C'est pourquoi la différence entre sciences de la nature et sciences humaines ne tient pas du tout à la nature des modèles qu'elles utilisent – ils sont toujours des schémas abstraits – mais à la façon qu'elles ont de les mettre en œuvre : « La spécificité du travail historique va consister dans la superposition et l'entrelacs de ces modèles. »⁷ Il témoigne de « *l'expression d'un certain style dans l'application aux événements* des modèles que ces sciences [sociales] ont fournis »⁸.

Dans la décennie des années 1990, Gilles-Gaston Granger a cependant considérablement infléchi son projet de départ. Le vécu auquel il était selon lui si essentiel de faire barrage dans les

¹ En effet l'épistémologie de l'analyse des styles peut valoir pour des sciences nées dans le passé, donc pas forcément contemporaines de la méthode des modèles, comme c'est le cas du style mathématique de Descartes, de celui de Desargues, etc.

² [Granger, G.-G., 1968], p. 272.

³ [Granger, G.-G., 1968], p. 272.

⁴ [Granger, G.-G., 1968], p. 300.

⁵ [Granger, G.-G., 1968], p. 300.

⁶ [Granger, G.-G., 1968], p. 300.

⁷ [Granger, G.-G., 1968], p. 301. Une telle position sera maintenue dans les ouvrages ultérieurs : voir [Granger, G.G., 1994], pp. 254-258.

⁸ [Granger, G.-G., 1968], p. 301. C'est l'auteur qui souligne.

années 1960¹, particulièrement pour la construction de modèles rigoureux en science humaine, devient au contraire constitutif de la pertinence des modèles dans toutes les sciences en 1992² ! Avec la problématique générale de la « vérification » des modèles en science, Gilles-Gaston Granger se voit logiquement forcé d'abandonner son linguisticisme hégélien de principe pour thématiser enfin en détail l'intuition constructive de concepts dans les sens successivement présentés et comparés de Kant, Hilbert et Brouwer³. L'analyse « pragmatique » de la science est ainsi quasiment évacuée et est transformée en une réflexion classique néo-kantienne voire poppérienne⁴ sur la théorie, l'hypothèse, la validation et l'expérience. Bien entendu les enseignements de Quine lui servent à présenter l'entreprise scientifique comme une stratégie holistique de vérification d'hypothèses formelles, mais la pragmatique est désormais cantonnée en une sensibilité aux « actes de pensée » constructifs des objets formels (intuitionnisme mathématique) ou aux actes de vérification empiriques. Or, selon nous, c'est bien entre autres à la distinction fréguénne entre sens et dénotation que Gilles-Gaston Granger doit un tel retournement épistémologique. Dans le livre de 1992, on perçoit en effet une prise en considération inédite chez lui du fait qu'en mathématique même « l'information apportée par le sens des propositions arithmétiques n'est nullement [...] réduite à des règles de langage » et que « les objets mathématiques quoique analytiquement dérivés, ont donc pour ainsi dire parlé des contenus de sens. »⁵ On comprend que le retour de l'intuition lui paraisse dès lors une nécessité. Aussi écrit-il en préambule : « Dans une première partie, je tenterai de préciser la question préliminaire du rapport de la connaissance symbolique (c'est-à-dire exprimée dans un 'langage') à la connaissance 'intuitive', du point de vue de l'idée de vérité. »⁶ La perspective anti-intuitive des premières années est donc désormais bien loin. L'iconoclasme n'est plus aussi présent que dans les œuvres de l'après-guerre. La preuve en est la réhabilitation elle aussi tardive de la notion d'imagination conceptuelle dans l'ouvrage paru en 2000⁷. La réalité⁸ (elle aussi réhabilitée) pose cette fois-ci le problème de « mise en forme » adéquate dans les sciences de l'empirie. Les « styles » sont définitivement remplacés par des « représentations » ou des « schématisations », comme c'est le cas pour la « représentation mécanicienne » de l'électrocinétique naissante⁹, par exemple. Les « schèmes » et les « thèmes » de la première époque sont remplacés par le « virtuel » et l'« actuel ». Le « virtuel » est défini comme étant ce qui n'est pas actuel et n'entretient

¹ Ce revirement confirme bien notre hypothèse – de nature psychosociologique et historique – sur le caractère essentiellement circonstanciel – lié à l'après-guerre – de l'insistance avec laquelle Granger voulait que les sciences se coupent du vécu.

² [Granger, G.-G., 1992], p. 14 : « Les *énoncés* scientifiques vérifiés, si abstraits qu'ils paraissent, si prédominante qu'y soit la médiation des modèles abstraits, *renvoient en dernier ressort à un vécu*, ou plus exactement à quelques aspects des vécus individuels dont la communication peut être, dans la mesure qui convient à chaque cas, contrôlée. » C'est l'auteur qui souligne.

³ [Granger, G.-G., 1992], chapitre 6.

⁴ [Granger, G.-G., 1992], p. 225.

⁵ [Granger, G.-G., 1992], p. 74. Voir le rappel de cette distinction que fait Granger lui-même, *ibid.*, p. 71 : La dénotation d'un signe, selon Frege, est l'objet de pensée à quoi renvoie le signe, alors que le sens est « le mode de donation de l'objet. » Par exemple, le « signe » suivant, à savoir « la suite qui converge le moins rapidement », a un sens mais pas de dénotation car ne renvoyant à aucun objet de pensée adéquat. On y a un mode de donation mais pas un objet. Un exemple fameux que donne également Frege est celui-ci : « La dénotation d' 'étoile du soir' et d' 'étoile du matin' serait la même mais leur sens serait différent », [Frege, G., 1892, 1971, 1994], p. 103.

⁶ [Granger, G.-G., 1992], p. 15.

⁷ [Granger, G.-G., 2000], troisième partie : « l'imagination conceptuelle ». Dans cet ouvrage, la question de la pertinence des modèles abstraits redevient la question traditionnelle de la conformité entre la réalité – sensible ou humaine – et nos représentations abstraites : voir *ibid.*, p. 139.

⁸ [Granger, G.-G., 1992], p. 243 : « La réalité des objets de science signifierait donc, selon nos analyses, un certain rapport entre un aspect virtuel [les anciennes structures formelles] et un aspect actuel de la représentation de l'expérience. »

⁹ [Granger, G.-G., 1992], pp. 146-149.

pas de rapport avec lui, à la différence du possible et du probable. Il nous faut prendre garde ici que ce « virtuel » n'est justement pas le virtuel de l'infographie ou de l'informatique. Il caractérise bien plutôt les mathématiques elles-mêmes et leur rôle dans les sciences. Si bien que ce « virtuel »-là devient en fait actuel lorsqu'il est traité par ordinateur. Dans cette perspective, si nous ne sollicitons pas trop le texte et si nous le comprenons bien, la simulation informatique (dont Gilles-Gaston Granger ne parle pas expressément) passerait pour une forme d'actualisation du « virtuel » mathématique : ce serait donc une sorte d'expérience. Ce qui justifie sans doute le fait qu'à la fin de cet ouvrage, Gilles-Gaston Granger en vienne à la question ontologique de l'accession de notre savoir à l'être. C'est cette question qui désormais le préoccupe, dans le cadre de sa réflexion sur les sciences. Il prône alors un réalisme bien-tempéré. Ainsi, aujourd'hui, serait-il peut-être moins disposé à affirmer, comme il le faisait encore dans un courte conférence de 1988 sur « Simuler et comprendre », que « la simulation apparaît comme le degré le plus bas d'une échelle dont les degrés supérieurs seraient la compréhension et l'explication »¹. Une telle perspective intellectualiste sur la simulation restait encore fortement déformante et teintée de linguisticisme. Elle caractérise, selon nous, une période de transition propre à la pensée de Gilles-Gaston Granger.

Pour finir sur cette figure de l'épistémologie contemporaine, même si notre auteur semble ignorer les simulations informatiques les plus contemporaines, nous verrons, dans la suite, combien cette tendance récente chez lui, mais plus ou moins consciente, à dépasser le linguisticisme et à s'attaquer de nouveau au problème de l'intuition et de l'imagination conceptuelle, se présente comme la seule voie actuelle susceptible de mener à une compréhension du statut épistémologique de certaines simulations réalistes.

Le langage du virtuel selon Philippe Quéau

En 1986 paraît, en France, *Eloge de la simulation – De la vie des langages à la synthèse des images*, un essai assez influent écrit par Philippe Quéau, alors chercheur en poste à l'Institut National de la communication – INA. Cet essai nous semble à maints égards un des plus lucides et des mieux informés sur les questions qui tournent autour du statut de la modélisation et de la simulation informatique. Toutefois, du début jusqu'à la fin, ce texte manifeste symptomatiquement une permanente oscillation entre une interprétation purement linguisticiste et scripturaire de l'image et le dépassement de cette vision réductrice, dépassement que son auteur pressent comme indispensable devant l'afflux des nouveaux modes de simulation, mais sans pouvoir le concevoir exactement parce que ne s'appuyant justement que sur les philosophies de Michel Serres ou de François Dagognet. Ce texte qui se situe à la croisée des chemins interprétatifs, en ce milieu des années 1980, nous semble ainsi confirmer nos doutes au sujet des épistémologies françaises quant à leur capacité à penser la simulation dans toutes ses dimensions. Mais qu'en est-il exactement ?

Remarquons tout d'abord que, sous l'influence permanente et explicite des travaux de François Dagognet, et sous l'effet du principe hégélien selon lequel « il n'y a pas de pensée sans signe »², la réduction de toute représentation à un langage ou une écriture est, dans ce texte,

¹ [Granger, G. G., 1988, 2003], p. 191.

² [Quéau, P., 1986], p. 61.

exprimée comme une évidence incontestée pratiquement à toutes les pages¹. C'est la raison pour laquelle les 100 premières pages (tout le chapitre 1) traiteront longuement des métaphores en élargissant leur usage habituellement linguistique à toute forme de représentation imagée. Ce faisant, l'auteur se rend fortement dépendant de l'iconoclasme résiduel propre à la philosophie de François Dagognet : le refus d'une image qui ne serait que redoublement. Car si le terme de « simulation » ne reprend pas le sens méprisé qu'il avait chez François Dagognet (il est en effet impossible à l'auteur de récuser à lui seul un vocable massivement employé dans la pratique scientifique, notamment américaine, depuis les années 1950), elle n'y est cependant définie que comme la traduction numérique d'un modèle² ou l'expérimentation d'un modèle³ ou bien encore l'exploration d'un modèle⁴. Pour l'auteur, elle restera donc logiquement, et par principe, toujours dépendante de la nature scripturaire des modèles mathématiques. Ainsi Philippe Quéau ne peut-il interpréter l'émergence de la simulation informatique que comme celle d'« un nouvel instrument d'écriture »⁵. D'où l'enjeu principal de son livre et qui s'ensuit logiquement : préparer les hommes à accueillir ces nouveaux systèmes de signes et de symboles, en prolongement si ce n'est en lieu et place du langage naturel, et qui, en tant que nouveaux lieux de créations symboliques, leur permettront d'élargir leurs conceptions du monde, une fois que ces systèmes auront bien sûr été soumis aux tests et validations habituels.

Mais, par ailleurs, et de façon assez contradictoire, notre auteur pressent également qu'une nouvelle forme de donation du monde se fait jour à travers la simulation informatique, au-delà de la pure recombinaison de symboles formels. Ce qui n'est pas le moindre de ses mérites. Or, s'il prend ce phénomène en considération⁶, il l'interprète assez vaguement comme une nouvelle forme de donation de mondes en général, comme une donation fictive donc, et n'ouvrant la porte qu'à de nouvelles explorations formelles ; ce qui est en fait une manière pour lui de continuer à marginaliser le caractère de simple reproduction du réel propre à certaines images de synthèse, tout en revalorisant la simulation⁷, et cela en conformité avec les philosophies contemporaines sur lesquelles il s'appuie. Comme s'il voulait refouler cette tendance à dépasser l'iconoclasme résiduel, l'auteur va ainsi jusqu'à tâcher de se persuader, d'une manière qui paraît dès lors

¹ [Quéau, P., 1986], pp. 16, 28, 31, 61, 67, 73, 77, 78, 139, 176, 178, 180, 211 et 235, par exemple. Voir particulièrement la page 31 : « l'image est trace, symbole scriptural, signe combinable, schéma abrégiateur, carte panoptique. Elle permet de simplifier, de miniaturiser, de rassembler, de rapprocher. »

² [Quéau, P., 1986], p. 85.

³ [Quéau, P., 1986], p. 85.

⁴ [Quéau, P., 1986], pp. 160-161.

⁵ [Quéau, P., 1986], p. 116.

⁶ On trouve en effet çà et là des propos directement contradictoires avec les prémisses de la philosophie de François Dagognet : « Après le rêve de la condensation du réel en quelques formules mathématiques, on en vient de plus en plus à leur préférer la simulation algorithmique par ordinateur » (*Ibid.*, p. 151), ou bien : « Les conditions sont réunies aujourd'hui pour que le langage cède une part importante de son pouvoir de représentation à des systèmes numériques et symboliques nouveaux » (*Ibid.*, p. 156) ou bien encore : « L'ordinateur cesse d'être l'apanage des compositeurs de logiciels et de programmes, il devient accessible aux instrumentistes, aux virtuoses de l'interprétation 'sensible' » (*Ibid.*, p. 218). Mais, de façon suggestive, à aucun moment l'auteur ne s'autorise à en passer à une philosophie de la néo-sensibilité. Il préfère s'en tenir sagement à une philosophie de la « néo-écriture ». La perplexité que nous supposons à l'auteur de cet ouvrage peut se confirmer à la lecture de certaines questions qui demeurent chez lui prudemment ouvertes, comme celle-ci : « La simulation fait-elle sens ou seulement signe ? » Le malheur veut que l'auteur ne cherche justement pas à explorer également les deux pans de cette alternative si claire, mais se cantonne à l'hypothèse de la simulation-signe.

⁷ En affirmant qu'elle est véritablement une image, mais au sens de François Dagognet – représentation condensante, etc. - et non pas donc une image pléonastique ou de pur redoublement ! On perçoit là le simple déplacement qui s'opère par rapport à François Dagognet : ce que François Dagognet fustigeait sous le terme de « simulation » devient la simulation reproductrice chez Quéau. Et ce dernier considère, dans le même mouvement, qu'une telle forme dégénérée de simulation n'existe tout simplement pas, cela pour régler la question du risque de l'idolâtrie qui hante encore toute l'œuvre de François Dagognet.

excessivement forcée, que « les imageries informatiques ne cherchent pas à copier le réel »¹. Autrement dit, il veut continuer quand même à affirmer que ce qui était valable pour les modèles mathématiques l'est encore pour tous les usages actuels de la simulation, ce qui nous paraît clairement irrecevable au vu des simulations pluriformalisées. Autrement dit, dans ce texte, n'est jamais clairement décidée la question de savoir si, depuis la simulation informatique, la nature de l'image demeure toujours celle d'une écriture, d'un langage ou si elle peut devenir l'objet d'intuitions élargies non directement verbalisées ou symbolisées. L'auteur semble osciller entre les deux.

Huit ans plus tard, dans son ouvrage de 1994, Philippe Quéau est placé face à la difficulté nouvelle de penser les mondes virtuels. Pour cela, il maintient fermement l'idée de principe selon laquelle « les images de synthèse sont d'abord du langage »², ce qui, dans le cas des simulations interactives propres aux réalités virtuelles, le place dans une situation épistémologique très inconfortable. Il est en effet obligé de parler d'une « incarnation abstraite »³ en se refusant toujours d'en passer par une réflexion sur une éventuelle intuition sensible à travers les images simulées, quoique sur ce point l'option dagognésienne parfois vacille. De plus, le passage de sa réflexion aux images virtuelles interactives lui permet de poursuivre dans un iconoclasme résiduel d'un type nouveau : les images seulement simulées, donc non interactives, et dont il avait été uniquement question dans le livre de 1986, sont, cette fois-ci, contenues dans un rôle de représentation statique, donc d'éventuel pur redoublement, au profit des images virtuelles interactives qui, parce qu'elles sont dynamiques et se prêtent à l'exploration *via* l'interaction avec notre corps, sont considérées comme bien différentes des « imageries de pure représentation »⁴. Le virtuel apparaît alors comme ce qui peut sauver les images simulées de leur destin de simples idoles par le biais du temps rédempteur. Dans le cas du virtuel, Philippe Quéau finit quand même par admettre que les images perdent quelque peu de leur nature langagière car on peut « s'incorporer les images, les vivre de l'intérieur »⁵ :

*« Le rôle prédominant du corps dans le système virtuel en tant qu'élément actif et moteur, et non pas seulement récepteur passif et immobile, apporte une dimension absolument nouvelle par rapport aux techniques classiques de représentation spectaculaire comme la télévision ou le cinéma. Les techniques du virtuel convoquent le corps du spectateur-acteur au sein de l'espace simulé, elles lui offrent le moyen le plus naturel, le moins codé linguistiquement, de s'incorporer les images, de les vivre de l'intérieur. »*⁶

Ce passage qui semble s'émanciper du linguisticisme (même s'il nous sauve encore de la *theoria* par la *praxis*) contredit cependant d'autres passages plus classiques sur le virtuel : « les mondes virtuels sont des labyrinthes plus formels que matériels. Cette forme du virtuel est d'essence langagière. »⁷ Selon nous, la difficulté de l'entreprise philosophique de Philippe Quéau vient du fait qu'il tient pour acquis que, dans ces mondes virtuels, on n'expérimente de nouveaux rapports qu'« entre les concepts et les percepts, entre les phénomènes perceptibles et les

¹ [Quéau, P., 1986], p. 253.

² [Quéau, P., 1994], p. 30. Voir également les réaffirmations de l'image simulée comme « nouvelle écriture » : pp. 29, 39, 45, 87.

³ [Quéau, P., 1994], p. 30.

⁴ [Quéau, P., 1994], p. 15.

⁵ [Quéau, P., 1994], p. 16.

⁶ [Quéau, P., 1994], p. 16. C'est nous qui soulignons.

⁷ [Quéau, P., 1994], p. 87.

phénomènes intelligibles »¹ : le virtuel ne nous servirait qu'à imaginer le formel, à explorer concrètement le modèle logico-mathématique qui le sous-tend, sans pourtant que sa « substance intelligible »² y soit totalement exprimée. Il demeurerait donc une espèce de supériorité, irréductible et obscure, du modèle sur l'image sentie, cette dernière ne servant qu'à instancier le modèle, façon pour l'auteur de préserver là encore une forme d'iconoclasme. Ainsi, à aucun moment, l'auteur n'évoque la possibilité que les mondes virtuels soient l'occasion de multiplier les rapports entre les seuls percepts, ce qui l'aurait obligé à penser la possibilité d'une intuition sensible élargie, celle d'un élargissement de l'expérience sensible, celle d'expériences virtuelles en lien avec le réel. Le seul risque ou la seule possibilité qu'il veut voir poindre derrière l'émergence des réalités virtuelles tient au constat que le virtuel nous installerait toujours dans un autre monde ou dans une autre vision du monde, bien différente de celle qui nous est habituelle, au delà donc de la « logique juxtaposante »³ de notre monde trivial. Dans un seul passage pourtant, notre auteur évoque le fait que les « illusions virtuelles [...] ne sont pas toujours fausses ou trompeuses, et [que] d'ailleurs beaucoup d'applications industrielles et scientifiques tirent avantage de la capacité des mondes virtuels à saisir efficacement le réel »⁴. Mais il ne va pas plus loin, ce qui, à sa décharge, peut s'expliquer par le biais que lui occasionne sa propre pratique à l'INA et par le fait qu'en France, les recherches en images virtuelles ou de synthèse ont essentiellement reçu des subsides de la part du Ministère de la Culture dans les années 1980, c'est-à-dire bien avant (4 à 5 ans avant) que le Ministère de la Recherche et le CNRS y voient un réel enjeu scientifique. Philippe Quéau réfléchit donc ici davantage sur le virtuel ludique, médiatique (les communautés virtuelles sur Internet) ou pédagogique (les simulateurs de vol par exemple) que sur le virtuel valant comme instrument scientifique dans la recherche.

Pierre Lévy et les « pouvoirs accrus de l'imagination »⁵

Les réflexions de Pierre Lévy prennent également acte du fait qu'avec l'informatique, « l'accès direct aux choses s'éloigne d'un cran supplémentaire »⁶. Mais, sous l'influence d'une perspective davantage phénoménologique et anthropologique, il n'en vient pas aussi facilement que ses contemporains à un nouvel iconoclasme. En effet, à partir d'une réflexion qui lui permet de désacraliser le rôle de la raison mathématique dans la connaissance, il parvient à rendre compte du caractère empirique de la simulation informatique tout en la distinguant assez précisément de l'expérience réelle. Tout d'abord, à l'issue de rappels historiques sur les conditions intellectuelles de la naissance de l'ordinateur, il en vient à remarquer que « depuis près d'un demi-siècle, la connaissance bascule peu à peu du côté des procédures effectives, de la computation et de l'information opérationnelle »⁷. Il en déduit que « notre science ne sera peut-être bientôt plus mathématique »⁸. En conformité avec cette interprétation, il indique qu'« un des premiers effets de l'usage de la simulation numérique est de conférer un caractère expérimental à des disciplines qui ne le possédaient pas, comme la cosmologie ou la démographie »⁹. Cependant Pierre Lévy ne fait pas l'économie de la question immédiate qui se pose alors : quelle est la différence de nature entre

¹ [Quéau, P., 1994], p. 34.

² [Quéau, P., 1994], p. 30.

³ [Quéau, P., 1994], p. 103.

⁴ [Quéau, P., 1994], p. 93. Donc il y aurait quand même un bon usage de la reproduction du réel en science...

⁵ [Lévy, P., 1990, 1993], p. 142.

⁶ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 12.

⁷ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 105.

⁸ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 105.

⁹ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 132.

expérience réelle et expérience virtuelle, en science ? Il répond assez précisément en indiquant d'abord ce qui les apparente et ensuite ce qui les distingue. Ce qui apparente ces deux types d'expérience, et qui leur vaut cette commune dénomination, consiste dans la faculté qu'ils ont de surprendre le chercheur¹. Pierre Lévy opte ici pour une légitimation psychologique, voire seulement phénoménologique, de ce rapprochement entre les deux pratiques. On conçoit qu'elle ne saurait convenir telle quelle aux philosophes des sciences dont nous avons précédemment synthétisé les positions. Qu'est-ce qui distingue ensuite, selon lui, ces deux pratiques ? La distinction entre les deux tient au fait que la surprise vécue au spectacle d'une simulation ne s'explique pas de la même façon, qu'elle n'est pas due aux mêmes entraves que celles qui subsistent lorsque nous avons affaire à une expérience réelle : « Le résultat d'une simulation, même surprenant, était logiquement contenu dans un ensemble de possibles précodés par l'algorithme et les données. »² Cette surprise n'est due qu'à une limitation dans l'usage de notre propre faculté logico-mathématique. En revanche, « la surprise réelle est capable d'ouvrir un nouveau champ de virtualités »³ car elle incite le chercheur à repenser son modèle formel voire à le modifier au contact avec le réel. Cette surprise est donc due à une ignorance au sujet de la pertinence du modèle formel choisi par rapport au réel, mais pas à une ignorance du comportement de la représentation formelle elle-même. Par la suite, Pierre Lévy s'interroge sur la possible convergence ou identité de ces deux opacités dont les types paraissent, à première vue, bien différents. C'est la raison pour laquelle il s'oriente vers la question ontologique du caractère calculable ou non de l'univers, de la vie et de la pensée. C'est alors l'occasion pour lui de s'interroger sur la nature calculatoire des représentations humaines (notamment les images⁴), en interpellant les programmes actuels de l'intelligence artificielle ou de naturalisation de l'esprit. Ces questions sont laissées délibérément ouvertes par l'auteur, mais il ne cache pas sa préférence pour la thèse de l'irréductibilité du vécu au calculatoire⁵.

Néanmoins, ce qui distingue les analyses de Pierre Lévy des précédentes provient du fait que, dans le développement de la simulation numérique, on n'aurait pas simplement affaire à une nouvelle forme de langage ou d'écriture, mais à une évidente « prise de pouvoir du calcul sur le langage, déchu de sa souveraineté ontologique »⁶. Il nous invite alors à nous interroger sur la légitimité d'une telle opération. L'ordinateur, qualifié de « machine univers » parce que prétendant tout ramener à terme au calcul, est donc ici conçu sous la forme d'une machine fournissant des représentations multiples. Certes, ces représentations sont bien évidemment de nature formelle. Elles incitent donc à poser nouvellement la question de la réduction de l'univers (y compris de ce que la tradition philosophique appelle matière ou qualité seconde : sensation, couleurs, odeurs, etc.) non plus aux mathématiques ni donc à leurs modèles synthétiques (ce qui serait sacrifier encore à la vieille question portant sur la légitimité de l'option galiléenne) mais au calculable, au « computable ».

Pierre Lévy a donc le mérite d'indiquer précisément en quoi la problématique des liens entre l'abstrait et le concret ne peut plus se présenter aujourd'hui tout à fait sous la même forme

¹ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 135.

² [Lévy, P., 1987, 1992], p. 135.

³ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 135.

⁴ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 197.

⁵ « Le sujet demeure, enfoui au plus profond des replis du corps, dispersé parmi la beauté du monde [...] », [Lévy, P., 1987, 1992], p. 223.

⁶ [Lévy, P., 1987, 1992], p. 222. Voir aussi p. 209 : « En considérant la source de la représentation [le sujet] comme une machine à calculer, on objective le sujet, *on traite le transcendantal comme de l'empirique* [...] c'est ce par quoi il y a du sens qui entre dans le champ de l'opérateur. Langage et calcul ont inversé leurs relations. Désormais le calcul gouverne la transcendance. » C'est l'auteur qui souligne. Voir également p. 220 : « L'opérationnalité supplante l'intelligibilité. »

que naguère : il ne s'agit plus seulement de penser le rapport entre notre pouvoir d'abstraction synthétique (le langage et, plus spécifiquement, les mathématiques) et le réel, mais plutôt le rapport entre une technique d'extériorisation et d'objectivation de la pensée calculante, du traitement pas à pas de symboles qui sont des substituts du réel, avec le réel lui-même¹.

Dans ce texte, la position iconoclaste résiduelle de Pierre Lévy (y aurait-il quelque chose qui échappe au calcul ?), demeurant sous forme de question, ne peut dès lors, et en toute logique, que se réfugier dans une vision phénoménologique qui, devant la nouveauté des interrogations, demeure quelque peu désabusée et n'est rien moins que triomphante, surtout au vu du développement considérable et irrépessible du paradigme du calcul.

Par la suite, dans son ouvrage de 1990, Pierre Lévy semble davantage croire dans le « bouillonnement infini du réel »² et donc au fait que le réel échappera toujours à son absorption dans la machine univers. Il tient ainsi à infléchir le pessimisme qui le guidait encore deux ans auparavant. C'est qu'il avait conservé, à tort selon lui³, une vision holistique et indûment abstraite de l'émergence du paradigme du calcul, alors qu'il faut désormais prendre conscience que ce sont les acteurs qui, à l'échelle locale, ont fait progressivement se durcir ces dispositifs techniques de représentation du monde. On aurait ainsi tort de penser ces acteurs comme pris dans les rets de certaines entités abstraites (la Technique, l'Informatique, etc.) devenues autonomes et menaçantes, comme le firent Heidegger et Ellul, par exemple. C'est donc dans un horizon plus pragmatique, mais aussi plus proche du terrain et des véritables réalisations logicielles, que Pierre Lévy regagne en optimisme. Il prône ainsi une « théorie herméneutique de la communication »⁴ selon laquelle la construction du sens ne serait pas due à la circulation abstraite et impersonnelle des messages dans le médium, mais à une construction multi-niveaux, écologique et épigénétique du sens (théorie notamment soutenue par la métaphore de l'hypertexte) et par laquelle notre auteur rectifie les idées trop mécanistes et sclérosantes qui lui étaient auparavant venues des premiers travaux de Michel Serres. À travers ces quelques indications, comprenons que ce qui fait que la forme ne nous rend finalement jamais totalement oublieux du fond (et donc qu'elle ne violente pas le réel comme une machine oppressive qui tuerait la richesse des images réellement vécues) c'est qu'elle se présente toujours et ouvertement avec ses hypertextes, c'est-à-dire précisément comme un puits sans fond : le fond de la forme informatique, c'est le fait qu'elle nous indique clairement qu'elle n'en a pas, et qu'elle nous renvoie ainsi toujours indéfiniment à d'autres formes ; c'est sa récursivité intrinsèque qui fait son sens⁵. Significativement, dans cette perspective anthropologique davantage inspirée de l'individualisme méthodologique, Pierre Lévy prête une attention particulière au fait que, par le développement des langages de programmation orientés-objets, les ordinateurs deviennent de plus en plus des machines à simuler et non plus seulement des machines à calculer⁶. Ainsi, il indique que :

« La relation avec le modèle ne consiste plus à modifier certaines variables numériques d'une structure fonctionnelle abstraite, elle revient à agir directement sur ce que l'on considère intuitivement comme les acteurs effectifs d'un environnement d'une situation donnée. On améliore

¹ Et où les barrières entre réalité et virtualité ne sont plus aussi évidentes que dans l'ère glorieuse des modèles mathématiques structurels, condensants et supposés ne valoir que par leur seule isomorphie.

² [Lévy, P., 1990, 1993], p. 217.

³ Voir [Lévy, P., 1990, 1993], pp. 18-21, où l'auteur tient à rectifier de façon circonstanciée l'approche de son ouvrage précédent.

⁴ [Lévy, P., 1990, 1993], pp. 80-82.

⁵ [Lévy, P., 1990, 1993], p. 81.

⁶ [Lévy, P., 1990, 1993], pp. 138-139.

*ainsi non seulement la simulation des systèmes, mais encore la simulation de l'interaction naturelle avec les systèmes. »*¹

Ce passage nous paraît capital car il indique dans quels termes Pierre Lévy pressent qu'il faut comprendre le dépassement nécessaire de toute conception « linguisticiste » des simulations informatiques. Ce n'est donc pas par hasard que ces quelques lignes sont immédiatement suivies d'une réflexion qui, en tirant toutes les conséquences, pourrait bien paraître à beaucoup comme aventureuse. Pierre Lévy (en franchissant un cap épistémologique que nous jugeons crucial) y affirme en effet que la simulation informatique est finalement plutôt à comprendre comme une augmentation de notre « faculté d'imaginer »². C'est même pour lui « une imagination assistée par ordinateur »³. Certes toute simulation repose sur des modèles formels, mais ils peuvent être complexes, et, dans tous les cas ces modèles sont « bricolés »⁴ de façon à ce que la simulation donne des images ressemblant au réel, sans nécessairement que leurs procédés de construction soient censés expliciter une représentation théorique du phénomène réel et de ce qui lui est sous-jacent. La simulation est donc ici conçue comme un bricolage représentatif, dans ses seules performances, d'une réalité sentie ou mesurée par ailleurs. C'est précisément la raison pour laquelle on ne peut plus faire à la simulation le même procès que l'on faisait aux modèles mathématiques : « La simulation ne renvoie donc pas à quelque prétendue déréalisation du savoir ou du rapport au monde, mais bien plutôt à des pouvoirs accrus de l'imagination et de l'intuition. »⁵

Pierre Lévy termine son ouvrage par l'idée qu'il faudrait désormais se représenter l'essor de l'informatique dans le cadre d'une « écologie cognitive » généralisée. Autrement dit, il faudrait considérer que « les phénomènes sociaux sont des activités cognitives »⁶ et que, symétriquement, les phénomènes cognitifs sont des phénomènes sociaux, cela en conformité avec l'approche récente de l'intelligence artificielle distribuée. Ainsi, l'image et avec elle l'imagination, par les moyens nouveaux de l'informatique, gagneraient un nouvel élan et une véritable légitimité cognitive puisque le fait de procéder par essais, confrontations et erreurs leur redonnerait un rôle central.

Cependant, avec l'affirmation générale des paradigmes du calcul et des interfaces, Pierre Lévy ne va pas jusqu'à expliciter dans quelle mesure le modèle mathématique ne peut passer pour une figuration sensible alors qu'une simulation le peut. D'autre part, ses propos n'ont pas convaincu : ils n'ont pas été relayés par les philosophes ou les scientifiques⁷. Cela tient au fait que l'explication de la parenté entre la simulation et l'expérience réelle laisse à désirer dans la mesure même où elle part d'une approche psychologue, approche depuis longtemps⁸ assez unanimement bannie de la philosophie des sciences françaises. Pour se convaincre de la réalité de ce bannissement, il

¹ *Ibid.*, p. 140. C'est l'auteur qui souligne.

² [Lévy, P., 1990, 1993], p. 140.

³ [Lévy, P., 1990, 1993], p. 140.

⁴ [Lévy, P., 1990, 1993], p. 140.

⁵ [Lévy, P., 1990, 1993], p. 142.

⁶ [Lévy, P., 1990, 1993], p. 164.

⁷ À notre connaissance, ces textes sont très peu cités, à la différence de tous les précédents. Ils ne sont donc pas considérés comme des travaux suffisamment sérieux.

⁸ Depuis les derniers travaux de Bachelard, mais aussi depuis ceux de Cavallès, Desanti et Lecourt.

n'est besoin que de se référer à un ouvrage, constamment cité en revanche¹, celui de Dominique Lecourt, intitulé *Pour une critique de l'épistémologie*² et publié en 1972.

Pour finir notre survol analytique des réflexions de Pierre Lévy sur la simulation, on peut noter qu'il est important pour lui que les images simulées finissent par regagner du fond, du contenu et donc du sens, par rapport aux formes dont elles émanent. Ce en quoi il ne peut être dit tout à fait iconoclaste au même titre que les auteurs précédents. Ce sont en effet les « interfaces » informatiques, dont la nature est d'ouvrir récursivement et sans fin à d'autres interfaces (comme les hypertextes), qui le conduisent à une sorte de néo-leibnizianisme technologique pourrait-on dire, inspiré notamment de la philosophie de Michel Serres mais aussi des derniers travaux de Gilles Deleuze : l'image formelle a réellement un fond mais qui consiste seulement en un repliement en elle d'une infinité d'autres images formelles³. Son analyse de l'élargissement de l'intuition sensible par le recours à la simulation semble intrinsèquement liée à une réhabilitation du contenu de l'image mais seulement en tant qu'emboîtement et intrication de formes innombrables. Davantage, le corps est conçu par lui comme une interface de même nature que les interfaces informatiques : il est une forme qui en appelle une infinité d'autres, mutuellement intriquées entre elles. Pierre Lévy pense pouvoir régler le problème de l'oubli du fond dans la forme en rendant ainsi notre propre corps sentant homogène aux formes qui sont simulées par les nouvelles techniques. Ainsi, en même temps, mais implicitement, il pense la nature elle-même (que ces techniques simulent) à l'image d'un corps mystique informationnel. À la fin de ce deuxième livre, nous sommes donc reconduits à la question demeurée ouverte à la fin du premier : le formel calculatoire, mais présentant aussi des emboîtements de formes à l'infini, peut-il suffire à réaliser de la sensation *ex nihilo*, c'est-à-dire à rendre sensible une image simulée ? Sous cette présentation modifiée, Pierre Lévy semble, cette fois-ci, vouloir répondre par l'affirmative car toute sensation ou intuition est déjà en elle-même une interface alors qu'il lui avait semblé auparavant difficilement tenable qu'elle ne soit qu'un calcul.

Par la suite⁴, Pierre Lévy consacrera davantage sa réflexion à la construction actuelle de ce qu'il appelle une intelligence collective *via* la technologie de l'internet. L'espace virtuel étant un espace déterritorialisé⁵, il permet le développement de communautés virtuelles et la constitution d'un nouveau réel collectif, co-construit. Il s'éloigne donc d'une réflexion sur les modèles et la simulation pour ne plus réfléchir qu'à partir de la capacité propre au virtuel de ne pas être consommateur d'information et de s'offrir ainsi au regard d'un nombre considérable de personnes.

¹ Chez les scientifiques, voir par exemple [Legay, J.-M., 1973] et [Legay, J.-M., 1997]. Chez les philosophes, voir [Nouvel, P., 2002].

² [Lecourt, D., 1972]. Voir particulièrement la critique du psychologisme de Bachelard pp. 48, 52 et 63. Dominique Lecourt critique, dans l'épistémologie bachelardienne, cette façon qu'elle a d'utiliser indûment les concepts scientifiques comme métaphore de l'activité scientifique, cette activité étant elle-même comprise au seul niveau de la psychologie du sujet. Ce faisant, elle laisse en effet passer, dans l'écart qu'ouvre la métaphore, une idéologie qu'aucune épistémologie psychologue ne saurait désamorcer. C'est le cas notamment de la notion de « couplage » empruntée par Bachelard à l'électrodynamique pour métaphoriser les relations entre l'abstrait et le concret telles qu'elles interviennent dans l'activité scientifique (*ibid.*, pp. 62-63). D'où le choix final de Lecourt : « Pour notre part, du 'couplage' nous laisserons tomber la métaphore – indice d'un substitut de théorie de la connaissance – et nous garderons la dialectique... » (*ibid.*, p. 63).

³ Voir [Deleuze, G., 1988]. Voir [Lévy, P., 1990, 1992], pp. 205-206 : « Qu'est-ce qui passe à travers l'interface ? D'autres interfaces. Les interfaces sont impliquées, repliées, froissées, déformées les unes dans les autres, les unes par les autres, détournées de leurs finalités initiales. Et cela jusqu'à la dernière enveloppe, jusqu'au dernier petit pli. Encore une fois, s'il y a contenu, on doit l'imaginer fait de contenants emboîtés, agglomérés, pressés, tordus... L'intérieur est composé d'anciennes surfaces prêtes à surgir, plus ou moins visibles, contribuant à définir un milieu continûment déformant. Si bien qu'un acteur quelconque n'a rien de substantiel à communiquer mais toujours d'autres acteurs et d'autres interfaces à capter, chasser, envelopper, détourner, déformer, connecter, métaboliser. » L'idée que l'intérieur serait fait d'anciennes surfaces est à comparer avec le résultat de l'analyse épistémologique des sciences de la terre faite dans les mêmes termes par François Dagognet *in* [Dagognet, F., 1984].

⁴ Voir notamment [Lévy, P., 1998].

⁵ [Lévy, P., 1998], p. 56.

Dans cette perspective, il intervient davantage dans le débat actuel sur la dématérialisation des échanges, de l'économie et du travail, que dans des débats directement épistémologiques.

Daniel Parrochia : la simulation, à la fois empirie nouvelle et instrument d'intellection

C'est essentiellement à partir du colloque organisé par le CNRS en juin 1989, intitulé « La modélisation : confluent des sciences », que Daniel Parrochia commence à participer à la réflexion sur les modèles. Cette première contribution fait la synthèse du contenu de la plupart des travaux existant alors en langue française, et que nous avons déjà évoqués, concernant l'histoire de la modélisation : ceux de Pierre Duhem, Gaston Bachelard, Suzanne Bachelard et Georges Canguilhem. Daniel Parrochia définit alors le modèle, en sciences expérimentales, comme un « système homomorphe à un système donné »¹. Ce qui le conduit à reprendre textuellement la caractérisation de Suzanne Bachelard qu'elle avait, elle-même, reprise à Georges Canguilhem² :

*« Le modèle n'est rien d'autre que sa fonction ; et sa fonction est une fonction de délégation. Le modèle est un intermédiaire à qui nous déléguons la fonction de connaissance, plus précisément de réduction de l'encore-énigmatique, en présence d'un champ d'étude dont l'accès, pour des raisons diverses, nous est difficile. »*³

Dans la lignée d'un certain mathématisme à la française, il tient ensuite à réaffirmer et à étendre l'analyse de Suzanne Bachelard, analyse qui consistait déjà à amplifier considérablement le rôle du « structuralisme mathématique » du début du 20^{ème} siècle dans le développement de la modélisation :

*« Nul doute que l'entreprise de modélisation, dans les sciences exactes comme dans les sciences humaines, ait largement bénéficié de ce mouvement, qui, avec ces outils d'investigation formels, apporte un véritable langage de la comparaison des formes. »*⁴

Concentrant ensuite ses réflexions sur les limites que la modélisation lui semble présenter, il tient à rappeler les mises en garde de Bachelard au sujet de la figuration des images familières. Il faudrait les interpréter comme des obstacles épistémologiques quasi-obligés. La modélisation consiste en effet à représenter de l'inconnu par du déjà connu, ce qui la met en position d'introduire des idéologies⁵ ou de se livrer à des « placages » illégitimes, selon le terme qu'il reprend à Antoine Danchin⁶. En outre, pour évoquer le rôle de l'informatique dans la modélisation,

¹ [Parrochia, D., 1990], p. 225.

² [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 313.

³ Citation de [Bachelard, S., 1979], p. 3 citant elle-même [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 313, citée à son tour intégralement par [Parrochia, D., 1990], p. 219.

⁴ [Parrochia, D., 1990], p. 222.

⁵ Dans ce passage, après avoir rappelé la teneur des critiques d'Antoine Danchin concernant les usages de l'analogie entre entropie et désordre, Parrochia conclut : « Par conséquent on remarquera que non seulement l'analogie a tendance à diffuser mais qu'elle peut être soumise à des influences d'ordre culturel ou idéologique », *ibid.*, p. 225. Comme on peut le constater, ces analyses sont alors assez proches de celles d'Althusser (1967), Badiou (1969) ou Lecourt (1972). Voir *supra*.

⁶ [Danchin, A., 1978], p. 40 : « Cette première phase de la genèse de la connaissance est fondamentale. On commence par expliquer l'inconnu par le connu. » Plus loin encore : « Il y a un modèle pour chaque cas – le modèle part du réel – et la tentation totalitaire de la généralisation est ainsi exclue par construction », *ibid.*, p. 48. On reconnaît bien ici l'épistémologie du perspectivisme pragmatiste et de la dispersion obligée. Egalement : « On se trouve donc aux prises

Daniel Parrochia considère qu'il y a deux informatiques : une informatique de performance essentiellement consacrée au calcul et une informatique de simulation « qui recouvre tout le domaine de l'intelligence artificielle »¹. Mais dans la suite de ce passage, Daniel Parrochia ne revient que sur le premier type d'informatique, et notamment sur le problème classique que pose l'analyse de données au sujet de la nécessité ou non des hypothèses *a priori*. Pour finir, notre auteur tient à rectifier l'interprétation habituelle des modèles en terme de « métaphores ». Il convient de se persuader selon lui que le modèle « ne se réduit pas à un simple énoncé métaphorique » mais qu'« il constitue bien plutôt un système, un réseau de relations qu'on peut dire, si l'on veut métaphorique, mais en sachant qu'il s'agit d'une métaphore continuée et [...] surveillée lorsqu'il s'agit d'un bon modèle »². D'autre part, la métaphore articule du subjectif à de l'objectif alors que le modèle prétend avoir une objectivité. Ce qui permet à Daniel Parrochia de se persuader que cet accroissement de l'objectivité des modèles tient au fait qu'ils sont de plus en plus mathématiques et logiques : il indique par exemple que, grâce aux développements des concepts de l'analyse non standard en mathématiques, essentiellement intervenus dans les années 1960, certaines approches discrétisées ont pu voir le jour, autorisant la « modélisation de certains calculs par ordinateur »³. Pour finir, il tient à s'unir à la voix du biologiste Jean-Marie Legay pour lequel le modèle ne doit surtout pas être considéré comme une représentation mais seulement comme un outil de traitement des expérimentations. En ce sens, mais cela ne doit pas nous surprendre, on peut dire que ce qu'il hérite encore, à cette époque, de l'iconoclasme de la philosophie française retrouve ici son point d'accord avec les modélisateurs de l'école de biométrie de l'Université de Lyon⁴ : le modèle n'y doit jamais être conçu comme une pure reproduction sinon on se rendrait victime d'une idolâtrie ou d'une idéologie simplificatrice. Il ne doit valoir que par sa fonction et non plus par ce dont il est fait, sa matière. Et cette fonction ne doit être que de schématiser et ne doit désormais rester que formelle ou praxique.

Rappelons ici, par quelques citations, le propos général de Legay. En 1973, par exemple, on pouvait déjà lire ces lignes, au beau milieu de réflexions méthodologiques sur les différents usages des modèles mathématiques :

« Se battre pour comprendre ou créer des structures plus complexes, c'est se battre pour un progrès mental. Dénoncer le modèle-image-de-la-réalité, même auprès de ceux qui ont

avec un réel danger qui apparaît chaque fois qu'un nouveau champ de la connaissance s'ouvre à la réflexion cohérente », *ibid.*, p. 49. Signalons enfin qu'à cette date (1978), Antoine Danchin ne considérait la simulation informatique que comme un modèle phénoménologique et « à intention utilitaire », *ibid.*, p. 56.

¹ [Parrochia, D., 1990], p. 228. Cette restriction est, selon nous, très significative. Le rôle de la simulation comme instrument scientifique représentant des objets inertes ou seulement vivants, mais non pas « animés » - doués d'esprit -, semble traditionnellement occulté. C'est surtout la problématique - anthropomorphique et anthropocentriste - de l'intelligence artificielle qui a mobilisé les philosophes s'étant interrogés sur la simulation par ordinateur. Sur ce point, voir les travaux – par ailleurs très clairs et bien informés des débats autour du connexionisme – de Gérard Chazal (1995) (2000), ou même encore *La philosophie des réseaux* de Daniel Parrochia (1993).

² [Parrochia, D., 1990], p. 230. Le terme « surveillée » est bien évidemment un emprunt au lexique du *Rationalisme appliqué* de [Bachelard, G., 1949, 1962].

³ [Parrochia, D., 1990], p. 230.

⁴ Voir [Legay, J.-M., 1973], [Legay, J.-M., 1990] et [Legay, J.-M., 1997]. Voir particulièrement [Legay, J.-M., 1973], p. 70 : « Ainsi les modèles fonctionnent comme outils dans la production des connaissances. Le modèle-instrument n'a pas de vertu propre ; un marteau n'est pas habile. » Rappelons que ces premières réflexions conséquentes d'un biologiste français sur les modèles ont été principalement inspirées par Engels, Lénine, Bachelard, Althusser, Lefebvre, Badiou et Lecourt. Voir, pour s'en convaincre, les bibliographies des trois références précédentes. Comme de son côté, la philosophie, avec les mêmes références, mais également, et en parallèle, avec Georges Canguilhem et Suzanne Bachelard, cette dernière mêlant adroitement la philosophie de Bachelard et celle de Husserl (voir [Bachelard, S., 1958]), a interprété les modèles dans le même sens – ainsi que nous l'avons vu -, il ne faut pas du tout s'étonner que l'accord règne encore sur ce point, trois décennies plus tard, entre science et épistémologie.

conscience qu'il s'agit d'une image simplifiée de la réalité, c'est dénoncer un concept primitif et idéaliste, c'est en même temps dénoncer un concept mécaniste. »¹

Et Jean-Marie Legay ajoutait :

« Même quand cet instrument [le modèle] consiste en une simulation de la réalité, il ne doit à aucun moment être confondu avec la réalité. »²

Suivait alors le vieil argument purement logique du « Cratyle » :

« Il y a d'ailleurs là une impossibilité logique. Si un modèle représentait totalement la réalité, il ne saurait s'en distinguer et il n'y aurait plus sujet ni recherche définis. »³

Enfin, dans une note de bas de page visant à expliciter ces derniers propos, Legay précisait encore :

« C'est pourquoi une simulation ne peut être considérée comme une expérience, tout au moins au sens de recours à la réalité ; mais la simulation n'est qu'une technique de production de phénomènes ; simuler n'est pas seulement « faire ce qui est avant l'expérience », c'est aussi étudier des mécanismes possibles sur des faits réels. »⁴

Sans nous attarder ici davantage sur les réflexions de Legay puisque nous les avons déjà remises dans leur contexte, retenons que le cantonnement de la simulation à un rôle phénoménologique (imitation des performances de surface, ou heuristique et test de mécanismes hypothétiques), semblait donc bien faire une relative unanimité en cette fin des années 1980, tant du côté des scientifiques que des philosophes.

Or, il nous semble que depuis lors, sur ce point particulier, Daniel Parrochia ait quelque peu modifié ses conceptions. Il n'est que de lire, pour s'en convaincre, le titre de sa récente intervention à l'« Université de tous les savoirs » de l'année 2000 : « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation. »⁵ Dans cette conférence, notre auteur rappelle tout d'abord que la naissance de la méthode expérimentale en physique, avec Newton, avait été due à un retournement de la méthode hypothético-déductive cartésienne, méthode qui ne laissait que peu de poids à l'expérience, en une méthode davantage inductive et où la théorie se fonde et se construit sur des faits précis et vérifiés sans qu'on n'ait besoin pour cela de « feindre des hypothèses », selon l'expression même de Newton dans son *Optique*. Or, Daniel Parrochia se pose la question, selon nous pertinente, de savoir si, avec l'actuel développement des modèles et des procédés de simulation, on ne serait pas en train de revenir à une forme d'épistémologie cartésienne⁶. Ce nouveau renversement serait dû à la complexification de la mécanique newtonienne au 19^{ème} siècle et à l'apparition de la notion de système physique conditionnant elle-même l'apparition de la notion conjointe de systèmes d'équations. Dès lors, selon Daniel

¹ [Legay, J.-M., 1973], p. 26.

² [Legay, J.-M., 1973], p. 26.

³ [Legay, J.-M., 1973], p. 27.

⁴ [Legay, J.-M., 1973], p. 26.

⁵ [Parrochia, D., 2000].

⁶ [Parrochia, D., 2000], p. 197 : « Qu'est-ce qui a alors amené la science à infléchir à nouveau la méthode expérimentale dans les deux directions anticipées par Descartes : la construction de modèles et la mise en place de simulations ? »

Parrochia, « la notion de modèle n'est pas loin »¹. Puis revient, dans ses propos, l'argument de l'ouverture de la physique à des domaines non mécaniques explorés à partir de la mécanique. Ainsi le modèle a bien d'abord pour fonction de réduire de « l'encore-énigmatique à du déjà-connu »², ce qui lui permet de prendre une part importante dans l'objectif essentiel de la science : intégrer et abréger les savoirs en exportant des méthodes connues et éprouvées dans des domaines et à des échelles jusque là peu accessibles à l'expérience. C'est la raison pour laquelle, le modèle reste tout de même essentiellement un « instrument d'intelligibilité »³. C'est un instrument de réduction, de délégation de l'expérience, mais toujours en vue de l'intelligibilité. En biologie et en médecine également, au début de la mise en œuvre de la méthode expérimentale par Claude Bernard, on privilégiait encore l'approche analytique qui morcelait les phénomènes afin de déceler des causalités simples. Par la suite, avec la prise en compte du « caractère interrelié des phénomènes de la vie », de concrets qu'ils furent d'abord, et d'emploi seulement réservé à l'anatomie, les modèles sont progressivement devenus mathématiques et appliqués à la physiologie et au métabolisme⁴.

En résumé, la modélisation, pour Daniel Parrochia, intervient surtout au niveau de l'intelligibilité des phénomènes. Ses fonctions sont donc essentiellement de nature intellectuelle⁵. Dans cette interprétation épistémologique, il devient alors naturel de s'inquiéter du maintien de la conformité de cette représentation, empruntée au départ à un autre domaine, à l'expérience. Or, de façon significative, c'est à la simulation que ce rôle est tout naturellement assigné, selon notre auteur⁶. Il définit la simulation de la façon suivante : « cette capacité à reproduire numériquement et à générer de façon figurative et imagée des situations, des séquences, des processus identiques aux processus réels. »⁷ Informé de la distinction que fait le physicien Etienne Guyon entre modélisation et simulation⁸, Daniel Parrochia convient du fait que le modèle simplifie le phénomène visé, alors que la simulation tend à conserver « tous les paramètres du problème initial »⁹. À le lire, on sent alors qu'il pourrait entrevoir là les potentialités d'expérimentation (bien actualisées aujourd'hui dans les autres sciences que la physique) propres à la simulation, étant donné la capacité de cette technique à dupliquer le réel jusque dans ses linéaments les plus intriqués. Il y aurait donc là matière à percevoir une évolution chez notre auteur par rapport à la conférence de 1990. Mais, sous une forme qui tranche avec les propos qui précèdent, Daniel

¹ [Parrochia, D., 2000], p. 197.

² [Parrochia, D., 2000], p. 197.

³ [Parrochia, D., 2000], p. 197.

⁴ [Parrochia, D., 2000], pp. 198-199.

⁵ [Parrochia, D., 2000], p. 199 : « Dans ces deux exemples [mécanisme cybernétique de Monod, Jacob, Lwoff et modèle de régulation hormonale de Bernhard-Weil], des situations dialectiques complexes ne deviennent *intelligibles* que par une modélisation. » C'est nous qui soulignons.

⁶ [Parrochia, D., 2000], p. 199.

⁷ [Parrochia, D., 2000], p. 200.

⁸ In [Guyon, E., 1996, 1997], p. 109. Il faut noter que, dans ce texte précis, Etienne Guyon garde surtout à l'esprit les usages de la simulation qu'il pratique en physique et qui conservent essentiellement à la simulation informatique son rôle de simulation numérique – qu'il appelle d'ailleurs « expérience numérique » –, en conformité avec son origine historique remontant aux années 1940, plus exactement, en conformité avec l'interprétation française des simulations numériques à la von Neumann-Ulam, interprétation qui veut voir en elles de simples calculs numériques. La simulation y est donc considérée comme un calcul particulier, une résolution numérique du modèle, une simple instanciation de ce modèle. C'est pourquoi Etienne Guyon ne cache pas sa préférence pour la modélisation et il peut ainsi écrire que la différence de complexité entre modèle et simulation « permet de donner une plus grande marge de manœuvre à la modélisation qu'à la simulation », *ibid.*, p. 109. Plus loin, il ajoute : « En ce sens, l'expérience modèle [qui simplifie, filtre le réel en vue d'un objectif et fait donc intervenir le 'génie' du scientifique – pp. 110-111], qui est souvent doublée d'expériences numériques sur le même système, me semble avoir un plus grand degré d'autonomie que ces dernières parce qu'elle possède justement des degrés de liberté contingents à l'expérience modèle et non introduits par l'expérimentateur », *ibid.*, p. 124. Le modèle reste la formule générale de ce qui en reste un calcul particulier (la simulation), donc la simulation est dérivée du modèle et est de moindre valeur épistémique.

⁹ [Parrochia, D., 2000], p. 200.

Parrochia nous semble reculer encore devant cette éventualité épistémologique ; il indique tout de suite que le sentiment de réalité qu'éprouve le pilote qui se trouve dans un simulateur de vol est « trompeur car le simulateur est un modèle réduit, une simplification de la réalité, restreinte à un poste de pilotage monté sur un système de vérins hydrauliques ». En vertu du principe scolastique, implicite dans le texte, selon lequel la cause est plus parfaite et plus riche en réalité que son effet, et en vertu de la prémisse mineure, qui nous paraît précisément contestable, selon laquelle « la simulation présuppose [...] la modélisation »¹, il lui paraît évident de conclure que la simulation elle-même est un modèle réduit et vaut donc moins que le modèle mathématique. C'est donc un modèle (mathématique) réduit.

Dans la suite, Daniel Parrochia s'émancipe pourtant imperceptiblement de cette lecture puisqu'il va considérer la simulation comme une réplique réaliste des seuls effets accessibles à la représentation humaine², comme une imitation des performances seules, conformément à l'interprétation réductrice de Canguilhem³ que nous avons présentée plus haut. Or, comme plusieurs causes peuvent avoir le même effet, on peut choisir les causes les plus économiques pour se représenter un effet choisi. Dès lors, et moyennant ce déplacement subreptice, Daniel Parrochia peut faire, en toute justice, une place très large au rôle empirique de la simulation informatique : « La simulation permet d'effectuer des tests et d'expérimenter sans danger »⁴, à moindres coûts donc. Il nous semble alors qu'il rompt à nouveau avec les propos selon lesquels un modèle n'aurait d'impact direct qu'intellectuel, dans tout usage scientifique, y compris de simulation. Il n'en est rien en fait car, dans la suite immédiate de son intervention, il tient à classer la simulation numérique des modèles mathématiques de la météorologie dans ce type de simulations phénoménologiques. Cette évocation des modèles météorologiques lui permet d'affirmer que le modèle numérique devient en l'espèce un « laboratoire virtuel »⁵. La simulation informatique restant alors pour lui une imitation des effets de surface, c'est l'occasion de rappeler que, dans le domaine de l'intelligence artificielle, les chercheurs « ont dû se limiter à *reconstituer* des comportements intelligents » au lieu de « *comprendre* la nature de l'intelligence »⁶.

La simulation est donc par nature imparfaite pour Daniel Parrochia⁷, car il la juge toujours implicitement à l'aune d'une intellection idéale. C'est sans doute pourquoi il hésite encore à penser jusqu'au bout ce que cela signifie pour elle de passer pour une expérience effective, possibilité qu'il a pourtant évoquée, comme en passant. Dans la fin de son intervention, est alors rappelée l'idée plus commune, déjà présente chez Philippe Quéau, par exemple, selon laquelle la

¹ [Parrochia, D., 2000], p. 200.

² On le voit maintenant, cette fluctuation dans la caractérisation de la simulation lui vient de la définition qu'il s'en donne et que nous avons rappelée plus haut. Qu'entend-il exactement en effet par « des processus identiques aux processus réels » ? La précision manque sur ce point. Il lui est donc possible de passer imperceptiblement de l'évocation de la simulation numérique à celle d'une simulation informatique considérée d'un point de vue plus « phénoménologique », au sens non-philosophique de ce terme.

³ Caractérisation exprimée semblablement par [Couffignal, L., 1963], [Sauvan, J., 1966], [Legay, J.-M., 1973] puis [Legay, J.-M., 1997].

⁴ [Parrochia, D., 2000], p. 200.

⁵ [Parrochia, D., 2000], p. 200.

⁶ [Parrochia, D., 2000], p. 201. C'est l'auteur qui souligne.

⁷ Au sujet du programme de l'intelligence artificielle, il produit le commentaire suivant : « Il y a un triple affaiblissement du projet initial puisque que [reconstituer au lieu de comprendre] c'est avouer que non seulement on ne connaîtra pas la nature de l'intelligence, non seulement le simulacre ne renversera pas le modèle et la copie, mais la copie restera une copie imparfaite et qui n'égale pas le modèle humain. Cette évolution, qui sonne une sorte de retour à Platon, et va donc d'une modélisation impossible à une simulation imparfaite, aurait pu, à bon droit, passer pour une régression aliénante. Or selon Philippe Quéau, ce chemin apparaît au contraire libérateur [...] », [Parrochia, D., 2000], p. 201. Dans la suite est résumée l'idée de Quéau selon laquelle la créativité vient de la distance entre modèle et réalité, comme dans la logique du rêve où la créativité s'exprime le mieux par des déplacements et des condensations – ces termes étant pris au sens de l'interprétation des rêves conçue par Freud.

chance de la simulation est de nous livrer, grâce à ses imperfections mêmes, à un univers de mondes différents, dont le nôtre n'est qu'un des possibles.

Au sujet de l'empiricité de la simulation, Daniel Parrochia s'inquiète enfin de ce qu'il appelle un « rationalisme fantasmé »¹ qu'il oppose au « rationalisme appliqué » décrit et prôné en son temps par Gaston Bachelard, car, selon lui, « la simulation informatique fait perdre son empiricité à l'expérience et tend à la réinstaller au sein du théorique ». Autrement dit, la simulation n'aurait pas exactement pour conséquence d'approfondir et d'élargir notre accès à l'empirie du réel, mais, au contraire à la supprimer pour la remplacer par de pures considérations théoriques voire fantasmatiques. Or, on le voit, c'est bien parce que notre auteur préfère concevoir la simulation comme une modalité théorique et plus largement comme une modalité symbolique et langagière, qu'il s'inquiète d'une telle substitution. La bipolarité autorisant la dialectique traditionnelle théorie/expérience en science lui semble en conséquence menacée, surtout lorsqu'il s'enquiert des usages de la simulation dans les domaines de la créativité tels que ceux dont se préoccupent Philippe Quéau et l'INA. Toutefois, il concède qu'à travers ces simulations qui reformulent et enrichissent le réel², « expériences et applications sont moins réfutées que réduites à un support minimum, le symbolique remplaçant économiquement le matériel »³. La simulation permettrait donc de faire passer le modèle d'une représentation condensée à une représentation amplifiante du réel. Mais, selon Daniel Parrochia, cette amplification elle-même sera toujours quand même débordée par le réel, d'une façon qui reste d'ailleurs énigmatique dans son texte, puisque non élucidée. Ici, l'auteur ne nous semble pas convaincu par l'importance des arguments mathématiques de von Neumann (1951) constatant la supériorité d'une modélisation intégralement numérique sur tout autre approche du réel, à commencer par la modélisation analogique et jusqu'à l'expérimentation réelle. En effet, dans un modèle numérique, nous gardons toujours en droit la possibilité de contrôler la précision des variables et des paramètres, alors que, du fait des mesures et de la complexification croissante des expérimentations sur le réel, complexification due elle-même à la croissance de la connaissance que nous en avons, le recours direct à des expérimentations réelles semblera de moins en moins pertinent, comme cela a été précédemment le cas pour les modèles analogiques. On pourrait résumer cet argument en disant que *le réel n'est pas un bon modèle de lui-même*. Il ne fournit pas même le meilleur substrat d'expérimentation. Car, à cause de son caractère (apparemment) analogique, il ne fournit pas de situations réelles ni de modèles suffisamment contrôlables de ses propres phénomènes. Pour von Neumann, il faut pallier cette limitation du contrôle par le recours à des fictions complexifiées et numérisées : les simulations. C'est donc le progrès de la connaissance et, avec lui, la complexification du *contrôle*, de l'*instrumentation* et de la *métrologie* dans les expériences qui nécessitent de numériser et donc de virtualiser les expériences, pas seulement le caractère concrètement inaccessible de leur seul *substrat*. En dépit de cela, il demeure évident, pour Daniel Parrochia, que les simulations d'explosions nucléaires devront toujours se doubler d'un recours à des « expériences réelles coûteuses », ce qui nous paraît, pour le moins, discutable.

Suit alors un dernier paragraphe dont le contenu s'inquiète des dangers de la virtualisation. L'auteur y exprime malgré tout sa confiance. Mais une forme d'iconoclasme y perçoit encore :

« La simulation moderne suscite des mondes virtuels dont la logique, qui tient parfois du rêve, pourrait se révéler celle du cauchemar si elle se déconnectait totalement de l'expérience

¹ [Parrochia, D., 2000], p. 202.

² Il cite alors [Granger, G.-G., 1995], p. 9.

³ [Parrochia, D., 2000], p. 202.

sensible et si la matière symbolique devait définitivement remplacer la matière réelle. Mais nous n'en sommes pas là et le recours au sensible, aux infrastructures matérielles et aux coûts réels nous remet périodiquement, malgré l'excroissance surréaliste que nous avons créée, dans une perspective de rationalisme appliqué. »¹

Finalement, tout en acceptant cette fois-ci l'existence d'un statut empirique propre à certaines simulations, ce texte reste, au total, dans une sorte d'entre-deux. Même s'il en imagine la possibilité, il ne s'autorise pas à concevoir ce qui fait l'empiricité si particulière de la simulation informatique ; il oscille ainsi entre une réduction de la simulation au modèle simplifiant et une interprétation de cette même simulation comme imitation de surface. Mais comment une simple imitation de surface peut-elle donner lieu à des substituts d'expériences réelles qui ne soient pas toujours de purs fantasmes ? Comment se fait-il que, *parfois*, ces fantasmes soient de bons substituts du réel ? Sur quoi porte exactement cette substitution, une fois qu'on l'a admise ? Sur quoi fait-on précisément porter l'expérimentation virtuelle ? Qu'y apprend-on ? À toutes ces questions, point de réponses précises. Selon nous, l'auteur préfère conserver, dans ce texte, un type d'iconoclasme résiduel qui prend la forme d'une critique du fantasme, terme emprunté à la psychanalyse, ce qui lui permet de s'inscrire encore dans la lignée de Bachelard et de son projet d'une psychanalyse de la connaissance objective. Sous cette dernière forme, le déplacement de l'iconoclasme s'autorise de nos classiques peurs à l'égard de la « folle du logis » qu'est l'imagination, dont on craint toujours qu'elle prenne tout pouvoir sur la raison. Puisque la simulation n'est qu'une affaire entre ce qu'on *dit* du monde et ce qu'on *se dit* à part soi, entre l'esprit et l'esprit donc, on craint toujours que l'esprit se monte la tête, si l'on peut dire.

Bruno Latour et la nature « inscriptive » des modèles

Le philosophe et sociologue Bruno Latour n'a pas spécifiquement travaillé sur les modèles et les simulations dans la science contemporaine. Mais les quelques occurrences de ces termes dans son œuvre² montrent que de telles pratiques ne viennent, selon lui, que confirmer sa conception générale de la « construction des faits scientifiques »³. Selon lui, il n'y aurait donc guère de réels changements dans la pratique de la science qui soient intervenus avec l'émergence des modèles. Comme ce point de vue nivelle considérablement ce qui nous paraît au contraire se manifester singulièrement dans cette histoire récente, et qu'il tend même à supprimer la pertinence qu'il y aurait à en tenter une ressaisie compréhensive et différenciée, nous ne pouvons faire l'économie d'une analyse de cette philosophie, cela afin de voir si sa conception des modèles menace véritablement notre approche.

Il faut tout d'abord rappeler qu'à la lumière de ses premiers travaux d'anthropologie, la totalité de la pratique scientifique est rapidement apparue à Bruno Latour comme de nature « inscriptive » ou plus généralement langagière ou encore communicationnelle. La matérialité d'un laboratoire peut être ainsi entièrement ressaisie dans la « configuration particulière de ses inscripteurs »⁴. Le

¹ [Parrochia, D., 2000], p. 203.

² Voir [Latour, B., 1989, 1995], pp. 569-606.

³ Il nous paraît significatif que le terme anglais « *production* » ait été traduit par « construction » dans le sous-titre de son ouvrage de (1979, 1988) : « La vie de laboratoire – La construction des faits scientifiques ». Le terme de « production », trop connoté par ses usages tous azimuts dans le matérialisme dialectique français, naguère triomphant mais déclinant, en cette fin des années 1980, aurait eu l'inconvénient de placer d'emblée cet ouvrage dans une vision dépassée, et fortement refoulée par le lectorat français d'alors.

⁴ [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 58. Le terme « inscripteur » désigne tous types d'appareils, d'instruments, de pratiques ou de structures dont le fonctionnement donne finalement toujours naissance à des traces écrites,

fait que l'on croit par la suite avoir mis en évidence certaines propriétés matérielles ou objectives d'une réalité naturelle subsistant de façon autonome n'est lui-même que le produit mythique, utile mais mystifiant, de la stratégie rhétorique générale à laquelle peut se réduire l'activité scientifique¹. La totalité de la pratique scientifique se résume donc bien à une série d'opérations stratégiques et rhétoriques sur les énoncés : « ajout de modalités, citation, amélioration, diminution, emprunt, proposition de combinaisons nouvelles »². Les « idées » des scientifiques elles-mêmes « résultent d'une forme particulière de présentation et de simplification de toute une série de conditions matérielles et collectives »³. Suit alors, en bas de page, une note reconnaissant l'emprunt de cette « idée » à la thèse de Nietzsche⁴ concernant la vérité scientifique. Arrêtons-nous un moment sur cette référence dont nous allons voir qu'elle est plus importante, pour la compréhension de toute son œuvre, que ce que son auteur veut bien reconnaître. N'oublions pas en effet que sa formation initiale fut d'abord essentiellement philosophique. Il sait donc précisément de quoi il retourne lorsqu'il évoque comme en passant le nom de Nietzsche⁵. Bruno Latour écrit exactement en bas de cette page 172 : « La notion d'idée comprise comme résumé d'une série de circonstances qui conforterait la croyance en l'existence d'un moi pensant, doit beaucoup à la façon dont Nietzsche traite de la vérité scientifique. »

En quoi consiste donc la doctrine nietzschéenne de la vérité ? Rappelons-là en quelques mots. À partir d'une attention de principe quasi exclusive aux rapports conflictuels entre hommes, notamment depuis *Humain, trop humain* (1878), les « vérités » apparaissent à Nietzsche comme « les erreurs irréfutables de l'homme »⁶. Ce serait donc « un préjugé moral de croire que la vérité a plus de valeur que l'apparence »⁷. La naissance de la croyance en la vérité et du goût que les hommes ont pour elle serait donc à rapporter à la généalogie de la morale elle-même. La volonté

communicables, à des inscriptions visant à persuader ou à remonter – ce dernier terme étant pris ici dans son vieux sens de « représenter la vérité ou la crédibilité de quelque énoncé à quelqu'un ».

¹ « On assiste alors à la transformation de ce qui n'est que le simple résultat d'une inscription en un objet qui colle à la mythologie en vigueur », [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 58. « On a bel et bien construit, à l'aide des inscripteurs une réalité artificielle, dont les acteurs parlent comme d'une entité objective », *ibid.*, p. 59.

² [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 87.

³ [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 172.

⁴ Deux autres occurrences de Nietzsche existent dans [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988]. La première, allusive, permet de faire comprendre aux philosophes qui le lisent que son expérience en laboratoire, si éprouvante d'un point de vue émotif, lui commandait de renoncer successivement à l'optimisme rationaliste de Hegel puis à celui de Leibniz, pour épouser définitivement le nietzschéisme : « Le rouge de leur sang et le blanc de leur peau [des rats de laboratoire] sont également aveuglants sous la lumière crue des projecteurs. Je ne savais plus si ce réel était rationnel et si ces hécatombes étaient en vue du meilleur des mondes possibles. Nietzsche m'avait appris à poser cette question : qui dira la cruauté d'un homme qui ne veut pas être trompé ? Qui dira la cruauté d'un homme qui ne veut pas se tromper ? », *ibid.*, p. 13. La troisième occurrence, la deuxième étant la note de la page 172 que nous citons, apparaît en conclusion de l'ouvrage, en note également, à la page 280 : « Il semble que le prototype de base de l'activité scientifique soit à trouver non pas dans le domaine des mathématiques et de la logique, mais, comme l'ont dit, à plusieurs reprises Nietzsche et Spinoza, dans le travail d'exégèse. L'exégèse et l'herméneutique sont les outils autour desquels l'idée de production scientifique a été historiquement forgée [est insérée ici une référence à *La grammatologie* de Derrida (1967)]. Nous affirmons que nos observations empiriques de l'activité du laboratoire s'accordent parfaitement avec ce point de vue [sont insérées ici une référence au n°spécial de « Culture technique », 14 : « Les 'vues' de l'esprit », dirigée par Latour et de Noblet, 1985 et une référence à *La raison graphique* de Jack Goody, 1979]. » C'est nous qui soulignons. Il est pour le moins surprenant qu'une description philosophique produite par des philosophes d'il y a un ou trois siècles, ou bien encore contemporains mais tout à fait ignorants de la science contemporaine, « s'accorde parfaitement » avec cette même science. On peut donc soupçonner ici à juste titre la simple confirmation d'un *a priori* nietzschéen en fait constamment régulateur dans le travail de Latour, plutôt qu'un réel et déraisonnable accord à travers les siècles.

⁵ Il est étonnant que l'ouvrage plus philosophique et plus récent de 1991, *Nous n'avons jamais été modernes*, ne cite pratiquement jamais Nietzsche, sauf, en passant, pp. 90 et 100, et ne l'inclut même pas dans sa bibliographie. Latour semble ainsi vouloir nous barrer le chemin du retour à la généalogie de sa propre pensée. Sur la stratégie du chemin barré comme essentielle à la résistance d'une idée aux critiques, voir Latour lui-même, *infra*. Nous considérons que ce *lapsus* « calculé » est très révélateur, comme cela se confirmera plus bas.

⁶ In *Le gai savoir*, 1882-1886, § 265, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], p. 163 : « *Dernier scepticisme*. – Que sont en dernière analyse les vérités de l'homme ? – Ce sont les erreurs irréfutables de l'homme. »

⁷ In « Par-delà le bien et le mal », 1886, II, §34, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], p. 590.

de vérité reposerait sur la morale. Or la morale est une invention concertée des hommes faibles, ou de la faiblesse des hommes si l'on préfère, et dont l'objectif est de servir à contrecarrer les puissants et les forts par le recours aux valeurs et à la culpabilisation. À l'origine de la généalogie de la morale, les faibles ont réussi à faire croire aux forts qu'il y avait un Bien et un Mal, qu'il y avait de l'Etre et du Vrai, et ainsi ils ont pu leur résister. L'union a donc fait la force des faibles, elle a institué des valeurs fictives, construites socialement, auxquelles les faibles eux-mêmes, dans leur faiblesse, finissent par croire ; elle a contribué enfin à développer, de façon donc seconde là aussi, la conscience personnelle de chaque homme. La conscience de soi personnelle, cette prétendue intériorité, ne serait donc que le résultat accidentel du besoin de communication qui serait lui-même né de la seule faiblesse du corps de l'homme et de cette nécessaire et humiliante concertation moralisante et visant à la construction d'un accord autour d'une morale, d'une religion et de « représentations » communes, c'est-à-dire autour d'une « vérité » originellement sans objet. C'est pourquoi la volonté de vérité est à la fois d'origine philosophique, avec Platon, et chrétienne, avec l'invention de la culpabilité et de l'explication de la souffrance des faibles par le prétendu péché¹.

Nous avons donc là affaire à une vision clairement agonistique² et linguisticiste³ de la vérité : la vérité est née d'un conflit, elle ne subsiste que dans des signes que l'on se communique, et ce, même à part soi, dans cette prétendue conscience personnelle où l'on peut se persuader soi-même de la valeur de quelque énoncé que l'on se dise. On ne pense pas : on se dit à part soi, on se parle à soi-même, c'est tout. Non pas « je pense » *cogito*, mais « je me dis que je pense ». La vérité que l'on ressent en soi, dans la soi-disant profondeur ou intimité de son for intérieur mais qui n'est en fait que de surface, n'est donc que l'effet superficiel d'une auto-persuasion rhétorique. Quand nous disons que nous « connaissons » la vérité, c'est que nous avons perdu : nous avons cédé, en nous-même, dans notre discours intérieur (car il n'y a, à l'« intérieur », que du discours), aux obligations de la coalition des faibles qui nous entourent. La vérité n'est donc que le discours qui résiste aux attaques qui ont tendance à l'abattre. Mais tout discours en lui-même ne peut, par nature, aucunement être « vrai » en fait, puisqu'il s'agit là d'une valeur, d'un idéal inventé. Seules la vie, l'action et la force immédiate témoignent d'une réalité. Le discours de vérité lui-même, en tant que discours, est né d'un mensonge, d'un ratage premier de cette réalité seule essentielle qu'il faudrait, qu'il aurait fallu, vivre pleinement.

¹ Voir « La généalogie de la morale », 1887, III, §§ 27-28, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], pp. 886-889.

² Indiquons pour finir que cette vision agonistique a elle-même son soubassement dans la doctrine de la volonté de puissance dont serait animé tout homme. Il nous serait trop long et peu utile de le montrer. Qu'il nous suffise de l'avoir signalé.

³ Si nous insistons tant sur cette option linguisticiste inaperçue, mais bien à l'œuvre dans tant de théories de la connaissance et d'épistémologies depuis Kant – dialecticisme, logicisme, structuralisme et sociologisme –, c'est que nous voulons y voir la forme contemporaine d'un anthropomorphisme proche parent – simplement déplacé de la science dans la philosophie des sciences – de celui d'Aristote dont l'époque moderne, le 17^{ème} siècle, s'était pourtant tant gaussé. En effet, si l'on ne peut encore penser le rapport cognitif que nous entretenons avec le monde et avec les choses que sur le seul modèle de notre rapport aux hommes, dans un horizon ou communicationnel ou conflictuel donc, il y a fort à parier que la raison épistémologique peut, sans crainte, croire qu'elle n'en est qu'à son enfance, à l'instar de la physique d'Aristote. Sur ce point, le revirement du dernier Granger, inspiré justement entre autres par une méditation incessante sur Aristote, devrait pouvoir nous faire réfléchir un peu sur l'éventuelle mais souhaitable entrée dans l'adolescence de la raison épistémologique. Le retour du « réalisme » dans la philosophie anglo-américaine des dernières décennies est aussi une conséquence de cet épuisement du linguisticisme (voir également le dernier Bouveresse). Mais cette philosophie de la connaissance reste une forme critique amoindrie et encore fortement teintée de pragmatisme linguisticiste : elle opère essentiellement une critique des représentations et des théories des « *sense-data* ». Les actuels farouches tenants de l'extériorisme en France quant à eux – dont François Dagognet – se rendent encore inconsciemment victimes d'un fort anthropomorphisme lorsqu'il ne veulent voir toute science ou tout savoir que comme un langage, une écriture circulant entre hommes, entre les hommes et les choses, ou entre soi et soi-même.

À côté du pathos très ambigu de cette doctrine, on reconnaît en revanche la thématique, très classique au 19^{ème} siècle, du ratage premier et tragiquement nécessaire de l'essence ou de la réalité, éperdument visée pourtant à travers toute conscience humaine¹. Et c'est le langage ici qui est, comme chez Hegel, la marque d'une médiation nécessaire et irréductible. Nous voyons maintenant qu'il y a lieu de penser que la philosophie sociologiste de Bruno Latour est bien une manifestation extrême de ce que nous avons appelé l'option largement linguisticiste de l'épistémologie française. Sa seule spécificité tient à son influence plutôt nietzschéenne² qu'hégélienne. Ce qui d'ailleurs explique son caractère extrême et volontiers combatif, puisque justement, selon une telle doctrine, la vérité ne subsiste pas à part soi mais se décide dans le débat et le conflit³. Ce résistivisme ontologique de principe, qui justifie le fait que nous classions Latour parmi les philosophes, voire parmi les ontologistes⁴, s'exprime donc clairement de la façon suivante : n'existe dans le discours et ne mérite d'être rapporté que ce qui résiste aux autres discours ou dispositifs de persuasion. On le voit, la sociologie des sciences de Latour découle à peu près totalement de ce principe ontologique⁵.

Il ne nous revient pas de discuter ici de l'intérêt général des thèses nietzschéennes. Simplement, après avoir caractérisé cette philosophie⁶ et ses soubassements ontologiques et épistémologiques, interrogeons-nous sur la façon dont Latour lui-même l'applique à la question

¹ Il est significatif que Bruno Latour ne voit pratiquement que cela dans l'apport kantien. Il ne présente cette philosophie que comme une doctrine de l'éloignement de l'être, du désenchantement humain, en oubliant qu'il y a aussi chez Kant une doctrine de l'intuition, certes non intellectuelle, c'est-à-dire - pour faire bref - non cartésienne, mais dont on devrait quand même, selon nous, se préoccuper, surtout quand on travaille sur la mise en œuvre des savoirs et des pratiques de science. Voir la page 76 - philosophiquement très réductrice à ce sujet - de [Latour, B., 1991, 1997].

² Il reconnaît d'ailleurs cet héritage nietzschéen dans l'entretien qu'il a eu avec François Dosse : voir [Dosse, F., 1995, 1997], pp. 126-126.

³ C'est bien ce que Michel Serres reproche constamment à Bruno Latour dans [Serres, M., Latour, B., 1992]. Pour Serres, la science, à la rigueur, peut se réduire à cette agonistique communicationnelle, car l'idée latourienne est sur ce point très proche de celles qu'il défendait naguère - voir ici *supra* -, mais il refuse de nier toute existence à la création pure et solitaire de l'esprit propre aux arts et à la philosophie. C'est en ce sens qu'il reste leibnizien sans devenir nietzschéen.

⁴ Il y a en effet une sorte d'ontologie relationniste convaincue et tranquille qui s'exprime à travers des phrases comme celles-ci : « La plupart des difficultés pour comprendre la science et la technique viennent du fait que nous croyons en l'existence de l'espace et du temps comme un cadre de référence à l'intérieur duquel les événements et les lieux prendraient place. », [Latour, B., 1989, 1995], p. 548. Plus loin, on trouve une métaphysique improvisée : « L'espace est constitué par des déplacements réversibles, le temps par des déplacements irréversibles. Comme tout dépend du fait de déplacer des éléments, chaque invention d'un mobile immuable va dessiner un espace-temps différent », *ibid.*, pp. 551-552. Certes, nous savons combien l'auteur doit ici aux invariants circulationnels et aux temps et espaces topologiquement feuilletés de Michel Serres, mais du moins ce dernier n'en a-t-il pas conçu une application directe et susceptible d'expliquer d'une façon purement idéaliste la construction de la science.

⁵ Il n'y a pas jusqu'à la théorie de l'oubli de la construction sociale des faits scientifiques qui ne doive aussi intégralement son principe à Nietzsche lui-même : « *Nous n'affirmons pas seulement que les faits sont socialement construits. Nous voulons montrer également que le processus de construction met en jeu l'utilisation de certains dispositifs* par lesquels toute trace de leur production est rendue extrêmement difficile à détecter », [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 180. C'est l'auteur qui souligne en italique. C'est ce qui n'est pas souligné par lui que nous soulignons en revanche : à en croire notre auteur donc, le chemin du retour à la généalogie sociologique des faits scientifiques serait barré. Si les faits commencent à nous résister sur le mode de l'être et non plus du discours, c'est parce qu'ils n'existent pas ! En effet, cette inversion/perversion ferait partie de la stratégie des modernes pour continuer à nous faire croire que ces faits ne sont pas construits mais préexistent : « il se produit par conséquent une inversion : l'objet devient la raison pour laquelle l'énoncé a été formulé à l'origine. » Le chemin du retour est barré, sauf apparemment pour Latour, comme ce fut miraculeusement le cas aussi pour Nietzsche, ce visionnaire philologue qui tâchait de nous persuader que la vérité avait été construite et qu'il avait été malheureusement l'un des seuls à voir comment. En effet, pour réparer l'oubli de la véritable généalogie de la morale, Nietzsche procédait lui aussi déjà à une analyse des traces langagières, des inscriptions : il recourait à l'étymologie et à la philologie. Voir *La généalogie de la morale*, 1887, I, §4, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], pp. 780-781. L'argument poppérien classique de la non-réfutabilité guette cependant une telle sociologie, on le voit. Mais selon le principe nietzschéen et latourien déjà cité, une « erreur irréfutable » est une « vérité » ! Donc le problème est réglé. Tout ceci est quand même très paradoxal pour une philosophie qui conçoit par ailleurs la science comme une construction communicationnelle, dialoguée/dialectique et intersubjective.

⁶ Cette dénomination serait certainement récusée par Latour. Mais rappelons que c'était justement aussi le cas de Nietzsche, puisque, dans sa doctrine, les « philosophes » sont assimilés aux prêtres de la religion de la vérité.

des modèles et des simulations en science. Il part du principe que l'espace et le temps eux-mêmes sont construits et que les seuls invariants relatifs d'un domaine donné de la science sont les réseaux. Ils servent à « mobiliser, cumuler et recombinaer le monde »¹. Selon cette lecture rhétorique de la « mobilisation » interactive et recombinaante à quoi se résume la fonction de toute expérimentation comme de tout calcul dans toutes les sciences, le « modèle réduit », par exemple le modèle analogique en hydrodynamique², joue simplement le rôle de réducteur de problème. Il présente en effet l'essentielle qualité d'être réduit, c'est-à-dire d'être facilement mobilisable et mobilisé par l'activité des hommes dédiés à ce genre de tâches. Seules les dimensions ont été transférées ou réduites de sorte que cette mobilisation de l'artefact est plus aisée que celle de l'original. Tout n'est donc qu'un problème de « domination » et de « maîtrise »³ de la situation. Il faut se rallier la nature, la mettre de son côté, sans quoi la mobilisation aurait été stérile, les défaitistes ou les défections ayant été trop nombreux pour être contenus par la force des inscriptions dans un réseau fonctionnel. Les modèles sont donc des réseaux mobilisateurs de « choses »⁴ et d'acteurs humains, comme on le voit aisément pour le modèle analogique précédent. Et Latour d'étendre cette lecture aux nombres eux-mêmes : ils sont aussi essentiellement des organes mobilisateurs en ce qu'ils se réduisent à la fonction d'additionner, c'est-à-dire de synthétiser, totaliser. Si, par exemple, un institut de démographie compte des bébés, le nombre n'existe pas ici autrement que comme moyen de relation entre les « bébés qui pleurent » et l'« institut de démographie »⁵. Par extension, tout calcul ou toute manipulation sur des symboles ne devient qu'une stratégie parmi d'autres de mobilisations réductrices des acteurs-choses au profit des acteurs-hommes. Le pouvoir de représentation se réduit en fait à un pouvoir de mobilisation en vue d'un faire, d'un agir. La variance des statisticiens permet ainsi de dire le plus avec le moins, de réduire pour dominer. Et là, une référence explicite est enfin faite⁶ à François Dagognet (1984) et à sa théorie de la représentation-condensation. Les formules mathématiques ne sont que des liants qui rassemblent et « redistribuent les connexions entre éléments »⁷. Deux phrases résument bien ce que nous avons dit :

« Une équation n'est pas différente par nature de tous les autres outils qui permettent de réunir des éléments, de les mobiliser, de les organiser et de les représenter ; elle ne diffère pas d'un tableau, d'un questionnaire, d'une liste, d'un graphique, d'une collection ; elle constitue simplement, en tant que point ultime d'une longue cascade, un moyen d'accélérer encore un peu plus la mobilité et la combinabilité des traces ; les équations sont une des nombreuses catégories de traductions, et c'est à la suite de toutes les autres traductions qu'elles doivent être étudiées. Deuxièmement, elle ne peut être détachée de l'ensemble du processus de construction du réseau, dont elle représente une minuscule partie [...] »⁸

Cette philosophie sociologiste présente pour nous l'inconvénient d'être totalement nivelante ; elle écrase les distinctions épistémologiques, en les déclarant nulles et non avenues, distinctions

¹ [Latour, B., 1989, 1995], p. 548.

² [Latour, B., 1989, 1995], p. 554.

³ [Latour, B., 1989, 1995], p. 555. Inutile d'insister sur l'*a priori* agonistique dont nous avons déjà parlé et qui affleure ici à toutes les lignes, comme on le voit.

⁴ Les « choses » sont des acteurs : elles sont homogènes aux acteurs humains. Voir les propos tenus à propos du microbe pasteurien in [Latour, B., 1989, 1997], p. 658 : « le micro-organisme est un acteur en voie de définition... »

⁵ [Latour, B., 1989, 1995], p. 562.

⁶ [Latour, B., 1989, 1995], p. 571.

⁷ [Latour, B., 1989, 1995], p. 573.

⁸ [Latour, B., 1989, 1995], p. 574.

auxquelles on est contraint lorsque l'on réfléchit un peu sur l'histoire des différents modes de conceptualisation. Qu'on y songe : à ce compte-là, l'histoire des sciences et des techniques est une imposture pure et simple. Que tirer de toute cette entreprise confusionnante bien plus qu'éclairante ? Cette philosophie d'ensemble ne donne aucun moyen conceptuel de distinguer entre les divers modes de représentation, de calculs, de modélisation et de simulation. Néanmoins, elle nous rappelle de façon stimulante le rôle croissant des intervenants et des acteurs dans nombre de travaux scientifiques. Comme entreprise sceptique radicale, elle nous permet de comprendre et d'accepter la modestie des modèles en ce qu'ils n'ont plus la prétention de dire la vérité ou de théoriser le monde.

Bernard Feltz et Isabelle Stengers

Nous arrêterons ici de manière forcément un peu arbitraire la liste des auteurs que nous analysons : ceux que nous avons évoqués sont les plus influents jusqu'au milieu des années 1990. Il faudrait étendre plus au long ces analyses à des chercheurs comme Bernard Feltz ou Isabelle Stengers. Sans vouloir les ranger dans la même famille de pensée, nous les aborderons tous deux très succinctement dans ce paragraphe car leur poids, chez les scientifiques eux-mêmes, a été bien moindre pour la période qui nous occupe.

Après une étude minutieuse et différenciée d'un point de vue épistémologique de deux cas de modélisation mathématique en biologie, Bernard Feltz propose une « conception modeste » de la méthode des modèles. Suivant en cela Jean Ladrière, Bernard Feltz rappelle qu'il faut éviter de proposer des carcans épistémologiques à la science. Il remarque pourtant que, dans la méthode des modèles, c'est l'approche « globale » et non l'approche « totale » qui prime : les modèles tendent à ne plus être purement perspectivistes et pragmatiques même s'ils ne valent en revanche qu'à une échelle donnée. En ce sens, ils sont globalisants mais pas totalitaires¹. Bernard Feltz ne s'attarde pas en revanche sur les simulations informatiques.

Au contraire, Isabelle Stengers s'est dernièrement intéressée aux modèles jusque dans la forme récente des simulations en vie artificielle. Arguant du fait que le comportement du modèle nous conserve toujours une forme de mystère, elle rappelle que l'on ne sait jamais dans quelle mesure exacte le modèle est pertinent : il faut donc l'utiliser avec « tact »². Le tact est une forme de « négociation rusée »³ que le modélisateur doit avoir avec son modèle de manière à en tirer une information qui n'est jamais obvie, de par la complexité de sa conception, surtout depuis l'époque où ce sont les ordinateurs qui sont devenus les supports des modèles. Isabelle Stengers prend acte de l'actuelle opacité des modèles, en particulier celle des modèles mathématiques de systèmes dynamiques à grand nombre d'équations. Toutefois, elle ne prend pas véritablement comme objet d'étude les récentes simulations orientées-objet et à visée de réplique réaliste. Son discours semble alors ne porter que très incidemment sur la simulation informatique proprement dite.

Le linguisticisme : réunion des deux traditions

À l'issue de ces quelques jalons d'histoire de la philosophie des modèles, nous pouvons essayer de confronter les deux traditions : continentale-française d'un côté, anglo-saxonne de

¹ [Feltz, B., 1991], pp. 310-312.

² [Stengers, I., 1997], p. 113.

³ [Stengers, I., 1997], p. 117.

l'autre. L'épistémologie française n'a-t-elle pas finalement aussi une racine linguisticiste ? Si oui, à quoi peut-on l'attribuer ?

En effet, on a vu que l'interprétation du modèle comme pure schématisation théorique ou valant comme substitut de schématisation théorique demeure une constante de l'épistémologie française, au moins jusqu'au début des années 1990¹. La simulation comme modèle détaillé, mimétique et à valeur empirique, est systématiquement déconsidérée ou ravalée au rang d'une activité ludique ou heuristique prospective. Or, de plus en plus de scientifiques parlent aujourd'hui de « laboratoires virtuels »², d'« expériences virtuelles » ou d'« expérimentation sur mondes artificiels »³. Faut-il continuer à nier le fait que tous ces scientifiques essaient par là de se rendre compréhensible un changement qui s'opère sous nos yeux dans la pratique des modèles ? Ou faut-il encore les renvoyer à leurs idéologies ? L'épistémologie française actuelle est encore, pour une grande part, hostile au fait d'admettre et de penser cette évolution, ou cette innovation, dans la pratique scientifique.

Cela lui vient notamment de ses attaches philosophiques. Nous voulons ici revenir sur ces soubassements philosophiques pour confirmer notre caractérisation et notre mise au jour de ce que nous avons appelé le linguisticisme. La déconsidération de la simulation caractérisait en effet déjà la position *princeps* de Canguilhem, philosophe pourtant contemporain des premiers modèles cybernétiques. Elle sera relayée très durablement comme nous l'avons montré en détail. Ce rendez-vous manqué de l'épistémologie avec la science est bien, croyons-nous, le signe d'une reprise en charge inconsciente de l'iconoclasme judéo-chrétien par l'épistémologie au moyen d'une réactualisation de la pensée hégélienne pour l'essentiel, mais également nietzschéenne, pour les pensées qui se sont trouvées à la marge de l'épistémologie universitaire. Cette responsabilité se serait ainsi déplacée de la religion ou des idéaux politiques dans l'épistémologie elle-même, conçue comme prise en charge des savoirs humains comme de la culpabilité de la culture, ainsi que nous en avons ébauché la démonstration avec Bachelard, Serres, Dagognet, Quéau, le premier Granger ou Latour. Nous n'avons pas à juger de cet état de la culture judéo-chrétienne ni de la forme qu'ont pu prendre ses choix implicites. Peut-être n'y en avait-il pas d'autres face aux stigmates indélébiles des cataclysmes humains du siècle passé. En ce qui concerne Nietzsche, on pourrait pourtant nous objecter qu'il a justement été le premier philosophe à dénoncer avec force la sécularisation des catégories judéo-chrétiennes dans la philosophie même. Convaincu par le travail récent de mise en perspective de la « querelle de la sécularisation » effectué par Jean-Claude Monod, nous ne pouvons en effet que concéder l'idée que Nietzsche fut décisif pour cette prise de conscience⁴. Mais, ajouterions-nous, si Nietzsche a réussi à ne pas être victime de cette sécularisation sur le plan de *la philosophie morale et politique* (seule concernée jusqu'à présent par la désormais classique « querelle de la sécularisation », ainsi donc que par le travail de Jean-Claude Monod lui-même), c'est *parce qu'il* en était profondément resté la victime sur le plan épistémologique. Ainsi est-ce en réitérant le geste biblique du refus des idoles qu'il construit sa propre thèse généalogique et qu'il peut ensuite violemment relativiser les représentations absolues de l'absolu, comme donc aussi les idéologies de la vérité. Même s'il nous faudrait plus de place pour le montrer en détail, Nietzsche ne procède donc qu'à un

¹ À la décharge des épistémologues, c'est parfois encore le cas des scientifiques qui en restent à la « rupture épistémologique » des années 1960 selon laquelle le modèle, de représentation fidèle et théorique, serait devenu une image idéalisée et dont le contenu serait toujours conditionné par l'utilisation spécifique qu'on veut en faire. Voir [CNRS, 1996], pp. xiv-xv.

² [Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A., 1990].

³ [Treuil, J.-P. et Mullon, C., 1996].

⁴ Voir [Monod, J. C., 2002], pp. 81-94.

déplacement, non à un dépassement de la matrice judéo-chrétienne. En ce sens, il ne fait que préparer et préfigurer tous les actuels *iconoclasmes paniques* qui se font jour devant une nature entre-temps absolutisée.

Pour ce qui nous concerne plus directement, et comme nous ne pouvons aborder une histoire des sciences contemporaines sans disposer de quelques outils épistémologiques, il nous fallait revenir sur ce que nous avons appris à percevoir comme les limites de l'épistémologie contemporaine face au défi de penser la simulation informatique. Cette orientation linguisticiste, dont nous avons parlé, se retrouve en effet à peu près chez tous les philosophes des sciences depuis les années 1930, aussi bien dans cette épistémologie dite « continentale » qu'est l'épistémologie française que dans le positivisme logique. Elle s'est parfois durcie encore chez nos contemporains les plus proches. Elle est, selon nous, le signe clair que la raison épistémologique en demeure encore, pour l'essentiel, à une espèce bien définie d'anthropomorphisme. Bien que très satisfaisant, du point de vue de l'économie psychique, pour l'esprit de l'épistémologue ou du sociologue, à l'instar de la séduction que pouvait avoir l'anthropomorphisme des anciens, ainsi que Bachelard lui-même l'a amplement montré, le linguisticisme nous maintient dans l'ignorance en nous faisant croire au pouvoir magique de la nature par principe langagière ou, plus largement, *exprimée dans ou médiée par* des signes ou des symboles, des choses que nous cherchons à connaître et comprendre ou expliquer. Le linguisticisme projette donc bien par avance sur ce qui est à connaître une caractéristique qui se donne d'abord seulement comme humaine dans le vécu immédiat des relations interpersonnelles. Dans la première phrase de la *Phénoménologie de l'Esprit*, Hegel lui-même nous avait pourtant bien prévenu : pour développer la science de l'expérience de la conscience, il part explicitement du vécu immédiat. Notre prétendue méfiance à l'égard de l'immédiat aurait justement dû intervenir dès ce départ. Et les promoteurs du « construit » médiat aux dépens du « donné » immédiat, Bachelard le premier, auraient pourtant dû nous prévenir contre toute adhésion de principe au linguisticisme qu'Hegel allait professer dans les lignes qui suivaient cet avertissement méthodologique. Hegel reste donc aristotélicien sur ce point en ce sens précis que son épistémologie dialecticiste est en fait construite elle-même sur une intuition, sur un sentiment immédiat donc, concernant notre rapport cognitif médiat au monde et aux choses du monde : *le sentiment hégélien de la médieté de tout rapport au monde est lui-même immédiat*¹. De là vient tout l'optimisme rationaliste et quelque peu prématuré de la doctrine hégélienne. C'est là une des sources de l'anthropomorphisme fondamental, et persistant, de l'épistémologie contemporaine des modèles, qu'elle prenne une forme d'idéalisme dialectique ou de matérialisme dialectique ou pragmatique/praxique.

À ce titre donc, on a, selon nous, insuffisamment réfléchi sur ce qu'il restait de naïvetés épistémologiques dans beaucoup de lectures simplistes et utilitaires du texte hégélien du début de *La Phénoménologie de l'Esprit*, alors même qu'il est un point de repère et un point de départ pour plusieurs générations de philosophes français, surtout après la traduction de Jean Hyppolite et les exégèses multiples plus ou moins biaisées qui ont précédé la guerre (Kojève aux Hautes Etudes en 1933-1934) et celles qui l'ont suivie (Labarrière, Garaudy, Lefebvre et les néo-marxistes en général).

¹ Tirant la leçon du premier Bachelard, nous dirions que le dialecticisme épistémologique contemporain serait lui-même à « psychanalyser ».

Dans le même ordre d'idées, lorsque Bachelard, avant guerre, prône une « psychanalyse de la connaissance objective »¹, il ne s'aperçoit pas qu'il fait l'hypothèse implicite, fortement contestable et réductrice, selon laquelle la connaissance objective n'est toujours qu'une parole. Il nous semble en effet qu'on ne peut « psychanalyser »² qu'une parole au sens large, c'est-à-dire toute manifestation matérielle ou activité ou pensée soutenue par une intention singulière de signifier³. Ainsi Bachelard impose tacitement que la connaissance objective ne soit constituée que de jeux sur des signes ou des langages, ce dont hériteront la plupart de ses successeurs, comme nous l'avons montré. L'élargissement, après-guerre, de la première forme de sa doctrine à la fameuse thèse de la phénoménotéchnique ne sera que le simple passage, dès lors prévisible, de ce linguisticisme dialecticiste à une pragmatique prise encore une fois au seul sens de la linguistique. Cette interprétation dialecticiste de la *praxis* de la science pourra alors tout naturellement consonner avec les néo-hégélianismes d'Althusser et de Badiou. Dans ces néo-marxismes, la dominante linguisticiste bien évidemment demeure pour l'essentiel, et cela, malgré la foi matérialiste qui se révèle alors comme seconde par rapport à l'option hégélienne implicite au sujet de la nature dialoguante, discursivement exprimée ou médiée de tout rapport cognitif. Pour revenir à Bachelard, il n'est alors pas étonnant qu'il lui paraisse naturel et adéquat d'adjoindre ensuite à cette doctrine une lecture néo-hégélienne (dialecticiste, d'où son « rationalisme dialectique ») de la science en marche, puisque l'épistémologie hégélienne telle qu'on la concevait à l'époque se résumait souvent à un commentaire du début de *La Phénoménologie de l'Esprit*, insistant sur le caractère propre à toute expérience sensible, ou toute intuition, d'être toujours déjà de « parole » : toujours construite, ou vécue, mais jamais immédiatement donnée donc.

Les réflexions que Jean-Michel Salanskis mène sur l'anti-kantisme contemporain rejoignent, sur ce point, notre caractérisation générale de l'épistémologie française. Ce qu'il appelle un anti-kantisme et un néo-hégélianisme « historiste »⁴ est, *grosso modo*, ce que nous appelons un linguisticisme dialecticiste. La différence entre ces deux caractérisations provient du fait que Jean-Michel Salanskis s'appuie plus largement sur les philosophies de l'événement qui ont suivi le structuralisme : Deleuze et Lyotard. Pour l'approche qui est la nôtre, nous n'avons pas cru pertinent d'intégrer ces auteurs à notre panorama cursif de l'épistémologie française, dans la mesure où leurs contributions à la réflexion sur les modèles est faible. De plus, et à la différence de Salanskis, nous ajoutons le constat que le nietzschéisme lui-même, en tant que forme particulière de linguisticisme, a servi d'arme argumentative dans ce combat que nous jugeons plus généralement porté contre l'intuition et contre toute forme de représentation simplement reproductrice, et pas seulement « contre » Kant et « pour » Hegel.

Mais d'abord, comment peut-on expliquer un tel accord sur le nécessaire retour à la doctrine hégélienne dans les épistémologies françaises d'après-guerre ? Comme on le sait aujourd'hui et comme le signale le travail récent d'Emmanuel Renault sur *La naturalisation de la dialectique*⁵ chez Hegel, il faut rappeler que beaucoup des commentateurs français d'avant-guerre et d'après-guerre ont pâti de la difficile accessibilité de la « philosophie de la nature » hégélienne proprement dite. Nous irions jusqu'à dire qu'ils ont donc le plus souvent reconstruit, en conformité avec les

¹ En revanche, il nous paraît bien plus justifié de prôner aujourd'hui une « psychanalyse de l'épistémologie ». On ne peut nier, nous semble-t-il, qu'elle ne soit qu'un ensemble de paroles ou de discours, différant bien en cela de son objet propre : la science.

² À supposer même, ce qui est très contestable, qu'un tel verbe puisse être transitif. Dans l'orthodoxie freudienne, le psychanalyste ne « psychanalyse » pas le patient. Il est l'« analysant » pour l'« analysé ».

³ C'est pourquoi la production toujours seconde, le *discours* sur le discours, ou sur la pratique scientifique, qu'est et reste en revanche la conscience épistémologique elle-même nous paraît plus pertinemment « psychanalysable ».

⁴ Voir [Salanskis, J.-M., 2001], pp. 199-235.

⁵ [Renault, E., 2001], pp. 7-8.

besoins psychologiques et intellectuels de l'esprit du temps, une épistémologie hégélienne à partir du seul début de la *Phénoménologie de l'Esprit* et du chapitre peu explicite de l'*Encyclopédie* consacré à la philosophie de la nature. Il est tout à fait significatif que, pour sa part, face à ces simplifications abusives, dont nous laissons la dénonciation détaillée aux spécialistes de la pensée de Hegel, Emmanuel Renault encourage aujourd'hui les historiens de la pensée à reprendre cette doctrine par les trois chemins qui naturellement et tout à la fois y mènent et en partent : « l'histoire de la philosophie, l'histoire de la philosophie des sciences et l'histoire des sciences »¹. Nous souscrivons totalement à ce programme intégratif et compréhensif dans la mesure où nous avons commencé à esquisser, plus haut, une démonstration du fait que Hegel semble avoir été utilisé un peu à tort et à travers pour improviser des épistémologies ayant pour but (explicite) de contrer tout à la fois le bergsonisme, la phénoménologie husserlienne et le positivisme anglo-saxon, mais dont l'objet (implicite) consiste, selon nous, en une réassomption déplacée de l'iconoclasme biblique.

Donc, que semble dire le texte de Hegel et, surtout, comment a-t-il été souvent compris ? Nous ferons ici quelques brefs rappels très simplificateurs. Ils serviront à montrer que c'est bien déjà le langage qui s'impose et s'interpose dans toute relation cognitive selon cette perspective épistémologique si influente parce que si séduisante pour le philosophe. En effet, cela lui facilite grandement la tâche épistémologique, car les finesses des relations de connaissance peuvent être allègrement, indistinctement et en bloc, rapportées au même schéma nivelant et séduisant de la dialectique idéal-matérielle. C'est alors l'occasion pour la philosophie des sciences de ne plus du tout approfondir et analyser la conceptualisation propre au travail scientifique, c'est-à-dire ce que Kant appelait la « construction des concepts » dans ou devant l'intuition, alors même que pourtant, et c'est tout à la fois paradoxal et significatif, les épistémologues français d'après-guerre se rallient presque tous au mot d'ordre de Cavailles selon lequel il faudrait passer à une « philosophie du concept »².

Rappelons donc que, selon le début de *La Phénoménologie de l'Esprit*, la « sensibilité », source de connaissance prétendument fondamentale pour beaucoup et à quoi Hegel semble réduire l'intuition précédemment et finement thématisée par Kant, ne donne finalement comme certitude que celle, vague et encore abstraite, de la totalité de l'être, mais aucunement celle de la connaissance d'une chose singulière présente ici, devant nous et dans l'instant. C'est en quoi l'enseignement du sensible ou de l'intuitif est essentiellement négatif : notre sensibilité nous indique que ce que nous prenions pour le plus concret et le plus immédiat est en fait le plus abstrait et le plus médié. Le déploiement même de l'expérience sensible indique combien demeure en la sensation une médiation logique, c'est-à-dire linguistique, cachée. En tant que simple exemple de ce qui est sensible, c'est-à-dire comme simple instanciation d'un universel, c'est-à-dire encore en tant que singulière présentation d'un concept subsistant dans le langage, le senti ici et maintenant se donne sur un mode second, médié, c'est-à-dire sur un mode construit par et dans le langage. En effet le langage, en tant que porteur de l'universel, car tissé de mots, l'attend toujours déjà comme exemple immédiat et singulier de cet universel. Le langage donc produit une contradiction performative. En promouvant le ceci au rang d'instanciation d'un concept, il lui fait une côte mal taillée. Il dit au ceci : tu es telle sorte d'immédiateté. Il le qualifie donc, trahissant par là sa plus grande valeur et la vérité selon laquelle il était toujours déjà là avant lui, avant que ne

¹ [Renault, E., 2001], p. 11.

² Voir [Canguilhem, G., 1955] et [Lecourt, D., 1972] par exemple. Selon nous, il y aurait lieu de distinguer une philosophie du concept d'une philosophie de la conceptualisation tout comme d'une philosophie de la conception ou fabrication.

vienne au jour et se manifeste le pur ceci. Il trahit sa propre priorité d'abord inaperçue dans la sensation :

« L'universel est donc en fait le vrai de la certitude sensible.

C'est aussi comme un universel que nous prononçons le sensible. Ce que nous disons, c'est ceci, c'est-à-dire le ceci universel, ou encore il est, c'est-à-dire l'être en général. Nous ne nous représentons pas assurément le ceci universel ou l'être en général, mais nous prononçons l'universel. En d'autres termes, nous ne parlons absolument pas de la même façon que nous visons dans une certitude sensible. Mais comme nous le voyons, c'est le langage qui est le plus vrai : en lui, nous allons jusqu'à réfuter immédiatement notre avis ; et puisque l'universel est le vrai de la certitude sensible, et que le langage exprime seulement ce vrai, alors il n'est certes pas possible que nous puissions dire un être sensible que nous visons. »¹

Il faut comprendre ici que l'universel concret n'est pas à disposition mais qu'il s'esquisse déjà comme universel dans le langage : en effet les mots sont des généralités sinon il y aurait autant de mots que de sensations singulières, de choses, etc. Le langage universalise donc toujours. Le langage humain, de par cette caractéristique foncière, est déjà la promesse et la marque du renoncement à la connaissance immédiate qu'il nous faut accepter de vivre pour parvenir finalement à connaître en vérité. Mais l'intuition sensible se voit d'abord congédiée en tant que source de connaissance puisqu'il n'y a de connaissance que dans le langage et que la seule chose qu'elle puisse nous « dire » est qu'elle n'est pas le tout du concept ou du mot qui pourtant sert à la désigner. Mais bien entendu, Hegel n'oublie pas la sensibilité car elle participera, au final, à la récollection du Savoir Absolu. Elle était déjà une figure de la connaissance bien que pourtant d'abord essentiellement négative.

Que conclure de ce rappel très simplifié, voire caricatural, si ce n'est que « la logique hégélienne part d'une identification de la pensée et de la chose pensée »², comme le dit, en résumé, Jean Hyppolite ? Il ne nous appartient pas de nous demander ici si cet apparent « départ » hégélien est légitime. Mais il nous est en revanche possible de nous demander si ce passage, à lui seul, peut commander une épistémologie véritablement adaptée au projet de penser les nouveaux modes de conceptualisation et de représentation dans les sciences contemporaines. Pourquoi en effet faudrait-il que nous projetions cette nature parlante propre aux hommes dans les choses et que nous y voyions un défaut de connaissance lorsqu'elles ne nous parlent pas ? Pourquoi faudrait-il leur reprocher de ne pas parler et partir du principe qu'elles le devraient et qu'elles le feront à terme si on les « travaille » suffisamment (matérialisme dialecticiste de Marx) ou si les hommes se travaillent eux-mêmes suffisamment (idéisme dialecticiste de Hegel) ? Dans cette résolution dialectique du vieux problème de l'accord du singulier et de l'universel³ dans la connaissance, ne peut-on pas d'emblée déceler une forme assez grossière d'anthropomorphisme ? En effet cette philosophie des sciences, si elle ne se résume qu'à une sur-sollicitation de tels passages, se rend coupable de plaquer aventureusement des catégories *a priori* seulement valables dans le champ inter-humain sur le champ des autres types de relations qu'entretiennent les hommes. Toute relation avec le monde est-elle en effet nécessairement aussi d'ordre dialogique/dialectique, c'est-à-dire d'ordre linguistique ? Il est au moins permis d'en douter. C'est simplifier formidablement le problème épistémologique que de penser le phénomène réel (ou

¹ [Hegel, G.W.F., 1807, 1939], p. 84.

² [Hyppolite, J., 1953], p. 3.

³ C'est bien d'ailleurs cette thématique qui oriente toute la réflexion du premier Granger.

la pratique réelle) comme étant toujours déjà de langage, comme se mouvant essentiellement dans l'élément du langage et comme ne demandant qu'une chose : parvenir à se dire ce qu'il est pour vraiment devenir ce qu'il est. C'est le rendre un peu trop magiquement, et par principe, complice de l'entreprise humaine de l'accession à la connaissance. Et c'est se rendre coupable de forcer la solution épistémologique en plaquant des catégories humaines de relations inter-humaines, c'est-à-dire un modèle bien connu, sur d'autres champs de relations, c'est-à-dire sur une réalité encore mal connue. Cette erreur est pourtant dénoncée maintes fois en science par ceux mêmes qui la commettent en épistémologie.

Jean Hyppolite a bien montré que, dans le cas de la *Phénoménologie de l'Esprit*, la motivation principale de Hegel, quant à lui, pour l'affirmation de ce départ et de ce principe, tient à sa volonté qu'il ne demeure rien d'ineffable. Faut-il que cette volonté soit nécessairement aussi celle des épistémologues contemporains ? Hyppolite s'en explique en tout cas pour Hegel : « renoncer au discours, à la communauté instituée des consciences, ou se livrer au sentiment qui est au-dessous du langage c'est tout un »¹ ou encore « il faut que la conscience de soi ne soit pas une singularité ineffable enfermée dans sa propre intuition ; il faut que le discours humain soit à la fois le discours de l'être et le discours d'une conscience de soi universelle »². Telle est bien la foi ou l'espérance de Hegel et dont il tire toutes les conséquences optimistes et rationalistes.

Les autres interprétations de Hegel sur ce point vont presque toutes dans le même sens. Celle d'Alexandre Kojève par exemple :

*« Réalité = Réalité révélée = Vérité = Concept = Logos. La réalité dont nous parlons implique notre discours (Logos) puisque lui aussi est réel. Parler d'une réalité qui ne l'implique pas (objet sans sujet) c'est donc parler d'une abstraction, c'est parler (philosopher) abstraitement. (Or l'Objet qui implique le Sujet est Esprit, Geist. L'Etre concret est donc Esprit.) »*³

L'interprétation de Pierre-Jean Labarrière également :

*« L'intelligence de cet immédiat est ce qui exige la médiation la plus vaste. »*⁴

Celle de Roger Garaudy :

« La certitude ne peut être immédiate.

*D'abord parce que le donné lui-même est une illusion et implique contradiction [...] La certitude n'est plus immédiate mais médiatisée : l'objet entre déjà dans une catégorie universelle : celles des choses qui sont même si elles ne sont pas immédiatement senties. »*⁵

Pour justifier très succinctement notre introduction du terme général « linguisticisme »⁶, il nous suffit maintenant de montrer que l'un des philosophes le plus farouchement hostile (avec

¹ [Hyppolite, J., 1953], p. 7. Comme on l'a vu, c'est précisément cet argument qu'utilise François Dagognet contre l'iconoclasme platonicien.

² [Hyppolite, J., 1953], p. 11.

³ [Kojève, A., 1947, 1990], p. 45.

⁴ [Labarrière, P.-J., 1968, 1985], p. 74. Labarrière insiste moins cependant qu'Hyppolite, Lefebvre ou Bruaire sur le rôle fondamental du langage chez Hegel.

⁵ [Garaudy, R., 1966], pp. 42-43.

⁶ Nous rappelons que par linguisticisme, nous entendons désigner toute approche épistémologique qui considère que toute représentation scientifique, plus généralement cognitive, est de nature linguistique ou peut se ramener à du langage.

Kierkegaard) à cette vision panrationnaliste optimiste, nous voulons dire Nietzsche, a produit une théorie similaire de la médiation nécessaire à partir du même constat évident : les mots disent des généralités, donc ils mentent dans la mesure où ils échouent à exprimer le singulier. Bien évidemment, l'approche généalogique, et passablement inspirée de Darwin, propre à Nietzsche ne lui fait pas supposer que le langage préexiste et rencontre ensuite nos expériences, comme c'est le cas en revanche pour Hegel. Au contraire, le langage est construit à partir des insuffisances de l'état biologique supposé originaire des hommes. C'est le regroupement des hommes dû à leur faiblesse et à la prise en compte de leurs besoins qui a fait que le langage est apparu. Donc les signes et les mots sont le fruit d'une mise en commun : c'est pourquoi ils sont généralisants, communs voire vulgaires. Pour une raison très différente de celle qui est invoquée par Hegel, le langage est donc selon Nietzsche la forme universelle et vulgaire qui nous a permis de communiquer avec les autres et de désigner vaguement et vulgairement les choses¹. En ce sens, ils ne peuvent indiquer le singulier. Mais nous n'avons de rapport scientifique aux choses que par le langage puisque le langage, la volonté de vérité, la morale et la science sont en fait des phénomènes humains nés tous ensemble d'une même faiblesse. Mais ces mots, du fait qu'ils sont communs, humains trop humains, n'indiquent aucunement la réalité des choses et des êtres dans leur singularité.

Que l'on conçoive donc une épistémologie française d'influence hégélienne ou nietzschéenne, on tombera toujours sur ces deux arguments, repris et adaptés de l'iconoclasme biblique :

- 1- le langage est nécessaire pour connaître,
- 2- le langage est insuffisant pour connaître.

Si l'on ajoute que les modèles et les simulations sont des objets de science donc toujours des discours, des écritures ou des langages, il n'est pas étonnant que l'on retombe constamment sur un iconoclasme consensuel et de bon aloi, car se vêtant toujours du manteau respectable et confortable psychiquement de l'anti-idolâtrie. On affirme ainsi que l'expression discursive jamais ne convient à la connaissance de la singularité² mais que pourtant il n'y a pas d'autre type de rapport cognitif avec le monde. L'aventure occidentale peut continuer imperturbablement.

Selon nous, malgré sa fécondité par le passé et dans d'autres domaines, ce cadre interprétatif linguisticiste ne convient aucunement à une épistémologie de la simulation informatique actuelle³. Il n'est bien sûr pas étonnant que les développements de la science exposent rapidement l'épistémologie à ses propres insuffisances et la rendent rapidement caduque. Notre résultat serait méprisable s'il n'était que de cette nature, s'il ne visait qu'à invalider la pensée du passé par la réalité du présent. Ce jeu est évidemment bien trop facile, et donc suspect de stérilité, car il donne la victoire à tout coup. Nous n'avons donc pas à jeter la pierre aux épistémologues. Notre objectif est ailleurs. De ce résultat, nous voulons simplement inférer l'idée qu'il nous est aujourd'hui

¹ *Le gai savoir*, V, § 354, [Nietzsche, F., Tome II, 1993], pp. 219-220.

² Il existe pourtant certains travaux sur le langage du singulier. Dans le cas de [Hess, G., 1991], par exemple, il s'agit d'une reprise des catégories sémiotiques de Peirce, de manière à rendre compte du fait que la pensée de l'événement mythique peut être prise en charge par le langage. Mais, dans ce travail, il n'y a pas encore de réelle incursion dans l'épistémologie. De son côté, l'actuelle philosophie néo-réaliste post-wittgensteinienne d'inspiration anglo-saxonne (p. ex. [Bouveresse, J., 1995]), voulant briser en priorité avec le médiatisme, reste, à l'heure actuelle, dans les limbes de l'épistémologie des sciences de la nature. Elle n'en est donc qu'à ses débuts ; et on ne peut préjuger de son issue. Il nous faut attendre qu'elle sorte des problématiques de la perception élémentaire, qu'elle conçoit tout à la fois comme incarnée et parlée, pour en juger. Il est possible qu'elle propose à terme une solution innovante pour penser le rôle de la simulation informatique.

³ Pour des arguments plus précis à ce sujet, voir [Varenne, F., 2003a].

possible d'écrire une histoire des idées et des sciences contemporaines précisément grâce aux insuffisances reconnues de l'épistémologie du passé récent, c'est-à-dire grâce aux insuffisances reconnues d'une pensée qui s'efforce pourtant vers la compréhension du présent de la science, et cela du fait que ces insuffisances nous indiquent clairement qu'il est possible, si ce n'est de dépasser cette épistémologie, tout au moins de ne pas coller totalement à cet esprit du temps auquel elle participe tout autant que la science contemporaine et dont on peut voir désormais clairement, mais cela ne nous était justement pas possible avant l'avènement de la simulation informatique pluriformalisée, qu'il s'éloigne de nous et qu'il prend donc une forme enfin compréhensible et interprétable du point de vue de l'histoire, et non plus une forme confuse dans laquelle l'historien des sciences baignerait sans même le savoir, du fait de ses préjugés épistémologiques informulés ou injustifiés. Ce que nous a permis dès lors cette brève étude d'histoire de la philosophie au regard de l'histoire des sciences, c'est de montrer qu'il nous est possible de nous arracher d'ores et déjà quelque peu au présent, et d'objectiver notre passé récent grâce à ces premières caractérisations saisies au travers d'insuffisances déjà reconnaissables pour nous, contemporain.

Si cette caractérisation ne nous permet pas un dépassement (Y en a-t-il ? Et faut-il en espérer un ?) du moins nous autorise-t-elle un décollement sensible, un déplacement supplémentaire de notre perspective à l'égard de ces épistémologies embarquées dans leur présent, notamment quant à cette question des modèles. C'est la raison pour laquelle cet exposé analytique de l'état de la question en philosophie des sciences nous a servi essentiellement à en refuser l'option implicite assez générale, à discerner le malaise et les hésitations que cette philosophie manifeste de manière rétrospectivement compréhensible, pour nous hisser autant que possible hors de la vision purement linguisticiste de la représentation scientifique et nous rendre ainsi plus réceptif à la nouveauté scientifique des dernières années. Les quelques propositions de Pierre Lévy, l'évolution tardive de Gilles-Gaston Granger, la lecture critique d'Anne-Françoise Schmid, comme les hésitations légitimes de Daniel Parrochia nous indiquent déjà probablement la voie. L'histoire de l'épistémologie est donc bien, elle aussi, une histoire jugée, du fait même que son objet est la science. Celle-là hérite des sanctions qui traversent celle-ci. La critique de l'histoire récente de l'épistémologie n'est cependant pas un pur jeu gratuit, cruel et facile¹, mais elle nous donne du recul dès aujourd'hui, alors même que nous en avons tant besoin pour l'écriture contemporaine d'une histoire des sciences et des idées qui ne cesse de se faire et de se nouer sous nos yeux.

¹ Voir nos essais d'un début d'épistémologie alternative *in* [Varenne, F., 2003a].

ANNEXE C

Linguistique structurale, modélisation et

« grammaires de Chomsky »

Sans prétendre viser ici une quelconque exhaustivité, nous rappellerons en quelques mots comment la linguistique américaine, à partir du début des années 1950, a poussé jusqu'au bout puis combattu en interne son propre béhaviorisme et descriptivisme bloomfieldien d'une manière cependant différente de celles qu'adoptèrent antérieurement Jakobson, ou même Hjelmslev, et cela de manière à développer une approche de modélisation mathématique. Tel est le contexte dans lequel la technique et l'épistémologie des grammaires génératives ont pu en effet voir le jour. Or ce sont elles qui sont à mettre en regard avec les travaux en simulation de la morphogenèse biologique accomplis par Lindenmayer, une décennie plus tard.

De la théorie distributionnelle des unités linguistiques aux « grammaires de transfert » : Zellig S. Harris (1909-1992)

Sans vouloir entrer dans le détail de l'origine puis de l'évolution des idées du linguiste américain Zellig Sabbetai Harris¹, il est nécessaire d'évoquer quelles furent ses idées majeures et les liens qu'elles entretenirent ensuite avec celles de Chomsky. Il nous faut donc avant tout rappeler que Harris s'est formé à la linguistique au moment où le béhaviorisme de Bloomfield, qui s'était originellement développé à Yale, conduisait une grande partie des chercheurs américains, dans leurs analyses de la distribution des unités linguistiques d'une langue (morphèmes ou phonèmes), à s'efforcer de ne pas recourir au mentalisme, c'est-à-dire à récuser toute forme de renvoi à une opération cachée de l'esprit qui ne soit pas objectivable scientifiquement. Or, Bloomfield, dans ses propres travaux sur l'alternance, dans la langue, des morphèmes et des phonèmes, avait conservé une référence non seulement à la *distribution* formelle mais aussi au *sens* de certaines de ces unités. C'est précisément ce résidu de sens dans la théorie bloomfieldienne qu'il faut, selon Harris, définitivement éradiquer². Après des travaux plus empiriques, l'essentiel des premières conceptions théoriques de Harris s'est donc d'abord formé, dès les années 1930 et 1940³, autour de ce projet de réduire encore la *part du sens*⁴ dans l'analyse structurale de la langue.

C'est là qu'il propose en 1951 sa propre théorie distributionnelle. Il s'agit de redéfinir le concept de « distribution » d'une unité linguistique de manière à ce qu'à travers ce concept seul,

¹ Nous renvoyons pour cela à [Mounin, G., 1972], pp. 170-188, à [Robins, R. H., 1967, 1976], pp. 206-250, à [Steiner, G., 1971, 2002], pp. 140-172 et enfin à [Johnson, S., 2002], notamment pour les dernières publications de Harris. On trouve dans ce site internet les analyses les plus récentes de ses dernières œuvres. Ce site est maintenu par Stephen Johnson et par le département d'informatique de l'Université Columbia.

² Pour ces rappels, nous nous appuyons notamment sur [Mounin, G., 1972], p. 174.

³ Voir la bibliographie de [Johnson, S., 2002].

⁴ Pour une mise en perspective littéraire de cette réduction, voir [Steiner, G., 1989, 1991], chapitre 2 : « le contrat rompu », pp. 77-165.

toutes les différenciations¹ de la langue soient concevables et éventuellement prévisibles, sans qu'il y ait besoin de recourir à une méthode de distinction intuitive, donc nécessairement sémantique. Harris définit pour ce faire la distribution d'une unité linguistique comme « la somme de ses environnements ». Supposons en effet que l'on veuille savoir si [l] et [r] sont des phonèmes en anglais. Si l'on considère qu'il suffit de constater qu'ils permettent de différencier *life* de *rife*, alors on s'appuie en fait sur un recours implicite à la différence de sens entre ces deux termes. Pour Harris, cette méthode intuitive « est seulement un raccourci pris par le linguiste ou le non-linguiste pour atteindre aux véritables différenciations [qui sont] distributionnelles »². Si l'on veut être scientifiquement rigoureux, c'est-à-dire ne pas se livrer à l'usage « mystique de termes philosophiques »³, il faut, en théorie, ne recourir qu'à la distribution formelle correctes des unités dans la langue. En fait, Harris admet très vite un certain nombre d'entorses à cette loi qu'il présente d'abord comme indéfectible⁴.

En outre, et comme le montrent Mounin et Hutchins, sans doute à partir de 1951 et de la publication du rapport de Bar Hillel, publié en prévision d'une conférence qui se tiendra au MIT en juin 1952 sur la « traduction par machine » [« *MT : Machine Translation* »]⁵, l'analyse linguistique théorique va être plus concrètement et plus consciemment confrontée à un problème qu'elle portait de toute façon en germe : celui de l'ambiguïté sémantique. Hors contexte, certaines phrases bien formées demeurent en effet ambiguës. Malgré les tentatives inchoatives et polémiques (car d'abord tournées en partie contre la thèse quiniennne de l'impossibilité de la traduction) du second Carnap et visant à mettre en place une théorie de la sémantique formelle⁶, la traduction

¹ L'idée que la langue est un *système de différences purement formelles* et non un système d'unités substantielles vient bien entendu déjà de Saussure.

² *Methods in Structural Linguistics*, University of Chicago Press, 1951, 3ème édition : 1957, n. 4, p. 7 ; extrait traduit et cité par [Mounin, G., 1972], p. 175.

³ [Mounin, G., 1972], p. 175.

⁴ Mounin rappelle également les contre-exemples apportés par les détracteurs de la théorie distributionnelle. Il existe ainsi des unités linguistiques (comme *boysen-* dans *boysenberries* = variété de mûre) qui n'ont pas d'environnement autre que celui qu'on leur connaît ponctuellement (ici *-berries*) et qui ne s'inscrivent donc pas dans un système de pures différences formelles.

⁵ Pour une chronologie et une histoire circonstanciée de la « traduction mécanique », principalement aux Etats-Unis, voir [Hutchins, J., 1997a, 2003] et [Hutchins, J., 1997b, 2003]. Pour une histoire (déjà ancienne et datée mais suggestive) des prémices de travaux contemporains, similaires mais différents, essentiellement en URSS, voir [Delaveney, E., 1958].

⁶ Voir [Carnap, 1947, 1956, 1997]. Dans cet ouvrage, (*Signification et nécessité*), Carnap essaie de remplacer la fonction de nomination (correspondant à la relation sémantique habituelle) des termes par deux propriétés formelles conjointes adaptées des concepts frégréens de sens et de dénotation : l'intension et l'extension. Il peut construire ainsi une sorte de sémantique formelle permettant de se passer de la référence (donc, selon lui, de toute ontologie). En 1947, il applique ensuite cette nouvelle notation aux problèmes des logiques modales mais sans traiter directement les problèmes de traduction. Voir une présentation générale de son projet : *ibid.*, pp. 47-49. Mais dans un article de 1953 répondant plus particulièrement à Quine (qui avait, de son point de vue, démontré à la fois la relativité et l'irréductibilité de l'ontologie dans les langages naturels), Carnap utilise une version pragmatique du concept d'intension de façon à montrer qu'il est en droit possible qu'un « robot » (selon son propre terme) procède seul et objectivement à une analyse d'intension (le « robot » carnapien n'est d'abord qu'un dispositif de pensée conçu pour la seule argumentation théorique et servant d'arme contre le relativisme de Quine ; ce n'est donc pas exactement un ordinateur réel). En effet, le concept d'intension (ou de signification) d'un prédicat est défini par Carnap comme n'étant que ce qui conditionne un certain type de *comportement* linguistique : « l'intension d'un prédicat 'Q' pour un locuteur X est la condition générale qu'un objet y doit remplir pour que le locuteur X soit prêt à attribuer le prédicat 'Q' à y », *ibid.*, p. 362. C'est ce recours, dans la définition de l'intension, à un *comportement visible, objectivement représentable et formalisable*, qui fait que Carnap revendique que l'on rapproche son point de vue des perspectives béhavioristes de la psychologie. Voir *ibid.*, pp. 354-367. Voir particulièrement la page 367 : « L'intension d'un prédicat peut être déterminée pour un robot aussi bien que pour un locuteur humain, et même plus complètement si l'on connaît suffisamment la structure interne du robot pour prédire comment il fonctionnera dans différentes conditions. » Carnap se rallie alors explicitement au travail de Bar Hillel (qu'il cite) : « [Bar Hillel] appelle les linguistes à construire de manière analogue [la théorie de la sémantique formelle] la théorie de la signification dont ils ont besoin dans leurs recherches empiriques. Le présent article indique la possibilité d'une telle construction. Le fait que le concept d'intension puisse être appliqué même à un robot montre qu'il n'a pas le caractère psychologique qu'avait le concept traditionnel de signification », *ibid.*, p. 367, n. 1. Cependant, ce travail

automatique conçue sur la base d'une théorie purement syntaxique et formelle, semble donc devenir manifestement délicate voire impossible¹. Cependant, Bar Hillel, en admettant que la traduction aura longtemps besoin encore d'un « *native speaker* » pour contrôler le travail automatique, pense que, moyennant cette condition, la faisabilité à court terme de telles machines est déjà démontrée. Et c'est pourquoi il fait tout de même un geste en direction des théories formelles de l'analyse structurale. Dans son rapport de 1951, Bar Hillel préconise en conséquence que le système mécanique programmé, si l'on veut qu'il ne soit pas seulement spécifique (c'est-à-dire conçu pour une traduction d'une langue précise en autre précise²) mais qu'il vaille pour n'importe quel type de traduction, s'appuie sur ce qu'il appelle une « grammaire universelle ». Or, selon lui, la tâche en incombe ici manifestement aux théoriciens de l'analyse structurale et des grammaires. La balle est donc dans leur camp.

Malgré les dénégations ultérieures de Chomsky³, il est donc fort probable que Chomsky (qui est l'élève de Harris entre 1950 et 1954) et Harris lui-même consolident l'idée de « transformation » précisément sous cette impulsion-là⁴ et ce, dès 1952⁵. C'est d'abord sous la forme de « grammaire de transfert » que, sous la plume de Harris, la notion de grammaire universelle fait son apparition en linguistique structurale : il s'agit de nommer par-là l'ensemble des règles formelles de transformations que l'on peut appliquer à certaines structures (phonologiques, morphologiques ou syntaxiques⁶) d'une langue-source pour en tirer les structures correspondantes dans la langue-cible.

Progressivement, l'expression « grammaire de transfert » va finir par désigner l'ensemble des « instructions »⁷ nécessaires à la reconstruction des phrases d'une langue à partir de catégories et de classes d'unités linguistiques universelles de la même langue. D'un outil de traduction entre langues, elle devient donc un système axiomatique de génération de structures à l'intérieur d'une même langue. Mais Harris, conscient des difficultés multiples qu'oppose à la formalisation la complexité des langues réelles ne voit dans cette proposition qu'un travail préparatoire d'analyse et d'induction. C'est Chomsky (né en 1928) qui, en revanche, et à partir de

essentiellement théorique visant à démontrer une simple possibilité en droit ne donne pas le matériau formel effectif suffisant pour rendre opérationnelle une véritable explicitation mécanique de la signification. D'où le fait que, comme on le sait, les techniques de la traduction par machine devront encore trouver des chemins détournés et plus complexes pour tendre à devenir effectives.

¹ [Mounin, G., 1972], p. 183.

² En première approche, précise-t-il, ce type de traduction peut en effet se satisfaire d'une approche par essais et erreurs et par modèles statistiques, y compris pour le règlement du problème de l'ambiguïté sémantique.

³ Voir [Robins, R. H., 1967, 1976], p. 248. Voir également l'entretien de 1969 avec George Steiner : « Je ne contesterais pas que l'image de l'ordinateur soit pour moi une intuition vivante, si par cette image vous renvoyez à la théorie abstraite du calcul – la théorie des machines de Turing, la théorie des fonctions récursives, la théorie des automates finis, etc. Cela a toujours été pour moi un modèle très conscient, et, comme vous le savez peut-être, j'ai beaucoup travaillé sur certains aspects de la théorie mathématique des automates, largement résumés dans mon article du *Handbook of Mathematical Psychology*, auquel vous faites référence. Mais si par 'image de l'ordinateur' vous entendez l'objet matériel, ce n'est en aucun cas pour moi un modèle, ni conscient ni inconscient. De fait, je n'ai jamais vu d'ordinateur et, pour ainsi dire, les ordinateurs ne m'intéressent pas. J'ai eu le sentiment, dès le début, que le principal effet de la disponibilité d'ordinateurs sur la linguistique (comme sur les humanités) serait de banaliser la recherche et de nous entraîner dans des directions absurdes ; avec le temps, cette conjecture initiale n'a fait que se renforcer », [Steiner, G., 1971, 2002], p. 146.

⁴ Voir [Mounin, G., 1972], p. 172.

⁵ Suite à des discussions qu'il avait eues avec Chomsky en 1950, la notion de « transformation » est proposée pour la première fois par Harris en 1951 dans un article de la revue *Language* afin de servir à l'analyse du discours et non pas à l'analyse de la phrase en unités linguistiques. Voir les retranscriptions d'entretiens avec Chomsky que fournit [Steiner, G., 1971, 2002], pp. 140 *sqq.* C'est seulement à partir de 1957 que la notion de « transformation » est appliquée par Harris à la structure de la phrase en elle-même. Cette notion est donc déplacée et transférée par Harris d'un niveau linguistique macroscopique à un niveau plus microscopique.

⁶ Voir [Hutchins, J., 1997a, 2003], p. 7.

⁷ Harris reprend ce terme à la théorie des machines.

son doctorat en linguistique soutenu en 1955 sur l'« Analyse transformationnelle » à l'Université de Pennsylvanie, donne un statut fermement hypothético-déductif à ces nouveaux construits formels que sont les « grammaires universelles »¹ ou « grammaires de transferts ». C'est bien là qu'il rejoint nettement une approche de type modélisation mathématique. En effet, afin de contrer les positions béhavioristes et pavloviennes du psychologue américain B. F. Skinner sur l'acquisition du langage chez l'homme², Chomsky reprend et modifie la notion de « grammaire de transformation », forgée auparavant par son maître, pour concevoir ce qu'il appelle un « troisième modèle » capable de récuser tous les modèles empiristes, et *a posteriori*, d'acquisition de la compétence linguistique.

Le troisième « modèle » : les choix épistémologiques de Noam Chomsky

Chomsky fait en effet passer la problématique de la formalisation de la langue, d'une question de traduction et d'analyse structurale descriptive, conçue en vue d'une traduction, à une question de synthèse et de recherche d'universaux formels sous forme de règles de transformation. Dans un entretien privé avec George Steiner remontant à 1969, il lève toute ambiguïté en précisant le point suivant :

*« Harris, au fond, considère les transformations comme une relation définie sur des phrases qui ont été pleinement analysées avec des méthodes comme celles de son livre de 1951, i. e. comme une sorte de prolongement de la linguistique descriptive. Mon point de vue a été de prime abord assez différent [...] Où je m'écartais de Harris, c'était dans mon idée de la place des transformations dans le tableau d'ensemble. Pour moi, elles étaient partie intégrante du système permettant d'engendrer des phrases, de donner en premier lieu une explication analytique ou descriptive. »*³

C'est donc la raison pour laquelle, passant d'une approche analytique et descriptive à une approche synthétique et explicative, Chomsky adopte explicitement, et dès 1956, le terme de « modèle » qu'il apparente alors en fait très étroitement à celui de « théorie »⁴ : « Etant donné par hypothèse l'ensemble des phrases grammaticales de l'anglais, recherchons quel type de mécanisme peut produire cet ensemble (ou, ce qui est équivalent, quel type de théorie rend compte de manière adéquate de la structure de cet ensemble d'énoncés) »⁵. Le modèle ou la théorie qu'il recherche est donc conçu à l'image d'un « mécanisme » de génération formelle et axiomatique.

¹ Dans [Hutchins, J., 1997a, 2003], l'historien anglais de la linguistique John Hutchins montre bien que même lorsque Bar Hillel parle de « grammaire universelle » ou d'« universaux », il ne s'agit toujours pour lui que d'invoquer la mise en place d'une *méthode d'analyse mécanique* partielle ne permettant jamais la complète régénération via un système formel axiomatique de toutes les phrases d'une langue acceptables du point de vue de la seule syntaxe : "certainly, there was no suggestion of a 'universal' syntactic representation and nothing corresponding to Chomsky's later idea of deep syntax", *ibid.*, p. 10.

² La thèse du psychologue Burrhus Frederick Skinner (1904-1990) est que nous acquérons la compétence linguistique par des séquences de stimuli (d'origine sociale), de corrections, de renforcements et de conditionnements du même type que ceux qu'on observe dans le réflexe conditionné à la Pavlov. Or, Chomsky objecte que, dans ces conditions, on ne peut expliquer le fait que nous puissions comprendre des phrases jamais entendues et même des phrases dont la structure apparente nous est inconnue. Voir [Chomsky, N., 1959, 1967, 2000], *passim* et [Steiner, G., 1971, 2002], p. 144.

³ [Steiner, G., 1971, 2002], p. 141.

⁴ Voir [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 13.

⁵ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 21.

Dans un premier temps pour asseoir sa suggestion, Chomsky critique l'approche empiriste, parce qu'informationnelle et statistique, de Claude Shannon et Warren Weaver¹ pour cette raison qu'une langue naturelle, comme l'anglais par exemple, ne présente pas un langage à états finis². En effet, un processus de Markov consiste à reproduire une phrase d'un langage en parcourant un diagramme d'états (d'une machine ou d'un automate virtuel) probabilisés de gauche à droite. Chaque transition entre états (de la machine supposée) représente l'ajout d'un mot, ou unité linguistique, à la phrase déjà constituée. Cette transition est pondérée d'une certaine probabilité. Si cet état admet une transition sous forme de boucle, cela signifie par exemple que l'on peut répéter plusieurs fois de suite le même mot³ dans une phrase, pour exprimer une emphase par exemple. À côté de cela, Chomsky donne alors l'exemple de plusieurs langages formels simples dont les phrases présentent des symétries ou des enchâssements de phrases identiques. Ces phrases présentent une allure nettement récursive. Or, on peut montrer que ce type de langage, pour être engendré par un alphabet simple, doit utiliser des parenthèses couplées⁴, ce qui ne peut être pris en charge par un automate séquentiel à états finis, surtout lorsqu'on le parcourt toujours de gauche à droite, comme c'est le cas pour le processus markovien de Shannon et Weaver. En effet, il n'y a pas de prise en charge de la récursivité⁵. De même, en anglais, des phrases subordonnées *Si* et *Sj* qui sont enchâssées dans des propositions conditionnelles du type « *If Si then Sj* » doivent avoir chacune un début et une fin formalisés par une sorte de parenthésage. Donc, comme de tels comportements récursifs ont parfois lieu dans le langage naturel, le modèle informationnel et markovien de Shannon et Weaver ne convient pas.

Finalement, ce que Chomsky reproche à ce modèle à états finis, c'est de ne pas permettre une formalisation correcte de la *structuration grammaticale* des phrases : « Nous avons vu qu'une théorie linguistique aussi limitée était inadéquate ; nous devons chercher un type de grammaire plus puissant et une théorie linguistique de forme plus 'abstraite'. »⁶ Comme pour Woodger et Lindenmayer, c'est donc la « puissance » de la théorie (en quelque sorte le rapport du nombre de faits décrits sur le nombre d'axiomes nécessaires) qui est le critère le plus important pour Chomsky. C'est à cela que l'on reconnaît sa préférence pour une théorie axiomatisée et générative⁷.

Cet appel à l'« abstraction » signifie pour Chomsky que l'on doit se méfier d'une approche épistémologique empirico-inductive qui ne tirerait ses idées que de l'observation, comme c'est le cas des modèles probabilistes informationnels. Le modèle informationnel n'est pas « abstrait », selon lui, puisque, pourrions-nous dire, il ne fait que représenter la *relation* empirique que vit concrètement la linguistique descriptiviste avec l'apparence la plus immédiate de son objet d'étude qu'est la langue. Un tel modèle de *relation* ne pourra donc servir à représenter directement les *objets* linguistiques ni surtout la *grammaire* qui, en intégrant les différents niveaux

¹ Qui, dans *The mathematical theory of communication* (Urbana, 1949, cité par [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 22) proposaient un modèle de construction des phrases par processus de Markov à états finis. On peut supposer que Chomsky vise en fait plus précisément ici les suggestions de ses collègues Jakobson et Halle.

² [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 27.

³ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 22-23.

⁴ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 25, note 6.

⁵ En fait, Chomsky signale que l'on pourrait artificiellement prendre en compte la récursivité au moyen d'un automate à états finis, notamment en ajoutant des bouclages et des conditions sur le nombre *n* de bouclages. Mais cela supposerait de spécifier par avance la longueur maximale d'une phrase, ce qui, est selon Chomsky, une « l'imitation inutile » : « L'important est qu'il existe des procédures de formation des phrases dont les grammaires à états finis sont intrinsèquement incapables de rendre compte », [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 26. C'est dans de telles argumentations étonnantes que l'on voit le choix *a priori* de Chomsky pour l'élégance mathématique, la puissance et la généralité des modèles aux dépens de leur éventuelle praticabilité opérationnelle.

⁶ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 27.

⁷ Voir également [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 39.

d'enchâssements linguistiques, joue déjà avec le *sens* et la logique intrinsèque du discours. À ce titre, l'idée que le modèle saisit sous une forme d'« intuition » la réalité linguistique reste prépondérante pour Chomsky¹. C'est un candidat pour une théorie mécaniste et explicative.

Assez logiquement donc, le deuxième modèle que se propose mais que critiquera aussi Chomsky est celui qui repose sur l'analyse graduelle, par niveaux, des phrases en *constituants grammaticaux* de plus en plus élémentaires : au niveau le plus abstrait, une phrase est ainsi toujours constituée d'un syntagme nominal et d'un syntagme verbal ; le syntagme nominal est constitué d'un article et d'un nom ; le syntagme verbal est quant à lui constitué d'un verbe et d'un autre nom ; enfin, les articles, les verbes et les noms peuvent être spécifiés au point d'en venir à être représentés par des articles, des noms et des verbes précis². C'est précisément cette dernière forme, la « séquence terminale » qui constitue la phrase proprement dite, dans son caractère concret.

Et là est l'essentiel pour le rapprochement avec Lindenmayer : une phrase peut donc toujours être représentée par l'arborescence de sa décomposition grammaticale graduelle³. À chaque étape de la décomposition, Chomsky considère que l'on applique ce qu'il appelle des « règles de réécriture »⁴ afin de parvenir à l'étape suivante de cette formulation de moins en moins abstraite de la phrase. Chomsky montre alors que ce modèle de « réécriture » est plus « puissant » que le modèle de Markov. En effet, en droit, il permet la recombinaison concrète de tout type de phrase à partir de son niveau linguistique le plus abstrait.

Cependant, Chomsky trouve un certain nombre de limitations à ce premier modèle génératif. La critique principale qu'il formule est celle qui consiste à faire remarquer que, dans ce genre de modèle visant à construire une structure grammaticale correcte à partir d'éléments finaux qui ne sont pas eux-mêmes déjà structurés, l'ordre des opérations de réécriture est crucial⁵. Or, un tel ordre des opérations ne peut pas être formalisé commodément dans ce genre de grammaire à simple réécriture et affectant un changement de niveau linguistique. En fait, même s'il adopte une approche par les niveaux linguistiques, et cela pour contrer la modélisation purement phénoméniste et informationnelle de Shannon (trop déracinée en ce sens), Chomsky ne pense pas que l'on puisse commodément voir émerger une structure grammaticale de ce qui ne serait pas déjà structuré, dès le départ : pour lui, si « nous abandonnons l'idée que des niveaux supérieurs sont littéralement construits à partir d'éléments de niveaux inférieurs, alors il devient beaucoup plus naturel de considérer des systèmes de représentation, même aussi abstraits que la structure transformationnelle (où chaque énoncé est représenté par la suite des transformations par lesquelles il est dérivé d'une séquence terminale de la grammaire syntagmatique) comme constituant un niveau linguistique »⁶.

C'est pourquoi une « grammaire transformationnelle » sera une adaptation des grammaires à simples réécritures recomposantes ou décomposantes puisqu'on y partira toujours d'« éléments » pré-structurés, les « phrases noyaux » [*kernel sentences*], et non pas d'éléments simples comme l'article ou le verbe, etc. En fait, puisque l'émergence du structurel grammatical semble ne pas être aisément modélisable à partir des unités grammaticales atomiques, Chomsky réitère là le geste des mathématiciens et des logiciens du début du siècle en rapatriant entièrement les objets formalisés dans le structurel : le formalisme de la grammaire ne

¹ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 68 et 95.

² Voir [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 29.

³ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 30.

⁴ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 30 et 31.

⁵ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 40.

⁶ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 67.

représente alors que des transformations algébriques à l'intérieur de l'espace des phrases toujours déjà structurées¹. Comme l'individu formel dans les *Principia Mathematica* par exemple, l'individu grammatical (l'article, le verbe, etc.) est ici toujours déjà une classe. C'est une classe terminale de l'arborescence généalogique des classes. Il est donc de même nature formelle que les structures plus abstraites.

Finalement donc, ce qui peut caractériser les choix épistémologiques de Chomsky peut se définir en deux expressions : anti-phénoménisme et anti-réductionnisme. Comme les physiologistes ou les biophysiciens qui modélisent de façon non probabiliste et non réductionniste les phénomènes du vivant en partant directement de la dynamique du métabolisme au niveau cellulaire, c'est-à-dire d'un phénomène supposé receler en lui le cœur de ce qui fait la spécificité du vivant, et sans prétendre ainsi le voir émerger d'un modèle pris à un niveau seulement biochimique, Chomsky fait partir ses propres modèles à réécriture de ces sortes d'axiomes qu'il appelle les « phrases noyaux », c'est-à-dire de ce qui se donne d'emblée comme possédant une structure grammaticale élémentaire. Dans la modélisation des phénomènes linguistiques, c'est donc le « grammatical » qui joue pour lui un rôle analogue à celui que joue, par exemple chez Nicholas Rashevsky, le « physiologique » ou le « métabolique ». Chomsky ne modélise pas directement le *sens* de la phrase dans sa *construction intégrale ab initio*. Son modèle prend tout de même en compte le *sens grammatical* dans sa *constitution*, mais il est vrai seulement au titre de point aveugle persistant dans toute transformation équivalente et décomposante de la phrase par la grammaire. Ainsi, écrit-il que « les phrases noyaux sous-jacentes à une phrase donnée peuvent être considérées en un sens comme les 'éléments de contenu élémentaire' à partir desquels cette phrase est construite »². Il commente ce propos : « Autrement dit, un résultat de l'étude formelle de la structure grammaticale est d'amener au jour un cadre syntaxique qui peut supporter l'analyse sémantique. »³ C'est donc la prise en compte du *sens* sous une forme séminale toujours déjà donnée et le refus de tenter de le voir émerger mécaniquement de règles constitutives intégrales qui va ensuite logiquement susciter le problème de l'incarnation, de l'acquisition ou de l'innéité psychologique de telles « grammaires de transformation » chez l'homme⁴.

On pourrait enfin et également rapprocher cette épistémologie non-réductionniste de l'épistémologie organiciste de Waddington notamment lorsque ce dernier refuse d'attendre les résultats de la biologie moléculaire pour proposer une théorie du développement organique. De façon assez semblable, Chomsky écrit en 1957 : « Je pense que la conception selon laquelle la théorie syntaxique doit attendre la solution des problèmes de la phonologie et de la morphologie est insoutenable [...] ; et je pense qu'elle est entretenue par une analogie erronée entre l'ordre de développement de la théorie linguistique et l'ordre présumé des opérations dans la découverte de la structure grammaticale. »⁵

¹ Voir la définition détaillée d'une « transformation grammaticale » in [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 52-53.

² [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 123.

³ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 123.

⁴ Assez cohérent avec lui-même sur ce point, on sait que Chomsky va refuser jusqu'au bout de se faire une représentation de la genèse du sens et de la compréhension dans l'esprit humain puisqu'il va concevoir une sorte d'innéité pour sa « grammaire profonde ». Voir [Chomsky, N., 1965, 1971], pp. 69-90 : « §8 - Théorie linguistique et apprentissage ». Voir également la célèbre confrontation avec Piaget sur cette question in [Piattelli-Palmarini, M., 1975, 1979], *passim*.

⁵ [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 68. À comparer avec [Waddington, C. H., 1962], p. vii. Dans les deux cas, les auteurs refusent d'admettre qu'il faille « attendre » que la discipline de niveau plus fin (micro) ouvre la voie à leurs théories et à leurs modèles.

ANNEXE D

Caractéristiques de la « HP 9820 »

Ce n'est pas avec la série 9820 que HP commence sa diffusion de calculateurs programmables. Depuis le milieu des années 1960, en effet, avec sa première série de calculateurs, les HP 9100, la firme américaine propose déjà une prise en charge des expressions arithmétiques complexes, avec la notation polonaise inversée, cela au moyen de registres d'opérandes. De plus, des programmes incluant essentiellement des conditionnelles (IF...THEN...) avec cinq niveaux de sous-routines peuvent être écrits lignes à lignes et mémorisés¹. Mais ce qui est tout à fait nouveau dans la série 9820 tient au fait qu'elle présente un calculateur de bureau entièrement algébrique. C'est-à-dire que le rapport que l'on entretient avec la machine n'oblige plus l'utilisateur à abandonner sans cesse ses notations mathématiques formelles ou algébriques familières pour les rendre opératoires dans la machine : un compilateur² est intégré. On peut donc converser avec elle en gardant dans ce dialogue les notations usuelles : parenthèses, règles implicites usuelles sur l'ordre des calculs. Même en mode direct, c'est-à-dire non programmé, c'est désormais la machine qui s'occupe d'interpréter la formulation du calcul en notation inverse polonaise (RPN). Ainsi, grâce à un interpréteur, elle peut aisément rappeler à l'écran, c'est-à-dire décompiler, ce qu'elle a auparavant mémorisé sous format RPN. Les fonctionnalités de programmation sont également considérablement étendues. On y trouve de nouvelles instructions : « ENT » grâce à laquelle l'utilisateur du programme peut entrer une valeur³ sans qu'il lui soit nécessaire d'arrêter le programme pour intervenir directement dans la liste (ou listing), « PRT » commande une impression de résultat sur l'unique ligne de 16 LEDs (diodes électroluminescentes) de l'écran⁴, « GTO » commande un saut conditionnel (ou non) qui peut renvoyer à un numéro de ligne ou à un label, la flèche « → » commande l'assignation d'une valeur au contenu d'un registre même si ce qui précède la flèche est une expression algébrique complexe encore à évaluer et faisant intervenir d'autres registres mémoires (exemple : « $2 + 4.A \rightarrow C$ »). Enfin, une des grandes nouveautés de cette machine est la référence indirecte puisqu'on y trouve

¹ En 1968, le journal interne de HP s'exprime précisément en ces termes : « Maintenant nous disposons d'une nouvelle et puissante machine à calculer de bureau. Notre modèle 9100 A est davantage un ordinateur [*computer*] qu'un calculateur [*calculator*]. Il se pourrait bien que cela soit le « Premier Mot » d'une nouvelle lignée de machines à calculer [*calculating machines*] », [Hicks, D., 1995-2002], www.hpmuseum.org/hp9100.htm, p. 4. La politique de HP est donc de développer des calculateurs programmables de bureau accessibles à un plus grand nombre de professionnels non spécialisés en électronique ou dans le calcul numérique. Il ne s'agit pas d'une préfiguration du PC (*Personal Computer*) d'IBM car cette orientation particulière a ensuite poussé HP à miniaturiser ces machines programmables pour donner naissance aux calculettes programmables de poche et à courant continu (donc fonctionnant sur batteries ou piles) de type HP 35 puis HP 65. Au début des années 1970, les machines HP 9100 et 9800 sont conçues pour être d'abord des machines programmables certes, mais essentiellement à des fins de computations, donc des *computers* au sens strict.

² Un compilateur est un langage qui permet de traduire ce que l'on écrit sur la machine en langage évolué (c'est-à-dire un langage synthétique et formulaire) en un « langage machine », c'est-à-dire en un langage qui se trouve compréhensible et exécutable parce qu'il est lui-même assez directement traduisible en des états électroniques non ambigus. À partir de la fin des années 1950, le langage évolué le plus fréquent est le FORTRAN. Sur le FORTRAN, sa naissance en 1957 et son devenir, voir [Ramunni, G., 1989], pp. 160-163.

³ C'est l'équivalent de l'instruction « INPUT » en BASIC.

⁴ C'est l'équivalent de l'instruction « PRINT » en BASIC.

des registres R(i) numérotés de R(0) à R(172). Les registres R(i) et leurs contenus peuvent donc être appelés ou modifiés en fonction d'une expression encore à évaluer par le calcul (exemple : « $R(2+4.A) \rightarrow C$ »). Ces deux dernières propriétés, en particulier, justifient l'appellation de « calculateur pleinement algébrique » employée par HP pour désigner sa nouvelle machine. À titre indicatif, pour son programme de synthèse finale de 1976 (d'une longueur totale de 26 lignes¹), de Reffye se sert de 11 registres mémoires alors que les machines Monroe de l'époque, même si elles peuvent proposer en accès direct plusieurs fonctions mathématiques transcendantes assez complexes, ne présentent au mieux que deux registres mémoires et ne sont pas programmables. C'est bien en outre le caractère programmable de ces machines électroniques de bureau qui leur permet de servir à la conception de modèles de simulation. Comme nous l'avons vu, la programmabilité ajoute en effet la gestion d'opérations logiques à celle des opérations arithmétiques. Des modèles faiblement mathématisés, c'est-à-dire le plus souvent non analytiques, peuvent donc être supportés par de telles infrastructures².

¹ Il est publié dans l'article de 1976 sur une seule demi-colonne. Voir [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976].

² Les chercheurs en recherche opérationnelle avaient pris conscience de cette nouveauté et de ses avantages dès le début des années 1960, cela même en France, notamment sous l'impulsion de ces spécialistes en mathématiques descriptives qu'étaient M. Girault et G. Th. Guilbaud, professeurs à l'Institut de Statistique de l'Université de Paris ou A. Kaufmann, professeur à l'Université de Louvain, ainsi que des ingénieurs comme J.-P. Boss, ingénieur-conseil auprès de la Compagnie des Machines Bull, A. Le Garff d'abord conseiller informatique auprès de l'Etablissement de Recherche et d'Activité Pétrolière, puis ingénieur chargé du traitement de l'information chez ELF-Aquitaine, ou encore Robert Faure, ingénieur chez Bull, puis professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers : « Nous avons dit plus haut que c'est l'apparition des calculateurs électroniques qui avait répandu l'emploi des méthodes de simulation en économie. Sans entrer dans les détails de fonctionnement de ces machines, nous voudrions justifier ici cette assertion. Ce qui caractérise un modèle de simulation économique c'est l'intervention, en plus des opérations arithmétiques habituelles, d'un très grand nombre d'opérations logiques », [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1960, 1967], p. 101.