

Modes de raisonnement et images scientifiques

Catherine ALLAMEL-RAFFIN
IRIST, Université de Strasbourg

Certains énoncés des sciences (et probablement les plus importants d'entre eux) vont bien au-delà de ce que notre seule expérience sensorielle quotidienne nous autorise à affirmer.

À titre d'exemple, les biologistes nous disent que nous entretenons une étroite parenté avec les chimpanzés, les géologues nous disent que les continents africain et sud-américain n'en ont formé jadis qu'un seul, et les cosmologistes nous disent que l'univers est en continuelle expansion.¹

Comment ces scientifiques ont-ils pu aboutir à de telles conclusions ? Dans une des meilleures introductions à la philosophie des sciences actuellement disponibles, Samir Okasha, l'auteur des exemples précités, répond : ils y sont parvenus au moyen de processus de raisonnement, plus ou moins complexes et dont la nature est elle-même source de questionnements multiples. Depuis l'Antiquité, en effet, ces outils cognitifs essentiels que sont les modes de raisonnement ont donné lieu – en particulier chez les philosophes – à des interrogations sous-tendues par deux orientations majeures : descriptive d'une part, normative d'autre part. Par orientation descriptive, on entend ici toutes les recherches visant à dégager la structure interne de chaque mode de raisonnement, à préciser les contextes dans lesquels il est effectivement employé, à mesurer sa fécondité heuristique en termes de contribution à l'élaboration de connaissances nouvelles. Par orientation normative, on désigne les travaux qui portent plus précisément sur la validité de chaque mode de raisonnement au regard de la logique, et sur sa légitimité dans le cadre d'une justification rationnelle de la connaissance.

¹ Samir Okasha, *Philosophy of Science. A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2002, p. 18. Traduction personnelle.

Toutes ces questions peuvent bien sûr coexister dans l'œuvre de ceux qui s'intéressent aux sciences, qu'ils soient philosophes, historiens ou sociologues. Au fil de ces dernières décennies, on a cependant assisté à un glissement de l'orientation exclusivement normative et revendiquée comme telle, vers une orientation plus ou moins descriptive. En d'autres termes, on a (au moins partiellement) substitué l'interrogation : « Quels sont les modes de raisonnement employés *de fait* dans les sciences ? » à celle qui incitait davantage à établir les règles d'une juridiction épistémologique : « Quels sont les modes de raisonnement que les sciences *doivent* (ou du moins *devraient*) employer ? » Pour des raisons multiples, quoique non contraignantes – refus des positions aprioristes et des approches transcendantales, adhésion au tournant pratique tel qu'il a eu lieu depuis trois décennies dans les études sur la science, recours à l'ethnographie de laboratoire – mon approche sera clairement descriptive dans les pages qui suivent. Pour employer des termes qui réapparaîtront dès la première section de cet article, la démarche à laquelle je souscris est d'inspiration inductivo-empirique, selon la formule utilisée à plusieurs reprises par Nathalie Heinich². Franchissant les portes d'un laboratoire de sciences observationnelles ou expérimentales donné, je débute toujours mon travail d'investigation par une phase d'observation des pratiques à l'œuvre, entendues comme un ensemble d'actions hautement finalisées, supposant entre autres des habiletés corporelles et des savoirs tacites, relativement à des dispositifs matériels, à des cadres conceptuels, à des types de résultats, à des modes de diffusion de ces derniers.

Ainsi, si on s'en tient à la question des modes de raisonnement, force est de reconnaître que dans le cadre de la « conception standard des sciences », éminemment normative, qui a longtemps prévalu dans le domaine de la philosophie des sciences, deux modes ont été privilégiés, que ce soit dans les manuels à destination des étudiants ou dans le cadre des recherches les plus pointues menées depuis le début du XX^e siècle³. Il

² Nathalie Heinich résume ainsi sa démarche sociologique : elle consiste dans « le fait de partir de séquences observées dans la vie réelle - ce que l'on appelle des « études de cas » - pour en tirer des conclusions plus générales, susceptibles de s'appliquer à d'autres cas (et non pas de partir de raisonnements abstraits que l'on illustrerait ensuite par des exemples). (...) Cette opposition entre empirisme et pensée inductive d'un côté, conceptualisme et pensée déductive de l'autre, existe également dans la tradition philosophique. » (Nathalie Heinich & Jean-Marie Schaeffer, « Art, création, fiction. Entre sociologie et philosophie ». Entretien avec A. Prstojevic & A. Louis, *VoxPoetica*. 2005, Lettres et sciences humaines, <http://www.vox-poetica.org/entretiens/intSchaefferHeinich.html>, consulté le 23/06/2013). Voir également Nathalie Heinich, *La sociologie à l'épreuve de l'art (1^{ère} partie)*, La Courneuve, Aux lieux d'être, 2006, p. 11.

³ Kevin N. Dunbar, "Understanding the Role of Cognition in Science: the Science as Category Framework" in P. Carruthers, Stephen Stich & Michael Siegal (dirs.),

s'agit en l'occurrence de la *déduction* et de l'*induction*. Or, dès lors que l'on adopte une visée essentiellement descriptive, il apparaît rapidement que ces deux modes de raisonnement ne suffisent pas à rendre compte des pratiques effectives au sein des laboratoires. Deux autres modes, l'*abduction* et l'*analogie*, y jouent également un rôle-clé. Ceci se révèle particulièrement flagrant lorsqu'on observe les activités relatives à la production et à l'exploitation d'images, comme j'ai eu l'occasion de le faire au cours d'enquêtes ethnographiques menées dans deux laboratoires déterminés⁴. Dans la suite de mon propos, nous verrons que le singulier « un mode de raisonnement » ne saurait convenir ici, et que l'adoption d'un mode n'est pas exclusif des autres dans le cadre d'une

The Cognitive Basis of Science, Cambridge, GB, Cambridge University Press, 2002, p. 154.

⁴ J'ai séjourné durant plusieurs mois dans deux laboratoires : en physique des matériaux et en astrophysique. Au sein de chacun d'eux, j'ai effectué des observations de la pratique scientifique au quotidien et réalisé des entretiens centrés sur la production et les fonctions des images.

Le Groupe Surface-Interface (GSI) de l'Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS) est un laboratoire qui étudie les structures et les propriétés des surfaces de matériaux, le plus souvent inorganiques. Les investigations menées ont un caractère essentiellement expérimental et recourent aux principes théoriques de la physique quantique. L'objectif du laboratoire est le développement de matériaux déterminés et la maîtrise de leurs propriétés. Il s'agit de comprendre pourquoi telle ou telle propriété apparaît dans le cadre de tel ou tel protocole expérimental. Les résultats des recherches peuvent être utilisés éventuellement dans le cadre d'une recherche-développement par des industriels, mais ce n'est pas là l'objectif principal du laboratoire. Les chercheurs utilisent quotidiennement des microscopes tels que le microscope électronique à transmission (MET), le microscope électronique à balayage (MEB), le microscope à effet tunnel (STM), le microscope à force atomique (AFM).

Le *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* ou CfA est un centre de recherche qui regroupe près de 300 scientifiques. Les recherches qui y sont menées portent en particulier sur la nature et l'évolution de l'univers. Le CfA est divisé en plusieurs départements scientifiques :

- le département de physique atomique et moléculaire (*AMP*) ;
- le département d'astrophysique des hautes énergies (*HEA*) ;
- le département d'astronomie optique et infrarouge (*OIR*) ;
- le département de radioastronomie et de géo-astronomie (*RG*) ;
- le département des sciences solaires, stellaires et planétaires (*SSP*) ;
- le département d'astrophysique théorique (*TA*) ;
- le département de sciences de l'éducation (*SED*).

Chacun de ces départements comporte un nombre important de laboratoires de recherche. Pour mon étude, j'ai séjourné plus longuement dans le département de radioastronomie et de géo-astronomie et dans le département d'astrophysique des hautes énergies. Les astrophysiciens utilisent largement tous les types de télescopes couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique (téléscope optique, à rayons X, à infrarouge, radiotélescope, etc.).

même recherche. On peut ainsi dégager de notables différences entre physique des matériaux et astrophysique quant au recours à l'un ou l'autre des types d'inférence étudiés. Le classique modèle épistémologique allant de l'émission d'une hypothèse à sa vérification *via* le raisonnement déductif semble mis à mal dès lors que l'on prend en compte : 1) des modes de raisonnement qui ne sont pas unanimement considérés comme légitimes sur le plan épistémologique (induction, abduction et analogie apparaissent comme problématiques pour des raisons diverses) ; 2) le fait que les possibilités concrètes d'appréhension des objets d'étude au sein de chaque science observationnelle ou expérimentale influencent significativement le recours à tel ou tel mode de raisonnement.

Abduction et analogie sont parfois purement et simplement rejetées hors du champ des inférences acceptables, ou voient leur impact effectif diminué dans les comptes rendus proposés de telle ou telle recherche – alors qu'elles sont pourtant parfaitement repérables comme ayant joué un rôle essentiel, aussi bien dans l'histoire des sciences que dans les activités quotidiennes des laboratoires. Je tenterai de cerner dans un dernier point de cet article les multiples fonctions assurées par ces types d'inférence – abduction et analogie – dans la recherche au quotidien, et ce notamment dans les pratiques qui incluent des images comme éléments de preuve.

1. Déduction, induction, abduction

Quelle est la visée fondamentale des chercheurs qui œuvrent dans le cadre des sciences de la nature ? Celle-ci peut se résumer simplement : ils sont constamment à l'affût de nouvelles informations, de nouveaux concepts, de nouvelles lois. Soulignons-le d'emblée : les procédures cognitives susceptibles d'atteindre cette fin sont multiples et ne se limitent pas aux modes de raisonnement identifiés, décrits et évalués expressément comme tels, le plus souvent depuis l'Antiquité. Ainsi, et pour m'en tenir à un seul exemple issu de mes observations au CfA, le premier travail des astrophysiciens consiste à tenter de se repérer au sein d'une multitude d'objets célestes : *classer* est donc la première étape de la recherche en astrophysique⁵. Observer une multitude d'objets, en

⁵ Plusieurs manières de classer les objets célestes ont été mises au point au fil des siècles. Afin de se repérer dans le ciel, les astronomes des siècles passés découpèrent ce dernier en un certain nombre de figures reliant entre elles les étoiles les plus brillantes : ce sont les constellations. Ils donnèrent à ces constellations des noms issus de la mythologie (Cassiopée, Andromède), des noms d'animaux (le Cygne, la Grande Ourse) ou d'objets techniques (la Balance, la Lyre). Les premiers astronomes antiques n'observèrent que les constellations visibles dans l'hémisphère Nord. Ce furent les astronomes Johann Bayer (1572-1625) et Nicolas Louis de la Caille (1713-1762) qui se livrèrent au même travail

dégager les caractéristiques précises, puis entreprendre une classification sous forme de catalogues reposant sur ces caractéristiques, est une démarche repérable dans l'histoire de l'astronomie avant même l'apparition des premières lunettes astronomiques. Cette entreprise se

pour l'hémisphère Sud. Les limites des constellations restaient cependant floues et indéterminées. En 1922, l'Union Astronomique Internationale régla une fois pour toutes le problème en découpant le ciel en 88 constellations. En ce qui concerne la classification des étoiles, durant l'Antiquité, elles étaient nommées en fonction de la constellation à laquelle elles appartenaient. Au Moyen-Age, les astronomes arabes attribuèrent un nom aux étoiles les plus brillantes selon le même principe : Rigel, qui signifie « pied » en arabe, est l'étoile la plus brillante du pied gauche de la constellation d'Orion. Les noms donnés par les Arabes sont restés d'usage courant. Bayer, précédemment évoqué, classa quant à lui les étoiles des constellations en fonction de leur luminosité décroissante, en prenant pour base l'alphabet grec, puis l'alphabet latin suivi du génitif du nom latin de la constellation. Ainsi, Castor et Pollux, les deux étoiles les plus brillantes des Gémeaux (*Gemini*), sont nommées respectivement α et β *Geminorum* (α et β Gem). John Flamsteed (1646-1719) poursuivit cette entreprise de classification en employant des nombres afin de constituer des numéros. Cette nomenclature, encore en vigueur de nos jours, est appelée la nomenclature de Bayer-Flamsteed. Le nombre d'étoiles découvertes ayant considérablement augmenté, elles sont nommées, actuellement, d'après leurs numéros dans des catalogues spécifiques (catalogues d'étoiles binaires, variables, observées avec tel ou tel instrument, etc.). Une étoile appartenant à plusieurs catalogues a donc plusieurs noms, l'essentiel ne résidant pas dans le choix de telle ou telle dénomination, mais dans l'établissement de ses coordonnées célestes précises. Pour ce qui est des autres types d'objets célestes, il existe de nombreux catalogues en ligne sur Internet en fonction des objets et des instruments utilisés. À chaque fois qu'un nouveau satellite comprenant un télescope est mis en orbite, la première tâche des astrophysiciens est de réaliser un recensement et une classification des objets, nouveaux ou non, observés au moyen de ce nouveau télescope : en ligne sont donc accessibles par exemple les données résultant de l'« *Iras Survey* » ou de la « *Chandra Survey* ». Quelques mots, pour finir, sur deux catalogues très célèbres et dont les dénominations sont toujours largement utilisées : le catalogue de Messier et le *New General Catalogue* (NGC). Le catalogue de Charles Messier (1730-1817), élaboré entre les années 1758 et 1782, établit une liste d'une centaine d'objets diffus (Messier ne savait pas trop, en raison des limitations instrumentales de son époque, s'il s'agissait de comètes ou non). En fait, sans le savoir, il réalisa la collection des plus beaux objets du ciel comprenant des nébuleuses, des amas d'étoiles, des galaxies. Ce catalogue a été réactualisé depuis sa création. Quant au *New General Catalogue of Nebulae and Star Clusters* créé en 1888, il comprend actuellement près de 8000 objets. Là encore, un même objet peut posséder plusieurs dénominations : la grande nébuleuse d'Orion s'appelle M42 dans le Catalogue Messier et NGC 1976 dans le *New General Catalogue*.

Pour plus de précisions sur les catalogues, voici quelques sites :

<http://www.obspm.fr/~webaim/Astro/Rastro/Cours/C08/etoiles.html>

http://www.obspm.fr/messier/Messier_f.html

<http://www.glyphweb.com/esky/concepts/ngc.html>

poursuit actuellement : certains astrophysiciens ont pour tâche de réactualiser les différents catalogues disponibles en y incluant les nouveaux objets repérés. Cette entreprise ne s'avère d'ailleurs pas toujours aisée⁶.

La procédure consistant à classer les objets d'étude pertinents au regard d'une science donnée (en l'occurrence, l'astrophysique) incorpore par moments des modes de raisonnement⁷ qui sont précisément ceux que je vais évoquer maintenant plus en détail, tout en se distinguant d'eux par certains aspects qui lui sont spécifiques. Dans les pages qui suivront, je m'en tiendrai aux quatre types d'inférence annoncés dès l'introduction : la déduction, l'induction, l'abduction et l'analogie.

Quelle est tout d'abord la place de la *déduction* dans le cadre des pratiques ayant cours au sein de laboratoires tels que le GSI et le CfA ? Celle-ci n'est évidemment pas absente du travail des chercheurs en physique des matériaux et en astrophysique, à différentes étapes de leur travail.

Pour comprendre ce qu'est le mode de raisonnement déductif, il convient de rappeler d'abord la distinction essentielle entre *validité formelle* et *vérité matérielle*. « La validité concerne l'inférence, le lien logique entre prémisses et conclusion. Elle ne concerne pas la vérité des prémisses ou celle de la conclusion, ces vérités pouvant être établies le

⁶ Le cas de la définition d'un objet comme celui de galaxie est intéressant. L'idée d'univers-îles (qui deviendra par la suite, l'objet « galaxie ») est née au XVIII^e siècle (Emmanuel Kant, Friedrich Wilhelm Herschel) et devra attendre le XX^e siècle et les travaux d'Edwin Hubble pour réellement acquérir toute sa consistance. En effet, jusque-là, les astronomes avaient observé certains objets « nébuleux », mais sans clairement les distinguer les uns des autres. Par exemple, au début du XX^e siècle, T. Chamberlin recourut à la photographie afin d'étudier la formation des météorites, comètes et nébuleuses, ce dernier terme recouvrant en fait tous les objets célestes étendus à l'exception des comètes. C'est parmi cette catégorie d'objets désignés par le terme de « nébuleuse » que va peu à peu se construire l'objet « galaxie », en s'appuyant entre autres, sur les progrès notables des télescopes de l'époque. Mais ce qui est intéressant, c'est que Hubble est parvenu très progressivement à ses conclusions. Même si les télescopes offraient de bien meilleures résolutions, l'objet « galaxie » ne s'est pas imposé immédiatement à lui. Il lui a fallu prouver dans un premier temps l'existence de nébuleuses extragalactiques (le fait que des objets puissent être situés en dehors de la Voie Lactée était pour certain astronomes de l'époque inimaginable), puis asseoir la notion d'univers-îles. Pour plus de précisions sur ces points, je renvoie à la thèse de Francis Massart (Francis Massart, *Une histoire de l'image dans l'astrophysique et la cosmologie au XX^e siècle*, 2007).

⁷ En particulier l'analogie.

plus souvent indépendamment les unes des autres. »⁸ Une déduction – entendue comme le fait de dégager les implications logiques de prémisses afin d’aboutir à une conclusion⁹ – peut être valide tout en ayant une prémisse fausse, ou être non valide tout en ayant une conclusion vraie¹⁰. Lorsque la déduction est valide et que les prémisses sont vraies, la conclusion est nécessairement vraie. On dit que la conclusion « préserve » la vérité des prémisses. Dans tous les cas, ce qui caractérise la déduction au premier chef, c’est qu’elle n’apporte pas de savoir nouveau dans sa conclusion qui ne soit déjà en un sens contenu dans ses prémisses. « Sur l’échelle des méthodes génératrices de nouveauté, l’inférence déductive est située au plus bas, car elle ne peut en aucune façon donner naissance à une information nouvelle. »¹¹

Par conséquent, le mode de raisonnement déductif ne saurait se suffire à lui-même lorsqu’on l’emploie dans le cadre des sciences observationnelles ou expérimentales. Le rapport à l’empirie de ces dernières constitue une composante de base que l’on ne saurait esquiver, et la déduction, comme on l’a vu, est indifférente à l’égard du fait que

⁸ Ian Hacking & Michel Dufour, *L’ouverture au probable. Eléments de logique inductive*, Paris, Armand Colin, 2004, p. 15.

⁹ Pour fournir une formulation plus rigoureuse du raisonnement déductif : « un ensemble de prémisses Γ a pour conséquence logique un énoncé A si, et seulement si, il est impossible que les prémisses contenues dans Γ soient vraies, tandis que A serait faux. » Mikaël Cozic, « Confirmation et induction », *Précis de philosophie des sciences*, Anouk Barberousse, Denis Bonnay & Mikaël Cozic (dirs.), Paris, Vuibert, 2011, p. 63.

¹⁰ Je reprends ici les exemples fournis par Ian Hacking et son traducteur Michel Dufour dans l’ouvrage introductif *L’ouverture au probable. Eléments de logique inductive*. Pour un exemple de raisonnement valide qui peut avoir une prémisse fausse, mais une conclusion vraie :

« 1. Tous les philosophes célèbres ayant vécu plus de quatre-vingt-dix ans s’adonnaient à la logique mathématique.

2. Bertrand Russell, philosophe célèbre, vécut plus de quatre-vingt-dix ans.

Donc : 3. Bertrand Russell s’adonnait à la logique mathématique. » Ici, l’argument est valide et de surcroît, la conclusion est matériellement vraie. En revanche, la première prémisse est fausse, Hobbes ayant vécu au XVII^e siècle, plus de quatre-vingt-dix ans, sans s’être adonné à la logique.

Pour un exemple de raisonnement non valide ayant à la fois des prémisses et une conclusion vraie, Hacking et Dufour proposent le suivant :

« 1. Certains philosophes brillants, mais décédés, écrivirent de nombreux livres.

2. Le philosophe Bertrand Russell est décédé.

Donc : 3. Bertrand Russell était brillant et écrivit de nombreux livres. » (Ian Hacking & Dufour, *L’ouverture au probable. Eléments de logique inductive*, op. cit., p. 16).

¹¹ Aharon Kantorovich, *Scientific Discovery. Logic and Tinkering*, New York, State University of New York Press, 1993, p. 64. Traduction personnelle.

nous pouvons « connaître certaines choses sur le monde ». ¹² Néanmoins, il ne faudrait pas la congédier sans autre forme de procès et sans avoir pris la peine de relever quelques-uns des moments au cours desquels elle constitue un élément clé dans l'activité des chercheurs. Parmi ces moments, on compte ceux qui consistent à faire appel à des modèles mathématiques. On verra également plus loin que selon les versions canoniques du mode de raisonnement abductif, celui-ci suppose l'existence d'une nécessaire étape déductive.

Qu'en est-il, dans un deuxième temps, de l'*induction* ? Pourquoi ne pourrait-on affirmer que le mode de raisonnement dominant au sein des laboratoires est le mode inductif ? Premier constat de fait : le terme « induction » recouvre en réalité une multiplicité d'acceptions. Si l'on souhaite trouver une formulation synthétique, qui prenne en compte ces dernières, tout en négligeant les extensions périphériques ¹³, on utilisera la définition proposée par Claudine Tiercelin :

Toute forme d'inférence par laquelle on passe d'un ensemble fini d'observations particulières à une conclusion générale, et qui n'est pas de nature démonstrative. ¹⁴

Parmi les distinctions susceptibles d'être établies sur la base de cette définition, il en est une sur laquelle insiste Robert Blanché : selon lui, le sens du mot « induction » oscille entre deux acceptions : celle d'un *passage du particulier au général* qui remonte à Aristote, et celle d'un *passage des faits à la loi* que l'on peut rapporter aux travaux des physiciens, qui, de Galilée à Newton, ont élaboré la méthode expérimentale rendant possible l'émergence des sciences de la nature modernes. ¹⁵ Qu'on souscrive à l'une ou à l'autre de ces acceptions, les traits communs à toutes les conceptions de l'induction depuis Aristote sont les suivants : un *point de départ, direct ou indirect, dans l'expérience* – c'est-à-dire la caractéristique de toute opération inductive de reposer en définitive sur des données de fait ; un *mouvement de remontée qui va des conséquences vers des principes* et qui prend à rebours l'ordre

¹² Ian Hacking & Michel Dufour, *L'ouverture au probable. Eléments de logique inductive*, op. cit., p. 17.

¹³ Parmi ces extensions périphériques, on compte notamment le raisonnement par récurrence qu'Henri Poincaré appelle « induction mathématique ». À l'autre extrémité, on trouve l'inférence conjecturale du type de celles que dégage le détective ou l'historien – et que pour ma part, j'intégrerai plutôt à la classe des raisonnements de type abductif.

¹⁴ Claudine Tiercelin, « Induction » in *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Dominique Lecourt (dir.), Paris, Puf, 1999, p. 506.

¹⁵ Robert Blanché, *L'induction scientifique et les lois naturelles*, Paris, Puf, 1975, p. 8-9.

déductif ; un *caractère d'insécurité*, dans la mesure où dans l'inférence inductive, la conclusion dit plus que les prémisses et peut se révéler fautive en dépit de la vérité de ces dernières. Une idée de risque logique est donc constitutivement associée à la nature ampliative de l'induction¹⁶. Qu'est-ce qui permet d'affirmer, sur la base de nombreuses observations de corbeaux noirs, que tous les corbeaux sont noirs ? Bon nombre d'auteurs se sont penché avec des intentions et des formulations distinctes sur le problème de la justification de l'induction¹⁷.

Cependant, si on néglige le point de vue de la logique qui condamne impitoyablement le mode de raisonnement inductif, on peut malgré tout lui accorder une certaine fécondité, notamment si l'on s'appuie sur un modèle probabiliste¹⁸. Ce dernier permet de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses, lois ou théories. Il suppose une certaine fréquence d'apparition d'un phénomène, si l'on veut que les résultats du calcul de probabilités soient opératoires. En physique des matériaux, dans un laboratoire tel que le GSI, la difficulté à mettre à jour les phénomènes étudiés, depuis l'élaboration de l'échantillon jusqu'à la production et à l'exploitation d'une image, entraîne que les chercheurs n'ont pas affaire à une multitude de cas similaires qu'ils pourraient intégrer dans une

¹⁶ Une restriction s'impose au passage : toute induction n'est pas nécessairement ampliative. Aristote, pour sa part, considérait l'induction comme une induction par énumération et distinguait deux cas possibles. Soit l'induction est complète (tous les cas sont énumérés) et se ramène à une forme de syllogisme, certes imparfait, mais dont les prémisses garantissent la conclusion. Soit l'induction est ampliative, à concevoir non pas comme un syllogisme, mais comme « une saisie intuitive de l'universel dans le donné sensible » (*Ibid.*, p. 11). En tant que telle, elle comporte bien évidemment le risque logique qu'on lui a classiquement reconnu.

¹⁷ Si l'on résume, avec John Watkins le problème tel que David Hume le posait au XVIII^{ème} siècle, (sans employer, pour sa part, le terme d'induction) : les inférences inductives, allant de cas observés à des cas non encore observés sont : (1) indispensables, à la fois dans la vie quotidienne et dans les sciences de la nature ; (2) injustifiables. Le choix de Hume a consisté à retenir à la fois les propositions (1) et (2), ce qui a fait dire que sa position était schizophrénique et intenable. Emmanuel Kant et les membres du Cercle de Vienne ont retenu la proposition (1) et rejeté la (2). Ceci les a conduits à chercher à justifier l'induction par des voies diverses. Karl Popper, enfin, a rejeté la proposition (1) et accepté la (2) en proposant une voie de sortie constituée par sa théorie falsificationniste de la connaissance empirique. John Watkins, "A New View of Scientific Rationality", *Revue de Synthèse*, n° 3-4. Pour plus de précisions relatives au problème de l'induction, voir Catherine Allamel-Raffin & Jean-Luc Gangloff, *La raison et le réel*, Paris, Ellipses, 2007 ; Léna Soler, *Introduction à l'épistémologie*, Paris, Ellipses, 2009.

¹⁸ On accepte dès lors que l'induction ne peut atteindre que le vraisemblable. La fonction du calcul de probabilité est de contrôler cette vraisemblance. Ce qu'on a exclu inéluctablement, en l'occurrence, ce sont la nécessité et l'universalité.

même rubrique d'énoncés d'observation. Cela ne signifie pas qu'ils ne parviennent en aucun cas à des énoncés universels ayant valeur de principe, mais plutôt que leurs procédures de raisonnement ne relèvent pas essentiellement de l'induction. En astrophysique, au CfA, la situation est sensiblement différente. Le raisonnement inductif y est facilité du fait même de la possibilité de reproduire les observations relatives à des propriétés ou aux mouvements des objets célestes. Cependant, là encore, l'induction seule se révèle incapable de rendre compte de toutes les activités qui ont cours dans un tel laboratoire. Car, bien que l'astrophysique soit une science observationnelle, il lui faut également déterminer les processus qui sous-tendent la formation et l'évolution des objets célestes contenus dans l'univers et en fournir des modèles explicatifs¹⁹. Une telle visée ne peut être atteinte en recourant seulement de façon massive à l'induction.

Quel est dès lors le mode de raisonnement qui permettrait de mieux comprendre la recherche au quotidien effectuée dans les deux laboratoires, celui du GSI et celui du CfA ? L'*abduction* semble ici constituer le meilleur candidat possible. Elle est définissable ainsi, selon Charles Sanders Peirce :

Le fait surprenant C est observé ;
Mais si A était vrai, C irait de soi.
Partant, il y a des raisons de soupçonner que A est vrai.²⁰

Le raisonnement abductif a la forme suivante : un phénomène observé est surprenant. Mais ce phénomène ne serait plus aussi surprenant si une hypothèse d'une certaine espèce était vraie, alors le phénomène s'expliquerait. Alors on essaie de formuler une hypothèse en question. Parmi les hypothèses de cette espèce, on voit par approximation laquelle permet de déduire le phénomène initial avec le plus d'exactitude.²¹

Dans tous les cas, il faut qu'il y ait eu une observation initiale « surprenante ». On part donc toujours du « terrain », à la différence de ce que l'on rencontre dans le raisonnement hypothético-déductif. Pour Norwood Russell Hanson (1961), ce dernier est en réalité assimilable à une reconstruction *a posteriori*, correspondant à une logique de la justification, tandis que l'abduction, pour sa part, caractériserait plutôt

¹⁹ Voir sur ce point le très intéressant ouvrage de Stéphanie Ruphy : *Pluralismes scientifiques. Enjeux épistémiques et métaphysiques*, Paris, Hermann, 2013.

²⁰ Charles Sanders Peirce, *Œuvres I. Pragmatisme et pragmaticisme*, Claudine Tiercelin & Pierre Thibaud (dirs.), Paris, Editions du Cerf, 2002, p. 425 ; CP. 5. 189.

²¹ Pierre Jacob, *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique*, Paris, Puf, 1980, p. 446.

une logique de la découverte²². Proposer un modèle de la découverte exclusif, comme le fait Hanson, est partiellement erroné, mais a le mérite d'inciter à penser, *a contrario*, qu'il n'existe pas une et une seule méthode de recherche scientifique. C'est la prétention à l'universalité du modèle épistémologique, quel qu'il soit, qui s'avère contestable. Au sein d'un même domaine général de recherche, la physique par exemple, il semble pertinent d'affirmer que différents modèles de la découverte coexistent, s'appliquent à des objets distincts et se fécondent mutuellement. Ainsi, la physique d'Albert Einstein peut se comprendre à partir d'un modèle hypothético-déductif (et ce n'est pas un hasard si Einstein a grandement impressionné Popper). Dans un laboratoire de recherche comme le GSI ou le CfA, en revanche, c'est le mode de raisonnement abductif qui paraît jouer un rôle essentiel²³. Qu'est-ce qui justifie la distinction entre la

²² La logique de la découverte au sens de Hanson, c'est « ... l'analyse des raisons de suggérer une hypothèse, elle s'inspire du raisonnement réductif de Peirce. » « Ce que refuse Hanson, c'est donc l'idée que le processus de découverte d'une hypothèse n'a rien à voir avec la logique (inductive ou déductive) : qu'il relève de facteurs psychologiques, sociologiques ou historiques » (*Ibid.* p. 446). Rappelons que le contexte de la *découverte* a été distingué du contexte de la *justification* par les philosophes du début du XX^{ème} siècle. Le contexte de la découverte renvoie à un ensemble de facteurs relevant du *quid facti* ? kantien. Ces facteurs sont susceptibles d'intéresser les historiens, les sociologues et les psychologues : qui a fait la découverte ? Est-elle le fruit d'une intuition heureuse, d'une idée empruntée à un rival ou le résultat d'un travail acharné de toute une vie ? Quel milieu social ou religieux a favorisé ou entravé le développement des recherches ? Du point de vue des membres du Cercle de Vienne, de Reichenbach et de Popper, ces interrogations ne présentent aucun intérêt pour qui mène une enquête philosophique. Seul importe le contexte de la justification (*quid juris*?) : l'énoncé correspondant à l'hypothèse théorique est-il justifié ? Est-il logiquement sous la dépendance d'autres énoncés ? Est-il confirmé par l'expérience ou corroboré par des essais rigoureux ? La tâche dévolue à la philosophie des sciences consiste à développer une analyse logique de la connaissance scientifique, conçue sous l'angle de la justification, excluant par conséquent tout ce qui a trait à la découverte elle-même – point de vue que Hanson remet en question (tout en refusant lui aussi le psychologisme, le sociologisme et l'historicisme).

²³ Si l'on se rapporte au contexte des études expérimentales menées dans les deux laboratoires où j'ai séjourné, le modèle hypothético-déductif poppérien tombe sous le coup de la même réserve que celle que j'ai esquissée plus haut pour l'induction. Afin de pouvoir tester l'hypothèse théorique de départ, il faut postuler la possibilité de tests multiples, et non d'un test unique. On se heurte donc au problème de la reproductibilité des conditions expérimentales en matière de production d'images. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, dans un laboratoire comme le GSI, on ne reproduit pas des expériences afin de corroborer ou de falsifier des énoncés théoriques (pour des raisons qui tiennent à l'impossibilité matérielle de reproduire à l'identique les conditions de chaque expérimentation). C'est l'abduction qui va permettre de remédier à cet état de fait. En astrophysique, la situation est sensiblement différente. Il est possible, et

démarche hypothético-déductive et la démarche abductive ? C'est le statut de l'hypothèse²⁴. Dans la première, l'hypothèse a une fonction initiale, fondatrice. Dans la seconde, on remonte vers l'hypothèse à partir d'observations indirectes.

Dans ces deux mouvements, le sens de l'hypothèse est inversé : alors que la déduction, qui procède par syllogisme catégorique, ouvre un déroulement programmatique (appuyé sur des assertions définitionnelles), de son côté, l'abduction, qui procède par syllogisme hypothétique, est l'expression d'une genèse des enchaînements.²⁵

Avec l'abduction, nous avons affaire à un principe de découverte associé à une construction théorique en un sens opposé au principe d'exposition hypothético-déductif. Carlo Ginzburg²⁶ résume la spécificité de l'inférence abductive peircienne en parlant de « la tendance fondamentale à inférer les causes des effets ». Plus encore, ce qui distingue l'abduction des autres modes de raisonnement, selon Peirce lui-même, c'est qu'elle est la seule à permettre la *création d'idées nouvelles*. Grâce à l'abduction, on conclut à l'existence de quelque chose qui est totalement différent de ce que l'on a pu observer empiriquement, et qui est généralement inobservable directement.

L'abduction est le processus qui consiste à former une hypothèse explicative. C'est la seule opération logique qui introduise la moindre idée nouvelle ; car l'induction ne fait rien si ce n'est déterminer une valeur, et la déduction se contente de dérouler les conséquences nécessaires d'une pure hypothèse.

La Déduction prouve que quelque chose *doit* être, l'Induction montre que quelque chose *est effectivement* opérant. L'Abduction suggère simplement que quelque chose *peut être*.²⁷

La constitution d'hypothèses caractérise en propre l'abduction. En témoigne une étude de cas historique souvent reprise, même par des

même conseillé, de répéter des observations qui pourraient sembler dans un premier temps insuffisantes pour parvenir à des conclusions solides. Cela dit, le processus de recherche débute rarement par l'élaboration d'une hypothèse de départ qu'il convient d'infirmer ou de confirmer dans un second temps. En général, le processus de recherche débute par l'identification d'un phénomène ou objet inhabituel, qu'il va s'agir en général de caractériser.

²⁴ Pierre Boudon, « Entre rhétorique et dialectique : la constitution des figures d'argumentation » in *Langue française*, n° 137, 2000.

²⁵ *Ibid.*, p. 83.

²⁶ Carlo Ginzburg, « Signes, traces, pistes. Racines d'un paradigme de l'indice », *Le Débat* n° 6, Paris, Gallimard, p. 3-44 (traduit de l'italien par Jean-Pierre Cottureau), 1980, p. 15.

²⁷ Charles Sanders Peirce, *Œuvres I. Pragmatisme et pragmatisme*, Claudine Tiercelin & P. Thibaud (dirs.), *op.cit.*, p. 401 ; CP. 5-171.

philosophes très critiques à l'égard du concept d'abduction : il s'agit de la découverte de la cause de la fièvre puerpérale qui fut l'occasion, pour le jeune médecin Ignaz Semmelweis, de formuler de nombreuses hypothèses jusqu'à ce qu'il parvienne à celle qui se révéla au moins provisoirement satisfaisante²⁸.

2. Trois types d'abduction

On peut distinguer plusieurs types d'abduction selon Umberto Eco²⁹ : l'abduction hypercodée, l'abduction hypocodée, l'abduction créative. À ceux-ci, Eco ajoute la méta-abduction que j'assimilerai pour ma part à une procédure de vérification. Nous allons voir que ces trois types sont diversement à l'œuvre dans l'activité de recherche menée au sein du GSI ou du CfA.

2.1 L'abduction hypercodée

Dans l'abduction hypercodée, l'hypothèse (ou la loi) est suggérée par le contexte et les connaissances des chercheurs. Par exemple, lors d'une prise d'image avec un microscope à effet tunnel (STM), l'apparition de certaines distorsions sur l'image conduit les chercheurs à émettre l'hypothèse d'une déficience de la pointe de l'instrument, de manière quasi instantanée et inconsciente. Cette hypothèse abductive hypercodée peut s'avérer judicieuse, mais les scientifiques participant à l'investigation savent bien qu'ils pourraient en formuler d'autres et qu'ils

²⁸ L'étude de cas fut d'abord utilisée par Carl Hempel dans le cadre d'une présentation didactique de la méthode hypothético-déductive (Carl Hempel, *Éléments d'épistémologie*, Paris, Armand Colin, 1966/2012, traduit de l'anglais (USA) par Bertrand Saint-Sernin). Elle a ensuite été exploitée notamment par les auteurs suivants : Peter Lipton, *Inference to the Best Explanation*, Oxon, Routledge, 1991 (deuxième édition : 2004) ; Sami Paavola, "Hansonian and Harmanian Abduction as Models of Discovery", *International Studies in the Philosophy of Science*, vol. 20, n° 1, 2006 ; Alexander Bird, "Eliminative Abduction: examples from medicine", *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 41, 2010. J'ai moi-même repris dans deux ouvrages l'étude de cas (à partir de la version qu'en propose Hempel) pour y souligner le rôle déterminant de l'abduction (Catherine Allamel-Raffin & Jean-Luc Gangloff, *La raison et le réel*, *op.cit.* ; Catherine Allamel-Raffin & Alain Leplège, *Histoire de la médecine*, Paris, Dunod, 2008). Cela sans savoir que parallèlement, elle était traitée par Alain-Charles Masquelet dans son *Que Sais-Je ?* ayant pour objet le raisonnement médical paru en 2006. Les auteurs anglophones précités recourent à cet épisode de l'histoire de la médecine pour établir une distinction entre abduction et inférence à la meilleure explication (*IBE* ou *Inference to the Best Explanation*) que je néglige dans le cadre du présent article. On peut lire sur ce point Sami Paavola, "Hansonian and Harmanian Abduction as Models of Discovery", *International Studies in the Philosophy of Science*, *op.cit.*

²⁹ Umberto Eco, *Les limites de l'interprétation* (1983), Paris, Grasset (traduit de l'italien par Myriem Bouzaher, 1992, p. 262.

seront peut-être même amenés à le faire. De même, au CfA, la distorsion d'une image de manière symétrique conduira les chercheurs à penser de manière quasi immédiate qu'ils ont affaire à un artefact instrumental.

2.2 L'abduction hypocodée

L'abduction hypocodée consiste à choisir parmi un ensemble d'hypothèses équiprobables. Dans ce cas, l'hypothèse choisie devra être soumise à vérification. Elle ne s'impose pas comme allant de soi, mais entre en concurrence avec d'autres hypothèses possibles. Ainsi, par exemple, dans le cas de l'apparition d'un nouveau cercle blanc sur une micrographie réalisée avec un microscope électronique à transmission (MET), plusieurs hypothèses abductives hypocodées s'offrent à la microscopiste : le cercle correspond soit à un artefact causé par l'appareil, soit à une caractéristique nouvelle de l'objet étudié. Ce n'est qu'après de multiples recoupements nécessitant des mois de labeur que la microscopiste a pu retenir l'hypothèse de l'artefact.

De même au CfA, les chercheurs ont détecté des quasars présentant de grandes ressemblances sur le plan optique, ce qui constitue un fait surprenant. Les hypothèses envisagées permettant de rendre compte de ce phénomène surprenant sont :

- l'obtention de deux images similaires d'un même quasar en raison d'une lentille gravitationnelle ;
- l'existence de deux quasars réellement distincts, mais se ressemblant beaucoup sur le plan optique.

Les chercheurs ont envisagé les deux hypothèses pour parvenir définitive à la quasi-certitude de la présence simultanée de deux quasars, ces derniers possédant des caractéristiques significativement différentes dans le domaine des rayons X.

Ces deux types d'abduction – hypercodée et hypocodée – sont fréquemment exploités dans les recherches menées dans le cadre de la « science normale ». On s'appuie sur l'expérience acquise par l'ensemble de la communauté scientifique et sur la sienne propre. Ces abductions apparaissent comme acceptables en vertu du savoir antérieur, et sont en conformité avec les schèmes de pensée en vigueur.

2.3 L'abduction créative

Dans l'abduction créative, l'hypothèse doit être inventée de toutes pièces et n'est donc pas nécessairement conforme aux attentes des chercheurs et aux théories impliquées dans un travail expérimental de routine. L'expérience antérieure et les connaissances acquises individuellement et collectivement se révèlent alors insuffisantes pour suggérer une explication. Certaines abductions créatives peuvent ainsi constituer les bases de « révolutions scientifiques ». La représentation héliocentrique du mouvement des planètes par Copernic en est un

exemple. À une échelle infiniment plus modeste, un chercheur, dont j'ai observé le travail mené au GSI, se livre à une abduction créative lorsqu'il tente de mettre au point un couplage AFM (microscope à force atomique)-STM (microscope à effet tunnel), afin d'étudier le rôle des défauts atomiques dans le magnétisme. En effet, les diverses techniques de visualisation disponibles lui semblent inopérantes et ne permettent pas de décrire le phénomène dont il soupçonne l'existence : un lien, qu'il juge essentiel, entre les défauts atomiques et le magnétisme. Il envisage donc de mettre au point un nouveau type de microscope. Les images produites par ce dernier n'étant pas encore éprouvées, l'abduction créative nécessite l'application de la méta-abduction.

2.4 La méta-abduction

La méta-abduction est le processus par lequel

on cherche à vérifier si le monde possible dépeint au moyen de l'abduction créative est identique au monde réel observable : dit autrement, on cherche à voir si l'hypothèse est conforme au monde. (...) Les abductions créatives et les méta-abductions associées sont à la fois stimulantes et subversives.³⁰

Pour prolonger notre exemple précédent, le chercheur va devoir montrer que les nouvelles images qu'il produit ont une pertinence.

Le raisonnement abductif, dans ses différentes versions, a souvent été négligé, ou alors on a récusé sa spécificité en l'intégrant au mode de raisonnement inductif. C'est ce que fait encore Claudine Tiercelin dans l'article « Induction » du *Dictionnaire de philosophie et histoire des sciences*³¹. Notons que, tout comme dans le raisonnement hypothético-déductif³², ce qui suit la formulation de l'hypothèse dans le cadre du

³⁰ Michel J. Blais, Introduction à la logique, 2000, <http://callisto.si.usherb.ca:8080/mblais>, consulté le 11/11/1999

³¹ Claudine Tiercelin, « Induction », *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* D. Lecourt (dir.), *op.cit.*, p. 506.

³² Même si j'ai, dans les pages qui précèdent, souligné ce qui différencie ces modèles de raisonnement, on peut cependant rapprocher, comme le fait Christiane Chauviré, les conceptions de la recherche scientifique de Charles Sanders Peirce (qui mit à jour la structure du raisonnement abductif) et de Karl Popper (dont l'épistémologie repose sur la primauté accordée au modèle hypothético-déductif) : les deux auteurs s'accordent pour ce qui est du caractère surprenant du fait déclencheur de l'investigation (« fait surprenant » pour Peirce, « anomalie théorique » pour Popper). Ce fait déclencheur donne lieu à la formulation d'une hypothèse et à un important travail de déduction opéré *a priori* portant sur les prédictions susceptibles d'être ensuite testées expérimentalement. En définitive, et si l'on voulait suivre les analyses de Chauviré sur ce point, les distinctions doctrinales que l'on peut établir entre

raisonnement abductif relève de l'ordre de la déduction, et doit donc nécessairement s'allier à cette dernière pour aboutir à son terme. Peirce lui-même affirme :

Les déductions que nous faisons à partir de l'hypothèse à laquelle a abouti l'abduction produisent des prédictions conditionnelles sur notre expérience future, c'est-à-dire que nous inférons par déduction que si l'hypothèse est vraie, alors tout phénomène futur d'une certaine description doit présenter tel ou tel caractère.³³

Il note cependant :

La rétroduction n'offre aucune sécurité. L'hypothèse doit être vérifiée. Cette vérification, pour être logiquement valable, doit partir honnêtement, non comme part la rétroduction par l'examen des phénomènes, mais par l'examen de l'hypothèse et un passage en revue de tous les types de conséquences expérimentales dans l'expérience qui s'ensuivraient si elle était vraie. Cela constitue le second pas de la recherche.³⁴

Après avoir recueilli sur une liste tout l'éventail des prédictions possibles à partir de l'hypothèse retenue, le chercheur procède à une vérification expérimentale. Reprenons Peirce encore une fois :

L'expérimentation consiste à produire ou à rechercher un état de choses auquel les prédictions conditionnelles déduites de l'hypothèse

Peirce et Popper concernent essentiellement le vocabulaire employé. « D'un côté, Popper déclare que la méthode des sciences empiriques ne met en jeu que des procédures déductives. Peirce maintient au contraire que les inférences déductives sont : a) précédées d'un raisonnement, l'abduction, irréductible à la déduction et qui nous fait parvenir aux hypothèses b) suivies d'un autre raisonnement, l'induction aboutissant au rejet ou à l'acceptation provisoire des hypothèses par confrontation de certaines de leurs conséquences avec des résultats expérimentaux. Mais, nous l'avons vu, ce que Peirce appelle induction correspond chez Popper à la phase terminale de la méthode déductive de contrôle et ce qu'il décrit sous le nom d'abduction recouvre toute une série de procédures également admises et décrites par Popper qui ne leur donne aucun nom particulier ». Christiane Chauviré, « Peirce, Popper et l'abduction. Pour en finir avec l'idée d'une logique de la découverte » in *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, n°4 1981, p. 453.

³³ Charles Sanders Peirce, 7.115n, cité par Christiane Chauviré, « Peirce, Popper et l'abduction. Pour en finir avec l'idée d'une logique de la découverte » in *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, *op. cit.*, p. 453.

³⁴ Charles Sanders Peirce, 6.470, cité par Umberto Eco, *Les limites de l'interprétation op. cit.*, p. 283.

sont applicables et à noter dans quelle mesure la prédiction est remplie.³⁵

Reste à préciser comment s'opère le choix des hypothèses dignes d'être testées. Selon Peirce, la sélection s'effectue sur la base de l'adoption de trois critères : la testabilité, le pouvoir explicatif et le principe d'économie (« de temps, d'argent, de pensée et d'énergie »³⁶). Pour le classement des hypothèses concurrentes, il faut tester en premier lieu d'une part, les hypothèses susceptibles d'être le plus évidemment falsifiées (en d'autres termes les plus audacieuses), et d'autre part celles qui présentent la caractéristique d'être les plus simples³⁷.

Afin de synthétiser mon propos sur les modes de raisonnement scientifique et le processus de recherche à l'œuvre dans un laboratoire comme le GSI ou le CfA, je suggère de distinguer six étapes dudit processus :

- a. la perception d'un phénomène surprenant ;
- b. l'invention d'hypothèses concurrentes susceptibles d'expliquer le phénomène ;
- c. le « listage » par un raisonnement déductif des prédictions engendrées par les hypothèses ;
- d. le classement des hypothèses, et le choix de celles que l'on va tester en respectant les trois critères évoqués plus haut ;
- e. la phase expérimentale durant laquelle on va essayer de confronter les prédictions avec les résultats de l'expérience ;
- f. l'évaluation de l'hypothèse (de son degré de concordance) avec les faits.

2.5 Le mode de raisonnement abductif au GSI et au CfA

Si nous dépassons le cadre strict de la production d'images pour y ajouter celle de données de natures diverses en physique des matériaux, et si nous considérons le cheminement des thématiques de recherche qui justifient cette production, nous voyons fréquemment se développer le mode de raisonnement abductif sous la forme suivante : soit un fait surprenant F qui serait explicable par les hypothèses $H_1, H_2, H_3 \dots H_n$ étant

³⁵ Charles Sanders Peirce, 7.115n cité par Christiane Chauviré, « Peirce, Popper et l'abduction. Pour en finir avec l'idée d'une logique de la découverte », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, op. cit., p. 453).

³⁶ Peirce, 5.600 cité par Christiane Chauviré, *La philosophie dans la boîte noire. Cinq pièces faciles sur Wittgenstein*, Paris, Editions Kimé, 2000, p. 65.

³⁷ Pour une critique de la notion d'inférence abductive sur la base de la permissivité trop grande offerte par sa définition quant aux hypothèses susceptibles d'être formulées avec pertinence, voir Sami Paavola, "Abduction as a Logic and Methodology of Discovery: the Importance of Strategies", *Foundation of Science*, vol. 92, 2004 – et en particulier le rappel des exemples formulés antérieurement par Peter Achinstein.

plus probable, les physiciens des matériaux testent des implications relatives à H_2 car ils ont la possibilité d'intervenir sur leurs objets d'investigation. Si H_2 est avérée par l'expérience, le fait surprenant F est expliqué par H_2 . C'est une logique de confirmation de l'hypothèse la plus probable qui s'appuie sur des expériences. Dans la présentation des résultats au travers d'un article, les hypothèses H_1 et H_3 seront, soit très brièvement évoquées, soit passées sous silence. Le corps de l'article va consister à exposer de manière la plus détaillée possible pourquoi l'hypothèse H_2 est pertinente.

En astrophysique, le raisonnement prendra souvent la forme suivante : soit un fait surprenant F qui serait explicable par les hypothèses H_1 , H_2 et H_3 . Etant donné que les astrophysiciens ne peuvent se livrer à des manipulations ou à des interventions directes sur leurs objets d'investigation, afin de montrer que H_3 par exemple est l'hypothèse qui semble la plus valide, ils tenteront de montrer que H_1 et H_2 ne sont pas valides. Ils peuvent dès lors conclure que H_3 explique probablement le fait surprenant F (sous réserve qu'il existe d'autres hypothèses rivales H_4 , H_5 , etc., plus à même de rendre compte de F). Il s'agit plutôt ici d'une logique de l'infirmité. A l'occasion de la présentation des travaux correspondants dans le cadre d'articles de revues spécialisées, le fait que certaines hypothèses ne conviennent pas sera largement détaillé.

Ce que je souhaite souligner ici, c'est que, bien que le raisonnement abductif soit également repérable dans les deux domaines de recherche considérés, la phase déductive qui permet en fin de parcours de produire une explication ne suit pas tout à fait les mêmes chemins, et ce en raison des modalités pratiques disponibles permettant d'étudier les objets soumis à l'investigation des chercheurs.

Une remarque s'impose encore : bien que le raisonnement abductif joue un rôle essentiel dans les deux laboratoires, GSI et CfA, il constitue bien évidemment, de par lui-même, un facteur d'incertitude supplémentaire. En effet, on peut refuser de prendre en compte une hypothèse ou une implication d'une hypothèse, ou ne pas avoir su la formuler pour des raisons diverses. Dans ce cas, les résultats auxquels on parvient peuvent être soit faux, soit incomplets.

3. L'analogie

Après avoir défini ce mode de raisonnement, je développerai un exemple historique visant à préciser les procédures à l'œuvre lorsqu'on recourt à lui. Dans un second temps, je soulignerai le rôle essentiel qu'il joue dans la recherche au quotidien dans les deux laboratoires, GSI et CfA, et notamment dans les pratiques relatives aux images conçues comme élément de preuve.

3. 1 Quelques définitions et précisions

Une analogie³⁸ est établie entre deux objets lorsqu'on parvient à déterminer des propriétés communes qu'ils partagent³⁹. Prenons pour

³⁸ « Le terme *analogia* signifie en Grèce (Archytas de Tarente) ce que les Latins [Varron (1), Cicéron (2)] ont traduit par *proportio*, soit ' rapports des parties entre elles et avec leur tout' (Litttré) et plus spécifiquement en mathématiques : rapport de quantités entre elles, et en géométrie : égalité de deux rapports par quotient. » (Philibert Secretan, *L'analogie*, Paris, Puf, *Que sais-je?*, 1984, p. 7). À partir de cette définition séminale de l'analogie s'est construit « le concept d'analogie qui désigne les similitudes au-delà de la proportion à quatre termes » (Marie Dominique Gineste, *Analogie et cognition. Etude expérimentale et simulation informatique*, Paris, Puf, 1997, p. 12). Il s'agit donc d'établir un rapport entre des choses dissemblantes du point de vue de la qualité, de la quantité et de leur nature. Il semblerait en fait que grâce à l'analogie, il y ait de la « ressemblance dans la dissemblance » (Philibert Secretan, *L'analogie, op. cit.*, p. 8). Aristote a été celui qui a introduit et défini le concept d'analogie. Adam Biela propose un historique complet de ce concept en partant des origines grecques jusqu'aux usages contemporains qui sont ceux des logiciens (Adam Biela, *Analogy in Science*, Frankfurt-am-Main, Peter Lang, p. 13-17). Si le consensus demeure quant à la définition de ce qu'est une analogie, les controverses sont vives dès lors qu'il s'agit de décrire plus précisément son ou ses modes de fonctionnement, et surtout d'en justifier l'usage dans le cadre d'un raisonnement qui viserait à être valide. J'aborderai ce point plus loin dans mon propos.

³⁹ Mary Hesse distingue deux types d'analogies : les analogies formelles et les analogies matérielles. Une équation remplaçant terme à terme les données issues d'une expérience est une analogie formelle. De manière générale, les modèles mathématiques utilisés en physique sont construits pour rendre compte de manière adéquate des données empiriques. De ce fait, ces analogies ne sont pas susceptibles de donner lieu à des hypothèses hautement prédictives dans le cadre d'un raisonnement analogique. Il en va tout autrement avec les analogies matérielles qui sont des analogies préthéoriques établies entre des caractéristiques observables d'objets précis. Sur ce point, l'un des exemples de Hesse est l'analogie développée en physique entre les propriétés du son et celles de la lumière. L'auteur montre la fécondité d'une telle analogie matérielle. C'est à ce type d'analogie que je limiterai mon propos dans la suite de cet article. Paul Thagard en appuyant son étude pour une grande part sur des cas empruntés au domaine médical, propose une autre typologie : il distingue les analogies théoriques, les analogies expérimentales, les analogies techniques, les analogies diagnostiques, les analogies thérapeutiques, les analogies éducatives. Certaines catégories rendent bien compte des analogies que l'on peut repérer dans le domaine de la physique, en l'occurrence les trois premières. Pour fournir une illustration du type constitué par les analogies théoriques, Thagard prend pour exemple l'analogie entre les ondes sonores et les vagues d'eau, ainsi que l'analogie établie par Louis Pasteur entre les bactéries impliquées dans le processus de fermentation de la bière ou du vin et les microorganismes pouvant engendrer une maladie chez l'homme. Pour le type constitué par les analogies techniques, l'exemple proposé est celui de l'invention du stéthoscope par R. Laennec après avoir observé des enfants jouant à transmettre des sons grâce à

exemple la Terre et la Lune : toutes deux sont des grandes sphères solides et opaques, recevant la lumière émise par le soleil, tournant sur elles-mêmes et en orbite autour de corps célestes d'une dimension plus importante. Ces éléments constituent ce qu'on peut appeler avec Mary Hesse⁴⁰ les éléments constitutifs d'une analogie positive. Cela dit, la Lune est plus petite que la Terre, elle est de nature plus volcanique que cette dernière, elle n'a pas d'atmosphère et ne comporte pas d'eau. Ces éléments constituent la partie négative de l'analogie. Hesse distingue également une partie neutre dans l'analogie constituée des caractéristiques dont la ressemblance ou la différence, relativement à la Terre et à la Lune, n'est pas encore déterminée. Si nous affirmons, avec Galilée⁴¹, que les taches noires observables sur la Lune sont des ombres dues aux montagnes lunaires, nous entrons dans un processus de raisonnement analogique. Selon Hesse, un tel raisonnement repose sur des analogies qui s'organisent en fait autour de deux axes :

- le premier axe est horizontal et porte sur la similarité (ou les différences) entre les propriétés attribuées à deux objets distincts ;
- le second axe est vertical et d'ordre causal.

de longues pièces de bois. Un autre bel exemple d'analogie technique est la mise au point du microscope à force atomique construit sur une analogie avec le microscope à effet tunnel. Pour ma part, tout en reconnaissant la pertinence de la typologie élaborée par Thagard, je me référerai à celle de Hesse, qui présente un plus grand degré de généralité et se révèle plus adaptée à mon propos (Mary Hesse, *Models and Analogies in Science*, Londres & New York, Sheed & Ward, 1963, p. 75).

Paul Thagard, "Medical Analogies: Why and How", 1997, <http://cogsci.uwaterloo.ca/Articles/Pages/med.analog.html>, consulté le 24/06/2013.

⁴⁰ Mary Hesse, *Models and Analogies in Science*, Londres & New York, Sheed & Ward, 1963, p. 66.

⁴¹ Je m'inspire pour cet exemple des articles suivants : Fernand Hallyn, « Galilée, le télescope et l'évaluation de l'inférence analogique », *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, n°40, 1992 ; William Shea, "Looking at the Moon as Another Earth : Terrestrial Analogies and Seventeenth-Century Telescopes", *Metaphor and Analogy*, Fernand Hallyn (dir.), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000.

Si nous reprenons l'exemple précédent selon la perspective de Hesse :

La Terre	La Lune
Sphère	Sphère
Opaque	Opaque
Tourne sur elle-même	Tourne sur elle-même
Tourne autour d'un objet plus massif	Tourne autour d'un objet plus massif
Eclairée par le soleil	Eclairée par le soleil
Présence de montagnes	<i>Présence de montagnes ?</i>
Présence d'ombre induite par les montagnes	<i>Présence d'ombre induite par les montagnes ?</i>

L'axe horizontal repose sur la mise en évidence de caractéristiques similaires (ou différentes) entre deux objets distincts. Soulignons, toujours avec Hesse⁴² que les caractéristiques du premier objet, celui qui sert en quelque sorte de modèle⁴³, doivent être observables directement ou indirectement (au moyen d'instruments). Si tel n'était pas le cas, il serait impossible de formuler une nouvelle hypothèse portant sur le second objet (dans notre cas, la Lune). L'axe vertical repose, quant à lui, sur la mise en évidence de relations causales. Ainsi, Galilée avait des raisons de penser que les caractéristiques de son analogie positive étaient liées causalement (la présence de montagnes, éclairées par le soleil, conduit à postuler l'existence d'ombres). De ce fait, il pouvait émettre l'hypothèse que les taches noires lunaires correspondaient à l'ombre des montagnes, tout comme sur Terre, nos montagnes produisent de larges zones d'ombre. L'existence de cette relation causale⁴⁴ est essentielle, car c'est en fait grâce à elle que le raisonnement

⁴² Mary Hesse, *Models and Analogies in Science*, op. cit., p. 77.

⁴³ Si on souhaite reprendre les termes employés par Holyoak et Thagard sur ce point, on dira qu'il s'agit de raccorder un domaine connu (« *source analog* ») à un domaine qui ne l'est pas encore de manière équivalente (« *target analog* ») (Keith J. Holyoak & Paul Thagard, *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*, Cambridge, MA, MIT Press, 1995, p. 2).

⁴⁴ Selon Mary Hesse, toutes les analogies ne peuvent en réalité donner lieu à des raisonnements analogiques pertinents. Pour ce, il faut qu'il existe une relation causale sur l'axe vertical ; il faut également que cet axe soit indépendant de l'axe horizontal relatif à la similarité. Hesse propose des exemples de raisonnement analogique dans lesquels ces conditions ne sont pas remplies. (Mary Hesse, *Models and Analogies in Science*, op. cit., p. 69). Dans le même ordre d'idées, Jean-Blaise Grize établit une distinction entre l'analogie « illustration » et l'analogie « preuve ». La première n'est là que pour illustrer un point particulier dans un discours, et ne s'intègre pas dans une entreprise probatoire. Dans le cadre de

analogique peut être conduit jusqu'à son terme. Le raisonnement analogique⁴⁵ prend donc la forme : A est à B ce que C est à D. Formulé autrement, et de manière plus précise : soient deux objets analogues x et y dont la ressemblance repose sur des traits communs : « $B_1, B_2...B_n$ ». Ils ne se ressemblent pas quant à certains traits « $A_1, A_2...A_n$ », que x possède, contrairement à y . Inversement, y possède certains traits « $C_1, C_2...C_n$ », contrairement à x . Le raisonnement analogique consiste à postuler que le trait D qui appartient à x est susceptible d'appartenir également à y .

3.2 Validité du raisonnement analogique

Pour les empiristes logiques, le raisonnement analogique ne reposant pas sur la déduction, est nécessairement incorrect. M. Bunge résume leur position ainsi :

Les arguments formulés sur la base d'analogies peuvent être fertiles, mais ils ne sont pas valides: leur succès, lorsque succès il y a, ne dépend pas de leur structure logique, mais de la nature du cas étudié – d'où le fait qu'il ne peut pas exister de logique de l'analogie [...] [Une hypothèse analogique] est une conjecture qui doit être soumise à des tests autres que ceux qui concernent la validation de la prémisse de l'analogie. Si l'hypothèse se révèle fautive, nous devrions conclure que l'inférence n'est pas seulement invalide, mais également stérile.⁴⁶

Comme le souligne Cameron Shelley⁴⁷, le fait que le raisonnement analogique soit non correct d'un point de vue logique est un postulat

cette analogie, l'accent est mis sur la similarité entre deux domaines distincts sans chercher à postuler l'existence d'un élément manquant à partir d'une première analogie. L'analogie « preuve » tente d'apporter des éléments de réponse valides. Non seulement elle doit reposer horizontalement sur des similarités fortes, mais elle doit également reposer sur un axe vertical causal bien étayé. Seule l'analogie « preuve » peut quant à elle donner lieu à des raisonnements analogiques pertinents. (Jean Blaise Grize, *Logique et langage*, Paris, Ophrys 1990, p. 102-104)

⁴⁵ Robert Blanché souligne que dans la littérature relative à l'analogie, il règne une certaine confusion entre établir une analogie entre deux objets et raisonner par analogie, c'est-à-dire établir une inférence à partir d'un premier objet vers le second objet. (Robert Blanché, *Le raisonnement*, Paris, Puf, 1973, p. 180) Selon cet auteur, c'est l'une des raisons pour laquelle la portée de l'analogie est bien souvent mal perçue. Le même constat est établi par Biela. (Adam Biela, *Analogy in Science, op.cit.*, p. 11).

⁴⁶ Mario Augusto Bunge, 1967, p. 267, cité par Cameron Shelley, "Analogy Counterarguments and the Acceptability of Analogical Hypotheses" in *British Journal for the Philosophy of Science*, n° 53, 2002, p. 478. Traduction personnelle.

⁴⁷ Cameron Shelley, *Ibid.*

largement accepté en philosophie des sciences⁴⁸. Shelley adresse quelques objections à ce postulat et propose de montrer que dans la recherche scientifique, certaines analogies ont une réelle validité qui s'appuie sur une logique prenant en compte l'analogie. Cette logique « analogique » se manifeste notamment par le recours à des contre-arguments qui reposent eux-mêmes sur des analogies. Dans une étude de cas portant sur l'extinction des dinosaures suite à l'impact supposé d'un astéroïde, Shelley étudie les contre-arguments analogiques qui ont été élaborés par les contradicteurs de cette hypothèse. Cette dernière a été proposée par Luis Alvarez à partir d'une analogie avec l'éruption gigantesque d'un volcan indonésien : le Krakatoa. Les débris de cette éruption se sont disséminés sur l'ensemble du globe terrestre provoquant un obscurcissement substantiel de l'atmosphère pendant une période de deux ans. S'appuyant sur les conséquences de cette éruption, Alvarez, dans le cadre de son raisonnement analogique, considère que l'impact d'un astéroïde de grande taille pourrait avoir provoqué un nuage de poussière tellement important que cela aurait provoqué l'assombrissement du soleil sur une période de trois années, trois années durant lesquelles la couverture végétale de la Terre aurait périclité, entraînant de fait la mort des dinosaures. De nombreux

⁴⁸ Ce postulat est, en fait, très ancien et remonte déjà à Aristote : « Découvrir des ressemblances entre les termes et les utiliser dans la démarche devient une procédure pour élaborer des hypothèses. Mais aucune connaissance ne peut être construite par analogie. En effet, pour Aristote, l'analogie est exclue de la logique, elle appartient au discours et à l'argumentation. Seul le raisonnement permet d'aboutir à des conclusions logiquement vraies. » (Marie Dominique Gineste, *Analogie et cognition. Etude expérimentale et simulation informatique, op. cit.*, p. 12). Comme le souligne Philibert Secretan, analogie et rationalité scientifique ne font pas bon ménage. (Philibert Secretan, *L'analogie, op.cit.*, p. 89-90), La notion de ressemblance est jugée trop vague pour soutenir un raisonnement scientifique. Adam Biela quant à lui, retrace les différentes positions adoptées au sujet de la légitimité épistémique du raisonnement analogique. (Adam Biela, *Analogy in Science, op.cit.*, p. 51-57), Trois positions semblent se dessiner : la première est celle qui s'adosse sur le recours au sens commun, et qui argumente que le raisonnement analogique peut être producteur de connaissances valides. La seconde attitude est une attitude de rejet complet pour les raisons évoquées plus haut. Ce sont les auteurs rattachés au Cercle de Vienne qui en sont les défenseurs. Une position médiane est adoptée par des auteurs comme Max Black qui montre qu'en réalité, la discussion sur la valeur épistémique du raisonnement analogique comporte à la fois une dimension philosophique (théorique) et une dimension pratique. De fait, les critiques très sévères sont portées (à juste titre ?) sur la dimension théorique, alors que l'analogie dans sa dimension pratique, semble bien avoir une validité. À ces trois positions, nous en ajouterons une quatrième, beaucoup plus récente et issue des sciences cognitives, celle qui plaide pour une validité du raisonnement analogique dans le cadre d'une logique analogique. Cette position est par exemple défendue par Paul Thagard et Cameron Shelley.

chercheurs refusèrent cette hypothèse et élaborèrent des contre-arguments relevant également de l'ordre de l'analogie. Shelley propose une classification de ces contre-arguments. Elle en distingue quatre types :

3.2.1 La disanalogie

La disanalogie⁴⁹ consiste à reprendre les caractéristiques de l'analogie de départ en l'appliquant à un objet similaire. Cette nouvelle analogie conduit à des conclusions différentes et invalide donc celles que l'on vise à réfuter et auxquelles était parvenu l'auteur de l'analogie initiale.

3.2.2 La misanalogie

La misanalogie⁵⁰ consiste à reprendre l'analogie de départ et à montrer que certaines de ses caractéristiques, non prises en compte jusqu'alors, mènent à des conclusions différentes. Elle consiste donc à dégager les insuffisances, sur le plan structurel, du raisonnement tenu.

3.2.3 La contre analogie

La contre analogie⁵¹ est tout simplement une hypothèse alternative qui se présente sous forme d'analogie.

⁴⁹ Pour exemple, Shelley évoque une disanalogie proposée par un des contradicteurs de Luis Alvarez sur la base d'un autre cas d'éruption volcanique, celui du volcan Toba. La puissance de l'éruption du Toba aurait été quatre cent fois plus grande que celle du Krakatoa et correspondrait, en termes de volume de débris dispersés dans l'atmosphère, à l'impact de l'astéroïde postulé par Alvarez. Pourtant, l'éruption du Toba n'a pas engendré de catastrophe écologique – puisqu'en l'occurrence, la plupart des espèces végétales et animales ont survécu.

⁵⁰ Pour exemple, Shelley cite l'étude d'un autre contradicteur d'Alvarez. L'étude réalisée par ce dernier reprend l'analogie de départ et montre que dans le cas de l'éruption du Krakatoa, comme pour toute éruption volcanique, les débris ont tendance à coaguler dans l'atmosphère et à retomber rapidement. La quantité de débris susceptible de rester en suspension dans l'atmosphère serait donc bien plus faible que celle postulée par Alvarez. Bien que provoquant un obscurcissement, elle ne pourrait aucunement entraîner une extinction d'espèces vivantes telles que celles des dinosaures.

⁵¹ Pour exemple, Shelley détaille une proposition alternative formulée par un troisième contradicteur d'Alvarez. L'obscurcissement de l'atmosphère aurait été engendré par une pluie de comètes. Pour étayer son hypothèse, l'auteur de cette proposition établit une analogie entre l'impact d'une comète ayant explosé en Sibérie (le lieu d'impact se nommant Tunguska) et les circonstances qui ont conduit à l'extinction des dinosaures.

3.2.4 La fausse analogie

Une fausse analogie⁵² consiste en un raisonnement structurellement consistant en apparence, mais qui se révèle fautif dès lors qu'on lui consacre un examen plus approfondi. Nous avons vu plus haut que pour Hesse, seules les analogies ayant un axe vertical causal peuvent donner lieu à un raisonnement analogique fertile. Holyoak et Thagard⁵³ affinent la réflexion de Hesse. D'après eux, la qualité d'une analogie peut être évaluée selon trois critères⁵⁴. Premièrement, l'analogie doit être structurellement consistante, c'est-à-dire que la relation de similarité entre les deux analogies doit être univoque. À un élément de l'analogie modèle doit correspondre un seul élément de la seconde analogie. Deuxièmement, il doit exister une similarité sémantique entre l'analogie qui sert de modèle et la seconde analogie, c'est-à-dire que les éléments des deux analogies doivent être sémantiquement équivalents. Troisièmement, le raisonnement analogique doit être utile et suggérer une explication plausible. Si les analogies qui contribuent à l'élaboration d'un raisonnement analogique ne remplissent pas ces trois conditions, elles sont dès lors considérées comme des fausses analogies.

Cameron Shelley montre à travers l'exemple d'une recherche scientifique précise que le raisonnement analogique constitue le cœur des argumentaires fournis par les différents acteurs du débat, et qu'il y a bien une logique de l'inférence analogique à l'œuvre dans le cadre d'études reconnues par la communauté scientifique des paléontologues.

Si nous revenons à Galilée, plusieurs raisonnements analogiques ont bel et bien été proposés afin d'expliquer les taches lunaires et les taches solaires. La question que se posait déjà Galilée était : comment savoir lequel est le plus pertinent ? Plusieurs pistes de réflexion sont proposées

⁵² Shelley étudie la structure de l'analogie établie par Alvarez, qui se révèle en réalité fautive. La plupart des débris qui demeurent longtemps dans l'atmosphère après une éruption volcanique ne sont pas des poussières, mais de minuscules gouttes d'acide sulfurique. Ces gouttelettes ne se coagulent pas et sont susceptibles de demeurer très longtemps dans l'atmosphère en provoquant un obscurcissement très important de cette dernière. Alvarez attribuait donc faussement ce phénomène d'obscurcissement à des poussières éjectées par l'éruption alors qu'il est dû en réalité à des gouttelettes d'acide sulfurique. Le problème est que l'impact d'un astéroïde ne peut en aucune façon provoquer l'apparition de telles gouttelettes. Aucun élément dans l'analogie établie avec l'impact d'un astéroïde ne correspond à l'élément « gouttelettes d'acide » de l'éruption volcanique. Le raisonnement analogique d'Alvarez n'est donc pas structurellement consistant.

⁵³ Keith J. Holyoak et Paul Thagard, *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought* *op.cit.*, p. 36-37.

⁵⁴ Cette évaluation des analogies est baptisée « théorie des contraintes multiples ».

par Galilée lui-même. Dans le cas des taches sombres lunaires, des analogies alternatives ont été proposées par les contradicteurs de Galilée. Par exemple, le mathématicien Clavius comparait l'aspect visuel de la Lune, tel qu'il était décrit par Galilée, à des matières précieuses comme le cristal ou l'ambre, et estimait que les différences de clarté étaient provoquées par la densité variable selon les endroits du corps lunaire. Cette contre analogie, pour reprendre la terminologie de Shelley, avait l'immense avantage d'être cohérente avec la représentation aristotélicienne du cosmos, dominante à l'époque de Galilée et qui établissait une différence fondamentale entre le Terre et le Ciel. Galilée estimait que son analogie était plus pertinente, car elle permettait de rendre compte d'un plus grand nombre de phénomènes que celle reposant sur la présence de matières précieuses. En effet, cette dernière ne s'appliquait avec succès qu'à une phase lunaire, alors que l'analogie proposée par Galilée permet de rendre compte de l'état de la surface lunaire pendant toutes les phases de l'astre. Il valait effectivement mieux retenir cette analogie, car elle était plus « utile » que celle proposée par Clavius. L'analogie de Galilée présentait tout de même des faiblesses : pourquoi la Lune apparaissait-elle parfaitement sphérique ? Ne devait-on pas la percevoir toute hérissée de montagnes sur son pourtour ? Soulignant cette faiblesse (et montrant en fait que l'analogie de Galilée était une misanalogie), Lodovico delle Colombe proposa une contre analogie où la Lune comportait effectivement des montagnes et des vallées, mais était entourée d'un cristal invisible entièrement lisse.

En ce qui concerne les taches solaires, Galilée les assimila à des nuages, semblables à nos nuages terrestres : ces taches « sont produites et dissoutes en peu de temps, persistent pour un temps de plus en ou moins long, s'étendent et se contractent, changent facilement de figure, sont plus denses et opaques en certaines parties que d'autres »⁵⁵ Certains de ses contradicteurs assimilaient ces taches à l'ombre portée de petites étoiles orbitant autour du soleil. Galilée, pour justifier le recours à son raisonnement analogique, fit appel à la prise en considération des « qualités essentielles ». Une étoile possède des caractéristiques (sphéricité, mouvement orbital périodique et régulier, etc.) sans lesquelles elle ne peut se voir attribuer le qualificatif d' « étoile ». Or, Galilée souligne que ces qualités essentielles ne sont pas présentes dans l'analogie proposée par ses contradicteurs (ceux-ci ont donc établi une fausse analogie), et donc que la partie négative de l'analogie est plus importante que celle qui est présente dans l'analogie des nuages.

⁵⁵ Galilée, cité par Fernand Hallyn, « Galilée, le télescope et l'évaluation de l'inférence analogique », *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, n° 40, 1992, p. 108.

C'est la prise en compte des qualités essentielles⁵⁶ qui permet en l'occurrence de faire un choix raisonné entre plusieurs analogies concurrentes.

3. 3 Les fonctions du raisonnement analogique

Ce qui apparaît clairement à travers ces exemples de raisonnement analogique, c'est qu'ils permettent de formuler de nouvelles hypothèses. En ce sens, les analogies jouent un rôle essentiel dans la création de nouvelles voies conceptuelles, dans l'apparition de nouvelles perspectives de recherche. A l'occasion de l'apparition d'un fait surprenant, nous avons vu que le raisonnement abductif conduisait à émettre un certain nombre d'hypothèses permettant, si elles sont vérifiées, de fournir une explication de ce fait surprenant. La formulation d'hypothèses lors de cette phase abductive peut se faire en recourant aux théories établies antérieurement, mais également en développant un raisonnement analogique⁵⁷ (c'est le cas des ombres lunaires et des taches solaires évoquées plus haut). Le raisonnement analogique est dans ce cas-là une source d'inventions parfois extrêmement fécondes pour la science⁵⁸. C'est d'ailleurs une des fonctions de l'analogie dans le

⁵⁶ Le mouvement et la grandeur, perçus indirectement, étaient des qualités placées au dernier rang dans la hiérarchie établie par Aristote. Mouvement, grandeur, figure sont considérés *a contrario* comme essentiels par Galilée, car on peut recourir grâce à eux à la démonstration mathématique, seul langage univoque indispensable à un accord entre les hommes.

⁵⁷ C'est ce que Thagard nomme une « abduction analogique ». Il s'agit, selon lui, de construire une nouvelle explication en empruntant la structure d'une autre explication déjà acceptée pour un problème similaire. C'est bien ce qui se passe dans les analogies proposées par Galilée et ses contradicteurs. Paul Thagard, 1988, p. 60-63.

⁵⁸ Les exemples donnés par les différents auteurs qui se sont intéressés à l'analogie sont d'ailleurs innombrables : Maxwell et l'électromagnétisme (Marie-Dominique Gineste, *Analogie et cognition. Etude expérimentale et simulation informatique, op.cit* ; Max Black, *Models and Metaphors*, London and Ithaca, Cornell University Press, 1962 ; Mary Hesse, 1966) ; Claude Bernard et la fonction glycogénique du foie (Marie-Dominique Gineste, *Analogie et cognition. Etude expérimentale et simulation informatique, op. cit*) ; Pasteur et les microbes (Thagard, "Medical Analogies: Why and How", *op. cit.*) ; Laennec et le stéthoscope (*Ibid.*) ; Galilée et les taches lunaires et solaires (Hallyn, « Galilée, le télescope et l'évaluation de l'inférence analogique » in *op. cit.*, William Shea, "Looking at the Moon as Another Earth: Terrestrial Analogies and Seventeenth-Century Telescopes", *Metaphor and Analogy*, Fernand Hallyn (dir.), *op. cit.*) ; Bohr et l'atome (Joke Meheus, "Analogical Reasoning...", *Metaphor and Analogy in the Sciences*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000 ; Adam Biela, *Analogy in Science, op. cit.*) ; Huygens pour l'analogie entre la lumière et le son (Blanché, *Le raisonnement, op. cit.*) ; de Broglie pour l'analogie entre la lumière et la matière (*Ibid.*) ; Lavoisier et l'analogie entre la combustion et la transformation de l'air par les poumons (Adam Biela, *Analogy in Science, op. cit.*). Holyak et Thagard, à

domaine scientifique définies par Adam Biela⁵⁹. Cet auteur établit cinq fonctions particulièrement pertinentes à mes yeux, dès lors que l'on souhaite comprendre le rôle du raisonnement analogique dans les deux domaines d'investigation que sont la physique des matériaux et l'astrophysique.

3.3.1 La fonction heuristique

C'est celle décrite plus haut et qui permet, à partir d'un problème donné, d'élaborer de nouvelles hypothèses qu'il s'agira ensuite de vérifier. Cette fonction, comme le soulignent chacun de leur côté Biela et Shelley, est la seule qui soit reconnue par l'ensemble des auteurs qui se sont intéressés à l'analogie.

3.3.2 La fonction de systématisation

La systématisation correspond à une activité essentielle dans les sciences. Sans elle, les sciences se réduiraient à une collection de faits inexplicables ou inexplicables. La systématisation consiste à créer un ordre, à proposer une manière de classer. Selon Biela⁶⁰, elle repose en

eux seuls, proposent seize exemples de découvertes scientifiques majeures reposant sur un raisonnement analogique. Cette liste pourrait bien sûr être encore significativement rallongée... (Keith J. Holyak et Paul Thagard, *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought op.cit.* p. 186-188).

⁵⁹ Adam Biela, *Analogy in Science, op. cit.*, p. 135-153. Parmi les autres propositions de typologie des fonctions du raisonnement analogique dans la recherche scientifique, on trouve notamment Holyoak et Thagard, *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought op.cit.* p. 189-191, et Yves Gingras & Alexandre Guay "The Uses of Analogies in Seventeenth and Eighteenth Century Science", *Perspectives on Science*, vol. 19, n° 2, 2011. Selon Keith J. Holyoak et Paul Thagard, l'analogie peut jouer un rôle lors de la phase de découverte (émission d'hypothèses originales), lors de la phase de développement d'une recherche (mise en place d'un protocole expérimental, par exemple), lors de la phase d'évaluation (en participant activement à la cohérence d'une démonstration), lors de la phase d'exposition des résultats. Selon Gingras et Guay, dont l'approche se conçoit avant tout comme une recension historique (la base de l'étude est constituée par l'ensemble des occurrences des termes « analog », « analogies », « analogous » dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society* de Londres de 1665 à 1780), six usages ont été développés durant cette période. Une analogie peut : 1) renvoyer à un principe scientifique très général tel que celui de l'uniformité de la nature ; 2) consister en un modèle concret ; 3) illustrer ou clarifier un argument ; 4) se rapporter à une relation de proportions ; 5) servir comme base en vue d'établir une classification ; 6) permettre de formuler et de justifier une prédiction. (Yves Gingras & Alexandre Guay, "The Uses of Analogies in Seventeenth and Eighteenth Century Science", *op.cit.*). On retrouvera bien sûr dans la suite de mon propos des éléments contenus dans ces deux typologies ou recouvrant partiellement certains de leurs éléments.

⁶⁰ Adam Biela, *Analogy in Science, op.cit.*, p. 140.

fait sur l'établissement de critères de différenciation. Ceux-ci peuvent être fort divers en fonction des champs disciplinaires considérés, des situations envisagées, des objets d'investigation considérés, etc. Ces critères peuvent être notamment formels, structurels ou fonctionnels. La procédure de systématisation est menée à bien par la comparaison d'événements, de situations, d'objets, dans laquelle le raisonnement analogique tient une place centrale. Une telle entreprise n'a pas pour objectif unique de simplement ordonner les éléments pris en compte. Elle permet également de formuler des relations possibles entre les différentes classes d'éléments ainsi constituées.

3.3.3 La fonction explicative

Ce qui est en jeu à l'occasion de la détermination de cette fonction, c'est l'activité de modélisation des scientifiques. Cette activité est indispensable dans la phase d'interprétation des données. Comme Lord Kelvin l'affirme : « Je ne comprends rien, tant que je n'ai pas construit un modèle. »⁶¹. Ce processus se développe comme suit : un modèle sous-tendu par une théorie donnée permet de rendre compte adéquatement d'un ensemble bien connu d'événements, de situations, d'objets. Ce même modèle peut être utilisé afin de décrire un ensemble d'événements, de situations, d'objets moins bien connus. De fait, dans le cadre d'une telle construction, le scientifique ne retient que les éléments de la partie positive de l'analogie et rejette la partie négative. On obtient alors un « modèle analogue »⁶² qui permet une interprétation des événements, des situations, des objets moins bien connus.

3.3.4 La fonction de justification

Cette fonction n'est généralement pas conférée au raisonnement analogique, et cela se révèle conforme à son statut épistémologique controversé. Cependant, une telle position mérite d'être reconsidérée, car sinon, comme le souligne Biela, bon nombre de conclusions scientifiques jugées valides dans certaines disciplines, devraient être rejetées. La question que l'on doit se poser est : dans quelles situations les scientifiques sont-ils conduits à utiliser des arguments fondés sur un raisonnement analogique ? La réponse est simple : dans les situations où ils ne peuvent pas recourir à d'autres types de raisonnement. Il s'agit en général des champs disciplinaires où les événements, situations et objets sont spécifiques, voire uniques, et ne peuvent être dupliqués. La géologie, la paléontologie, la glaciologie et la climatologie⁶³ font partie de ces disciplines qui recourent abondamment au raisonnement analogique

⁶¹ Cité par Adam Biela, *Analogy in Science*, *op.cit.*, p. 143.

⁶² *Ibid.*

⁶³ Biela cite également la sociologie et l'ethnologie.

tout en lui accordant une validité (ainsi, l'exemple présenté plus haut de l'extinction des dinosaures).

3.3.5 La fonction illustrative

Elle est utilisée abondamment dans le cadre de l'enseignement des sciences et dans celui de la vulgarisation de ses résultats et méthodes. Je ne m'attarderai pas ici sur cette fonction, car elle est en quelque sorte « extrascientifique », (même si parfois les scientifiques y recourent, quand ils doivent expliquer une expérience ou préciser les caractéristiques d'un phénomène à des étudiants en situation de stage ou inscrits en thèse).

3.4 Le raisonnement analogique au GSI et au CfA

Il intervient à plusieurs niveaux dans les activités de recherche intégrant les images, menées dans ces laboratoires. Pour détailler quelque peu sa distribution au sein de ces niveaux, je vais reprendre le découpage des fonctions proposé par Biela.

3.4.1 La fonction heuristique

En général, elle fait suite à une situation inhabituelle. Un fait surprenant se produit. Un certain nombre d'hypothèses sont émises dans le cadre d'un raisonnement abductif. Certaines de ces hypothèses résultent en fait d'un raisonnement analogique. Prenons deux exemples tirés de mes observations dans les laboratoires où j'ai séjourné.

- Les nanotubes de carbone au GSI

Un chercheur constate un fait surprenant : l'absence de nanotubes de carbone sur un échantillon observé au moyen d'un microscope électronique à transmission ou MET. Le chercheur évoque plusieurs hypothèses pour expliquer cette absence intrigante. L'une d'elles consiste à modifier le mode de préparation de l'échantillon. En s'appuyant sur son expérience et en recourant à un raisonnement analogique, la microscopiste propose au chercheur de préparer son échantillon comme ceux sur lesquels on a déposé des multicouches de métaux. En fait, si un tel échantillon est aminci selon la méthode habituelle, une partie des multicouches métalliques sera arrachée et donc inobservable au MET. L'astuce mise au point par les scientifiques consiste à broyer l'échantillon sur lequel se trouvent les multicouches afin de recueillir des petits morceaux. Les bords des morceaux ainsi obtenus sont susceptibles d'être assez fins pour être exploitables au moyen du MET. De plus, ils devraient selon toute probabilité comporter les multicouches métalliques. La microscopiste, en établissant un raisonnement analogique avec ce cas de figure, propose donc de

procéder de la même manière dans le cas de l'échantillon des nanotubes de carbone. Puisque visiblement la méthode extractive a abouti à la disparition des nanotubes recherchés, et n'a laissé que les traces de ces tubes, il convient donc de changer le mode de préparation. Le fait de broyer l'échantillon et d'obtenir des morceaux permettrait peut-être de pouvoir observer ces nanotubes sur les bords des morceaux obtenus. Après trois mois de tentatives infructueuses, les scientifiques se rendront compte que ce n'était pas le mode de préparation de l'échantillon pour le MET qui était en cause. Ils pensaient préparer des nanotubes de carbone, encouragés en cela par les informations fournies par le microscope électronique à balayage (MEB). En fait, il s'agissait d'une autre substance.

- Les masers d'eau en astrophysique

Prenons l'exemple d'une étude menée par des chercheurs du CfA relativement à des masers d'eau⁶⁴. Il s'agit de masses de molécules d'eau sous forme gazeuse détectée grâce au recours à la radio-interférométrie. À la suite d'observations répétées, les données montraient des masses détectées dans différentes localisations spatiales. Étaient-ce des masses différentes ? Les mêmes masses qui se déplaçaient au cours du temps ? Qu'est-ce qui était susceptible de provoquer un effet maser ? Par analogie avec l'évolution des planètes autour d'une étoile en vertu des lois de Kepler, les astrophysiciens ont émis l'idée que leurs données étaient en fait compatibles avec l'hypothèse de plusieurs masers d'eau se déplaçant selon une orbite régulière autour d'un objet massif. Les lois de Kepler permettent également de calculer la masse de cet objet massif (en l'occurrence, quarante millions de fois la masse solaire). Il s'agirait donc d'un trou noir, ce qui semble cohérent avec sa localisation spatiale : le centre de la galaxie NGC4258. Cette analogie s'avère judicieuse, mais demande à être corroborée par d'autres observations. En effet, le recours à l'analogie avec un déplacement similaire à celui d'une planète autour d'une étoile permet d'indiquer un sens de déplacement et, en fonction de la vitesse de déplacement, une localisation précise sur l'orbite. Les astrophysiciens se proposent donc, dans les conclusions de leur article⁶⁵, de procéder à une autre série d'observations.

⁶⁴ L'effet maser est provoqué par l'amplification du rayonnement émis par des atomes ou des molécules sous l'effet d'un processus qui conduit ces atomes ou ces molécules à émettre un rayonnement analogue à celui d'un laser. Maser signifie *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

⁶⁵ Sur ce point, on peut se référer aux articles suivants : "Of Dusty Tori and Black Holes", *Nature*, 1995 ; n°6510, p. 103-104 ; "Evidence for a Massive Black hole from High Rotation Velocities in a Sub-parsec Region of NGC4258" *Nature*, 1995 ; n°6510, p. 127-129.

3.4.2 La fonction explicative

La fonction explicative de l'analogie consiste à construire des modèles et à les confronter à des données empiriques. Voici deux exemples de ce type de processus.

- Les images de modélisation⁶⁶

Les images de modélisation, au GSI tout comme au CfA, remplissent cette fonction. Elles sont construites par analogie avec des situations empiriques déjà connues, mais le scientifique n'en retient que certaines propriétés : celles qui semblent tout à fait stabilisées théoriquement, et celles qui sont indispensables à la construction du modèle (nature des matériaux ou de l'objet céleste, quantité en nombre d'atomes de matériaux ou masse de l'objet céleste, etc.). En revanche, le scientifique ne prendra pas en compte les facteurs expérimentaux réels (en physique des matériaux, température dans l'enceinte du microscope, qualité du vide et de la pointe du microscope, etc., ou, en astrophysique, qualité du milieu interstellaire, occurrences de différents types d'artefacts possibles produits lors de l'enregistrement des données, etc.). Ces images sont en quelque sorte épurées des multiples facteurs qui conditionnent l'observation ou l'expérimentation effective. Une fois réalisées, les images de modélisation sont systématiquement comparées avec les images effectivement produites au moyen d'un microscope ou d'un télescope, et permettent de mieux comprendre ces dernières.

- Les courbes-modèles en astrophysique

Afin d'obtenir des informations sur la nature chimique d'un corps céleste, les astrophysiciens recourent à la spectroscopie. Dans le cas du radiotélescope SMA (*Submillimeter Array*), lors de la phase de construction du récepteur, les scientifiques ont fabriqué une chambre à vide dans laquelle ils ont injecté un gaz connu, mais non présent à l'état naturel sur Terre, le gaz oxysulfure. Parfaitement connu par ailleurs, le spectre de ce gaz va servir de courbe-modèle, en ne tenant pas compte des artefacts expérimentaux potentiels. Il permettra d'interpréter la qualité des spectres produits avec le nouveau récepteur. Toute donnée produite par ce dernier, dont les coordonnées se trouveront

⁶⁶ Les images de simulation sont également réalisées en recourant à un raisonnement analogique. De ce fait, les remarques relatives aux images de modélisation s'appliquent à celles produites dans une visée de simulation.

significativement à une certaine distance de la courbe-modèle, sera considérée comme du bruit. Reste, par une méthode d'essais et erreurs, à tenter de repérer les différentes sources de bruit, à les limiter et, en dernière instance, à évaluer la part qui restera incompressible⁶⁷. Le recours à des courbes-modèles est un processus employé de manière extrêmement courante dans tous les domaines de l'astrophysique, et constitue un des moyens d'interpréter les données collectées. Sans ces modèles, bon nombre de données en astrophysique resteraient muettes.

3.4.3 La fonction de systématisation

- La lecture d'image

Lors de la phase de lecture d'image, les scientifiques tentent d'identifier les éléments présents sur l'image qu'ils examinent. Le raisonnement analogique est alors très fortement présent. Les analogies effectuées reposent en grande partie sur les connaissances acquises et conservées sous formes d'encyclopédies personnelles ou collectives. L'expérience antérieure tient ici une grande place, et reste pour une bonne part tacite. Prenons l'exemple suivant : un chercheur au GSI qui a élaboré un échantillon composé de silicium, cobalt, fer et cuivre, s'attend à repérer une barrière extrêmement mince, parce qu'il a déjà vu dans d'autres publications de telles barrières sur des échantillons équivalents à celui qu'il a confectionné⁶⁸. De même en astrophysique, le raisonnement analogique permet de mettre en évidence des défauts sur l'image produite avec XMM (XMM est un télescope à rayons X). L'image de Chandra⁶⁹ devrait être analogue à celle produite avec XMM, or ce n'est pas le cas.

La capacité à établir des analogies judicieuses entre les différentes images étudiées est extrêmement utile, aussi bien au GSI qu'au CfA. Cette capacité fait partie des savoirs tacites acquis grâce à une longue fréquentation des microscopes ou des télescopes. Elle correspond à la fonction de systématisation.

- L'entreprise de classification en astrophysique

Comme je l'ai déjà énoncé plus haut, une des activités de base réalisées par les astrophysiciens consiste à établir des classifications de la

⁶⁷ Les astrophysiciens parlent de « *fitter* » une courbe. Il s'agit en fait d'ajuster la courbe produite avec les données empiriques à la courbe-modèle, en réduisant tous les types de bruit potentiels.

⁶⁸ Voir sur ce point Catherine Allamel-Raffin, "The Meaning of a Scientific Image: Case Study in Nanoscience. A Semiotic Approach", *Nanoethics*, vol. 5, n° 2, 2011.

⁶⁹ Chandra est un télescope à rayons X plus puissant que XMM.

multitude d'objets célestes présents dans notre cosmos. Ils tentent donc de répertorier dans un premier temps ce qui se trouve dans le ciel, afin de pouvoir expliquer dans un second temps la nature des phénomènes ou des objets observés. Lorsqu'ils se livrent à une étude sur un objet céleste précis, ces classifications disponibles dans des bases de données accessibles *via* le réseau Internet leur permettent de trouver rapidement des données relatives à lui dans différents domaines du spectre électromagnétique, ainsi que de collecter des informations correspondant à des objets similaires afin de pouvoir effectuer des comparaisons.

Or l'entreprise de classification en elle-même repose sur un raisonnement intrinsèquement analogique⁷⁰. Une fois fixés les critères qui régissent la typologie, l'intégration à une classe donnée se fait à partir d'un tel raisonnement. Ainsi, il existe par exemple des classifications des galaxies réalisées en s'appuyant sur leur morphologie (elliptiques, spirales, lenticulaires et irrégulières⁷¹). Lorsqu'une nouvelle galaxie est repérée, elle va être classée dans l'une des catégories en suivant un raisonnement analogique.

⁷⁰ Là encore, Aristote a ouvert la voie. Les entreprises de classification en biologie, et notamment celles qui permettent de décrire les types de ressemblances caractérisant les être vivants, reposent sur le recours à l'analogie. Dans ce cadre, les analogies effectuées par Aristote s'établissent autour des similitudes de structure ou de fonction. L'os de seiche, l'arrête du poisson, l'os des mammifères présentent une similitude de structure : ils sont tous trois de nature osseuse. Les ailes de l'oiseau et les nageoires du poisson présentent une similitude de fonction (se déplacer). Plus généralement, les sciences où l'entreprise classificatoire s'avère importante supposent le recours à l'analogie. Pour plus de précisions sur ce point, voir Marie-Dominique Gineste, *Analogie et cognition. Etude expérimentale et simulation informatique*, op. cit., 1997, p. 11.

⁷¹ Une galaxie elliptique est de forme ovale, sans structure interne particulière, et de brillance à peu près uniforme. Une galaxie spirale comporte un noyau sphérique entouré d'une masse de matière dans laquelle apparaît une structure spirale. Des bras plus ou moins importants se développent à partir du noyau. Une galaxie lenticulaire présente des caractéristiques à mi-chemin entre la galaxie elliptique et la galaxie spirale. Elle possède en effet un noyau important (comme la galaxie spirale), mais est démunie de bras (comme la galaxie elliptique). Une galaxie irrégulière est une galaxie qui ne rentre pas dans les trois catégories ci-dessus. L'intérêt de cette classification dépasse le simple fait d'être capable de catégoriser, en fonction de leur morphologie, la multitude des galaxies de notre univers, car cette morphologie des galaxies délivre des informations sur leur composition et leur évolution. Par exemple, les galaxies elliptiques sont composées principalement de vieilles étoiles. De plus, contenant une quantité faible de poussières et de gaz interstellaires, elles ne sont pas susceptibles de donner naissance à de jeunes étoiles.

Conclusion

La recherche quotidienne au sein des laboratoires inclut des manières de raisonner longtemps négligées par les philosophes des sciences. Or leurs fonctions sont essentielles : abduction et analogie sont génératrices de nouveauté et contribuent au processus probatoire. Comprendre comment une image peut devenir une preuve, ou un élément de preuve, suppose qu'on prenne en compte ces types inférentiels, car ceux-ci interviennent dans la production, la lecture et le choix des images et dans l'évaluation de la pertinence des images les unes par rapport aux autres. Proposer une étude n'incluant pas ces deux types amènerait à développer une vision bancale de la valeur probatoire des images. Le revers de la médaille, en ce qui concerne l'abduction et l'analogie, est constitué par le motif même de leur éviction de certaines conceptions rationalistes normatives élaborées par des philosophes. Elles n'ont pas la rigueur de la déduction, et ne sont pas aussi aisément formalisables que l'induction, bien que des tentatives aient vu le jour, notamment dans les travaux de sciences cognitives de ces dernières années.

Bibliographie

- Catherine ALLAMEL-RAFFIN, "The Meaning of a Scientific Image: Case Study in Nanoscience. A Semiotic Approach", *Nanoethics*, vol. 5, n° 2, 2011, p. 165-173.
- Catherine ALLAMEL-RAFFIN & Alain LEPLEGE, *Histoire de la médecine*, Paris, Dunod, 2008.
- Catherine ALLAMEL-RAFFIN & Jean-Luc GANGLOFF, *La raison et le réel*, Paris, Ellipses, 2007.
- Adam BIELA, *Analogy in Science*, Frankfurt-am-Main, Peter Lang, 1991.
- Alexander BIRD, "Eliminative Abduction: Examples from Medicine", *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 41, 2010, p. 345-352.
- Max BLACK, *Models and Metaphors*, London and Ithaca, Cornell University Press, 1962.
- Michel J. BLAIS *Introduction à la logique*, <http://callisto.si.usherb.ca:8080/mblais>, consulté le 11/11/1999
- Robert BLANCHE, *L'induction scientifique et les lois naturelles*, Paris, Puf, 1975.
- Robert BLANCHE, *Le raisonnement*, Paris, Puf, 1973.
- Pierre BOUDON, « Entre rhétorique et dialectique : la constitution des figures d'argumentation », *Langue française*, n° 137, 2000, p. 63-86.
- Christiane CHAUVIRE « Peirce, Popper et l'abduction. Pour en finir avec l'idée d'une logique de la découverte », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, n° 4, 1981, p. 441-459.
- Christiane CHAUVIRE, « Vérifier ou falsifier : de Peirce à Popper », *Les Etudes philosophiques*, n° 3, 1981, p. 257-278.
- Christiane CHAUVIRE, *La philosophie dans la boîte noire. Cinq pièces faciles sur Wittgenstein*, Paris, Editions Kimé, 2000.

- Mikaël COZIC, « Confirmation et induction », *Précis de philosophie des sciences*, Anouk Barberousse, Denis Bonnay & Mikaël Cozic (dirs.), Paris, Vuibert, 2011, p. 62-99.
- Kevin N. DUNBAR, "Understanding the Role of Cognition in Science: the Science as Category Framework", P. Carruthers, Stephen Stich & Michael Siegal (dirs.), *The Cognitive Basis of Science*, Cambridge, GB, Cambridge University Press, 2002, p. 154-170.
- Umberto ECO (1983) *Les limites de l'interprétation*, Paris, Grasset (traduit de l'italien par M. Bouzaher), 1992.
- Marie-Dominique GINESTE, *Analogie et cognition. Etude expérimentale et simulation informatique*, Paris, Puf, 1997.
- Yves GINGRAS & Alexandre GUAY, "The Uses of Analogies in Seventeenth and Eighteenth Century Science", *Perspectives on Science*, vol. 19, n° 2, 2011, p. 154-191.
- Carlo GINZBURG, « Signes, traces, pistes. Racines d'un paradigme de l'indice », *Le Débat* n° 6, Paris, Gallimard, 1980, p. 3-44 (traduit de l'italien par J.-P. Cottureau).
- Jean Blaise GRIZE, *Logique et langage*, Paris, Ophrys, 1990.
- Ian HACKING & Michel DUFOUR, *L'ouverture au probable. Eléments de logique inductive*, Paris, Armand Colin, 2004.
- Fernand HALLYN, « Galilée, le télescope et l'évaluation de l'inférence analogique » in *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, n°40, 1992, p. 103-112.
- Norwood Russell HANSON (1961) « Y a-t-il une logique de la découverte scientifique ? », *De Vienne à Cambridge*, P. Jacob (dir.), Paris, Gallimard, 1980, p. 447-468.
- Nathalie HEINICH, *La sociologie à l'épreuve de l'art (1^{ère} partie)*, La Courneuve, Aux lieux d'être, 2006.
- Nathalie HEINICH & Jean-Marie SCHAEFFER, « Art, création, fiction. Entre sociologie et philosophie ». Entretien avec A. Prstojevic & A. Louis, *VoxPoetica. Lettres et sciences humaines*, 2005. <http://www.vox-poetica.org/entretiens/intSchaefferHeinich.html>, consulté le 23/06/2013
- Mary HESSE, *Models and Analogies in Science*, Londres & New York, Sheed & Ward, 1963.
- Keith J. HOLYOAK & Paul THAGARD, *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*, Cambridge, MA, MIT Press, 1995.
- Pierre JACOB, *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique*, Paris, Puf, 1980.
- Peter LIPTON, *Inference to the Best Explanation*, Oxon, Routledge, 1991 (deuxième édition: 2004)
- Aharon KANTOROVICH, *Scientific Discovery. Logic and Tinkering*, New York, State University of New York Press, 1993.
- Alain Charles MASQUELET, *Le raisonnement médical*, Paris, Puf, *Que Sais-Je ?*, 2006.
- Joke MEHEUS, "Analogical Reasoning...", *Metaphor and Analogy in the Sciences*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 17-34.
- Samir OKASHA, *Philosophy of Science. A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2002.
- Sami PAAVOLA, "Hansonian and Harmanian Abduction as Models of Discovery", *International Studies in the Philosophy of Science*, vol. 20, n° 1, 2006, p. 93-108.

- Sami PAAVOLA, "Abduction as a Logic and Methodology of Discovery: the Importance of Strategies", *Foundation of Science*, vol. 9, 2004, p. 267-283.
- Charles Sanders PEIRCE, *Œuvres I. Pragmatisme et pragmatisme*, Claudine Tiercelin & Pierre Thibaud (dirs.), Paris, Editions du Cerf, 2002.
- Stéphanie RUPHY, *Pluralismes scientifiques . Enjeux épistémiques et métaphysiques*, Paris, Hermann, 2013.
- Philibert SECRETAN, *L'analogie*, Paris, Puf, *Que sais-je?*, 1984.
- William SHEA, "Looking at the Moon as Another Earth : Terrestrial Analogies and Seventeenth-Century Telescopes", *Metaphor and Analogy*, Fernand Hallyn (dir.), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 83-103.
- Cameron SHELLEY, "Analogy Counterarguments and the Acceptability of Analogical Hypotheses", *British Journal for the Philosophy of Science*, n° 53, 2002, p. 477-496.
- Léna SOLER, *Introduction à l'épistémologie*, Paris, Ellipses, 2009.
- Paul THAGARD, "Medical Analogies: Why and How", 1997.
<http://cogsci.uwaterloo.ca/Articles/Pages/med.analog.html>, consulté le 24/06/2013
- Claudine TIERCELIN, « Induction », *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, D. Lecourt (dir.), Paris, Puf, 1999, p. 506-511.
- John WATKINS, "A New View of Scientific Rationality", *Revue de Synthèse*, n° 3-4, 1987, p. 455-473.