

## INTRODUCTION

Marie-José DURAND-RICHARD<sup>1</sup>

### ANALOGIE ET SCIENCE : UNE PROXIMITÉ QUELQUE PEU OCCULTÉE

Analogie et science : y aurait-il incongruité à vouloir rapprocher ces deux termes ? Correspondent-ils à des modes de pensée si radicalement étrangers l'un à l'autre qu'il soit vain de tenter d'en parler conjointement ?

L'analogie évoque plus souvent le sens commun ou les formes prélogiques de la pensée enfantine ou magique que la rigueur déductive du discours scientifique<sup>2</sup>. Parler d'analogie renvoie en effet à la notion de ressemblance, qui est plus volontiers associée aux fonctions rhétorique et poétique du langage qu'à sa fonction référentielle<sup>3</sup>. Et cette notion est suffisamment floue pour que le recours à l'analogie dans la démarche scientifique soit frappé de suspicion, introduisant une indétermination peu compatible avec l'affirmation de certitude dont la science est porteuse. Elle apparaît comme trop subjective, et donc comme trop diverse et trop hasardeuse, pour pouvoir intervenir dans un savoir soucieux d'explicitier les conditions de son objectivation et de son universalité. Si les figures de style en général participent de la richesse de la langue naturelle, elles se nourrissent des ambiguïtés d'une polysémie qui semble devoir être exclue du discours scientifique, dont l'idéal de transparence au monde vise bien davantage à l'univocité des significations. De ce fait, bien des traités de philosophie des sciences opposent analogie et raisonnement. Robert Blanché affirme par exemple que le « caractère foncièrement subjectif et incontrôlable de l'analogie lui retire toute portée cognitive »<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> mjdr@ai.univ-paris8.fr, Equipe MAATICAH, Université Paris 8, 93526 Saint-Denis Cedex, et REHSEIS, UMR 7596, Université Paris 7, 75251 Paris Cedex 05.

<sup>2</sup> Piaget, « L'épistémologie et ses variétés », pp.42-44 ; Lévi-Strauss, *La pensée sauvage*, pp. 13-35. Claude Lévi-Strauss affirme pourtant, p. 13, que la pensée dite « sauvage » ou « primitive » implique « des démarches intellectuelles et des méthodes d'observation comparables à celles de la science moderne », et qu'elle en diffère « moins en nature qu'en fonction des types de phénomènes auxquels elles s'appliquent ».

<sup>3</sup> Jakobson, *Essais de linguistique générale*.

<sup>4</sup> Blanché, *Le raisonnement*, p. 180.

Analogie et science fréquentent cependant des territoires communs. Le plus manifeste est celui de la diffusion scientifique, qui utilise souvent une présentation métaphorique pour donner à saisir certains points théoriques, tout en évitant une formalisation mathématique ou conceptuelle trop spécialisée pour un certain public. L'analogie est alors censée « donner à voir », tantôt en substituant le registre de la perception à celui de l'explication, tantôt en transférant les termes d'une théorisation déjà élaborée dans un autre domaine. Mais le terme même de « vulgarisation » dont ce type de présentation est alors qualifié est assez révélateur de la dévalorisation qui l'accompagne : elle procède d'un changement de registre jugé inadéquat vis-à-vis des exigences logico-déductives du discours scientifique.

Plus discrètement peut-être, l'analogie se trouve également mobilisée dans les manuels scolaires, par exemple lorsqu'une même équation, qu'elle soit ordinaire ou différentielle, permet de résoudre des problèmes relatifs à des grandeurs issues de champs théoriques différents. C'est ainsi qu'un manuel de physique indique, à propos de la vitesse d'une particule dans un champ électrostatique : « L'analogie avec l'expression de la vitesse d'un corps tombant en chute libre sans vitesse initiale est évidente. Le mouvement de la particule est un mouvement à accélération constante »<sup>5</sup>.

Est-ce bien une analogie qui permet de transférer ainsi l'analyse du mouvement d'une particule, du champ de la mécanique à celui de l'électrostatique ? Un physicien ou un mathématicien s'en défendrait, affirmant plutôt que le traitement commun de ces deux problèmes s'appuie non pas sur une analogie, mais sur l'élaboration d'un concept mathématique spécifique, dans ce cas celui de dérivée.

Quoi qu'il en soit, si la possibilité d'un traitement mathématique commun de différents problèmes repose sur une même formalisation, celle-ci va de pair avec des conditions d'interprétation qui sont d'autant plus passées sous silence que les domaines concernés sont des disciplines établies, fonctionnant comme « sciences normales » au sens de Kuhn<sup>6</sup>. Ni la quantification des phénomènes, ni la mathématisation d'un problème ne vont cependant de soi. Si la référence à l'analogie est exclue des théories scientifiques constituées, elle est bien plus explicite au moment de l'élaboration des concepts. Pourtant, qui dit présence ne dit pas forcément acceptation. Lorsqu'elle intervient dans la théorisation d'une question scientifique en voie de constitution, l'analogie n'est souvent convoquée qu'à titre de démarche heuristique, pour être congédiée le plus rapidement possible de l'édifice théorique lui-même. Comme le remarque W.H.

---

<sup>5</sup> Blain et al., *Physique, Terminale C*, p. 30.

<sup>6</sup> Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, p. 30.

Leatherdale, les auteurs qui insistent le plus sur son intervention dans les processus d'invention et de découverte sont précisément ceux qui lui refusent tout rôle théorique essentiel<sup>7</sup>.

Cette remarque est tout à fait pertinente : elle souligne que la distorsion initialement évoquée entre analogie et science provient précisément du fait qu'elles ne sont ni saisies au même moment, ni observées du même point de vue.

Affirmer que la science est une connaissance certaine présuppose de fait l'existence de catégories conceptuelles invariantes et stables, dans un monde envisagé comme naturel, pré-existant, où le sujet n'intervient finalement que dans la mise en œuvre des méthodes les plus adéquates à son déchiffrement. Ce monde est ainsi considéré comme indépendant de la connaissance, et le sujet comme indépendant du monde dont le discours scientifique est censé fournir la lecture. Véritable théorie du reflet<sup>8</sup>, cette image fictionnelle de la science telle qu'elle se donne à voir dans les théories achevées, n'en retient que sa volonté d'énoncer une vérité univoque qui, pour être rationnelle, n'en partage pas moins avec la vérité révélée la même revendication d'absolue transparence, qui en abolisse tout à la fois la contingence et la fonction symbolique de représentation. De fait, cette conception strictement logico-dénotative de la science, s'enracine dans la métaphore platonicienne : « l'intellect est à l'âme ce que la vue est au corps », et dans une assimilation entre connaissance, lumière et idée du Bien<sup>9</sup>. Relayée par la théologie chrétienne, renforcée par le positivisme, elle a longtemps alimenté l'ambition d'une langue parfaite à retrouver ou à reconstruire, en purifiant la pensée de l'imperfection des langues naturelles<sup>10</sup>. L'empirisme logique a poussé à son paroxysme cette ambition philosophique d'un discours scientifique réduit à une syntaxe et une sémantique, avant que le théorème d'incomplétude de Gödel ne vienne en ruiner l'utopie. Ce théorème atteste que la perfection conférée aux langages artificiels par la rigueur de leur syntaxe logique les enferme radicalement à l'intérieur de ces langues vulgaires que philosophes et logiciens ont longtemps projeté de contenir. Il n'empêche que cette utopie nourrit encore certaines théories linguistiques<sup>11</sup>, et qu'elle n'a pas disparu de l'horizon du discours scientifique.

De plus, au cœur même de la science se sont progressivement imposées au cours du siècle dernier des méthodes probabilistes dont la fonction modélisatrice renvoie à l'évaluation du certain, à la mesure du risque, plutôt qu'à une simple description des phénomènes. Dans ce cadre, il est clair que

---

<sup>7</sup> Leatherdale, *The Role of Analogy, Model and Metaphor*, p. 62.

<sup>8</sup> Schaff, *Langage et connaissance*, p. 50.

<sup>9</sup> Borella, *Penser l'analogie*, pp. 143-157.

<sup>10</sup> Eco, *La recherche de la langue parfaite dans la culture européenne*.

<sup>11</sup> Piatelli-Palmarini, *Théories du langage, théories de l'apprentissage*.

le caractère univoque, logico-déductif et strictement référentiel d'une théorie scientifique n'est effectif qu'une fois précisées les conditions spécifiques de sa pertinence. Plutôt que de refléter l'essence ou la nature des phénomènes, elle renvoie avant tout à la méthodologie définie pour les appréhender.

Assimiler le discours scientifique à cette épistémologie de la coïncidence<sup>12</sup> relève donc d'une philosophie réaliste coextensive de la forme « normale » de la science classique. Cette assimilation néglige le moment d'élaboration collective de significations nouvelles, tel qu'il s'établit par exemple entre le moment où Copernic propose le système héliocentrique comme hypothèse et celui où Galilée en affirme la réalité. Cet oubli n'est pas dépourvu d'une dimension idéologique devenue d'autant plus manifeste que différentes approches, comme celles de l'herméneutique<sup>13</sup> ou de la sociologie des sciences<sup>14</sup>, tendent à réintégrer comme significatives les pratiques de la science et les interprétations du discours scientifique comme facteurs constitutifs du processus de structuration théorique. En ce sens, l'universalité de la science apparaît davantage comme visée que comme donnée imprescriptible : elle n'existe pas *a priori*, mais se construit elle-même dans le jeu constant des tensions et des échanges entre différentes sphères culturelles, qu'elles soient académiques ou praticiennes, locales ou transnationales.

Ce n'est donc pas lors de l'énonciation des théories établies que la complexité de la démarche scientifique se laisse le mieux appréhender, mais bien plutôt dans les moments où elle hésite, où l'effort de rationalisation qu'elle représente tente d'intégrer à la réflexion des questionnements jusqu'à négligés ou ignorés. C'est dans ces moments où la science apparaît comme un double processus de projections et de confrontations, qu'elle peut être saisie dans le dynamisme de son historicité. C'est dire qu'elle ne se contente pas d'exprimer au mieux la réalité d'un monde dont la seule présence donnerait accès à une classification des « choses en soi ». Son élaboration s'applique d'abord à caractériser les phénomènes qu'il s'agit de prendre en compte, et donc à constituer les catégories elles-mêmes. La science œuvre ainsi, non pas à la lecture d'un monde déjà-là, mais à l'édification d'une représentation rationnellement structurée, portant sur des objets et des relations inscrits dans des situations contextuelles spécifiques, et qui vont signifier une réalité que ses acteurs-auteurs pourront ainsi s'approprier.

C'est donc plutôt dans la plasticité d'une science envisagée dans ses pratiques que le recours à l'analogie peut être pleinement reconnu, puisqu'il fait partie des tentatives visant à intégrer de nouvelles perspectives au champ

---

<sup>12</sup> Chartier, *Au bord de la falaise*, p. 16.

<sup>13</sup> Salanskis, Rastier, et Scheps, *Herméneutique : textes, sciences*.

<sup>14</sup> Bourdieu, *Science de la science et réflexivité*, pp. 97-98; Latour, *Nous n'avons jamais été modernes*.

des connaissances acquises, à la fois en amont et en aval du processus de théorisation scientifique. Dans cette optique, la polysémie de la langue naturelle, cette capacité des mots à prendre un sens nouveau qui coexiste avec l'ancien, apparaît plutôt comme une richesse à explorer que comme un handicap à éliminer<sup>15</sup>. Elle offre précisément sa souplesse, reconnue comme un mécanisme puissant d'évolution des langues, à l'élaboration dialectique de nouvelles catégories conceptuelles. Examiner les analogies qui structurent cette polysémie procède de l'analyse des processus de production du sens attachés à l'élaboration des concepts scientifiques. Cette perspective permet d'appréhender les théories scientifiques en tant que représentations partagées. Elle met à jour les formes de contingence qui restent encloses dans les non-dits de métaphores qui restent présentes y compris dans les théories scientifiques considérées comme bien constituées. Elle renoue les liens entre discours et pratiques, et avec d'autres modes extra-scientifiques de questionnement. Plutôt que de se focaliser sur l'invariance des catégories conceptuelles, qui ne fait que signifier la constance provisoire du sens, et donc du contexte où il se déploie, elle se propose d'en examiner les transformations, les lieux de « plisure conceptuelle »<sup>16</sup>, et d'en analyser l'objectivation comme processus d'appropriation symbolique de nouveaux champs de savoir, constitutives de nouvelles manières de voir et de nouvelles fonctionnalités<sup>17</sup>.

#### LA PLACE DE L'ANALOGIE DANS L'ECONOMIE LINGUISTIQUE

Quels que soient ses modes d'appropriation du réel, toute science s'exprime par un discours, élaboré au sein de la langue ordinaire, usant de signes et de symboles dont le sens est fondé sur des pratiques spécifiques, elles-mêmes pensées par le biais de cette même langue. Saisi dans son historicité, le discours scientifique apparaît comme un lien social spécifique tendant à affirmer comme certitude une référence qui s'y trouve d'abord construite comme représentation signifiante. La conception de la science est ainsi marquée par la conception du langage et par les présupposés de son rapport à la réalité. Se démarquer du préjugé positiviste selon lequel le discours scientifique dit une réalité intangible suppose que soit prise en compte la fonction symbolisante du langage. Quel que soit l'événement, il ne se constitue en « fait » qu'à partir du moment où il est dit, où il fait sens, où il est signalé, retenu et où quelque information s'échange à son sujet. Comme

---

<sup>15</sup> Victorri, et Fuchs, *La polysémie, construction dynamique du sens*, pp. 45-58.

<sup>16</sup> Passeron, « Analogie, connaissance et poésie », pp. 31-32.

<sup>17</sup> Cassirer, *Substance et fonction*.

le langage, le discours scientifique donne à voir le monde au sens où il le représente, et c'est le consensus relatif à ce qu'il choisit de re-présenter qui confère une relative stabilité à la signification de ses termes. Celle-ci est elle-même fonction de la stabilité provisoire des formes d'appréhension du monde partagées à une période et dans un milieu donnés. Un exemple caractéristique de ce phénomène est spécifiquement observable dans l'accord qui s'établit sur les hypothèses d'une théorie scientifique : cet accord joue un rôle clé dans le processus qui permet au nouvel édifice théorique d'être entendu avant d'être collectivement accepté.

L'analogie intervient précisément au cœur de la langue, comme support opératoire du transfert métaphorique qui permet d'appréhender l'inconnu à partir du connu, ou d'établir des relations nouvelles entre des choses connues. C'est elle qui permet de parler, par exemple, du « dérapage du dollar » ou des idées « vertes ». L'analogie est plus fondamentale dans la mesure où elle structure la métaphore, mais elle reste implicite dans la plupart des cas. Et c'est bien cet « implicite » que ce volume se propose de préciser pour mieux l'analyser, en étudiant ses différents niveaux d'intervention dans l'évolution du langage en général, et du discours scientifique en particulier.

Quand le transfert métaphorique intervient au niveau lexical, il supplée d'abord à une absence de dénomination. Il autorise ainsi à parler d'une « aile de voiture », ou à qualifier de quantités « moindres que rien » ou « impossibles » des écritures initialement aussi insolites que  $(-3)$  ou  $\sqrt{-1}$ . La métaphore est directement observable dans ce transfert de sens : elle opère en empruntant un terme dans un champ sémantique connu, ici celui de quantité, pour rattacher un élément nouveau à une connaissance antérieure, voire à signifier la nouveauté. La présence de l'analogie est plus souterraine, et souvent confondue avec celle de la métaphore, qui n'en est pourtant que l'effet. L'analogie se manifeste comme une sorte de logique sous-jacente de la comparaison, à ceci près qu'elle reste dans le non-dit et ne joue que localement. C'est précisément ce non-dit qui permet d'ailleurs d'éluder les interrogations relatives à la pertinence de ce transfert<sup>18</sup>. Saussure reconnaît l'analogie comme principe général de cohésion et d'économie linguistique, essentiel à toutes les créations de la langue<sup>19</sup>, et les linguistes la considèrent plus généralement comme un des principaux mécanismes de renouvellement du sens. Elle permet effectivement d'étendre le domaine lexical, dès lors que la « métaphore vive » qu'elle soutient, et qui d'abord transgresse les catégories établies, se trouve intégrée par l'usage comme un terme du

---

<sup>18</sup> Borella, *Penser l'analogie*, p. 11.

<sup>19</sup> Saussure, *Cours de linguistique générale*, pp. 221-250.

langage courant, devenu « métaphore morte »<sup>20</sup>. C'est dire que l'écart lexical qu'engage la métaphore ne fonctionne pas seulement comme une facilité dans le champ de la dénomination : s'il peut apparaître comme simple audace, voire comme impertinence, dans le domaine poétique, il engage un choc sémantique qui transgresse aussi la cohérence prédicative et le domaine des références, et cette transgression prend un effet de sens d'autant plus fort que l'écart sémantique est plus grand entre entité substituante et entité substituée. Ainsi, comme l'a fort bien montré Paul Ricœur dans *La métaphore vive*, toute transgression nominale se répercute aussi bien sur la structure logique des énoncés que sur la référence du texte tout entier. Hors du champ poétique, l'intégration au lexique ne peut avoir lieu qu'une fois rétablie une cohérence nouvelle entre ces trois niveaux de « signifiante », tels que les désigne Jean Ladrière : celui du mot, celui de l'énoncé et celui du discours<sup>21</sup>. Et c'est précisément dans les interactions entre ces trois niveaux sémantiques que se constitue l'émergence des significations nouvelles. L'analogie n'intervient donc pas seulement au niveau de la dénomination, elle bouscule l'ordre catégoriel initial pour en reconstruire un autre, dans une tension qui s'éprouve entre la nécessité logique et le souci référentiel propre au langage<sup>22</sup>, et que Ricœur qualifie de « véhémence ontologique »<sup>23</sup>. Cette recomposition du langage autour de nouveaux codes lexicaux ne se contente pas d'en renouveler les catégories, elle intègre la référence à de nouvelles pratiques et à de nouveaux codes culturels, impliquant ainsi, dans le discours scientifique plus encore que dans le langage en général, un engagement philosophique quant à la réalité extra-linguistique qu'il s'agit de signifier. Pour reprendre l'exemple précédent, l'acceptation de  $\sqrt{-1}$  comme nombre conduit à la fois à renoncer à l'universalité de la relation d'ordre entre tous les nombres, et à leur représentation sur une droite, pour les référer à des points dans un plan.

Des études récentes menées en psychologie<sup>24</sup> confirment la dynamique que l'analogie met en œuvre entre les différents niveaux de structuration et de signification du langage. Elles rejoignent d'autres études d'histoire et de philosophie des sciences pour souligner son rôle primordial dans les processus d'élaboration de connaissances, et pour mettre l'accent aussi bien sur ses qualités opératoires que sur ses potentialités créatrices<sup>25</sup>. Cette

<sup>20</sup> Turbayne, *The myth of metaphor*, pp. 54-70.

<sup>21</sup> Ricœur, *La métaphore vive*, p. 377.

<sup>22</sup> Kristeva, *Le langage, cet inconnu*, pp. 11-23.

<sup>23</sup> Ricœur, *La métaphore vive*, p. 313.

<sup>24</sup> Sander, *L'analogie, du naïf au créatif*. Tijus, *Métaphore et Analogie*.

<sup>25</sup> Les recherches sur ce thème se sont multipliées au cours des vingt dernières années. En voici quelques exemples : le séminaire de philosophie anglaise, animé par G. Brykman dans les années 1990 à l'Université de Nanterre, a traité des « Analogies et métaphores chez

perspective permet de se dégager d'une conception trop strictement référentielle du discours scientifique, empruntée aux systèmes formels, pour lui restituer sa fonction de discours historiquement construit. Resituer l'historicité de la démarche scientifique permet de se démarquer de l'illusion cartésienne ou piagétienne d'un « sujet épistémique » radicalement solitaire, pour le rétablir dans sa dimension d'être parlant, et pour ressaisir le savant comme acteur social. L'élaboration du discours scientifique se nourrit non seulement de l'innovation créatrice d'individus spécifiques, mais de l'élaboration collective de visées référentielles socialement partagées, et qu'il s'agit d'inscrire dans et par le langage, sans renoncer aux impératifs logiques qui lui sont propres. C'est ainsi par exemple qu'à partir de Copernic et Galilée, l'analogie macrocosme-microcosme, qui appréhendait les phénomènes terrestres à partir d'une cosmologie, va progressivement lâcher prise face à toutes les conséquences d'autres analogies, examinant au contraire les objets célestes avec le même regard que les objets terrestres. De ces confrontations naissent les schèmes et les canons grâce auxquels peuvent être étayés rationnellement les nouveaux usages d'une lunette, devenue « astronomique »<sup>26</sup>. L'adéquation qui s'établit ainsi entre certaines mises à l'épreuve du monde et leurs représentations, érigées en vérité, en légitime la pérennisation. Se substituant au monde proprement dit, ces représentations pourront de surcroît étendre leur impact pour restructurer d'autres champs conceptuels, toujours par le biais du langage et des transferts de signification, en s'appuyant sur de nouvelles analogies interprétatives, qui, faute d'être repérées pour en expliciter les limites, élargissent souvent les représentations ainsi construites en de nouvelles idéologies.

#### LE TRAVAIL DE L'ANALOGIE DANS LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE

L'analyse que fournit Paul Ricoeur des trois niveaux où intervient l'analogie dans le processus de transformation des significations – niveau du lexique, de l'énoncé et du discours – sert donc ici de fil directeur pour situer le rôle de l'analogie dans la démarche scientifique sur un autre registre que celui de la subjectivité. Elle permet d'en réhabiliter le fonctionnement, en

---

Berkeley » ; les conférences de M. Dascal, données à l'EHESS en 1994 portaient sur le thème : « Métaphore et cognition » ; la thèse de Léna Soler sur le fonctionnement de l'analogie dans l'élaboration de la physique quantique s'inscrit dans le prolongement de l'ouvrage d'O. Darrigol, *From c-Numbers to q-Numbers. The Classical Analogy in the History of Quantum Theory* de 1992 ; Bernadette Bensaude-Vincent et Martha Spranzi Zuber ont également organisé en 2000 un colloque sur « L'analogie dans les sciences » à l'université de Nanterre. .

<sup>26</sup> Kuhn, *La révolution copernicienne*.

l'examinant non pas seulement au moment du transfert lexical, mais dans le jeu constant des interactions entre ces trois niveaux, dont il s'agit de restituer la présence et d'examiner les interdépendances. C'est en accordant autant d'importance à ces trois niveaux que la démarche scientifique peut être appréhendée, non pas dans l'isolement de son édifice théorique, mais comme processus de construction de sens, ressaisi dans sa fonction symbolisante du fait même de son inscription dans la langue.

Si, dans le champ lexical, la prise en compte de phénomènes nouveaux se traduit d'abord par un transfert de mot – ou de signe – qui manifeste l'ambition d'étendre des propriétés opératoires ou fonctionnelles à de nouveaux objets, il est d'abord urgent de rétablir pour ces opérations une logique que le transfert lexical vient précisément bousculer. Ainsi, faire des calculs sur des signes tels que  $(-3)$  conduit à repenser les relations entre ordre et opérations : dès que le négatif se trouve pris en compte, la différence  $a-b$  peut exister même si  $a$  est inférieur à  $b$ , tandis que l'égalité de deux rapports, comme  $\frac{+3}{-2} = \frac{-3}{+2}$  conduit à renoncer à avoir le même ordre de

grandeur entre le numérateur et le dénominateur. Le caractère heuristique de cette démarche fait déjà l'objet de dénominations différentes : qualifié d'« invention » pour caractériser la méthode de travail, il devient « découverte » pour désigner les objets susceptibles d'être ainsi approchés. Valorisée en tant que moment créatif, cette interaction entre transfert lexical et logique de l'énoncé se trouve minimisée au regard du processus d'édification théorique. Blanché, par exemple, la qualifie de « péripétie de la découverte », n'intéressant que l'histoire des consciences individuelles<sup>27</sup>.

La résolution des contradictions apparues du fait d'un transfert lexical passe aussi par une redéfinition des objets, de leurs relations et de leur domaine de légitimité, qui soit susceptible d'étendre la portée de l'édifice théorique et d'en maintenir la cohérence. Ce travail a été particulièrement analysé par Mary Hesse, notamment sur l'exemple de la conception ondulatoire de l'eau, du son et de la lumière, où sont examinés les multiples éléments possibles de leur caractérisation, allant du mode de production des ondes à la spécification du phénomène vibratoire. Dans ce repérage, la difficulté consiste justement à préciser jusqu'où l'analogie reste valide, en distinguant là où les relations sont préservées et là où elles ne le sont pas. Mary Hesse les qualifie respectivement d'analogies positives, et d'analogies négatives, qualifiant d'analogies neutres celles qui restent à explorer<sup>28</sup>.

Une fois suggérées des relations dont la validité reste à établir, leur spécification s'élabore donc dans un échange dialectique entre la nécessité de

<sup>27</sup> Blanché, *Le raisonnement*, p. 8.

<sup>28</sup> Hesse, *Models and Analogies in Science*, pp. 8-32.

cohérence logico-déductive du discours scientifique et sa portée prédictive sur les phénomènes qu'il se propose d'appréhender. De fait, le référent de l'énoncé n'attend pas pour être lui aussi réinterrogé par le transfert lexical, qui bouscule d'emblée les catégorisations du réel antérieurement établies. C'est seulement *a posteriori* que la réduction épistémologique qu'exige leur restructuration est considérée comme la « découverte » d'un déjà-là, leurs présupposés interprétatifs n'étant plus ré-interrogés. Marc Dorolle par exemple, à propos des recherches de caractérisation du vivant, depuis Lamarck et Cuvier jusqu'à Claude Bernard et Darwin, insiste sur la fécondité dont sont porteuses les analogies qui ont permis de concevoir la fonction glyco-génique du foie, puis d'élaborer de nouvelles taxinomies. Mais il n'aborde pas les conséquences du transfert de significations qu'implique l'usage du vocabulaire chimique dans le domaine organique, notamment les conséquences de l'abandon des significations antérieures qu'il suppose<sup>29</sup>.

C'est pourtant du fait même de son caractère prospectif que cette troisième étape réinterroge le fondement même de la réalité, et que l'intervention de l'analogie se joue sur un mode éminemment conflictuel, dévoilant au grand jour les fragilités de l'objectivation du discours scientifique. C'est au sujet du crédit symbolique accordé aux nouvelles représentations ainsi constituées que Cassirer affirme, à propos de la logique d'Aristote, « [qu']au niveau de ses principes généraux, [elle] est l'expression et le reflet fidèle de sa métaphysique »<sup>30</sup>. Plus près de nous, les débats qui accompagnent les recherches en l'intelligence artificielle depuis les cinquante dernières années en sont particulièrement représentatifs. Les enjeux portent sur la légitimité d'appliquer une conception purement opératoire à des domaines que la science classique, en se réservant l'étude de la « matière inerte », avait exclus de ses analyses : comment utiliser la même grille d'analyse computationnelle à des systèmes « naturels » aussi bien qu'« artificiels », ou à des systèmes naturels dits de niveau « inférieur », ceux qu'étudient les neuro-sciences, aussi bien qu'à des systèmes dits de niveau « supérieur », dont traitent la psychologie, la linguistique, la philosophie, ou la sociologie. L'idée d'une computationnalité de la pensée, souvent ramenée à la métaphore hobbesienne « Penser, c'est calculer »<sup>31</sup> achoppe précisément sur la question de décider à quel niveau l'appliquer pour qu'elle soit pertinente – le cerveau ? l'esprit ? la pensée ? – et pour pouvoir situer adéquatement le « lieu » de l'interprétation de ses calculs aveugles<sup>32</sup>. Le vocabulaire utilisé, qui substitue les termes de « cognition »,

<sup>29</sup> Dorolle, *Le raisonnement par analogie*, pp. 57-82.

<sup>30</sup> Cassirer, *Substance et fonction*, p. 14.

<sup>31</sup> Parrochia, *Qu'est-ce-que penser / calculer ?*

<sup>32</sup> Durand-Richard, « Des lois de la pensée aux constructivismes ».

« modélisation », « simulation », à ceux de « connaissance », « compréhension », « explication », témoigne d'un effacement de la notion de vérité et d'un renforcement du critère d'efficacité opératoire, qui va bien au-delà des intentions d'un Gonseth proposant d'installer l'analogie au cœur d'une méthodologie de l'action efficace<sup>33</sup>.

Cette troisième étape, inséparable de toute nouvelle forme de théorisation scientifique, est bien la plus délicate, celle dont la légitimité peut se révéler la plus contestable, sinon la plus contestée, en tous cas la plus aventureuse. Il reste toujours problématique d'examiner jusqu'où peuvent s'exercer les analogies mobilisées pour appréhender le « réel », en tant qu'il est à connaître. Cette question rencontre inévitablement des présupposés, d'ordre philosophique, sur la nature des phénomènes envisagés. Les péripéties de l'« affaire Sokal-Bricmont » constituent en ce sens une illustration significative des conflits suscités par l'absence d'une frontière nette et définitive entre ce qui relève de la science et ce qui n'en relève pas<sup>34</sup>, et des luttes symboliques qui se jouent pour en stabiliser provisoirement les limites. Car si une théorie scientifique s'énonce déductivement, non seulement elle n'est jamais à l'abri d'interrogations persistantes quant à la signification de certains de ses termes, mais toute science vivante se renouvelle précisément à partir des lieux même où elle a laissé des interrogations en suspens. Mais surtout, la ré-interprétation des phénomènes dans un nouveau cadre théorique affecte fondamentalement les rapports entre les trois éléments que Piaget définit comme constitutifs de tout processus de connaissance : le sujet, l'objet, et la relation qui s'établit entre eux<sup>35</sup>. C'est exactement là que se manifeste l'engagement philosophique qualifié par Paul Ricœur de « véhémence ontologique ». Le mécanisme que Hobbes applique à la société<sup>36</sup>, la métaphore du Dieu horloger<sup>37</sup>, ou l'attribution d'une intelligence aux ordinateurs<sup>38</sup> en sont des exemples paradigmatiques. Ils témoignent des tentatives d'élaboration de représentations collectives qui tendent à structurer les relations de l'homme et de la nature, et à servir de cadre aux pratiques sociales de la science. Nier l'existence de ce processus, rejeter sa possibilité hors du champ des préoccupations de la science, revient à lui refuser le statut d'un savoir collectivement interrogeable, à l'exclure du champ social, voire à lui conférer quelque fonction sacrée. *A contrario*, n'est-il pas pertinent de se demander si ce n'est pas plutôt cette polysémie, née d'une métaphorisation multiple des concepts scientifiques, qui leur donne, au-delà de la théorie elle-

<sup>33</sup> Gonseth, « L'analogie en tant que méthode de connaissance », p. 114.

<sup>34</sup> Alliages, « Impostures scientifiques ».

<sup>35</sup> Piaget, *Le langage et la pensée chez l'enfant*, p. 3.

<sup>36</sup> Hobbes, *Léviathan, Traité de la matière*.

<sup>37</sup> Descartes, « Lettre à Mersenne, 15 avril 1630 », p. 666.

<sup>38</sup> McCorduck, *Machines who think*, p. xi.

même, un effet social de vérité ? N'est-ce-pas à ce moment précis que le concept devient « métaphore morte », au sens où se trouve provisoirement stabilisée son intégration dans un réseau de représentations socialement signifiantes ?

L'identification des différents niveaux où l'analogie alimente les fonctionnements conceptuel et sociétal du discours scientifique, pour être essentielle au propos de cet ouvrage, ne saurait à elle seule en épuiser le projet. Ce repérage ne suffit pas à rendre compte des attitudes qu'adoptent les scientifiques à son propos. Au delà de leur propre subjectivité, leur position se soutient d'une distorsion entre le rôle effectif de l'analogie et le statut qu'ils lui reconnaissent, et qui se trouve historiquement situé. La perspective historique de ce volume incite à examiner de plus près l'impact du statut accordé à l'analogie sur l'importance qui lui est effectivement attribuée.

#### HISTORICITE DU STATUT DE L'ANALOGIE

Dès lors que les catégories de pensée sur lesquelles s'applique l'édifice théorique apparaissent à leur tour dans la dynamique de leur élaboration, la restitution de cette dynamique atteste des difficultés qui se jouent pour conjuguer la prise en compte de phénomènes nouveaux et l'existence d'anciennes théories logiquement structurées sur la base d'hypothèses dont l'évidence devient problématique. Là où de nouvelles ressemblances sont envisagées, il ne s'agit pas pour le scientifique de lâcher la proie pour l'ombre. Dès que s'engage cette projection vers l'inconnu, la question se pose de sa légitimité. Et ce type de projection peut à son tour être diversement interprété, selon la conception philosophique de l'activité humaine qui est elle-même un fait historique.

Foucault, dans *Les mots et les choses*, s'était déjà appliqué à montrer combien le savoir n'est pas seulement issu de l'élaboration d'un édifice rationnel, mais d'une « archéologie » constituée des critères selon lesquels « une culture éprouve la proximité des choses », et qui fondent les systèmes d'invariance autorisant leur comparaison. Ce faisant, il examine l'historicité du statut de l'analogie, saisie comme mode de structuration de la ressemblance. L'accord qui s'établit autour de tels invariants est ainsi marqué par des discontinuités essentielles, et Foucault analyse les modifications qu'elles impriment aux systèmes de ressemblance. Il examine en particulier en quoi les présupposés de la science classique la distinguent des conceptions du savoir de la Renaissance d'une part, et de la période contemporaine d'autre part.

Là où 16<sup>e</sup> siècle prolonge la pensée médiévale, l'analogie s'affirme comme élément constitutif de l'organisation du savoir. Elle est censée

manifester l'harmonie qui organise la convenance universelle des choses. Celle-ci est conçue comme une proximité, dans un monde où microcosme et macrocosme sont envisagés comme duplications l'un de l'autre, et où les similitudes apparaissent comme les signatures visibles d'analogies invisibles, à la fois réversibles et polyvalentes. Le langage, assimilé à un système de marques au même titre que la Nature, y apparaît comme manifestation de la vérité : il est avec le monde dans un rapport d'analogie plutôt que de signification, et supporte un savoir conçu comme une herméneutique<sup>39</sup>. Comme l'indiquent les manuscrits de Léonard de Vinci :

« L'homme a été appelé par les anciens Microcosme, et certes ce terme est bien employé, car, de même que l'homme est un composé de terre, eau, air et feu, de même le corps de la terre. Si l'homme a les os, support et armature de la chair, le monde a les rochers comme supports de la terre ; si l'homme porte le lac du sang où le poumon se gonfle et se dégonfle dans la respiration, le corps de la terre a son océan qui, lui, croît et décroît toutes les six heures en une respiration cosmique ; si les veines partent de ce lac de sang, en se ramifiant dans le corps humain, de même l'océan remplit le corps de la terre d'une infinité de veines d'eau. Il manque les nerfs au corps de la terre ; car ils sont faits pour le mouvement, mais le monde, doté d'une stabilité perpétuelle, est sans mouvement et, étant sans mouvement, n'a pas besoin de nerfs. Mais pour tout le reste, ils ont beaucoup de ressemblance »<sup>40</sup>.

« En quinze figures, je t'exposerai la cosmographie du microcosme, dans le même ordre que suivit avant moi Ptolémée dans sa cosmographie, je ferai la division des membres comme il a fait celle des provinces, puis je décrirai l'office propre de chaque partie sous tous ses aspects, en te mettant sous les yeux l'indication de la figure et des fonctions de l'homme dans le mouvement local dû à ses membres.

Plaise ainsi à notre divin Auteur que je puisse démontrer la nature et les mœurs des hommes comme je décris leur forme »<sup>41</sup>.

Or, la pensée classique va précisément abandonner l'analogie à « l'homosémantisme du fou » et à « l'allégorie poétique ». Aux illusions du sens dont joue si bien Shakespeare dans *Le songe d'une nuit d'été*, le 17<sup>e</sup> siècle substitue une conception du langage où la question centrale devient l'étude des conditions de la représentation. La question de la signification s'y trouve renvoyée à celle des origines, tant historiques que conceptuelles. C'est la décomposition en éléments simples qui va fonder la capacité de transparence au monde, pour la connaissance comme pour le langage. La notion d'ordre se substitue à celle de ressemblance dans la structuration du

<sup>39</sup> Foucault, *Les mots et les choses*, pp. 32-57.

<sup>40</sup> De Vinci, *Traité de la peinture*, A 55 v, R 929, p. 254.

<sup>41</sup> De Vinci, *Traité de la peinture*, QU. AN. 1 r, FUMA 125-126, p. 251.

savoir. Dans une telle configuration, l'analogie ne peut plus intervenir qu'à la marge, comme signe de cet ordre à expliciter. Bacon et Galilée s'inscrivent aux deux pôles de cette transformation. Bacon, s'il instaure une nouvelle classification des savoirs et reconnaît le danger d'un usage non critique de l'analogie, lui conserve un rôle essentiel dans la recherche des invariances qui révèlent les formes vraies de la Nature. Taxinomies et classifications sont au cœur de sa méthodologie<sup>42</sup> : elles maintiennent l'activité du savant dans un travail de lecture du monde dont le 17<sup>e</sup> siècle va pourtant inverser les présupposés. Galilée, lui, retourne la perspective médiévale en décrivant cette fois la Lune et les satellites de Jupiter par des analogies avec la Terre, osant prétendre que l'expérience humaine puisse devenir signifiante dans les modes de lecture de l'univers<sup>43</sup>. Descartes agit lui aussi comme sujet lorsqu'il impose dans sa *Géométrie* le choix d'une unité de mesure, qui lui permet de substituer l'égalité algébrique à la proportion comme outil fondamental. Mais si le sujet pensant intervient dans l'élaboration des méthodes, il ne se vit pas comme créateur du savoir qu'il élabore : la signification des relations dont il traite est directement attribuée à l'ordre du monde. De la raison-calcul de Hobbes au projet cartésien d'une *Mathesis* universelle, de la caractéristique leibnizienne à la conception lockéenne du langage, perdue, en dépit de profondes divergences quant à son statut, ce même idéal d'une langue simple, transparente à la raison, conçue comme système de signes, et capable de décrire le monde à partir de constituants élémentaires objectifs et de leurs multiples combinaisons :

« La RAISON n'est que le calcul des conséquences des dénominations générales dont nous avons convenu pour noter et signifier nos pensées : pour les noter, dis-je, quand nous calculons à part nous; et pour les signifier, quand nous démontrons, quand nous prouvons à autrui nos calculs »<sup>44</sup>.

La pensée classique s'appuie ici sur une analyse du langage qui traite essentiellement de son aspect discursif, linéaire, propre à la segmentation de ce que Jakobson appelle « l'axe syntagmatique », conçu comme axe des combinaisons ou des successivités<sup>45</sup>. C'est cet aspect qu'aperçoit Hobbes lorsqu'il identifie raisonnement et inscription du discours dans le temps. Il convient encore si bien aujourd'hui à la représentation du discours formalisé, combinant des symboles dépourvus de signification, que Hobbes est souvent cité comme « le premier à exprimer clairement cette conception syntaxique

---

<sup>42</sup> Bacon, *Novum Organum*, I-45, II-27.

<sup>43</sup> Galilée, *Le message des étoiles*.

<sup>44</sup> Hobbes, *Le Léviathan*, p. 39

<sup>45</sup> Jakobson, *Essais de linguistique générale*.

de la pensée perçue comme un calcul »<sup>46</sup>. Une telle référence manifeste combien perdure une philosophie implicite des sciences de l'esprit qui prolonge celle de la science classique, et occulte la question des lieux et des fonctions de la signification.

Cette question travaille davantage la pensée contemporaine, et ce d'autant plus que la part du sujet dans l'élaboration des connaissances se trouve mieux prise en compte. La même linguistique jakobsonienne représente déjà les multiples possibilités de la signification sur des axes verticaux le long desquels le locuteur, au moment de l'énonciation du message, peut opérer un choix pour chacun des segments isolés de l'axe des successivités. Ce choix est alors fonction de l'effet de sens recherché, qui n'est pas indépendant des contextes dans lesquels il se déploie, même s'il est projeté sur une référence affirmée comme extérieure et objective. C'est le long de tels axes qualifiés de « paradigmatiques » que Jakobson situe les glissements de sens, les transferts sémantiques, les franchissements de contexte, à l'œuvre dans la métaphore.

Cette latitude présente dans la question du sens croise l'interrogation sur les processus par lesquels le sujet appréhende le monde. Du kantisme à la phénoménologie se pose la question des limites de droit des représentations, non seulement celle des conditions de leur cohérence, mais celle des conditions de leur signification, que le discours scientifique pose en termes d'objectivité et d'universalité. Pour sa part, Foucault envisage, à partir de la phénoménologie de Husserl, un basculement possible de la pensée vers une anthropologie, « c'est-à-dire vers un mode de pensée où les limites du droit à la connaissance (soient) en même temps les formes concrètes de l'existence »<sup>47</sup>. Prendre en compte l'intervention du sujet connaissant dans l'élaboration des significations du savoir, conçues comme médiations entre lui et son expérience du monde, conduit à repenser la question toujours ouverte du statut de l'objectivité<sup>48</sup>.

Or, si le travail de Foucault donne à voir ces transformations, il en donne une analyse descriptive qui ne permet ni d'appréhender les conditions d'élaboration de ces transformations, ni de comprendre comment elles s'imposent. De plus, situant l'analogie au niveau de l'archéologie du savoir, il reconduit sa relégation hors du champ proprement scientifique. Situer le rôle de l'analogie dans la démarche scientifique suppose de s'attacher à cette perspective anthropologique, et d'intégrer la question de la signification du discours pour le sujet à l'analyse de la science dans son historicité. Ce qui exige de renoncer à la position d'extériorité du sujet connaissant, pour

---

<sup>46</sup> Dreyfus, 1984, *Mythes et limites de l'intelligence artificielle*. Parrochia, *Qu'est-ce que penser / calculer ?*, pp. 52-89.

<sup>47</sup> Foucault, *Les mots et les choses*, p. 261.

<sup>48</sup> Tinland, « L'ouverture anthropologique ».

interroger comment il élabore ces systèmes d'invariants dont participe la connaissance scientifique. Ce qui oblige de se souvenir qu'il a, lui aussi, une histoire et une géographie.

### LE STATUT DE L'ANALOGIE EN MATHEMATIQUES

Analyser le recours à l'analogie dans le cadre d'une analyse des représentations textuelles de pratiques collectives suppose donc non seulement de repérer ses différents niveaux d'intervention, d'en spécifier le statut, mais aussi de préciser comment elle s'exprime dans les différents contextes où elle est convoquée. En effet, lorsque l'analogie est sollicitée pour autoriser une métaphore, elle est souvent énoncée sous la forme : « A est à B comme C est à D ». Cette expression suggère l'invariance d'un rapport et laisse supposer un recours, au moins implicite, aux mathématiques. Tout se passe comme si cette référence se suffisait à elle-même. Cette façon d'installer les mathématiques comme référence ultime les situe de fait comme point aveugle de toute analyse, ce qui revient à nier l'historicité des concepts mathématiques eux-mêmes. Cette négation conduit à ignorer deux phénomènes pourtant essentiels à une appréhension synthétique du rôle de l'analogie dans la démarche scientifique. D'une part, les analogies historiquement construites sous le couvert du « comme » se déploient aujourd'hui de la proportion entre grandeurs au morphisme entre structures, ce qui étend considérablement le champ des ressemblances envisagées. D'autre part, l'analogie intervient, au sein même des mathématiques, comme invariant opératoire dans l'élaboration de nouveaux objets. Comme les exemples donnés l'ont déjà succinctement indiqué, le processus dynamique d'extension du champ opératoire s'élabore dans la confrontation entre transfert lexical, souci de cohérence logique et visée référentielle. La réhabilitation de ces trois niveaux d'intervention de l'analogie au sein même des mathématiques conduit à ré-interroger les limites de leur opérativité, en ce sens qu'elle conduit à préciser les significations construites et les significations abandonnées pour que devienne effective leur visée d'universalité.

Si la notion de proportionnalité semble constituer la forme élémentaire de tout recours à l'analogie, au point de lui servir de signification première, cette idée est déjà le fruit d'une approche rétro-historique particulièrement trompeuse. Certes, cette notion paraît aujourd'hui élémentaire, l'égalité de deux rapports étant immédiatement envisagée dans un champ numérique parfaitement constitué comme celui des nombres réels. Et elle est centrale depuis que les *Eléments* d'Euclide, au 3<sup>e</sup> siècle avant notre ère, ont fondé la théorie des grandeurs sur la notion de proportion, au cœur d'un exposé

rigoureusement structuré de connaissances mathématiques démonstrativement énoncées. Pourtant, dans l'ouvrage euclidien, la proportion n'est conçue que comme analogie (*αναλογια*) entre deux rapports de grandeurs dont seule la mesurabilité est définie. Déjà présente chez Platon<sup>49</sup> et soigneusement analysée par Aristote<sup>50</sup>, l'analogie fonde la possibilité d'exprimer une relation entre les éléments comparés, qui relève alors davantage de l'harmonie que de l'égalité. En l'absence de toute représentation numérique autre que celle des rapports d'entiers, cette proportion-analogie fonctionne comme condition minimale pour opérer sur toutes les grandeurs – en particulier sur des entités aussi problématiques que le rapport non-rationnel de la diagonale au côté du carré – tout en renonçant à toute visée ontologique sur leur nature :

- « 1. Une grandeur est *partie* d'une grandeur, la plus petite de la plus grande, quand elle mesure la plus grande.
2. Et *multiple*, la plus grande de la plus petite, quand elle est mesurée par la plus petite.
3. Un rapport est la relation, telle ou telle, selon la taille, [qu'il y a] entre les grandeurs de même genre.
4. Des grandeurs sont dites avoir un rapport l'une relativement à l'autre quand elles sont capables, étant multipliées, de se dépasser l'une l'autre.
5. Des grandeurs sont dites être *dans le même rapport*, une première relativement à une deuxième et une troisième relativement à une quatrième quand des équimultiples de la première et la troisième ou simultanément dépassent, ou sont simultanément égaux ou inférieurs à des équimultiples de la deuxième et de la quatrième, selon n'importe quelle multiplication, chacun à chacun, [et] pris de manière correspondante.
6. Et que les grandeurs qui ont le même rapport sont dites en *proportion* »<sup>51</sup>.

C'est dans la stricte mesure où cette définition mathématique de la proportion permet d'opérer sur les grandeurs sans les spécifier davantage qu'elle en organise le champ : ainsi définie, la conception du « même rapport » constitue une forme d'invariance pour les opérations arithmétiques pratiquées sur ces grandeurs. Cette stabilité opératoire fonctionne comme condition d'intelligibilité des grandeurs, au sein d'un « logos » lui-même conçu comme champ de rapports<sup>52</sup>. Et c'est cette appartenance au « logos »

<sup>49</sup> Grenet, *Les origines de l'analogie philosophique*.

<sup>50</sup> Aristote, *Topiques*, I 17 ; *Ethique à Nicomaque*, E, 6 ; I, 6, 1096b, 26-31 ; V, 6, 1131a30 et suivantes. *Physique*, D, 215b6. *Poétique*, 1457b9 ; *Seconds Analytiques*, A 74a18 et 78a1-4. L'article de Philippe Huneman étudie ci-dessous les spécificités de l'analyse aristotélicienne de l'analogie.

<sup>51</sup> Euclide, par Vitrac, *Les Eléments d'Euclide*, pp. 35-41.

<sup>52</sup> Desanti, «Une crise de développement exemplaire», pp. 439-464.

qui en autorise l'extension dans des domaines plus vastes que celui des grandeurs<sup>53</sup>.

Historiquement, la recherche de telles stabilités opératoires en mathématiques s'est enrichie de bien d'autres relations que la seule proportionnalité, sur la base d'analogies permettant d'étendre le champ opératoire. Ainsi, l'algorithme d'Euclide, initialement théorème caractérisant la relation des nombres entiers premiers entre eux, sera utilisé comme procédure d'approximation des grandeurs incommensurables par les algébristes arabes, avant de suffire à les caractériser, scellant le rapprochement entre nombres (entiers) et grandeurs (continues)<sup>54</sup>. Et depuis que l'algèbre s'applique à dégager des structures mathématiques abstraites, toute structure mathématique est, par le biais des morphismes, constitutive d'une analogie constructive entre des ensembles d'objets qui peuvent être de nature fort différente, et qui autorise précisément le transfert des propriétés opératoires d'un ensemble à un autre. Cette variété des correspondances rend quelque peu caduque la réduction de l'analogie à la seule mise en œuvre d'une proportionnalité. Dans tous les cas, l'analogie ignore les données ontologiques, pour étudier exclusivement la stabilité opératoire des structures ainsi définies, et pour lui subordonner la diversité de leurs interprétations possibles. Reste cependant à interroger la signification de cet aspect opératoire.

L'installation du formalisme algébrique à partir du 16<sup>e</sup> siècle a d'ailleurs conduit mathématiciens et historiens des mathématiques à reconnaître de plus en plus volontiers l'importance de l'analogie, dont ils caractérisent souvent l'intervention comme point de départ de l'abstraction, sans préciser pour autant la signification d'un tel ancrage. Eberhard Knobloch va ainsi jusqu'à affirmer que « les mathématiques sont le domaine légitime de l'analogie », ce dont il témoigne par de nombreux exemples, empruntés à leur histoire<sup>55</sup>. Mais il atténue immédiatement son propos en précisant que l'analogie intervient surtout dans un « contexte de découverte », et non dans un « contexte de justification ». Il donne cependant une typologie des modes d'intervention de l'analogie, qui rend compte des transformations du statut de l'analogie attachées au développement du formalisme algébrique. Elle est fondée sur la nature des arguments qu'apportent les mathématiciens lorsqu'ils ont le souci d'en légitimer l'intervention, et confirme la remarquable extension du champ d'analyse des processus opératoires au-delà de la seule proportion.

<sup>53</sup> Vuillemin, *La logique et le monde sensible*, p. 20.

<sup>54</sup> Vitrac, *Les Eléments d'Euclide*, II, p. 535. Rashed et Djebbar, *L'œuvre algébrique d'al-Khayyam*, p. 20. Rashed, pp. 53-54. Hoyrup, « Pure mathematics in Islamic civilization », pp. 70-79.

<sup>55</sup> Knobloch, « L'analogie et la pensée mathématique », pp. 217-237.

Jusqu'au 17<sup>e</sup> siècle, les légitimations sont d'abord d'ordre métaphysique. Eberhard Knobloch rappelle ainsi comment Képler envisage les sections coniques les unes par rapport aux autres, utilisant sans réticence l'affinité géométrique comme principe de continuité. Mais cette affinité renvoie chez Képler à la certitude platonicienne d'une harmonie structurelle entre mathématiques et construction du monde.

La succession des exemples présentés par Eberhard Knobloch témoigne aussi d'une autonomisation grandissante des modes de légitimation de l'analogie, qui s'éloignent progressivement de la métaphysique pour s'appuyer sur les richesses potentielles de l'écriture algébrique. Ce mode de représentation permet de mieux visualiser les analogies opératoires, et il leur donne d'autant plus d'importance qu'il relègue au second plan la question de la signification des symboles. Leibniz notamment situe l'analogie au coeur de cet *Ars Inveniendi* qu'est l'analyse algébrique<sup>56</sup>. Il observe l'identité de comportement opératoire entre  $x^n$  et  $d^n x$ , dans les développements de la puissance  $n$ -ième d'un binôme et de la différentielle  $n$ -ième d'un produit :

$$(x + y)^n = x^n y^0 + n x^{n-1} y^1 + \frac{n(n-1)}{2} x^{n-2} y^2 + \dots + \frac{n(n-1)}{2} x^2 y^{n-2} + n x^1 y^{n-1} + x^0 y^n$$

$$d^n(xy) = d^n x d^0 y + n d^{n-1} x d^1 y + \frac{n(n-1)}{2} d^{n-2} x d^2 y + \dots + n d^1 x d^{n-1} y + d^0 x d^n y$$

Cette analogie se soutient alors de la cohérence de ses conséquences avec des résultats déjà obtenus par d'autres voies, et de sa richesse potentielle. En autorisant à calculer sur l'opérateur différentiel comme sur un nombre ordinaire, elle donnera lieu à de remarquables développements, qui sont à l'origine du calcul fonctionnel et du calcul symbolique ou opérationnel.

Lorsque Condillac affirme que l'algèbre est la seule langue bien faite, et que l'analogie est pour cette langue la méthode même d'inventer<sup>57</sup>, il ne fait qu'entériner cet usage des analogies opératoires, tellement essentiel à l'extension du champ des calculs<sup>58</sup>. L'algèbre autorise la possibilité d'attribuer des propriétés opératoires à de nouvelles entités, non plus en les légitimant par la philosophie, mais en exerçant sans retenue la possibilité qu'offre une « formule » de garantir l'égalité des résultats de deux calculs, quelles que soient les substitutions opérées sur les lettres qui s'y trouvent. En concrétisant l'indépendance des propriétés opératoires vis-à-vis des résultats, l'usage des formules institue les procédures opératoires comme grammaire de cette langue algébrique. C'est l'importance accordée à ce processus qui permet de laisser provisoirement en suspens l'interrogation sur la nature des signes utilisés et sur ce qu'ils sont censés représenter, y compris

<sup>56</sup> Leibniz, *Naissance du calcul différentiel*, p. 420.

<sup>57</sup> Condillac, *La langue des calculs*, p. 8.

<sup>58</sup> Durand-Richard, « Nombre, grandeur, quantité », pp. 79-122.

l'interrogation sur la signification de l'égalité elle-même. Eberhard Knobloch remarque d'ailleurs, de manière presque incidente, ce changement de statut de l'analogie :

« Dans la mesure où les mathématiciens **commençaient à croire**<sup>59</sup> que les mathématiques sont faites par les hommes, les analogies obtenaient un nouveau rôle dans les mathématiques »<sup>60</sup>.

Ce basculement du point de vue métaphysique vers un point de vue constructif est co-extensif du développement de l'algèbre, où la possibilité d'étendre des propriétés à de nouvelles entités va devenir principe organisateur de nouvelles structures. L'algébrisation de la logique, entreprise par George Boole et Gottlob Frege au 19<sup>e</sup> siècle, a permis d'étendre ce point de vue constructif à la logique elle-même, avant que les travaux de Gödel ne conduise à l'intégrer au champ des mathématiques au 20<sup>e</sup> siècle. La théorie des modèles, qu'Abraham Robinson définit comme le « développement naturel de l'algèbre moderne par les moyens de la logique formelle », va constituer un lieu privilégié de cette transformation : la hiérarchie normative entre syntaxe et sémantique, présente aussi bien chez Boole et Frege que chez Hilbert, s'y trouvera abandonnée, et l'analogie y jouera cette fois un rôle constructif explicite dans l'échange dialectique reconnu entre syntaxe et sémantique pour concevoir des identités structurelles, et pour envisager démonstrativement par ce biais la production de structures nouvelles<sup>61</sup>. Dans le même temps, la séparation radicale entre vérité et validité des théories, rendue incontournable par les travaux de Gödel, rend plus aigüe la question de la construction du sens des théories scientifiques, tout en permettant d'explicitier les limites dans lesquelles leur rationalité est susceptible de s'exercer. Elle tend à substituer, à la problématique classique d'une science énonciatrice de vérité, celle d'une logique opératoire dont les modélisations ne s'adressent pas tant à des réalisations effectives qu'à des ensembles de possibilités ou de configurations.

#### LA THEORISATION SCIENTIFIQUE A L'EPREUVE DE L'ANALOGIE

Les répercussions de ces transformations sur le statut de la connaissance sont considérables, puisque la permanence présumée par l'analogie perd de son réalisme pour endosser une fonction de plus en plus strictement opératoire ou fonctionnelle. La mécanique quantique constitue un lieu

<sup>59</sup> C'est moi qui souligne.

<sup>60</sup> Knobloch, « L'analogie et la pensée mathématique », p. 231.

<sup>61</sup> Benis-Sinaceur, « *Ars inveniendi* et théorie des modèles », pp. 591-613.

privilegié pour appréhender cette mutation, avec les débats sur le déterminisme et l'interprétation de la science, et sur le déplacement de la notion de vérité vers celles de prédiction et de corrélation statistique. Comme le rappelle Mario Bunge :

« L'analogie formelle entre l'équation d'état de la mécanique quantique et l'équation des ondes classiques est à l'origine de l'interprétation de Schrödinger et de Broglie d'après laquelle le vecteur d'état d'un microsystème représente une onde réelle. Cette affirmation est le résultat d'un raisonnement par analogie ayant pour point de départ une analogie de type formel.

Dans les débuts de la mécanique quantique, cette interprétation n'était pas considérée comme métaphorique, mais comme littérale, c'est-à-dire que l'analogie formelle était considérée comme l'indice d'une analogie substantielle. Ce n'est que plus tard lorsque fut adoptée l'interprétation probabiliste proposée par Born, qu'on admit, de façon implicite, que l'analogie formelle considérée n'impliquait aucune analogie substantielle puisque le vecteur d'état ne représentait pas une substance occupant tout l'espace offert au système, mais l'état du système »<sup>62</sup>.

Expliciter les enjeux du recours à l'analogie dans la démarche scientifique suppose donc de prendre en compte, non seulement ses possibilités heuristiques, mais l'engagement ontologique sous-jacent à toute interprétation<sup>63</sup> : au delà d'une énonciation de type démonstratif, toute théorie scientifique renvoie à la dimension symbolisante du langage, et sa pleine compréhension suppose que sa fonction référentielle se trouve explicitée. Engagement ou véhémence, cette fonction référentielle induit un spectre de significations possibles dont la polysémie inhérente à la langue permet d'envisager la diffusion dans d'autres champs de savoir. L'analyse de ce processus de diffusion transférentielle des théories scientifiques, en restituant la tension dialectique constante dont elles sont l'objet, tend à permettre à la fois d'apprécier l'impact culturel de l'opérativité qui leur est attachée, et de se démarquer du réductionnisme scientifique et des risques d'instrumentalisation, voire de réification, qui lui sont sous-jacents.

Le travail des historiens et philosophes des sciences porte précisément sur l'étude de textes qui, en amont et en aval de la forme aboutie des théories scientifiques, témoignent du processus de construction de sens dont participe la démarche scientifique. Manuscrits, correspondances et textes de controverses permettent d'en identifier les modes d'élaboration, qui résultent des interactions entre les trois niveaux de signification du discours scientifique : lexical, logique, et référentiel. Ce sont précisément les

---

<sup>62</sup> Bunge, *Philosophie de la physique*, p. 31.

<sup>63</sup> Ricœur, *La métaphore vive*, p. 313.

spécificités de ces interactions que les contributions rassemblées dans cet ouvrage s'appliquent à situer historiquement et conceptuellement. Elles résultent d'un travail de réflexion collective, mené au sein de l'équipe REHSEIS<sup>64</sup> au cours de ces dernières années. Si elles ne prétendent pas à l'exhaustivité, elles permettent d'interroger une opérativité qui, à être trop souvent envisagée comme se suffisant à elle-même dans les sciences contemporaines ou dans leurs implications sociétales, risque de phagocyter le champ entier de la signification, et de masquer les conditions d'exercice de la raison. Ils s'articulent donc précisément autour d'un corps de textes accordant une importance toute particulière au rôle si souvent occulté de l'analogie en mathématiques.

Philippe Huneman aborde cette interrogation dans la philosophie d'Aristote, en ce qu'elle prend le contre-pied de la posture rhétorique des Sophistes. Le Stagyrite cherche à cerner les principes d'une théorie de la signification qui soit, non pas socialement construite, mais ontologiquement fondée. En rapportant les catégories de l'être à une substance première, l'*ousia*, il autorise la prédication à transcender aussi bien les frontières du genre que les limites d'une définition ostensive. Mais le statut – ontologique ou linguistique – de l'*ousia* reste difficile à cerner, et maintient une ambiguïté fondamentale, essentielle à l'intention aristotélicienne de dire le vrai en fondant le discours sur la nature même des choses.

Le dépaysement n'est qu'apparent, lorsqu'Alexei Volkov observe l'usage de l'analogie dans les textes mathématiques de la Chine ancienne. Le texte central de ce corpus<sup>65</sup>, *Les neuf chapitres sur les procédures mathématiques*, avec ses *Commentaires*, ont longtemps été évalués comme dépourvus d'abstraction, dans la mesure où ils n'intégraient pas la démarcation entre logique et rhétorique qui s'est imposée dans l'aire culturelle occidentale depuis le travail d'Aristote. Une lecture herméneutique tend à les identifier comme théorisation de procédures algorithmiques que la manipulation d'analogies opératoires permet de projeter sur d'autres problèmes. Ils constituent ce qu'Alexei Volkov qualifie de « calcul emblématique », où le carré et le cercle jouent le rôle de « fonction » tout en renvoyant à des connotations symboliques de la philosophie chinoise, relatives à une dynamique des transformations.

Les deux articles suivants montrent comment l'analogie intervient dans le travail de formalisation algébrique, aussi bien sous sa forme littérale ou symbolique. Elle y sous-tend le processus d'extension du champ opératoire,

---

<sup>64</sup> Recherches Epistémologiques et Historiques sur les Sciences Exactes et les Institutions Scientifiques.

<sup>65</sup> Ce texte a récemment été publié dans une édition bilingue français-chinois par Karine Chemla.

sans faire d'emblée l'objet d'une réflexion explicite sur les limites de son fonctionnement.

Christian Houzel retrace, depuis les mathématiciens de la civilisation arabo-musulmane, l'historique de situations où l'analogie a présidé à la création d'objets mathématiques nouveaux dans le domaine algébrique, par extension systématique des propriétés opératoires antérieurement établies sur des objets antérieurement définis comme mathématiques. Des nombres décimaux aux polynômes et aux séries entières, des nombres algébriques aux fonctions algébriques d'une variable, jusqu'à celles dont les coefficients appartiennent à un corps fini, c'est en s'appuyant sur la permanence supposée, sinon revendiquée, de ces propriétés opératoires, que les mathématiciens se sont autorisés à transférer les méthodes de calcul, et à réaliser de ce fait la structuration de nouveaux champs théoriques, modifiant en retour le statut respectif des uns et des autres<sup>66</sup>.

En utilisant d'emblée le langage achevé de la topologie algébrique pour en retracer le développement, les ouvrages généraux d'histoire des mathématiques ne peuvent qu'éluider le travail d'élaboration d'un langage algébrique pour *l'Analysis Situs*, qui va permettre de fonder la topologie algébrique. Alain Herreman tente au contraire de saisir ce moment de basculement de la pensée où Poincaré tente de conjuguer approche arithmétique et intuition géométrique pour soumettre les variétés, objets géométriques, aux mêmes opérations que les quantités. C'est précisément la distorsion provoquée par ce transfert du calcul à des entités géométriques qui va conduire ses successeurs à différentes tentatives de réécriture, sur des modes qui dépendent de l'engagement épistémologique de leur auteur : combinatoire, géométrique, symbolique, ou ensembliste.

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, le travail d'axiomatisation qui se met en place dans tous les domaines des mathématiques signale une audace nouvelle, par laquelle le mathématicien affirme sa liberté de construire un édifice théorique sur des hypothèses arbitrairement choisies. Cette liberté n'est pas nouvelle, mais elle est plus assumée, et participe d'une reconnaissance plus explicite du rôle du sujet dans l'élaboration des connaissances. Mon propre article envisage l'avant et l'après de ce basculement, dans le cadre des relations entre logique et algèbre. La conception formelle de l'algèbre, dite « symbolique », qu'élabore un réseau de réformateurs à Cambridge dans la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle, vise à éliminer les paradoxes issus d'un usage trop ouvert de l'analogie, sans renoncer toutefois à la richesse des résultats ainsi obtenus. Leur engagement épistémologique les porte à envisager l'analogie comme manifestation de la généralité des opérations de l'esprit, et

---

<sup>66</sup> Sonia Couche a récemment approfondi toute cette question dans sa thèse. Couche, *Un siècle d'analogie créatrice...*

à maintenir ainsi une stricte hiérarchie entre la logique des opérations, et les interprétations dont elles sont susceptibles. Au contraire, au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, dans les travaux de Tarski et Robinson, la séparation entre validité démonstrative et vérité référentielle est assumée, ainsi que le caractère constructif de l'activité mathématique. La théorie des modèles se donne pour objet l'analyse des relations mutuelles entre langages formels et structures algébriques, où l'analogie intervient explicitement sous la forme de principes de transfert. La hiérarchie s'efface entre structure déductive et interprétation algébrique.

Les textes de Michel Paty et de Claude Comte témoignent de l'importance du rôle de l'analogie dans le développement de la physique mathématique, qui accompagne celui de l'analyse algébrique. La fonction unifiante de l'analogie y est explicitement reconnue, mais son statut reste problématique, tant que les mathématiques interviennent comme garantes de l'objectivité de la science sans que soit abordée la question de la philosophie du langage que soutient une telle affirmation.

Si, comme l'a montré Alain Herreman, Poincaré est resté muet sur l'analogie qu'il a mise en œuvre en topologie algébrique, il a longuement disserté sur le rôle qu'elle joue entre physique et mathématiques. C'est cette réflexion spécifique que Michel Paty confronte ici au statut que Poincaré accorde à la physique, au moment précis où l'étude des équations différentielles issues de la formalisation mathématique du mouvement débouche sur le dépassement de la mécanique classique. Poincaré se préoccupe du processus d'élaboration théorique dans la transition entre mécanique newtonienne et électrodynamique, où l'analogie mathématique permet d'atteindre l'identité de structure qui représente pour lui la seule vraie signification des phénomènes. Ce faisant, Poincaré confère à l'analogie une valeur ontologique très forte : celle de saisir l'intelligibilité du monde, de révéler l'harmonie universelle qui constitue la seule réalité objective. Michel Paty envisage alors l'analogie mathématique chez Poincaré et les analogies de l'expérience chez Kant, comme une même affirmation de l'objectivité de la connaissance et de l'unité de l'univers et de l'expérience.

De son côté, Claude Comte offre ici, au présent, un remarquable exemple où l'analogie intervient de façon majeure, là encore généralisante et réorganisatrice, dans la reformulation d'une théorie physique unifiant la statique classique, la dynamique et la cinématique relativistes, jusqu'à la théorie des champs de probabilité quantiques. Il se situe dans la lignée du programme de D'Alembert, visant à dégager la physique newtonienne de toute considération métaphysique sur le caractère absolu de l'espace et du temps, et mobilise les mathématiques pour n'exprimer que les conditions de reproductibilité des phénomènes physiques. Le programme d'Erlangen, caractérisant chaque géométrie par le groupe de transformations qui rend

invariantes certaines propriétés de ses figures, lui permet d'adopter un point de vue structurel pour éclairer les analogies constatées entre les lois fondamentales de ces différents domaines. Il utilise ainsi la théorie mathématique des groupes et de leurs représentations pour exprimer les lois fondamentales de cette théorie physique unifiée, dégagée de toute hypothèse sur la structure de la matière et de ses interactions.

L'intervention de l'analogie dans les sciences autres que la physique est à la fois plus palpable et plus délicate, dans la mesure même où ces sciences n'entretiennent pas avec les mathématiques de relations aussi explicitement construites que la physique. L'engagement ontologique à l'œuvre dans l'élaboration de classifications nouvelles, susceptibles de relever d'une opérativité formalisée, et les risques réductionnistes du travail de modélisation, s'y manifestent explicitement.

Dans son travail sur l'intervention de l'analogie dans les sciences du végétal, Gilles Denis compare les points de vue de deux auteurs, Fontana et De Candolle, au tournant du 19<sup>e</sup> siècle. Leur questionnement, qui porte sur l'identification des causes des maladies des plantes, est contemporain des travaux où Lamarck modifie radicalement la classification en règnes (minéral, végétal, animal) et instaure la biologie comme science du vivant. Les discussions sur l'analogie sont omniprésentes, et les références à Aristote restent présentes, alors que se développe la méthode expérimentale, et que le vivant est abordé en termes d'organisation et d'échanges avec le milieu. Gilles Denis montre que les analogies envisagées et la classification des objets sur lesquels elles portent sont interdépendantes. Fontana récuse l'analogie pour des raisons d'ordre épistémologique, surtout quand elle trouble la séparation animal/végétal, et lui préfère le recours aux méthodes comparatives et combinatoires d'analyse issues des nouvelles problématiques de la science classique. De Candolle, qui travaille dans un cadre méthodologique renouvelé, investit au contraire l'analogie du pouvoir de conduire à une classification « naturelle ». L'importance accordée aux classifications nourrira le lamarckisme comme le darwinisme, qui les présenteront comme l'expression d'une filiation généalogique entre toutes les espèces vivantes.

Enfin, Paul Bromberg examine les problèmes liés à l'utilisation quasi clandestine de la métaphore de la machine en biologie moléculaire, alors que les conditions de mise en œuvre de l'analogie sous-jacente ne sont pas précisées. Par « machine », il entend surtout machine énergétique, qui sert à qualifier les modes d'action et d'évolution du vivant en termes physico-chimiques. Sur plusieurs exemples, comme celui de la synthèse de l'acide palmitique chez les animaux supérieurs, ou celui du transfert de molécules à travers une membrane moléculaire, se trouvent examinées les conditions du transfert sémantique de la thermodynamique à la biologie moléculaire, et du

niveau macroscopique au niveau microscopique. Paul Bromberg appréhende le risque de réduire la nature du vivant à son fonctionnement, et de considérer la structure des organismes comme pré-requis à leur fonctionnement, alors que les processus organiques apparaissent plutôt comme nécessaires à la préservation des structures. Mais il considère la présence de ces métaphores comme inhérentes au langage, et ne peut qu'en appeler, sur les traces de Richard Braithwaite, à une « éternelle vigilance ».

### CONCLUSION

Au-delà du strict exposé des théories scientifiques, aussi bien le recours à l'analogie que la distinction issue des sciences formelles entre calcul et interprétation rendent incontournable la question du lieu ou du niveau de légitimation de la fonction référentielle du discours scientifique. Dès lors que ces théories ne sont pas considérées comme des vérités en soi, mais comme élaboration d'un discours de la permanence dont les références varient, historiquement et géographiquement, selon la façon dont est conçue la relation du sujet au monde, le rôle de l'analogie se doit d'être soigneusement analysé, afin que les significations qui lui sont accordées puissent faire l'objet d'une réflexion critique. Préciser ses modes d'intervention permet d'en éviter l'utilisation implicite.

Si l'analogie s'efface du terrain de la déduction logique, elle demeure présente dans le mode de théorisation, puisqu'elle intervient dans l'accord sur les hypothèses choisies, qui rendent manifeste l'état du dialogue entre nature et culture. C'est l'oubli de cette prise de décision collective qui permet de passer du registre de la signification, avec les risques qu'il comporte, à celui de la stricte dénotation. Dès lors que la question des significations est envisagée comme construction, elle redevient interrogeable. Et sa prise en compte incite à la modestie d'une attitude scientifique préférant examiner la frontière toujours fluctuante qui sépare le contingent du nécessaire, pour mieux éviter de croire en l'absolue transparence du monde au savoir qu'elle produit. Que ces textes puissent contribuer à alimenter la réflexion en ce sens, à rendre explicite et manifeste le lieu toujours présent des difficultés méthodologiques de la construction d'une rationalité scientifique, constitue l'ambition essentielle du propos de cet ouvrage. Que les auteurs qui y ont contribué, et qui m'ont accompagnée avec beaucoup de patience dans ce cheminement parfois bien lent, en soient ici profondément remerciés. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les directeurs successifs de REHSEIS, Michel Paty et Karine Chemla, qui m'ont invitée à poursuivre ce travail dans le cadre du programme de recherche de l'équipe, et les chercheurs qui m'ont soutenue de leur confiance, ainsi que de leurs critiques

et suggestions : Olivier Darrigol, Catherine Goldstein, Irène Passeron et Norbert Meusnier.

## BIBLIOGRAPHIE

- Alliages, « Impostures scientifiques, Les malentendus de l'affaire Sokal », été-automne 1998, n° 35-36.
- Aristote, *Ethique à Nicomaque*, traduction, introduction et notes de J. Tricot, Paris, Vrin, 1997.
- *Organon, Les Seconds Analytiques, Les Topiques*, traduction, introduction et notes de J. Tricot, Paris, Vrin, 1995.
- *La Physique*, introduction de L. Couloubaritsis, traduction de A. Stevens, Paris, Vrin, 1999.
- Bacon, F., *Novum Organum* (1626), introduction, traduction et notes par Michel Malherbe et Jean-Marie Pousseur, Paris, PUF, Collection Epiméthée, 1986.
- Benis-Sinaceur, H., « *Ars inveniendi* et théorie des modèles », *Dialogue*, 1988 27, pp. 591-613.
- Blain, F., Faye, S. et Martin, F., *Physique, Terminale C et E*, Paris, Magnard, 1983.
- Blanché, R., *Le raisonnement*, Paris, PUF, 1973.
- Borella, J., *Penser l'analogie*, Paris, Ad Solem, 2000.
- Bourdieu, P., *Langage et pouvoir symbolique*, Paris, Seuil, 1991.
- *Méditations pascaliennes*, Paris, Seuil, 1997.
- *Les usages sociaux de la science. Pour une sociologie clinique de la champ scientifique, une conférence-débat Pierre Bourdieu; organisée par le Groupe Sciences en questions* (Paris, 11. mars 1997, INRA). Paris, INRA, 1998.
- *Science de la science et réflexivité, Cours du Collège de France, 2000-01*, Paris, Seuil, 2001, Collection Cours et travaux.
- Bunge, M., *Philosophie de la physique*, Paris, Seuil, 1975.
- Cassirer, E., *Substance et fonction. Eléments pour une théorie du concept* (1910), Paris, Editions de Minuit, 1977.
- Chartier, R., *Au bord de la falaise : l'histoire entre certitudes et inquiétudes*, Paris, Albin Michel, Collection Histoire, 1998.
- Chauviré, C., *L'essayeur de Galilée*, Paris, Les Belles-Lettres, Annales Littéraires de l'Université de Besançon, 1980.
- Chemla, K., et Guo, S., *Les Neuf Chapitres. Le classique mathématique de la Chine ancienne et ses commentaires*, Paris, Dunod, 2004.
- Condillac, E. de, *La langue des calculs* (1780), texte établi par A.M. Chouillet, introduction et notes de S. Auroux, Paris, P.U. Lille, 1981.

- Darrigol, O., *From c-Numbers to q-Numbers. The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press, 1992.
- Dascal, M., et Senderowicz, Y., «How pure is pure reason ? Language, Empirical concepts and Empirical Laws in Kant's Theory of Knowledge», *Histoire, Epistémologie, Langage : Théories linguistiques et opérations mentales*, 1992, tome 14, fasc. 11, pp. 129-152.
- Desanti, J.-T., « Une crise de développement exemplaire : la « découverte » des nombres irrationnels », in (éd.) Piaget, J., *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard, 1967, pp. 439-464.
- Descartes, R., «Lettre à Mersenne, 15 avril 1630», *Œuvres et lettres*, Paris, Gallimard, Collection La Pléiade, 1953, pp. 927-935.
- «Principes de philosophie» (1644), *Œuvres et lettres*, Paris, Gallimard, Collection La Pléiade, 1953, pp. 549-690.
- De Vinci, L., *Traité de la peinture*, Paris, Berger-Levrault, 1987.
- Dorolle, M., *Le raisonnement par analogie*, Paris, PUF, 1949.
- Dreyfus, H., *Mythes et limites de l'intelligence artificielle*, Paris, Flammarion, 1984.
- Durand-Richard, M.-J., « Nombre, grandeur, quantité, opérations : De la transformation conjointe de leurs significations », in (éd.) I.R.E.M., *Images, imaginaires, imaginations : Histoire des nombres complexes pour nos classes*, Paris, Ellipses, 1998, pp. 79-122.
- (éd.), « Des lois de la pensée aux constructivismes », *Intellectica*, 2004/2, n° 39.
- Eco, U., *La recherche de la langue parfaite dans la culture européenne*, Paris, Seuil, 1994.
- Foucault, M., *Les mots et les choses, une archéologie des sciences humaines*, Paris, Gallimard, 1966.
- Galilée, G., *Le message des étoiles* (1610), préface de F. Hallyn, Paris, Seuil, 1992.
- Gonseth, F., « L'analogie en tant que méthode de connaissance », *Dialectica*, 1963, n° 17, pp. 111-115.
- Grenet, P., *Les origines de l'analogie philosophique dans les dialogues de Platon*, Paris, Editions Contemporaines, 1948.
- Jakobson, R., *Essais de linguistique générale*, Paris, Editions de Minuit, 1963.
- Herreman, A., « Vers une analyse sémiotique de la théorie des ensembles : hiérarchies et réflexivité », 2003, <http://name.math.univ-rennes1.fr/theuth/biblios/theuth-herreman.html>.
- Hesse, M. B., *Models and Analogies in Science*, Notre-Dame, Indiana, University of Notre Dame Press, 1970.

- Hobbes, T., *Léviathan, Traité de la matière, de la forme et du pouvoir de la République ecclésiastique et civile* (1651), traduit de l'anglais par F. Tricaud, Paris, Sirey, 1971.
- Hoyrup, J., « Pure mathematics in Islamic civilization », in (éd.) Grattan-Guinness, I., *Companion Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences*, London, New York, Routledge, 1996, pp. 70-79.
- Knobloch, E., « L'analogie et la pensée mathématique », in (éd.) Rashed, R., *Mathématiques et philosophie de l'Antiquité à l'âge classique*, Paris, CNRS, 1991, pp. 217-237.
- Kristeva, J., *Le langage, cet inconnu. Une initiation à la linguistique* (1969), Paris, Seuil, Collection Points, 1981.
- Kuhn, T. S., *La structure des révolutions scientifiques*, traduction française Laure Meyer, Paris, Flammarion, Champs, 1983.
- *La révolution copernicienne*, traduction de Avram Hayli, Paris, Fayard, Le livre de poche, 1973.
- Latour, B., *Nous n'avons jamais été modernes, Essai d'anthropologie symétrique*, Paris, La Découverte, Collection L'Armillaire, 1991.
- Leatherdale, W. H., *The Role of Analogy, Model and Metaphor*, Amsterdam, Oxford, North Holland Publishing Company, 1974.
- Leibniz, G. W., *Naissance du calcul différentiel*, introduction, traduction et notes de M. Parmentier, Paris, Vrin, Mathesis, 1989.
- Lévi-Strauss, C., *La pensée sauvage* (1962), Paris, Pocket, 1990.
- McCorduck, P., *Machines who think*, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1979.
- Moscovici, S., *Essai sur l'Histoire Humaine de la Nature*, Paris, Flammarion, Champs, 1977.
- Parrochia, D., *Qu'est-ce-que penser / calculer ? Hobbes, Leibniz et Boole*, Paris, Vrin, 1992.
- Passeron, J.-C., « Analogie, connaissance et poésie », *Revue européenne des sciences sociales*, 2000, t. XXXVIII, n° 117, pp. 13-33.
- Piaget, J., *Le langage et la pensée chez l'enfant* (1948), Neuchâtel, Paris, Delachaux & Niestlé, 1989.
- «L'épistémologie et ses variétés», in (éd.) Piaget, J., *Logique et Connaissance Scientifique*, Paris, Gallimard, 1967.
- (éd.) Piatelli-Palmarini, M., *Théories du langage, théories de l'apprentissage, le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky*, Paris, Seuil, 1979.
- Rashed, R., *Entre arithmétique et algèbre ; recherches sur l'histoire des mathématiques arabes*, Paris, Les Belles-Lettres, 1984.
- Rashed, R., et Djebbar A., *L'œuvre algébrique d'al-Khayyam*, University of Aleppo, I.H.A.S., 1981.

- Ricœur, P., *La métaphore vive*, Paris, Seuil, 1975.
- Robinson, A., « L'application de la logique formelle aux mathématiques », *Actes du deuxième Colloque international de logique mathématique*, Paris, Gauthier-Villars, 1954.
- Salanskis, J.-M., Rastier, F. et Scheps, R., *Herméneutique : textes, sciences*, Paris, PUF, Collection Philosophie d'aujourd'hui, 1997.
- Sander, E., *L'analogie, du naïf au créatif. Analogie et Catégorisation*, Paris, L'Harmattan, 2000.
- Saussure, F. de, *Cours de linguistique générale*, publié par Bally Ch. et Sechehaye A., Paris, Payot, 1972.
- Schaff, A., *Langage et connaissance*, Paris, Editions Anthropos, traduit du polonais par Claire Brendel, 1969.
- Shakespeare, W., « Le songe d'une nuit d'été », *Œuvres complètes*, Paris, Gallimard, Bibliothèque de la Pléiade, 1959 (1600), vol. 1, pp. 1151-1204.
- Shea, W., *La révolution galiléenne. De la lunette au système du monde*, trad. de l'anglais par F. de Gandt, Seuil, 1992.
- Soler, L., « Les origines de la formule  $e = hn$ , ou comment l'analogie est vecteur de nouveauté », *Fundamenta Scientiæ*, 2001, vol. 5, cah. 2.  
— *L'émergence d'un nouvel objet symbolique : le photon*, thèse sous la direction de M. Bitbol, Paris, Sorbonne, 1997.
- Turbayne, C. M., *The myth of metaphor*, Columbia. Un. of South Carolina Press, 1970.
- (éd.) Tijus, C., *Métaphore et Analogie*, Paris, Hermès, Collection Traité de Sciences Cognitives, 2003.
- Tinland, F., « L'ouverture anthropologique, Chances et risques », in (éd.) Tinland, F. *Systèmes naturels, systèmes artificiels*, Paris, Champ Vallon, 1991.
- Victorri, B., et Fuchs, C., *La polysémie, construction dynamique du sens*, Paris, Hermès, 1996.
- Vitrac, B., *Les Eléments d'Euclide*, Paris, PUF, 1994-98. 4 vols.
- Vuillemin, J., *La logique et le monde sensible. Etude sur les théories contemporaines de l'abstraction*, Paris, Flammarion, 1971.
- Varenne, F., *Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations*, Paris, Pétra, 2005.