

L'explication scientifique revisitée à la lumière de la nanosynthèse de métaux anisotropes ?

PIER-ALEXANDRE TARDIF, *Université Laval*

RÉSUMÉ : D'aucuns ont récemment soutenu que la nanosynthèse entraîne une remise en question des conceptions philosophiques traditionnelles de l'explication scientifique. Ces conceptions standard se révéleraient incapables de rendre compte des dynamiques d'échanges d'information qui interviennent lors de la synthèse de nanoparticules de métaux anisotropes. Le concept d'heuristique efficace a conséquemment été proposé afin de combler cette lacune. Nous proposons une étude comparative entre le concept classique d'explication déductive-nomologique et celui d'heuristique efficace. Cette comparaison permet de mettre en évidence que la substitution d'un concept d'explication à l'autre implique non seulement un déplacement dans le rôle assigné à l'explication scientifique, mais également dans celui de l'épistémologie à l'égard des sciences synthétiques.

1. Introduction

En philosophie des sciences, le thème de l'explication scientifique constitue une problématique classique dont l'objectif principal a souvent consisté à spécifier ou prescrire les conditions à partir desquelles on entend rendre compte, sur le plan de la logique, de l'occurrence répétée des phénomènes naturels dans le monde. Il est néanmoins obvie qu'un aperçu de la littérature pertinente concernant les nanotechnologies permet de reconnaître que celles-ci ne visent pas seulement à décrire et expliquer les phénomènes naturels. En effet, les nanotechnologies sont explicitement orientées vers le contrôle de la matière à l'échelle nanométrique et vers la fabrication d'objets

possédant des propriétés physicochimiques particulières pouvant être manipulées avec une précision jusqu'ici inégalée. D'aucuns ont récemment soutenu à cet égard que la production d'objets à l'échelle nanométrique (la nanosynthèse) entraîne une remise en question des conceptions philosophiques traditionnelles de l'explication scientifique. Ces conceptions standard se révéleraient incapables de rendre compte des dynamiques d'échange d'information qui interviennent lors de la synthèse de nanoparticules de métaux anisotropes¹. Le concept d'« heuristique efficace² »³ (*effective heuristic*) a conséquemment été proposé afin de combler ces lacunes. Nous proposons une brève étude comparative des discours que deux épistémologues développent à propos de la science. Aux fins de notre comparaison, nous distinguerons entre différents niveaux de discours. Le niveau zéro (absence de discours) correspond aux phénomènes du monde extérieur. Le premier niveau est celui de la science, entendue comme un discours descriptif et explicatif s'intéressant aux régularités des phénomènes du monde extérieur. Le second niveau correspond à l'épistémologie, un discours qui prend pour objet d'étude le discours de la science. Étant donné que notre propre discours prend principalement pour objet d'étude non la science, mais les textes d'épistémologues (Hempel, Bursten), nous dirons qu'il se situe à un troisième niveau, dit métaépistémologique⁴. Dans cette étude comparative, nous exposons d'abord les concepts épistémologiques de « science » et d'« explication » chez Carl Gustav Hempel en prenant pour exemple l'application de l'explication déductive-nomologique à une expérimentation scientifique classique (2.). Nous présentons ensuite les concepts dont Julia Bursten promeut l'usage afin de rendre compte de la synthèse de nanoparticules de métaux anisotropes (3.). Cette comparaison permet, d'une part, de relever les particularités des procédures de nanosynthèse, ce qui éclaire en retour en quel sens la nanosynthèse représente une limite pour le modèle déductif-nomologique. D'autre part, cette même comparaison nous permet de montrer que le rôle – et non seulement le concept – assigné à l'explication scientifique diffère chez ces auteurs. Il en ressort qu'en substituant au concept d'« explication déductive-

nomologique » celui d'« heuristique efficace », Bursten s'inscrit dans une toute autre conception de l'épistémologie que Hempel (4.).

2. La science et l'explication déductive-nomologique chez Hempel

Au sein de la science, Hempel⁵ distingue les sciences non empiriques des sciences empiriques. Les premières, qui incluent la logique et les mathématiques, sont analytiques, c'est-à-dire que leur justification procède par démonstration *a priori* des propositions, de telle sorte que leur valeur de vérité dépend uniquement de la signification des termes et des règles du langage. Pour leur part, les sciences empiriques sont synthétiques, c'est-à-dire que la valeur de vérité de leurs énoncés est fonction de l'adéquation entre ce qui est prévu par la théorie et les faits qui sont observés. Ces énoncés doivent pouvoir faire l'objet d'expérimentations et ne sont acceptés que s'ils sont confirmés par une évidence empirique. Les sciences empiriques se divisent en deux catégories : sciences sociales et sciences de la nature. Les sciences sociales comprennent la sociologie, la politique, l'ethnologie, l'économie, l'histoire, etc., ainsi que la psychologie, qui est à cheval entre les deux catégories. Les sciences de la nature incluent pour leur part la physique, la chimie, la biologie et les disciplines leur étant adjacentes. Notons que dans cette conception hempélienne de la science, aucune distinction particulière n'est introduite pour les sciences dont l'objectif est de produire des matériaux. L'objectif des sciences empiriques consiste pour Hempel à explorer, décrire, expliquer et prévoir les événements du monde dans lequel nous vivons⁶. Plus précisément, selon la conception néo-positiviste de la science dans laquelle s'inscrit Hempel, la science empirique est conçue comme un système d'énoncés (vrais ou approximativement vrais) logiquement organisé, reposant sur une base empirique et qui a pour objectif d'expliquer et de prédire les phénomènes observables. Les énoncés analytiques sont vrais par convention et servent à organiser logiquement les énoncés synthétiques qui véhiculent de l'information partiellement vérifiable sur le monde. Au moyen de l'analyse logique, les énoncés synthétiques peuvent être ramenés à des constats d'observation intersubjectivement contrôlables. L'analyse logique est la méthode préconisée par le Cercle de Vienne, laquelle

consiste à clarifier les problèmes philosophiques et les énoncés d'un langage à l'aide des outils de la logique symbolique moderne :

since the meaning of every statement of science must be statable by reduction to a statement about the given, likewise the meaning of any concept, whatever branch of science it may belong to, must be statable by step-wise reduction to other concepts, down to the concepts of the lowest level which refer directly to the given⁷.

Dans cette perspective logico-formelle, la tâche de la science consiste pour Hempel à produire une conception du monde qui s'appuie sur l'expérience de façon claire et précise⁸. Pour ce faire, les explications scientifiques doivent satisfaire à deux conditions nécessaires (mais non suffisantes) : l'exigence de pertinence et l'exigence de testabilité. Ces conditions spécifient respectivement, d'une part, que l'information fournie par l'explication doit donner de bonnes raisons de s'attendre à ce que le phénomène se produise si certaines conditions sont satisfaites⁹, et d'autre part, que « les propositions qui constituent une explication scientifique doivent pouvoir se prêter à des tests empiriques¹⁰ ». Le modèle par lequel Hempel propose de concevoir ce que doit être une explication est le modèle déductif-nomologique. Abstraction faite de tout contenu de signification, l'explication déductive-nomologique a la forme logique suivante¹¹ :

MODÈLE DÉDUCTIF-NOMOLOGIQUE (D-N)

| | | |
|-------------|---|--|
| EXPLANANS | L_1, L_2, \dots, L_r C_1, C_2, \dots, C_k (déduction) | PRÉMISSES (LOIS & CONDITIONS INITIALES) |
| EXPLANANDUM | E | CONCLUSION (ÉNONCÉ) |

Deux types d'énoncés synthétiques peuvent être distingués dans ce modèle : les énoncés singuliers (des constats d'observation – tels que les conditions initiales – et leur conjonction), qui décrivent certains phénomènes observables, et les énoncés universels, c'est-à-

dire les lois de la nature qui expriment l'existence d'une régularité entre ces phénomènes. Hempel définit une loi comme un énoncé conditionnel, vrai, impliqué par une théorie scientifique admise et de forme strictement universelle, par exemple l'énoncé : « quand la température d'un gaz s'élève, sa pression restant constante, son volume augmente »¹². Les énoncés universels se distinguent également entre eux selon leur niveau de généralité (ou d'universalité). Dans un système déductif, « ce qui explique » doit être de niveau supérieur (en termes de généralité) à « ce qui est expliqué », de telle sorte que les énoncés de niveau supérieur ont le caractère d'hypothèses relatives aux énoncés de niveau inférieur qui peuvent en être déduits¹³. Hempel distingue ainsi les théories (les lois théoriques) des lois empiriques. Afin de rendre compte de façon plus compréhensive de la régularité de certains phénomènes empiriques, une théorie fait intervenir des entités et des processus – le plus souvent inobservables – régis par ces lois théoriques. À cet égard, Hempel discute de principes internes et de principes de liaison afin, d'une part, de rendre compte des entités et processus invoqués par une théorie et des lois auxquelles ceux-ci sont censés se conformer, et d'autre part, d'indiquer comment les processus théoriques sont reliés aux phénomènes empiriques. Par exemple, dit-il,

dans la théorie cinétique des gaz, ce sont les principes internes qui caractérisent les « microphénomènes » au niveau moléculaire, alors que les principes de liaison rattachent certains aspects de ces microphénomènes à des propriétés « macroscopiques » correspondantes d'un gaz¹⁴.

Ce qu'il importe de noter de ce qui précède est que le modèle d'explication proposé par Hempel tient compte des relations (en termes de généralité) entre différentes lois ainsi que de différentes échelles de grandeur, tel qu'en témoigne l'emploi des termes « microphénomènes » et « macroscopiques ».

Prenons maintenant un problème bien connu pour exemplifier la façon dont le modèle déductif-nomologique rend compte de l'explication d'un phénomène. Au 17^e siècle, les fontainiers de Florence tentaient en vain depuis plusieurs années de pomper l'eau

du fleuve Arno à plus de 10,33 mètres de hauteur. Après la mort de Galilée en 1642, son disciple Evangelista Torricelli proposa une hypothèse : la limite de 10,33 mètres de la colonne d'eau située dans le corps de la pompe correspond à la pression totale de l'air atmosphérique sur la surface de l'eau du puits. Quelques années plus tard, Blaise Pascal voulu tester une autre implication de l'hypothèse de Torricelli : « si le mercure du baromètre de Torricelli, raisonnait-il, fait contrepoids à la pression d'air sur la surface libre de la cuve à mercure, sa hauteur devrait décroître quand l'altitude augmente, puisque le poids de l'air au-dessus de la cuve devient plus faible¹⁵ ». À l'aide du modèle déductif-nomologique, représentons l'expérience du Puy-de-Dôme réalisée par Florin Périer les 15 et 16 novembre 1647 à l'instigation de son beau-frère Blaise Pascal¹⁶ :

L'EXPÉRIENCE DU PUY-DE-DÔME –
EXPLICATION DÉDUCTIVE-NOMOLOGIQUE

| | |
|---|------------------------------------|
| L_1 : En tout lieu, la pression que la colonne de mercure qui se trouve dans la branche fermée de l'appareil de Torricelli exerce sur le mercure qui est au-dessous est égale à la pression exercée sur la surface du mercure dans le récipient ouvert par la colonne d'air au-dessus de lui. | EXPLANANS PRÉMISSES |
| L_2 : Les pressions exercées par les colonnes de mercure et d'air sont proportionnelles à leurs poids ; plus courtes sont les colonnes, plus faible leur poids. | LOIS (L_1 , L_2) |
| C_1 : Au fur et à mesure que Périer faisait monter l'appareil vers le sommet du mont Puy-de-Dôme, la colonne d'air située au-dessus du récipient ouvert devenait plus courte. | CONDITION INITIALE (C_1) |
| E : (Par conséquent), la colonne de mercure dans le récipient fermé a diminué régulièrement au cours de la montée. | EXPLANANDUM (E) CONCLUSION |

Comme en témoigne cet exemple, l'explication déductive-nomologique, ou explication par subsumption sous des lois générales, se conçoit comme un raisonnement déductif dont la conclusion est l'énoncé *explanandum* (E), c'est-à-dire l'énoncé décrivant le phénomène à expliquer. L'ensemble des prémisses, ou *explanans*,

consiste en des lois générales L_1, L_2, \dots, L_r et des conditions initiales C_1, C_2, \dots, C_k , lesquelles sont des énoncés singuliers spécifiant l'information concernant certains faits particuliers devant être ajoutés aux lois afin de déduire logiquement l'*explanandum*. Dans ce modèle d'explication scientifique, les lois sont aussi appelées des lois de couverture du phénomène *explanandum*. Grâce à ce modèle, la « confirmation », l'« explication », la « prédiction » et la « rétrodiction » peuvent être représentées formellement et seules des considérations pragmatiques les distinguent. Hempel spécifie quatre règles, dont trois conditions logiques et une condition empirique, qui doivent être respectées afin qu'une explication soit valable (*sound*) :

RÈGLES DU MODÈLE D-N

Conditions logiques :

R_1 : l'*explanandum* doit être une conséquence logique de l'*explanans* ;

R_2 : l'*explanans* doit contenir au moins une loi générale nécessaire à la déduction de l'*explanandum* ;

R_3 : l'*explanans* doit avoir un contenu empirique (être observable ou testable au moins en principe) ;

Condition empirique :

R_4 : les énoncés constituant l'*explanans* doivent être vrais ou approximativement vrais¹⁷.

Ces règles formelles constituent des normes qui explicitent la signification de l'expression « explication (déductive-nomologique) » et qui en réglementent l'usage. Compte tenu de ce qui précède, nous pouvons maintenant esquisser une définition stipulative de l'expression « science empirique » à l'aide des six clauses suivantes :

La « science empirique » :

C_1 : un système ne contenant que des énoncés synthétiques et analytiques ;

C_2 : un système organisé conformément aux lois de la logique par les énoncés analytiques ;

C_3 : un système ayant une base empirique, c'est-à-dire que ses énoncés synthétiques peuvent être ramenés par l'analyse logique à des constats d'observation intersubjectivement contrôlables ;

- C_4 : un système ayant pour fonction d'expliquer et de prédire, c'est-à-dire de déduire à partir d'énoncés universels (les « lois ») des énoncés singuliers décrivant les phénomènes observables ;
- C_5 : un système comprenant une partie théorique qu'on peut considérer comme un « instrument » formel (analytique) permettant de faire des prédictions empiriques lorsque les « lois » (synthétiques) sont des interprétations admissibles de ses conséquences logiques ;
- [C_6 : un système d'énoncés vrais ou approximativement vrais¹⁸.]

Il appert que la conception hempelienne de la science s'inscrit dans une approche logico-formelle qui prescrit les conditions de validité des explications scientifiques. Ce qu'il importe de noter pour notre comparaison avec Bursten est que le rapport entre le concept d'« explication déductive-nomologique » et les explications scientifiques est normatif : un ensemble d'énoncés ne peut être considéré comme une explication scientifique que s'il respecte les conditions et la forme du modèle D-N. Bien que cette conception n'assigne aucune place aux sciences dont l'objectif principal est la production de matériaux, le concept d'« explication » chez Hempel tient compte (au moins en partie) des différentes échelles de grandeur (micro, macro) et des relations entre différentes lois (en termes de niveaux de généralité). Les concepts de « science » et d'« explication » chez Hempel étant maintenant exposés, attardons-nous à ceux que Bursten propose.

3. Science synthétique, heuristique efficace et nanosynthèse – Julia Bursten

L'idée à la base de la réflexion de Bursten est que la science poursuit d'autres objectifs que celui de décrire la nature. En conséquence, le concept de « science » proposé par Bursten¹⁹ implique deux catégories : les sciences théoriques et les sciences synthétiques. Les sciences théoriques, qui comprennent la physique et la biologie, sont dites taxonomiques, car elles visent à classifier ainsi qu'à observer, décrire et comprendre les systèmes naturels préexistants. Les sciences synthétiques, dont la science des matériaux, ont pour objectifs principaux non de classifier ou de décrire, mais de produire

(synthétiser) de nouveaux matériaux et de fournir une compréhension scientifique à travers ce processus de production. De ce fait, les questions posées par ces disciplines consistent à s'interroger sur la façon de fabriquer un nouveau matériau ou sur la possibilité qu'un changement de procédure de fabrication puisse conduire à altérer un matériau ou à modifier ses propriétés. Une fois leur place assignée aux sciences synthétiques, le constat sur lequel insiste Bursten est que la philosophie des sciences traditionnelle ne s'est pas occupée du rôle de l'explication dans les sciences synthétiques, notamment en chimie et en particulier dans l'une de ses branches, spécialisée dans la fabrication de nanomatériaux, c'est-à-dire la nanosynthèse.

Selon Bursten, une partie non négligeable de la littérature dans les revues de chimie est constituée d'articles qui décrivent des procédures de synthèse accompagnées de discussions sur la façon dont leur réalisation produit de nouveaux matériaux possédant de nouvelles propriétés. Ces articles peuvent ensuite être utilisés pour répondre à des questions concernant les propriétés et le fonctionnement de ces matériaux. Bursten spécifie qu'en ce sens restreint, l'information qui fait avancer les sciences synthétiques est de nature explicative²⁰. Dans *Reconsidering Explanation : Lessons from Nanosynthesis*, l'objectif de Bursten est d'identifier la façon dont cette information est obtenue afin d'esquisser une image de ce à quoi une théorie de l'explication peut ressembler dans les sciences synthétiques. Au moyen d'une description des différentes étapes de la synthèse de nanoparticules de métaux anisotropes, Bursten entend montrer que le concept d'« heuristique efficace », combiné avec une prise en compte des changements de signification des concepts à travers les différentes échelles de grandeur, paraît prometteur afin de rendre compte de la dynamique d'échange d'information dans les sciences synthétiques. Bursten admet que certains puristes seraient tentés de nier le statut d'explication scientifique aux heuristiques efficaces, mais elle souligne qu'il n'en demeure pas moins que ces heuristiques constituent une partie importante d'une pratique scientifique courante qui n'a pas fait l'objet d'études spécifiques en philosophie des sciences²¹. Spécifiquement, c'est la dynamique de l'information requise pour réaliser chacune des étapes de la

procédure de nanosynthèse que Bursten essaie de mettre en lumière à l'aide des notions d'« heuristique efficace » et de « changements de suppositions en fonction de l'échelle ».

William C. Wimsatt introduit le concept d'« heuristique » dans le contexte d'études de systèmes dont la complexité dépasse nos pouvoirs d'analyse. Dans ces conditions, précise Wimsatt, la solution a généralement consisté à introduire, parfois de façon artificielle, des idéalizations, des approximations ou d'autres dispositifs théoriques qui réduisent la complexité du système. La difficulté, à ses yeux, est que, traditionnellement, la philosophie des sciences a présenté la science comme un ensemble de structures déductives et d'algorithmes conçus pour des ordinateurs computationnellement omnipotents. Selon cette conception, les théories sont censées avoir une structure axiomatique et être déductivement fermées (*closed under entailment*), c'est-à-dire que tout ce qui s'ensuit d'un ensemble d'axiomes est une partie de cette théorie²². L'axiomatisation consiste à partir d'un ensemble fini d'axiomes (ou postulats) pour dériver tous les autres énoncés du système théorique par des transformations purement logiques²³ ou mathématiques, de manière à obtenir un ensemble d'énoncés logiquement organisés. Les règles de dérivation logique assurent que la valeur de vérité est préservée tout au long des transformations. Un système théorique, tel qu'un système à la Hilbert, est dit axiomatisé si ses axiomes satisfont aux quatre critères suivants :

CONDITIONS CONCERNANT LE SYSTÈME D'AXIOMES :

- C₁ : le système d'axiomes doit être exempt de contradiction
– on ne doit pas pouvoir en déduire n'importe quel énoncé choisi arbitrairement ;
- C₂ : le système doit être indépendant, c'est-à-dire que ses axiomes ne doivent pas pouvoir être déduits d'autres axiomes ;

CONDITIONS CONCERNANT LA RELATION DU SYSTÈME D'AXIOMES AU CORPS
DE LA THÉORIE :

- C₃ : les axiomes doivent être suffisants pour déduire tous les énoncés appartenant à la théorie axiomatisée ;
- C₄ : les axiomes doivent être nécessaires à cette déduction, ils ne doivent pas contenir de présuppositions superflues²⁴.

Si une telle rigueur sied à la géométrie euclidienne ou à la théorie des ensembles, Wimsatt considère qu'il en va tout autrement dans le cas des sciences naturelles, biologiques ou sociales. Selon lui, si une conception de l'explication comme le modèle déductif-nomologique de Hempel s'applique aux sciences de la nature, ce n'est qu'à condition de pouvoir i) faire appel à des idéalizations, ii) isoler le système plus facilement, iii) traiter les propriétés pertinentes comme étant indépendantes du contexte et iv) se concentrer sur des questions et des paramètres dont la portée produit des comportements d'équilibre simple²⁵. Ce que conteste Wimsatt relativement à cette conception est la prémisse selon laquelle nous, ou les ordinateurs effectuant les calculs, serions des démons de Laplace, c'est-à-dire :

une intelligence qui pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule, les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux²⁶.

Considérant cette représentation réductrice de l'explication comme inatteignable, Wimsatt précise que toute image de la science qui prescrit de nous comporter comme si nous étions des démons de Laplace, non seulement échoue à proposer une conduite utile au scientifique dans le monde réel, mais suggère en outre des points de vue et des méthodes non optimaux, étant entendu que l'équipement ordinaire que nous possédons est susceptible d'erreurs. Pour Wimsatt, un modèle plus réaliste du scientifique, considéré comme un décideur et un solveur de problèmes, prend en compte de telles limitations et fournit une orientation qui s'adapte à la pratique actuelle de toutes les sciences. Il n'en va pas autrement pour l'explication scientifique. Celle-ci doit pouvoir guider le scientifique dans sa pratique réelle tout en tenant compte de la complexité du système étudié et des limites pratiques de l'équipement dont il fait usage. Wimsatt propose de parler de « procédure heuristique » ou, plus simplement, d'« heuristique »,

en contraste avec un « algorithme²⁷ », afin de fournir une solution de rechange réaliste et pratique aux comptes rendus réducteurs des explications scientifiques traditionnelles²⁸.

Bursten reprend explicitement le concept d'« heuristique » de William Wimsatt. Les heuristiques efficaces sont définies par Bursten de la façon suivante : « *[they] are well-confirmed strategies for reliably reproducing a particular kind of behavior in the interaction of two or more substances or materials*²⁹ ». Par exemple, en chimie, les heuristiques efficaces peuvent être des règles concernant la réactivité des substances, telles que les « métaux alcalins brûlent en présence d'eau » ou « les métaux alcalins plus lourds comme le potassium brûlent plus violemment que ceux plus légers comme le lithium ». Bursten accole l'épithète « efficace » au substantif « heuristique » pour signifier que les heuristiques sont utiles dans la mesure où elles sont particulières à certaines classes de substances et que les généralisations de ces heuristiques mènent souvent à une diminution de leur efficacité. À son avis, la conception de l'« heuristique efficace » qu'elle promet se distingue des conceptions traditionnelles fortement orientées vers la justification théorique, mais elle ne leur est ni supérieure, ni subordonnée. Bursten prône explicitement un pluralisme pragmatique. Dans certains cas, une théorie causale sera le moyen le plus efficace pour expliquer une situation, tandis que dans d'autres cas, une théorie unificationniste³⁰ pourra être plus appropriée. Néanmoins, Bursten considère que, dans le cas des sciences synthétiques et de la synthèse de nanoparticules de métaux anisotropes, les heuristiques efficaces fournissent, sinon toujours, du moins souvent, la meilleure explication de la façon de réaliser une procédure.

Les nanoparticules de métaux anisotropes sont des particules monocristallines à géométrie non sphérique (cubes, nanofils, octaèdres, plaques triangulaires, etc.) le plus souvent constituées d'or, d'argent, d'oxyde de fer, de palladium ou de platine³¹. L'influence de la morphologie et de la taille de ces nanomatériaux, en particulier le grand rapport surface-volume déterminant certaines de leurs propriétés physicochimiques, en font des candidats de choix pour des applications potentielles dans des domaines aussi variés

que l'administration de médicaments, la catalyse, l'électronique, l'imagerie médicale, l'optique, la photonique, le traitement du cancer, etc. Par exemple, l'utilisation d'une lumière proche infrarouge issue d'un laser femtoseconde permet de maximiser la pénétration dans les tissus et de donner lieu à un plasmon de surface. En jouant le rôle d'une lentille qui focalise la lumière en certains points pour former des points chauds, le plasmon issu des nanoparticules d'or permet de détruire les cellules cancéreuses environnantes³² sans exposer tout le corps à des radiations nocives ou à des produits chimiques toxiques.

Plusieurs méthodes existent pour synthétiser les nanoparticules de métaux anisotropes. Afin de suivre son argumentaire, nous reprenons en bonne partie³³ la reconstruction proposée par Bursten d'une procédure couramment employée en chimie des solutions, à savoir la synthèse à partir d'un germe. Bursten divise cette synthèse en trois étapes. Premièrement, deux solutions liquides sont combinées pour produire une réaction d'oxydoréduction qui donne lieu à la formation d'un métal par précipitation. Deuxièmement, les nanoparticules entament leur nucléation et leur croissance. Troisièmement, un ligand³⁴ est ajouté afin de restreindre la taille et la forme des nanoparticules pendant qu'elles continuent à croître. Finalement, la procédure est répétée de manière identique, à quelques variations près, et cela afin d'ajuster la taille et la forme des particules souhaitées.

Avant d'exposer plus en détails la reconstruction rationnelle des étapes de la nanosynthèse de métaux anisotropes susmentionnée, il convient d'apporter certaines précisions quant aux rôles que peuvent jouer une explication scientifique en fonction du niveau de langage. Au niveau scientifique, par exemple dans la section « résultats » d'un article de chimie portant sur la nanosynthèse, l'explication scientifique est utilisée afin de rendre compte d'un phénomène (ou de la fabrication d'un matériau). À ce niveau, l'explication scientifique joue le rôle d'une hypothèse dont on tente de déterminer le statut au moyen d'une expérimentation. Au niveau épistémologique, l'explication scientifique est mentionnée et elle fait partie intégrante de l'ensemble des énoncés constituant l'argument utilisé pour

démontrer une thèse dont le statut est déterminé en fonction des critères de validité (logique) d'un discours. Par exemple, à l'aide de sa reconstruction rationnelle, Bursten entend démontrer la thèse selon laquelle son concept d'« heuristique efficace », contrairement aux concepts d'explication standard, permet de rendre compte des dynamiques d'échange d'information dans les différentes étapes de nanosynthèse de métaux anisotropes. Pour ce faire, elle mentionne différentes explications scientifiques pour mettre en évidence que celles-ci font intervenir des contextes théoriques distincts et, à son avis, c'est ce passage d'un contexte théorique à un autre (et impliquant différentes échelles de grandeur) dont doit pouvoir rendre compte un concept d'« explication » à l'égard des sciences synthétiques. Au niveau métaépistémologique, les explications scientifiques sont également mentionnées et font partie d'une argumentation évaluée de la même façon qu'au niveau épistémologique. Dans le cas de notre étude comparative de niveau métaépistémologique, ce qui nous intéresse dans le cadre de la reconstruction rationnelle ci-dessous est de déterminer le rapport qu'entretiennent les explications scientifiques mentionnées par Bursten avec son concept d'« heuristique efficace ».

Le contexte théorique des heuristiques de la première étape est déterminé par les théories acide-base ou d'oxydoréduction. Ces théories expliquent les réactions de la matière brute à l'échelle macroscopique. Par exemple, ces théories prédisent qu'un métal précipitera par la réduction d'un cation au moyen de l'ajout d'une solution d'un réducteur. Théoriquement, cette heuristique explique pourquoi la réduction des métaux est plus rapide en présence d'une plus grande quantité d'un réducteur. En pratique, elle explique comment obtenir un échantillon de métal dans un environnement contenant plus de molécules d'un réducteur.

Une fois que le métal a précipité, un processus de nucléation (ou germination) s'enclenche, c'est-à-dire que le métal s'autoassemble dans la solution de réaction pour former ses premiers germes sphériques, qui pourront avoir des tailles variables. Le contexte théorique correspondant à cette deuxième étape fait appel à la théorie éponyme de Victor LaMer. Cette théorie s'applique à des objets d'un ordre de grandeur correspondant à l'échelle nanométrique et

considère les objets dans une solution comme s'il s'agissait d'objets continus, lisses et parfaitement sphériques. Ces objets croissent à divers rythmes en fonction du temps pendant lequel la réaction est dans un état, dit métastable, où le soluté est en plus grande concentration que la limite de saturation du solvant, un état que l'on nomme sursaturation. Étant entendu que de nouvelles particules vont nucléer pendant que les premières continuent à croître, plus la réaction demeurera longtemps en sursaturation, moins la distribution finale des nanoparticules sera uniforme. Dans ces circonstances, LaMer³⁵ avait énoncé une condition stipulant de séparer les étapes de nucléation et de croissance lors de l'obtention de nanoparticules par voie chimique. Une heuristique à cette étape peut consister à manipuler la concentration de diverses substances dans une réaction donnée afin de modifier le temps passé en sursaturation et uniformiser ainsi le résultat final.

Selon Bursten, contrairement à la théorie d'oxydoréduction, la théorie de LaMer n'est pas conçue pour les objets macroscopiques et ne fait pas référence à la nature atomique des matériaux. Entre les heuristiques de la première et de la deuxième étape se produit donc un déplacement dans les contextes théoriques, c'est-à-dire un changement concernant l'information requise pour réaliser la synthèse des nanoparticules. Pour Bursten, un tel déplacement peut également être considéré comme un changement dans les contextes explicatifs et elle nomme de tels déplacements « changements de suppositions en fonction de l'échelle³⁶ ». La caractérisation qu'elle en donne est la suivante : « *scale-dependent assumption shifts are defined by changes in the relevant behavior of interest in the system, accompanied by changes in the assumptions required to theoretically model the system*³⁷ ». Toujours selon Bursten, ces changements constituent une réponse à la question de savoir comment les heuristiques interagissent entre elles et avec la théorie et fournissent ainsi des explications robustes pour les procédures synthétiques. Dans le cas de la nanosynthèse, ces changements sont dits dépendant de l'échelle dans la mesure où les comportements d'intérêt se produisent à différentes échelles de grandeur lors de chacune des étapes de la procédure de synthèse. Comme elle le précise : « *shifting*

*attention from what is happening at a macroscopic scale to what is happening at the nanoscale is what allows chemists to collect and apply information needed to perform the synthesis, and to obtain and use effective heuristics that can guide future procedures*³⁸ ».

Ce qu'il importe de savoir concernant la troisième étape de synthèse est que contrairement aux matériaux macroscopiques, les nanomatériaux sont très instables. Compte tenu de leur petite taille, les nanoparticules ont une haute énergie de surface et une grande dispersion, c'est-à-dire que le rapport entre le nombre d'atomes de surface et le nombre total d'atomes du matériau est élevé. Le fait d'avoir plus d'atomes de surface et conséquemment moins de liaisons atomiques avec les autres atomes du matériau rend les nanoparticules thermodynamiquement instables. En raison de cette instabilité, les nanoparticules ont une tendance thermodynamique à former des agrégats et des particules plus larges afin de stabiliser leurs hautes énergies de surface³⁹.

Pour éviter cette éventualité, la troisième étape de la synthèse consiste à introduire un agent de blocage (ou inhibiteur) à la réaction afin de jouer un rôle similaire à l'agrégation et de stabiliser ainsi les nanoparticules. L'inhibiteur peut être considéré comme le contraire d'un catalyseur, son rôle est de ralentir ou d'arrêter la croissance des nanoparticules au-delà de l'échelle nanométrique. Le rôle de l'inhibiteur pour la stabilisation des nanoparticules est parfois joué par un ligand⁴⁰ qui s'attache de façon sélective à l'une ou l'autre des facettes d'un cristal en fonction notamment de l'énergie de cette facette⁴¹. Le contexte théorique à cette étape fait référence à la théorie des indices de Miller : « *The theory of Miller indices associates different crystal facets with different vectors, and assigns different energies and chemical affinities to different crystal shapes based on the results of this vector analysis*⁴² ». Ce qu'il importe de noter durant cette troisième étape est que deux changements de suppositions en fonction de l'échelle ont lieu. Les cristaux sont d'abord considérés comme ayant des surfaces géométriques idéales, puis les surfaces de ces cristaux sont reconçues comme des objets constitués d'atomes regroupés en divers arrangements contenant différents lieux auxquels les ligands peuvent se lier. À cette étape,

une heuristique consisterait à suggérer l'usage d'un ligand particulier afin d'obtenir un matériau d'une forme donnée.

Il appert qu'à travers les différentes étapes de la nanosynthèse, le concept d'« heuristique efficace » constitue une sorte de reformulation des principes propres à chaque théorie et a pour fonction d'identifier et de décrire les procédures à suivre afin de mener à son terme le processus de fabrication de nanoparticules de métaux anisotropes. Le concept d'« heuristique efficace » entretient en ce sens un rapport descriptif à l'égard des explications scientifiques.

4. Les rôles assignés à l'explication scientifique

Afin de cerner la portée du texte de Bursten, il convient désormais de déterminer à quel niveau son discours se situe lorsqu'elle entend démontrer que les conceptions philosophiques standard échouent à rendre compte des dynamiques d'échange d'information dans les sciences synthétiques⁴³. Bien que dans son texte Bursten ne spécifie pas en quoi le modèle déductif-nomologique de Hempel en particulier échoue à rendre compte de la synthèse de nanoparticules de métaux anisotropes, les considérations précédentes nous permettent de suggérer l'existence de quelques limitations. Premièrement, bien que la conception de Hempel tienne compte – au moins en partie – de différentes échelles de grandeur (micro, macro) et des relations entre les lois (sur le plan des niveaux de généralité), Bursten suppose que rien n'est proposé dans ce modèle pour rendre compte des échanges d'information entre les contextes théoriques distincts lors d'une même nanosynthèse. Deuxièmement, en concevant une explication comme un raisonnement déductif, le modèle hempélien considérerait l'ensemble d'énoncés constitué des différentes étapes de la nanosynthèse précédemment décrites comme étant logiquement invalide. En effet, alors que la première étape de la nanosynthèse explique les réactions de la matière brute à l'échelle macroscopique, la seconde étape fait intervenir une théorie qui n'est pas conçue pour cette échelle et qui conçoit plutôt les particules comme des objets continus, lisses et parfaitement sphériques. Ces objets ne font pas partie du contexte théorique de la première étape durant laquelle ils sont implicitement considérés sinon comme inexistant, du moins

comme ayant une tout autre nature. Or, durant la seconde étape, les processus de nucléation et de croissance ont lieu simultanément, de telle sorte qu'un même objet se trouve à être et ne pas être conçu comme étant continu, lisse et parfaitement sphérique. L'ensemble des prémisses (en l'occurrence les conditions initiales décrivant à l'aide d'énoncés singuliers le type d'objet dont il est question) formant l'*explanans* du modèle déductif-nomologique contreviendrait alors au principe d'identité et serait inconsistant.

Le modèle déductif-nomologique n'accorderait donc pas le statut d'explication scientifique à une suite d'étapes procédurales dont la communauté des chimistes fait néanmoins couramment usage et dont chacune des étapes fait appel à un ensemble de considérations théoriques supportées par des évidences empiriques. En revanche, lorsqu'elles sont considérées dans la perspective des heuristiques efficaces, ce qui caractérise les explications en nanosynthèse est l'interaction entre différents contextes théoriques faisant appel à diverses échelles de grandeur supposant chacune des entités distinctes ainsi que différentes règles à appliquer afin de mener la procédure à son terme. L'information que procure la mise en évidence des heuristiques efficaces sert alors non seulement à comprendre les systèmes étudiés, mais également à guider les pratiques futures. Dans ces conditions, la limite du modèle déductif-nomologique est précisément qu'il ne propose aucune description de l'explication scientifique qui permettrait de comprendre comment l'information est obtenue et utilisée à travers les différentes étapes d'une procédure de nanosynthèse.

À partir de ce qui précède, nous pouvons maintenant spécifier que ce n'est pas la scientificité des explications dans les sciences synthétiques que Bursten remet en cause, mais plutôt la façon dont les philosophes des sciences rendent compte de ces explications. Ce n'est donc pas au niveau du discours scientifique (l'explication donnée par les scientifiques des différentes étapes de la nanosynthèse) que se situe Bursten lorsqu'elle propose son concept d'« heuristique efficace », mais au niveau épistémologique (en suggérant un nouveau concept qui concerne la science). Il apparaît toutefois que ce n'est pas seulement le concept d'« explication » qui se trouve remplacé, mais

également le rôle assigné à l'explication. À nouveau, ce n'est pas au niveau du discours scientifique que se situe Bursten, puisqu'elle n'entend remettre en question ni la façon dont les scientifiques formulent leurs explications ni le rôle de l'explication en science. Cette fois cependant, c'est au niveau métaépistémologique que le changement de rôle assigné à l'explication scientifique s'opère, c'est-à-dire que ce n'est pas la pratique de la science que Bursten suggère de modifier, mais la pratique épistémologique à l'égard des sciences synthétiques. D'un côté, Bursten se situe au niveau du discours épistémologique lorsqu'elle prend le discours de la science comme objet d'étude et qu'elle tente par ses concepts épistémologiques « d'esquisser un portrait de ce à quoi pourrait ressembler une théorie de l'explication dans les sciences synthétiques »⁴⁴. De l'autre, en remettant en question les conceptions standards de l'explication, elle se situe implicitement au niveau métaépistémologique : son objet d'étude et sa thèse ne portent pas sur le discours de la science, mais sur le discours qui porte sur le discours de la science, à savoir l'épistémologie. Or, tandis que le concept hempélien d'« explication déductive-nomologique » entretient un rapport normatif avec les explications scientifiques (section 2), le concept d'« heuristique efficace » entretient plutôt un rapport descriptif avec les explications scientifiques (section 3). Autrement dit, il appert qu'au niveau métaépistémologique, Bursten propose d'adopter une tout autre conception de l'épistémologie et de ce que doit être une explication scientifique pour l'épistémologue que la conception logico-formelle dans laquelle s'inscrit Hempel. En substituant au concept hempélien d'« explication déductive-nomologique » le concept d'« heuristique efficace », Bursten opère donc non seulement un déplacement dans le rôle assigné à l'explication (pour l'épistémologue), mais elle s'inscrit également de ce fait dans une tout autre conception de l'épistémologie. Selon cette conception, le rôle de l'épistémologue ne consiste pas à tenir un discours normatif par lequel il prescrit les règles qui explicitent les conditions de validité logique de ce que doit être une explication au sein d'un système axiomatique. Son rôle est plutôt d'offrir un discours descriptif qui vise à faire comprendre ce qu'est une explication dans les sciences synthétiques

à l'aide de nouveaux concepts épistémologiques (par exemple ceux d'« heuristique efficace » et de « changements de suppositions en fonction de l'échelle »).

Ces considérations apportées, il importe toutefois de prendre connaissance de la portée de notre étude métaépistémologique. L'avantage de choisir la conception épistémologique soutenue par Hempel est qu'elle permet de mettre en évidence une démarcation claire entre son approche normative et l'approche descriptive de Bursten. Plus précisément, ce contraste a permis de mettre en lumière que la substitution opérée par Bursten du concept d'« explication déductive-nomologique » par celui d'« heuristique efficace » implique un changement dans le rôle assigné à l'épistémologie. En contrepartie, la thèse soutenue par Bursten est que son concept d'« heuristique efficace » permet de combler un vide en philosophie des sciences, puisque les conceptions standard de l'explication scientifique sont, à son avis, incapables de rendre compte des dynamiques d'échange d'information dans les sciences synthétiques. Or, il ne saurait être question de déterminer la valeur de vérité de cette thèse dans les limites imposées par notre échantillon fort restreint (Hempel)⁴⁵. En conséquence, la question de savoir si la solution préconisée par Bursten, ainsi que l'approche épistémologique qui l'accompagne, constitue à proprement parler une nouveauté demeure ouverte.

-
1. Les nanoparticules de métal anisotropes sont des particules dont l'ordre de grandeur avoisine le milliardième de mètre (10^{-9}). L'anisotropie de ces nanoparticules, à savoir le fait que leurs propriétés dépendent de leur direction, permet d'ajuster (*to tune*) leur réponse optique, c'est-à-dire la façon dont ils réagissent à la lumière, cf. Sam Lohse, « Anisotropic Noble Metal Nanocrystal Growth : The Role of Halides » dans *Chemistry of Materials*, vol. 26, n° 1, 2013, p. 34-43. On peut se représenter l'effet de l'anisotropie avec les lunettes de soleil polarisées qui ne laissent pas passer la lumière dans certaines directions, ou les écrans à cristaux liquides qui ne présentent pas la même couleur selon la direction. La réponse optique des nanoparticules anisotropes est pour sa part dominée par un phénomène appelé résonance des plasmons localisés de surface, qui est sensible à l'environnement diélectrique (un milieu qui ne peut

pas conduire un courant), la composition, la morphologie (géométrie) et la taille des nanoparticules. En présence de la radiation (rayonnement) d'une lumière incidente, les électrons libres à la surface d'une mince couche métallique subissent une oscillation collective — c'est ce phénomène que l'on nomme résonance des plasmons de surface, cf. Eleonora Petryayeva, « Localized surface plasmon resonance : nanostructures, bioassays and biosensing--a review » dans *Analytica chimica acta*, vol. 706, n° 1, 2011, p. 8-24. Le phénomène de résonance des plasmons de surface se produit à certaines longueurs d'ondes spécifiques. Pour les nanoparticules d'argent et d'or, la résonance des plasmons de surface se produit lorsque l'énergie des photons se situe aux longueurs d'ondes du visible (qui se situent entre 380 et 700 nanomètres approximativement) et du proche infrarouge (entre 780 et 1400 nanomètres approximativement). La résonance des plasmons localisés de surface détermine et améliore en retour les propriétés d'absorption et de dispersion de la lumière par les nanoparticules, cf. Leon R. Hirsch, « Nanoshell-mediated near-infrared thermal therapy of tumors under magnetic resonance guidance » *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 100, n° 23, 2003, p. 13549-54. Afin de provoquer une oscillation collective des électrons libres à la surface d'une mince couche d'or (une résonance des plasmons localisés de surface), il est donc nécessaire que la radiation s'effectue à une certaine longueur d'onde, ce qui en retour requiert un appareil capable d'émettre une lumière qui s'étend à ce spectre. Le laser femtoseconde est un exemple d'appareil permettant d'atteindre l'ensemble du spectre du visible et du proche infrarouge. Au lieu de produire un rayonnement continu comme un laser conventionnel, le laser femtoseconde produit des impulsions de lumière ultra-courtes, chaque impulsion durant de quelques femtosecondes à une centaine de femtosecondes (un femtoseconde correspond à un milliardième de milliardième de seconde, soit 10^{-15}).

2. Pour Julia Bursten, les heuristiques efficaces correspondent à des stratégies bien confirmées et visant à reproduire de façon précise et exacte un type particulier de comportement (par exemple, la croissance de particules dans une solution en chimie) dans l'interaction de deux substances (ou matériaux) ou plus.
3. Conformément à l'usage en philosophie analytique, nous distinguerons syntaxiquement (à l'aide de guillemets français) les termes selon que nous en ferons mention (« Paris » est un mot de cinq lettres) plutôt qu'un usage (Paris est une ville de France).

4. François Tournier, *Le problème de la détermination sociale de la science*, thèse de doctorat, Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, p. 1-2.
5. Carl Gustav Hempel, *Éléments d'épistémologie*, Paris, A. Colin, 2012, p. 21.
6. *Ibid.*, p. 21.
7. Otto Neurath, *Empiricism and sociology*, Dordrecht : Reidel, 1973, p. 309.
8. Carl Gustav Hempel, 2012, *op. cit.*, p. 94.
9. *Ibid.*, p. 95.
10. *Ibid.*, p. 96.
11. *Ibid.*, p. 99.
12. Carl Gustav Hempel, 2012, *op. cit.*, p. 105.
13. Karl Raimund Popper, *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1982, p. 74.
14. Carl Gustav Hempel, 2012, *op. cit.*, p. 133.
15. *Ibid.*, p. 34-35.
16. *Ibid.*, p. 97.
17. Carl Gustav Hempel, 2012, *op. cit.*, p. 137.
18. D'une part, précisons qu'il s'agit d'une définition (parmi d'autres) du terme « science » qui a fait l'objet de nombreux raffinements que nous ne reprendrons pas ici. D'autre part, soulignons que nous nous retrouvons avec deux définitions différentes de l'expression « science empirique » selon que l'on inclut ou exclut la clause C_6 . Finalement, pour l'article duquel nous reprenons cette définition et pour une discussion des difficultés concernant ladite clause C_6 , cf. François Tournier, « Science et histoire : un abus de l'intervention épistémologique » dans *Cahiers du GRIESH*, vol. 44, n° 1, 1987, p. 85-101.
19. Julia Bursten, « Reconsidering Explanation : Lessons from Nanosynthesis (script of a talk presented at the 2012 PSA meeting) » November 15, p. 1.
20. *Ibid.*, p. 2.
21. *Ibid.*, p. 5.
22. William Wimsatt, « Heuristic and the Study of Human Behavior » dans *Metatheory in Social Science : Pluralisms and Subjectivities*, Chicago : University of Chicago Press, 1986, p. 295-296.
23. Par exemple le *modus ponens*.
24. Karl Raimund Popper, 1982, *op. cit.*, p. 70.
25. William Wimsatt, 1986, *loc. cit.*, p. 293.

26. Pierre-Simon de Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, Paris : C. Bourgeois, 1986, p. 32-33.
27. Considéré dans la perspective d'un système axiomatique déductivement fermé, un algorithme correspond à un ensemble fini d'énoncés cohérents (qui vise à produire une certaine tâche) dont la valeur de vérité est préservée tout au long des transformations. Si un tel algorithme est appliqué à des prémisses vraies, il conduira nécessairement à la bonne conclusion. Par exemple, cela pourrait correspondre à un ensemble exhaustif d'instructions permettant d'assurer l'obtention d'un résultat escompté lors de la fabrication d'un matériau. En contrepartie, une heuristique correspond à une suite de règles visant à obtenir un certain résultat, sans que la valeur de vérité soit nécessairement conservée. Autrement dit, l'application adéquate d'une heuristique à des prémisses vraies ne garantit pas l'obtention du résultat voulu. Pour de plus amples détails concernant ce concept, voir William Wimsatt, 1986, *loc. cit.*, p. 295.
28. William Wimsatt, 1986, *loc. cit.*, p. 295.
29. Julia Bursten, 2012, *loc. cit.*, p. 2.
30. À l'instar du modèle déductif-nomologique, le modèle unificationniste conçoit l'explication scientifique comme un raisonnement logiquement valide. Par contre, tandis que le modèle développé par Hempel vise à permettre l'explication de phénomènes particuliers, le modèle unificationniste a pour objectif une compréhension générale du monde (entendu au sens de l'ensemble des phénomènes). Ce modèle a d'abord été élaboré par Michael Friedman, pour lequel le concept d'« unification » constituait l'essence même d'une explication scientifique dans la mesure où une explication scientifique en bonne et due forme réduit le nombre total de phénomènes indépendants (les uns des autres) que nous devons admettre comme donnés (*given*). Pour plus de détails à ce sujet, voir Michael Friedman, « Explanation and Scientific Understanding », *The Journal of Philosophy*, vol. 71, n° 1, 1974, p. 5-19. Le modèle proposé par Friedman a par la suite été critiqué, partiellement entériné et raffiné par Philip Kitcher dans Philip Kitcher, « Explanatory Unification », *Philosophy of Science*, vol. 48, n° 4, p. 507-531.
31. Sam Lohse, 2013, *loc. cit.*
32. Sajid Fazal, « Green Synthesis of Anisotropic Gold Nanoparticles for Photothermal Therapy of Cancer » dans *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 6, n° 11, 2014, p. 8080-9.
33. Dans la mesure où la reconstruction rationnelle qu'offre Bursten de la nanosynthèse est très succincte et comporte des omissions, nous avons

dû combler certains vides en tentant de respecter sinon la lettre, du moins l'esprit de son texte. À cet égard, il va sans dire que notre reconstruction ne se veut pas une thèse (personnelle) concernant les procédures de nanosynthèse, mais uniquement une tentative (heuristique) visant à faire comprendre au lecteur l'argument que défend Bursten.

34. Un ligand correspond à un ion, une molécule (ou à un groupe de molécules) qui peut se lier à des atomes. Dans le contexte qui nous intéresse, ces atomes appartiennent généralement à une structure plus complexe (le matériau que l'on fabrique) qu'on tente de contrôler et modifier notamment par l'introduction de ligands à la solution.
35. Victor K. LaMer, « Theory, Production and Mechanism of Formation of Monodispersed Hydrosols », dans *Journal of the American Chemical Society*, vol. 72, n° 11, 1950, p. 4847-4854.
36. Julia Bursten, 2012, *loc. cit.*, p. 4.
37. *Ibid.*, p. 4.
38. *Ibid.*, p. 4.
39. Rick Arneil D. Arancon *et al.*, (2014), « Nanoparticle tracking analysis of gold nanomaterials stabilized by various capping agents » dans *RSC Advances*, vol. 3, n° 4, 2014, p. 17114-17119.
40. Kensuke Naka et Yoshiki Chujo, « Nanohybridized Synthesis of Metal Nanoparticles and Their Organization » dans *Nanohybridization of Organic-inorganic Materials*, Berlin, London : Springer, 2009, p. 3-40.
41. Clive R. Bealing *et al.*, « Predicting Nanocrystal Shape Through Consideration of Surface-Ligand Interactions » dans *ACS Nano*, vol. 6, n° 3, 2012, p. 2118-2127.
42. Julia Bursten, 2012, *loc. cit.*, p. 5.
43. *Ibid.*, p. 1.
44. *Ibid.*, p. 2 (nous traduisons).
45. En effet, il faudrait démontrer que l'ensemble des conceptions de l'explication scientifique contenues dans l'extension de ce que signifie Bursten par « conceptions philosophiques standards » s'avèrent incapables de rendre compte des procédés de fabrication dans les sciences synthétiques, ou à tout le moins dans le cas de la nanosynthèse de métaux anisotropes. Notons au passage qu'une étude d'une telle envergure n'a pas pu être davantage réalisée dans le cadre du texte de 6 pages de Bursten auquel nous nous sommes constamment référés.