

Explication et pertinence : du sel ensorcelé à la loi des airesⁱ

<merci, quand vous citez ce texte, de vous référer à la version publiée>

Please use the published version when citing or quoting.

Cyrille Imbert

Laboratoire d'Histoire des Sciences et de Philosophie-Archives Poincaré (Nancy-
Université/UMR 7117 CNRS)

Références : Imbert, Cyrille. « Explication et pertinence: du sel ensorcelé à la loi des aires ». *Dialogue: Canadian Philosophical Review/Revue canadienne de philosophie* 50, n° 04 (2011): 689-723.

Résumé :

A rebours des discussions sur l'explication, qui semblent faire de la pertinence explicative un problème unique, plusieurs critères de pertinence explicative sont ici distingués. Est en particulier soulignée l'importance de la notion de pertinence intra-scientifique, qui est analysée de façon précise sur la base de l'explication de la loi des aires. Les conceptions traditionnelles de l'explication, et notamment la théorie causale ainsi que la théorie unificationniste de Kitcher, sont évaluées à l'aune de ces différentes conditions. Il est en particulier montré qu'elles ne fournissent pas d'outils suffisants pour identifier les explications qui satisfont la condition de pertinence intra-scientifique.

Abstract

Whereas relevance in scientific explanations is usually discussed as if it was a single problem, several criteria of relevance are distinguished here. The emphasis is laid upon the notion of intra-scientific relevance, which is illustrated through the example of the explanation of the law of areas. Traditional accounts of explanation, such as the causal and unificationist accounts, are analyzed against these criteria of relevance. It is shown in particular that these accounts fail to indicate which explanations fulfill the condition of intra-scientific relevance. The significance of this latter criterion is finally emphasized and the epistemic benefits of the explanations fulfilling it are highlighted.

1. Introduction

Le problème de la pertinence explicative n'est à l'origine pas un problème interne aux débats philosophiques, qui naîtrait des difficultés inhérentes aux définitions proposées de la notion d'explication. Ainsi, si je demande pourquoi il y a de fortes marées en Bretagne et qu'on me propose une explication dans laquelle il est question de dinosaures sans qu'aucun lien entre les dinosaures et les marées ne soit signalé, je suis en droit de considérer que, étant donné la question posée, l'explication contient au mieux une information non pertinente entretenant une confusion préjudiciable et qu'il s'agit plus vraisemblablement d'une explication fantaisiste. Se pose alors la question de savoir à quels critères on reconnaît les informations qui peuvent figurer dans une explication scientifique.

Les réponses traditionnelles à cette question imposent d'ordinaire d'une façon ou d'une autre deux conditions pour qu'une information puisse rentrer dans une explication scientifique de bon aloi, à savoir la condition de scientificité et la condition de pertinence référentielle. La condition de scientificité impose que le matériel informatif proposé corresponde à une description *scientifique* de systèmes physiques, ce qui se traduit par exemple par l'exigence que les énoncés correspondants soient vrais et que certains de ces énoncés appartiennent à des théories scientifiques. Cette condition de scientificité écarte de la constitution des explications, comme scientifiquement hors de propos, les informations non validées par le discours scientifique et l'on peut pour cette raison l'appeler condition générale de pertinence scientifique. La condition de pertinence référentielle exige que les énoncés en question portent bien sur les systèmes qui sont en jeu dans la production du phénomène étudié et donc implicitement dans la demande explicative. Typiquement, dans les conceptions causalistes de l'explication (Salmon, 1984, 1994, 1997), la condition de scientificité est satisfaite en demandant que le matériel explicatif décrive des processus causaux ; et la condition de pertinence référentielle est satisfaite en demandant que lesdits processus causaux appartiennent à l'ensemble des processus causaux qui constituent ou qui mènent à l'événement étudié. S'ajoute par ailleurs à ces conditions une exigence de suffisance explicative, non liée au problème de la pertinence : on souhaite en effet que les informations fournies dans une explication soient suffisamment riches pour expliquer *complètement* un événement – une explication complète pouvant être insuffisante pour prédire l'occurrence d'un événement, dans le cas des phénomènes non déterministes. Par exemple, dans une conception causaliste de l'explication, on souhaite que soit décrit un ensemble de processus causaux qui suffisent à produire de façon déterministe ou non, selon le cas, l'événement à expliquer.

Comme cela est bien connu, les discussions sur la pertinence explicative vont bon train depuis que Hempel a relancé au milieu du XX^e siècle les discussions sur cette notion. Néanmoins, comme j'essaierai de le montrer, les exemples proposés dans les discussions philosophiques ne semblent guère faire du problème de la pertinence un problème scientifique majeur dans la mesure où ils mettent souvent en jeu des propriétés non pertinentes folkloriques ; le problème semble essentiellement de proposer une définition philosophique éliminant les contre-exemples philosophiques gênants. Corrélativement, le problème de la pertinence est traité comme *une* question appelant comme réponse *un* critère (pour caricaturer et anticiper, on peut avoir par exemple comme réponse : « sont pertinents les processus causaux qui produisent le phénomène », « sont pertinents les arguments qui permettent de déduire les phénomènes et de les unifier », etc.). La pluralité des conditions de pertinence que j'ai décrites ci-dessus vise à

suggérer d'entrée qu'il y a peut-être, au moins d'un point de vue scientifique, *plusieurs* problèmes de pertinence explicative – ce qui n'empêche éventuellement pas qu'un même critère, ou un même ensemble de critères, puisse au bout du compte permettre de répondre à ces différents problèmes. Il n'est par exemple pas évident que la question de l'inclusion ou la non inclusion d'une référence à la lune dans l'explication des marées, celle de l'inclusion ou non d'une référence au sexe d'un individu dans l'explication de sa non-fertilité et celle de l'inclusion ou non d'une référence à un ensorcellement antérieur dans l'explication d'une propriété physique d'un corps chimique correspondent au même problème de pertinence et doivent être analysées puis résolues de la même façon. Sans préjuger de la réponse, la distinction entre plusieurs conditions de pertinence vise au moins à souligner que, d'un point de vue scientifique tout comme d'un point de vue profane, ces trois problèmes de pertinence semblent différents. Dans le premier on se demande si on doit inclure dans l'explication d'un phénomène une mention à un corps situé à 400000 km (problème de pertinence référentielle), dans le deuxième, on se demande quelles propriétés du corps concerné on doit choisir dans l'explication, dans le troisième, il est plutôt question de savoir quelles propriétés ont droit de cité dans une explication scientifique.

Je vise d'abord à travers cet article à montrer qu'il existe plusieurs problèmes de pertinence explicative au sens où la satisfaction des différentes conditions de pertinence décrites plus hauts ne se fait pas en remplissant un seul critère. J'essaie de plus de montrer que le problème de la pertinence explicative est un problème scientifique et non un problème purement philosophique posé par le caractère insatisfaisant des modèles de l'explication en vogue dans la littérature philosophique : en ce sens, une bonne théorie de l'explication doit permettre aussi de comprendre comment ce problème de la pertinence est scientifiquement résolu. Enfin, je défends la thèse qu'il existe bien un problème de pertinence explicative proprement scientifique qui demeure même quand on possède des informations qui satisfont les deux conditions de pertinence générale et référentielle décrites ci-dessus et qui sont suffisamment riches pour expliquer l'événement étudié (condition de suffisance). Pour le dire autrement, je souhaite montrer que la condition de scientificité et la condition de pertinence référentielle suffisent à répondre à la demande *usuelle* de pertinence explicative mais nullement à répondre complètement à la demande *scientifique* de pertinence ; et donc qu'elles passent à côté d'une partie significative du travail explicatif des scientifiques. Pour le dire en un mot, ce problème survient quand l'information scientifique fournie à propos des systèmes physiques en jeu dans l'explication est trop riche. Je nomme ce problème, qui se pose spécifiquement aux scientifiques, le problème *intra-scientifique* de la pertinence, afin de le distinguer d'une part du problème de la pertinence référentielle, qui se pose à toute personne voulant proposer une explication qui soit *à propos*, et d'autre part du problème de la scientificité (ou problème général de pertinence scientifique), qui se pose à toute personne recherchant une explication *scientifique*. La majeure partie de cet article sera consacrée à illustrer ce problème *intra-scientifique* de la pertinence à travers des exemples et à montrer en quoi les modèles principaux de l'explication, et notamment la théorie unificationniste de Philip Kitcher, échouent en fait à le résoudre.

Cet article s'organise de la façon suivante. Dans la section 1, je discute le modèle déductif-nomologique à l'aune des conditions générales décrites plus haut, et notamment de la condition de pertinence *intra-scientifique*. Dans la section 2, j'analyse selon les mêmes critères le modèle causal. Dans la section 3, je présente des exemples discutés par Batterman qui illustrent à propos de l'exemple des propriétés physiques dites 'universelles' le problème de la pertinence *intra-scientifique* et suggèrent que le modèle

causal est gravement déficient sur ce point. Je montre ensuite dans la section 4 que le type d'exemple que propose Batterman est en fait trop particulier et que le problème se pose dans des situations beaucoup plus simples et usuelles. Pour cela, j'expose en détail le cas de l'explication de la loi des aires, et je montre à partir de cet exemple l'importance scientifique qu'il y a à bien satisfaire l'exigence de pertinence intra-scientifique. La section 5 est consacrée à montrer que la théorie unificationniste de Kitcher, qui semble pourtant la plus armée pour traiter la question, est en fait insuffisante sur ce point. Je conclus dans la section 6 par une mise en perspective des différentes discussions menées dans l'article.

Le concept de pertinence explicative a une longue et riche histoire et la discussion critique qui suit ne vise nullement à en retracer tous les méandres et toute la richesse. Pour cette raison, ma présentation sera la plupart du temps partielle et visera seulement à pointer les points d'achoppement au sein de théories de l'explication bien développées. A travers cette étude critique, mon but est d'identifier précisément les écueils que doit éviter un traitement satisfaisant de la notion de pertinence explicative et de dessiner en creux des pistes possibles - même si je laisse l'exploitation développée de ces pistes pour un autre article.

2. Retour sur le modèle déductif nomologique

Hempel et Oppenheim (Hempel et Oppenheim, 1948) proposent le modèle de l'explication suivant, dit « modèle DN » (déductif-nomologique): une explication est un argument déductif où l'*explanandum* apparaît en conclusion et où l'*explanans* est composé de prémisses vraies qui comprennent de façon essentielle au moins une loiⁱⁱ. Fournir une explication requiert donc notamment de satisfaire deux conditions extrêmement contraignantes. D'abord, une explication doit de façon essentielle être construite à partir de ce qui est considéré comme l'objet scientifique par excellence, à savoir une loi. Le travail scientifique préliminaire à une explication consiste donc à identifier des lois qui couvrent le domaine étudié. Il est ensuite exigé que l'ensemble des énoncés explicatifs (lequel doit donc déjà contenir une loi) permette de déduire l'énoncé à expliquer.

Examinons ce modèle à l'aune des conditions décrites en introduction. Ce modèle répond clairement à la condition générale de scientificité en réclamant que le modèle comporte une loi, c'est-à-dire un énoncé scientifique par excellence, et que les énoncés utilisés soient vrais. Sont ainsi éliminées toutes les explications fournissant des informations qui sont non pertinentes car elles sont fantaisistes et non scientifiques. La condition de pertinence référentielle est assurée de façon directe en demandant implicitement que l'ensemble des prémisses utilisées, du fait qu'il permet de déduire l'énoncé à expliquer, soit informatif à propos de cet énoncé. Sont ainsi éliminées les descriptions scientifiques de systèmes physiques n'apportant pas de « matière » scientifique à propos du fait étudié. Pour reprendre notre exemple introductif, les caractéristiques des dinosaures ne nous apprennent rien à propos des marées alors qu'il est possible de montrer par des arguments comment la présence de la lune influence la position et les mouvements des fluides terrestres. La condition de suffisance est enfin assurée à travers la demande de déductivité, qui nous garantit que les prémisses utilisées, quel que soit leur contenu, sélectionnent des ensembles d'énoncés scientifiques suffisamment riches pour rendre compte complètement de l'énoncé à expliquer. En résumé, le modèle DN répond au problème de la pertinence explicative en exigeant

qu'une explication apporte un matériau scientifique, vrai, informatif et suffisant pour rendre compte de l'événement étudié.

Ce modèle d'explication a rapidement suscité des objections ou des contre-exemples, qui laissent penser qu'au mieux, il reste incomplet. Voici par exemple le cas dit du « sel ensorcelé » (*hexed salt*) (Kyburg, 1965). C'est une régularité nomologique avérée que (R) tous les échantillons de sel ensorcelés qu'on plonge dans l'eau se dissolvent. Or cet échantillon de sel vient d'être ensorcelé. Si on le plonge dans l'eau, on s'attend en vertu de (R) à ce qu'il se dissolve. De fait, on le plonge dans l'eau et il se dissout. Même si cette dérivation est conforme au modèle de Hempel, on ne saurait considérer qu'elle fournit une explication correcte de la dissolution du sel. En effet, l'ensorcellement du sel ne contribue en rien à sa dissolution. On peut également noter que l'ajout de prémisses inutiles dans l'*explanandum* n'empêche pas une explication potentielle de remplir les critères demandés par Hempel. Il faut donc étendre le caractère d'indispensabilité, réclamé pour la loi ou les lois utilisées, à chaque prémisses de l'explication au sens où, quelle que soit la prémisses, l'argument explicatif n'est plus valide si on la retireⁱⁱⁱ.

Ces deux exemples illustrent le problème de la pertinence pour la théorie de Hempel : beaucoup d'arguments, que nous ne considérons pas comme explicatifs parce qu'ils invoquent des faits non pertinents (comme ici le fait d'être ensorcelé ou la proposition *P*), satisfont pourtant les critères du modèle DN.

Quel diagnostic faut-il proposer pour la théorie hempélienne à partir de ces contre-exemples ? Les explications potentielles décrites dans ces exemples, et plus généralement, les explications comportant des prémisses non pertinentes, n'ont-elles réellement aucune valeur explicative – et la théorie hempélienne est alors pleinement réfutée ? La réponse précise à cette question dépend, me semble-t-il, des positions philosophiques auxquelles on souscrit par ailleurs, et je ne souhaite pas m'engager en détail dans la discussion de ces positions. Je présenterai donc ici rapidement plusieurs réponses possibles. On peut d'abord considérer que, dans l'exemple du sel ensorcelé, le prédicat invoqué, 'être ensorcelé', n'est *dans l'absolu* pas un prédicat scientifiquement acceptable. En conséquence, l'énoncé qui le contient n'est pas scientifique et l'explication potentielle ne satisfait pas la condition de scientificité ou condition de pertinence générale. Si au contraire on considère que le prédicat en question est *dans l'absolu* scientifiquement acceptable, deux options sont possibles. Si on se trouve dans une situation scientifique dans laquelle il n'est de fait pas accepté – ce qui correspond à notre situation scientifique – on retombe dans le cas précédent. En effet, la régularité (R), quoique authentique et observable, ne peut alors nullement prétendre au statut de loi ou de régularité scientifique sur la base de laquelle il est légitime de construire une explication. De ce point de vue, l'explication proposée ne satisfait pas la condition de scientificité et l'exemple n'est donc pas problématique.

Si on se trouve dans une situation où le prédicat utilisé est au contraire scientifiquement acceptable, alors il n'est pas sûr non plus que le problème apparent subsiste. Pour mieux concevoir ce cas, il est préférable de modifier l'exemple de Kyburgh en utilisant une régularité (R') « tous les morceaux de sel placés dans un champ magnétique se dissolvent dans l'eau » et en indiquant que tel morceau de sel, placé dans un champ magnétique, se dissout bel et bien. L'exemple est cette fois moins critiquable ou incongru au regard de notre situation scientifique au sens où toutes les propriétés mises en jeu sont des propriétés physiques usuelles. Et il est connu que les corps placés dans un champ magnétique peuvent avoir leurs propriétés transformées. On se trouve alors dans une situation où la régularité mentionnée lie des prédicats physiques qui sont

par ailleurs reliés nomologiquement dans d'autres circonstances. La régularité correspondante est donc difficilement condamnable dans l'absolu même si c'est un fait scientifique que certaines des propriétés citées dans la régularité restreignent indûment sa généralité.

Quelle position tenir face à cette version remaniée de l'exemple ? Il est peut-être possible de contester de nouveau l'exemple en indiquant que la régularité (R') n'est qu'une régularité phénoménologique et que de tels problèmes de pertinence ne surgissent qu'avec l'utilisation dans les explications de régularités phénoménologiques, mais nullement si on réclame l'utilisation dans les explications de lois fondamentales, comme le sont les lois de la mécanique classique. Contre une telle position, je montrerai dans ce qui suit à partir de l'exemple de l'explication de la loi des aires que même si on réclame que les lois utilisées soient fondamentales, l'utilisation de telles lois ne nous prémunit guère contre l'existence de propriétés non pertinentes au sein d'une explication.

Dans l'immédiat, et sans prendre parti sur la nécessité d'utiliser ou non des lois fondamentales dans les explications, mon diagnostic à propos de la version reconstruite de l'exemple est différent. Cette explication est bel et bien une explication scientifique valable, même si une explication qui utilise la régularité selon laquelle tous les échantillons de sel jeté dans l'eau se dissolvent^{iv} est sans contestation une explication scientifique également valable *mais meilleure*. En effet, l'explication du sel magnétisé satisfait à la condition de scientificité ou condition de pertinence générale et à la condition de pertinence référentielle, mais elle échoue à satisfaire *complètement* la condition de pertinence intra-scientifique – qui est, nous le voyons une condition graduelle. Selon cette ligne d'analyse, le contre-exemple du sel magnétisé n'est pas un contre-exemple majeur pour le modèle de Hempel. Si le contre-exemple ici discuté était le seul opposé au modèle DN, on pourrait soutenir que ce modèle permet de passer un cap dans l'analyse en séparant les explications non scientifiques des explications scientifiques, c'est-à-dire celles qui n'ont aucune valeur explicative de celles qui ont une valeur explicative scientifique non nulle. Dans cette optique, le modèle serait incomplet et échouerait simplement à fournir un critère permettant de juger de la qualité des explications scientifiques, en l'occurrence du degré de pertinence de leurs prémisses.

Dans tous les cas, comme il appert déjà à travers l'exemple, la « purification » des explications et de leurs prémisses requiert un travail scientifique visant à exhiber des régularités explicatives scientifiquement acceptables ne contenant aucune propriété physique indue – et ayant donc un domaine le plus large possible. Renoncer à considérer comme satisfaisantes les explications qui ne satisfont pas complètement la condition de pertinence intra-scientifique revient à traiter de la même façon les explications qui n'ont aucune valeur de celle qui ont une valeur explicative réelle, quoique non optimale.

3. Le modèle causal et le problème de la pertinence

Je laisse ici la discussion de la position hempélienne qui, indépendamment du problème de la pertinence, soulève de nombreuses difficultés. Je ne parlerai pas non plus, malgré tout son intérêt, du modèle dit SR de l'explication, que, dans l'optique de résoudre les problèmes posés par des cas comme celui du sel ensorcelé, Wesley Salmon a dès 1971 proposé (Salmon, 1971) et qui accorde un rôle central à la notion de pertinence, analysée en termes statistiques (SR sont les initiales de *statistical relevance*). La notion de pertinence statistique se révèle en effet insuffisante à l'étude du fait de la sous-détermination des relations causales par les relations statistiques, ce qui empêche d'identifier les premières au moyen des secondes. Or, qu'on considère ou non la notion

de causalité comme fondamentale dans la construction d'un modèle explicatif, et même si l'identification d'une notion satisfaisante de causalité reste en elle-même sujette à discussion, une explication se doit d'indiquer ce qu'on considère comme les causes produisant un phénomène, et la sous-détermination mentionnée est donc un bon motif pour considérer que le modèle SR n'est pas satisfaisant, *a fortiori* si, comme nous allons le voir, l'identification des causes d'un phénomène est-elle même insuffisante à régler le problème de la pertinence explicative.

Je passe maintenant à la discussion de la conception causale de l'explication, qui est celle vers laquelle Wesley Salmon a orienté ses recherches au tournant des années 1980 (Salmon, 1984) suite aux problèmes rencontrés par le modèle SR. Salmon propose de résoudre le problème de la pertinence en indiquant qu'une bonne explication doit faire référence à des relations causales. Pour le dire plus nettement, dans l'approche causale de l'explication, les relations pertinentes sont les relations causales – et il convient alors de définir ce que sont ces relations causales, afin de ne pas en rester à la notion intuitive et vague de mécanisme ou de processus causal. Salmon a donc proposé plusieurs théories de la causalité dans les années 1980 (théorie de la transmission des traces, défendue dans Salmon 1984) puis 1990 (théorie de la quantité conservée, défendue dans Salmon 1994, Salmon 1997, et Dowe 2000). Et cela permet de régler à première vue le problème posé par les contre-exemples au modèle de Hempel relatifs à la notion de pertinence. Ainsi, l'ensorcellement du sel ne correspond à aucun des processus causaux qui se combinent pour amener à sa dissolution.

Il n'est paradoxalement pas besoin d'entrer dans le détail de ces théories pour voir par des arguments abstraits qu'elles ne peuvent en fait guère résoudre définitivement la question de la pertinence explicative. Commençons par la condition de scientificité ou de pertinence générale. Dans le modèle causal, la façon dont cette condition est satisfaite n'est pas claire du fait que le concept de causalité semble devoir à la fois sélectionner ce qui est explicatif et ce qui est considéré comme scientifique – puisqu'aucune référence n'est faite à la science dans ces définitions causales de l'explication, qui portent directement sur les objets naturels. On doit donc supposer que les descriptions fournies par les scientifiques doivent permettre de remplir le cadre fourni par les modèles causaux. Or de fait, les scientifiques produisent quotidiennement des explications scientifiques sur la base d'éléments scientifiques comme des théories, des lois, des modèles ou des descriptions de mécanisme. Cependant, étant donné une théorie scientifique (comme la mécanique statistique, la physique quantique), il ne va nullement de soi que cette théorie décrive des processus causaux au sens de Salmon ou en un autre sens. Pour tout dire, ce n'est guère sur la base d'une notion de la causalité qu'on identifie d'ordinaire ce qui est scientifique et il n'y a guère de chance qu'une conception de la causalité produite de façon indépendante par des philosophes coïncide avec les descriptions scientifiques du monde au sens où ces dernières viendraient remplir le cadre général posé par les premiers.

Les causalistes peuvent bien sûr s'inspirer partiellement de ce que disent les théories scientifiques et ainsi satisfaire dans un cadre causaliste la condition de scientificité – c'est ce que fait Salmon en s'appuyant sur la notion de quantité conservée. Mais il ne va alors nullement de soi que tous les éléments que les différents scientifiques utilisent de fait dans leur explication illustreront cette théorie de la causalité inspirée d'un domaine particulier. Il n'est par exemple pas évident que les mécanismes qui sont décrits par les biologistes satisfassent les théories de la causalité de Salmon, qui sont en partie inspirées de la physique. Une solution de repli est de dire que telle ou telle théorie de la causalité ne s'applique qu'à un domaine scientifique restreint, mais dans ce cas, sauf à trouver

d'autres théories de la causalité s'appliquant à d'autres domaines (voir par exemple pour la biologie Glennan, 1996, Machamer, Darden, Craver, 2000, Machamer 2004) et à montrer en quoi toutes ces théories sont causales en un sens commun plus général, on ne voit guère comment les théories causalistes peuvent proposer une théorie causale générale de l'explication – mais peut-être faut-il en partie y renoncer ? On voit à tout le moins que la satisfaction de la condition de scientificité ou condition de pertinence générale ne va nullement de soi dans cette approche^v.

La condition de pertinence référentielle semble elle plus facile à satisfaire, au moins dans un premier temps, puisque, pour expliquer un événement *E*, il suffit de sélectionner les processus causaux situés dans la zone spatio-temporelle de l'événement considéré et qui le constituent – c'est l'aspect constitutif de l'explication – ainsi que ceux situés dans son cône causal et qui le produisent – c'est l'aspect étiologique de l'explication (Salmon 1984, 275). Cela ne suffit néanmoins pas puisque plusieurs processus causaux peuvent avoir lieu au sein de la zone spatio-temporelle ainsi définie, dont certains ne jouent aucun rôle dans l'occurrence de l'événement étudié. Et cette zone spatio-temporelle grandit à la vitesse de la lumière quand on remonte dans le temps : une sélection des processus pertinents est donc vraiment nécessaire ! Typiquement, dans l'exemple précédent du sel placé dans un champ magnétique, les processus magnétiques ayant lieu au sein du système considéré ne jouent aucun rôle dans la dissolution du sel. C'est en substance l'objection que fait Hitchcock (1994) à la théorie de Salmon quand il remarque que, lors du choc de boules de billard, la quantité de craie bleue sur la boule frappée se conserve ; dans la théorie de Salmon, cette quantité permet de définir un processus causal situé dans le volume spatio-temporel adéquat mais ce processus n'est guère pertinent pour expliquer le mouvement des boules. Dans cette perspective, l'identification des processus causaux pertinents requiert implicitement un critère supplémentaire sur lequel la théorie de Salmon est silencieuse^{vi} – même si on peut imaginer qu'une autre théorie de la causalité pourrait ne pas l'être. On doit donc espérer qu'il est possible de trouver une méthode pour sélectionner les processus causaux pertinents, c'est-à-dire ceux qui produisent bel et bien l'événement considéré, et qu'on pourrait par là remplir complètement la condition de pertinence intra-scientifique.

Les choses ne sont hélas pas si simples. La simple sélection des processus causaux qui au sein du volume spatio-temporel adéquat contribuent à la production d'un phénomène ne permet en effet de remplir la condition de pertinence intra-scientifique, que de façon très grossière. La relation de pertinence explicative xRy (« *x* est explicativement pertinent relativement à *y* ») dépend en effet de façon fine de la nature de *y*. Or, un processus causal peut être responsable d'une multitude d'événements, qui, selon la théorie causale, devraient tous s'expliquer exactement de la même façon – ce qui jette déjà le soupçon sur cette théorie puisque pour un même système physique les explications fournies par les scientifiques varient de fait significativement selon les propriétés du système qu'on explore.

Par ailleurs, qu'est-ce qui garantit que pour un événement donné, la description de l'ensemble des événements jugés explicativement pertinents par les scientifiques soit à chaque fois assez riche pour décrire des processus causaux, tels que les philosophes les décrivent ? Inversement, n'est-il pas envisageable que certains des traits des processus causaux qui produisent ou constituent l'événement à expliquer ne soient pas explicativement pertinents relativement à l'événement à expliquer ?

Le problème est décrit de façon très élégante par James Woodward dans son article de revue sur l'explication scientifique : « une façon plus générale de présenter le problème révélé par ces exemples est de remarquer que les traits d'un processus *P* en

vertu desquels il est qualifiable de processus causal (la capacité à transmettre une trace M < dans la théorie causale de Salmon > peuvent ne pas être les traits de P qui sont causalement ou explicativement pertinents relativement à l'événement E que nous cherchons à expliquer. En conséquence, la transmission de traces [...] ne permet pas de distinguer les traits ou propriétés d'un processus causal qui sont explicativement pertinents relativement à un événement des traits qui ne le sont pas^{vii}. » Woodward prétend généraliser les exemples analysés par Hitchcock (1994) mais dans les faits, il pointe un problème distinct et plus profond puisque le problème de la pertinence ne se réduit pas ici à sélectionner les processus causaux pertinents mais à sélectionner, *au sein des processus causaux pertinents préalablement identifiés*, les traits qui sont explicativement pertinents relativement au fait à expliquer [...].

A ce stade, la remarque de Woodward peut néanmoins sembler une critique académique abstraite. En effet, tous les traits d'un processus causal ne sont-ils nécessairement pertinents pour expliquer les événements que ce processus causal produit ? Pour qu'ils ne le soient pas, il faudrait que l'événement à expliquer soit en mesure d'être produit en l'absence de ces traits. Or, sans ces traits, le processus en question serait incomplet et on peut se demander dans quelle mesure il subsisterait en tant que processus causal et serait à même de produire des événements. Il est donc légitime de se demander s'il est possible de donner de la chair à cette remarque abstraite de Woodward à partir d'exemples scientifiques authentiques.

Par ailleurs, même dans l'hypothèse où la réponse serait positive, il resterait à déterminer la portée de la critique. Ainsi, la remarque de Woodward nécessite-t-elle que soit exigée une condition supplémentaire permettant d'isoler les traits pertinents des processus causaux ? Doit-on inclure dans le concept de causalité des traits permettant de prendre en compte la question de la pertinence intra-scientifique ? Ou bien les théories causales sont-elles globalement mal embarquées ?

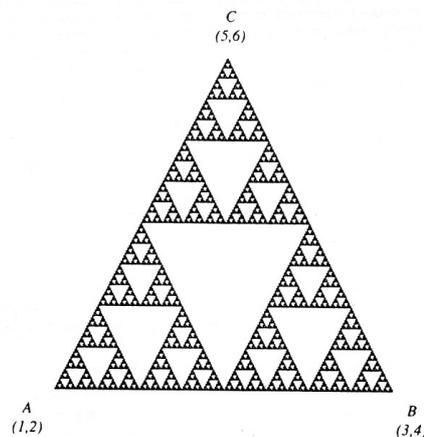
Les sections qui suivent visent à apporter des éléments de réponse à ces questions. J'y expose plusieurs exemples scientifiques montrant que le problème de la pertinence intra-scientifique constitue une part importante de l'activité explicative déployée par les scientifiques et que régler ce problème permet clairement de rendre nos explications plus informatives et meilleures. De ce point de vue, un traitement philosophique satisfaisant de la question de la pertinence intra-scientifique est réellement souhaitable et, comme nous le verrons, relativement à ce que montrent ces exemples, le modèle causal de l'explication, ainsi que le modèle unificationniste de Kitcher, sont inadéquats.

4. Batterman et les explications asymptotiques

Je commence par la présentation d'exemples spectaculaires, discutés par Robert Batterman (Batterman, 1998, 2003), dans lesquels apparaissent des formes typiques (*patterns*), comme des formes fractales ou des distributions de probabilité en physique statistique. Or, dans de tels cas, l'inclusion dans l'explication cherchée de propositions décrivant les détails du tissu causal n'est en fait nullement nécessaire ni même souhaitable pour obtenir une explication complète du fait étudié. Le cas dit « du galet de Sierpinski » constitue un exemple simple de ce type de phénomènes. Considérons le jeu suivant, appelé « jeu du chaos ». On trace les trois sommets A , B et C d'un triangle sur une feuille. Au sommet A , on fait correspondre les chiffres 1 et 2, au sommet B les chiffres 3 et 4 et au sommet C les chiffres 5 et 6. On choisit un point de départ O dans le triangle, qu'on marque d'un point. On dispose par ailleurs d'un point mobile M , initialement en O . On lance ensuite le dé. Si le dé tombe par exemple sur 4, on se

déplace à mi-distance du sommet correspondant à 4 (c'est-à-dire B) et de la position courante du point mobile M . On obtient ainsi un nouveau point, sur lequel on inscrit une marque, et qui correspond à la nouvelle position du point mobile M . Puis on relance le dé, on déplace de nouveau le point mobile M selon la méthode décrite, on fait une marque à la position obtenue et ainsi de suite. Après de nombreuses itérations, on obtient une figure similaire à celle de dessous, dite « galet de Sierpinski ». Il s'agit d'une figure fractale, c'est-à-dire ayant une dimension non entière, ici égale approximativement à 1,58 (et plus exactement à $\log 3 / \log 2$, puisque le triangle de Sierpinski s'obtient en juxtaposant trois copies d'un triangle obtenu à partir d'une homothétie de rapport $1/2$ appliquée au triangle initial).

Le fait notable est que, à chaque fois qu'on joue au jeu du chaos, on obtient une figure différente, c'est-à-dire dont les points ne sont pas exactement aux mêmes endroits, mais qui a la même dimension fractale et la même allure caractéristique. Les physiciens disent que la propriété 'obtenir une dimension fractale égale à 1.58' est universelle.



Le galet de Sierpinski

Pour discuter ces cas, Batterman distingue entre des questions de type 2, dans lesquelles on demande pourquoi une propriété d'un type général correspondant à un motif (*pattern*) est satisfaite, et des questions de type 1, dans lesquelles on demande pourquoi une propriété d'un type particulier correspondant à une instantiation particulière du même motif (*pattern*) est satisfaite. Dans ce cas précis, si nous demandons une explication de type 2, nous voulons savoir pourquoi, quand on joue le jeu du chaos, on obtient une figure ayant une dimension fractale égale à 1.58. Si nous demandons une explication de type 1, nous voulons savoir pourquoi tous les points se trouvent exactement où ils se trouvent et forment ainsi la figure particulière obtenue, qui se trouve avoir une dimension fractale égale à 1.58. Pour répondre à la question de type 1, nous devons indiquer la longue séquence des chiffres obtenus en lançant le dé. Nous pouvons même invoquer les conditions de chaque lancer du dé qui ont fait qu'il est tombé sur 3, puis 2, etc. Une explication causale détaillée, fidèle au modèle causal de l'explication, convient donc très bien pour répondre à la question de type 1.

Batterman souligne qu'en revanche, pour expliquer les propriétés de type 2, le détail causal n'est en fait pas pertinent. Pour répondre à la question de type 2, il faut en effet mener une étude des propriétés asymptotiques du système étudié. On constate alors que, dans cet exemple, on obtient avec une probabilité égale à 1 la figure fractale attendue en faisant un nombre infini de lancers, c'est-à-dire en passant à la limite. De plus, cette étude asymptotique montre que l'obtention de cette figure est indépendante du détail des mécanismes causaux utilisés dans le processus de sa construction. En effet, le système est stable par rapport à des perturbations : si on change les propriétés de détail du

système, comme la position initiale ou la vitesse des dés à chaque lancer, voire la dynamique physique qui meut le dé, c'est-à-dire si on perturbe le système, la même propriété universelle émerge. Typiquement, dans les explications de type 2, le raisonnement asymptotique indique que l'occurrence du phénomène étudié est à mettre sur le compte de propriétés de structure comme la dimension de l'espace, la topologie du système étudié, les symétries du système, le caractère aléatoire de certains processus, etc. Batterman nomme de telles explications de propriétés de type 2, dans lesquelles les détails causaux ne sont pas pertinents et le rôle des limites est crucial, des « explications asymptotiques ».

Il est possible, sans plus rentrer dans le détail des exemples de Batterman, de remarquer les points généraux suivants, sur lesquels nous reviendrons plus en détail avec l'analyse de l'explication de la loi des aires. Tout d'abord, dans ce type d'exemple, satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique est clairement une condition importante de l'adéquation des explications répondant aux demandes explicatives de type 2 : une explication de l'apparition constatée de la figure typique qui se concentrerait sur le détail des processus à l'œuvre raterait l'essentiel de l'explication recherchée. L'exemple montre de plus clairement que satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique permet de produire une explication plus informative puisqu'elle indique quel phénomène doit être attendu dans une large classe de cas et non pour telle ou telle condition du lancer des dés. De plus, ce caractère informatif de l'explication se fait au détriment du caractère causal de l'explication. En effet, dans le cas présenté, ce ne sont pas seulement *certain*s traits permettant de décrire les processus causaux qui sont supprimés (voir supra les remarques de Woodward sur le modèle causal) mais la quasi-totalité de l'information causale ; l'information contenue dans l'explication ne permet pas en effet de décrire des processus causaux individuels ni même des ensembles de processus causaux typiques qui permettrait d'expliquer les phénomènes observés. Il convient enfin de remarquer que, en dépit du caractère singulier de l'exemple choisi, le type d'explication ici décrit par Batterman met en jeu des phénomènes usuels (phénomènes critiques comme les transitions de phase, phénomènes auto-similaires) qui se retrouvent à travers de nombreux champs de la physique. De plus, l'étude consistant à identifier les détails pertinents d'un phénomène est étroitement associée à des techniques scientifiques de première importance comme l'analyse dimensionnelle, l'analyse de robustesse et de stabilité ou les techniques de renormalisation. Cela atteste une fois de plus du fait que satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique ne correspond pas à un problème marginal qui surgirait des définitions de l'explication proposées par les philosophes.

Contre l'analyse qui vient d'être proposée, une réponse possible est que les exemples proposés par Batterman constituent un type spécifique d'explication. Selon cette interprétation, la nécessité de satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique est attestée dans les cas décrits par Batterman mais elle est aussi spécifique à ces cas. Autrement dit, elle n'a une telle importance que dans les cas où, pour dire les choses rapidement, un comportement asymptotique est en jeu dans un système impliquant de nombreuses particules et où on s'intéresse non à une propriété de l'évolution particulière d'un système particulier mais à une propriété typique, instanciée « à la limite » avec une probabilité égale à 1 pour un ensemble infini de conditions initiales.

D'une certaine façon, Batterman nourrit implicitement une telle critique. Il présente en effet ces exemples comme illustration d'un type d'explication d'un genre nouveau, qu'il nomme « explication asymptotique » (c'est le titre du chapitre 4 de son livre). Il n'est donc pas clair, ou au moins pas explicite, que le fait d'éliminer les détails

scientifiques causaux non pertinents soit une condition générale exigible de toute explication. En un sens, comme Batterman n'énonce pas de théorie générale de l'explication ni ne se rattache à une théorie existante, il n'est pas non plus évident de comprendre en quoi ces explications asymptotiques sont des explications au même titre que d'autres types d'explications ne mettant pas en jeu des limites asymptotiques. Et comme Batterman ne donne pas non plus de définition formelle de la notion de pertinence qu'il utilise, le lecteur est également bien en peine pour déterminer dans quelle mesure les analyses proposées doivent être généralisées à toute explication.

En conséquence, je souhaite montrer dans ce qui suit que satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique est requis dans tous les cas, y compris les plus simples, et non seulement dans le cas des explications de propriétés universelles, auxquelles correspondent des demandes d'explication de type 2. Je me propose donc de montrer maintenant en quoi la condition de pertinence intra-scientifique doit aussi être satisfaite non pas simplement dans des cas d'explications dont le causaliste partisan d'un pluralisme explicatif pourrait soutenir qu'elles ne peuvent pas être de type causal mais dans le cas de systèmes qui devraient sans ambiguïté tomber dans le domaine visé par les théories causalistes de l'explication

5. Etude de cas : l'explication de la loi des aires

Cette section est consacrée à montrer que le problème de la pertinence intra-scientifique se pose de façon cruciale dans un cas où les phénomènes étudiés sont décrits à l'échelle correspondant aux processus causaux ; sont déterministes (*versus* sont vérifiés avec une probabilité égale à 1) ; caractérisent une propriété d'une trajectoire singulière d'un système précis (*versus* sont associés à un ensemble de conditions initiales et à une propriété typique sur cet ensemble) ; où les systèmes étudiés sont assez simples pour qu'il soit clairement possible en pratique d'identifier les processus causaux (*versus* mettent en jeu des systèmes complexes dans lesquels les explications causales sont inaccessibles). Et mon but est de montrer que dans un tel cas, qui est on ne peut plus favorable aux explications causales, le modèle causal de l'explication ne suffit pas à régler la condition de pertinence intra-scientifique et à décrire avec justesse ce qui, d'un point de vue scientifique, constitue une *bonne* explication scientifique.

L'exemple développé est celui de l'explication de la seconde loi de Kepler que voici : « Le mouvement de chaque planète est tel que le segment de droite reliant le soleil et la planète balaie des aires égales pendant des durées égales. » Cette loi porte à la base sur des objets particuliers (les planètes du système solaire) dont on souhaite expliquer le comportement, ce qui peut être fait dans le cadre théorique de la mécanique newtonienne. Commençons par décrire ce cadre. Les corps sont soumis aux lois de la mécanique classique, et notamment à ce qu'on nomme aujourd'hui « principe fondamental de la dynamique » (PFD) ou seconde loi de Newton $\Sigma \mathbf{F} = m \mathbf{a}$, où \mathbf{a} dénote l'accélération subie par le corps, m sa masse et \mathbf{F} une force exercée sur le corps, les vecteurs étant écrits en caractères gras. Par ailleurs, entre deux corps existe une force gravitationnelle d'attraction d'intensité $F = G \cdot M_{\text{Terre}} \cdot M_{\text{Soleil}} / R^2$, R dénotant la distance entre les corps, M_X une masse et G la constante d'attraction universelle.

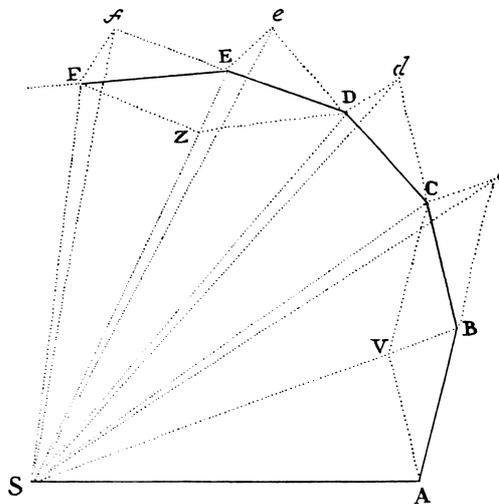
L'influence exercée par l'attraction des autres corps sur la planète étant ici négligeable par rapport à l'action qu'exerce le Soleil, une description du système comprend la position à un temps initial du Soleil et de la Terre, le PFD et l'expression de l'attraction gravitationnelle. Le fait qu'on cherche à expliquer est que la trajectoire de la planète Terre vérifie la seconde loi de Kepler, c'est-à-dire que la quantité dA_T/dt est

constante, où A_T dénote l'aire balayée par la Terre depuis le temps de référence $t=0$. Nommons ce fait K_T . Pour vérifier que la description précédente permet bien d'expliquer K_T , il faut maintenant montrer qu'elle permet de dériver K_T . Voyons plusieurs façons de le faire.

Puisque la seule force exercée sur la Terre est l'attraction gravitationnelle liée à la présence du Soleil, l'équation du mouvement est ici simplement $\mathbf{F} = m \mathbf{a}_T$, où \mathbf{a}_T dénote l'accélération de la Terre et \mathbf{F} la force d'attraction que le Soleil exerce sur la Terre. On intègre deux fois l'équation du mouvement afin de calculer la trajectoire de la Terre ou plus précisément son équation horaire T_T . A partir de T_T , il est aisé de calculer par intégration l'aire A_T balayée par le rayon vecteur en fonction du temps. Il suffit alors de dériver par rapport au temps $A_T(t)$ et de montrer que la quantité dA_T/dt est constante.

Cette dérivation « laborieuse » L est parfaitement correcte. A la question, « Pourquoi K_T est-il vérifié ? », on peut répondre en indiquant ce qu'étaient les positions initiales du Soleil, de la Terre, en précisant que la force gravitationnelle s'exerce, en spécifiant ce qu'est cette force et en indiquant enfin que le PFD régit ce système. Un partisan du modèle DN ajouterait alors que cette description permet de dériver le fait à expliquer ; un partisan du modèle causal soulignerait lui que cette description permet de détailler les processus causaux ayant lieu dans ce système et produisant le fait à expliquer.

Il existe une autre dérivation qui utilise le théorème du moment cinétique. Elle repose aussi sur le PFD et montre que la loi des aires correspond en fait à la loi de conservation du moment angulaire. Je ne détaillerai pas cette dérivation, qui nécessite un peu de calcul vectoriel, quoique ce soit celle qui est aujourd'hui le plus souvent présentée. Je passe donc à la dérivation N de Newton.



Démonstration géométrique par Newton de la loi des aires (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, I, 2, 1). Une seule force centrale s'exerce à intervalles de temps discrets en A, B, C , etc.

On considère avec Newton^{viii} qu'une seule force centrale s'exerce à intervalles de temps discrets en A, B, C , etc. Le mouvement de la Terre est dû à la fois au principe d'inertie^{ix} et à la force gravitationnelle qui s'exerce. Si aucune force ne s'exerçait, après avoir parcouru la partie de trajectoire $[AB]$, et en vertu du principe d'inertie, la Terre devrait poursuivre sa trajectoire et parcourir lors de l'intervalle de temps suivant l'intervalle $[Bc]$ et on aurait $AB=Bc$ en vertu du principe d'inertie. De plus, si la vitesse en B était nulle, la force centrale de gravitation agirait comme une force de rappel et amènerait le corps quelque part en V sur la droite (SB) en vertu du PFD. Par composition

des mouvements, le corps arrive donc finalement en C , on a donc $VB=Cc$ et le quadrilatère $VBcC$ est un parallélogramme.

Voyons maintenant la démonstration. Le principe de la démonstration est le suivant (voir la figure). On cherche à démontrer que les triangles SAB et SBC ont même aire et la démonstration est ensuite la même pour les triangles SAD et SAE , SAE et SAF , etc. Pour cela, on montre que l'aire de SAB est la même que l'aire de SBc et que l'aire de SBc est la même que l'aire de SBC .

Examinons la démonstration plus en détails. Les triangles SAB et SBc ont même aire car ils ont même hauteur (la projection orthogonale de S sur (AB)) et car leur base a une longueur égale (en effet $AB=Bc$). Les triangles SBc et SBC ont également même aire car ils ont une base commune $[SB]$ et des hauteurs qui sont de même longueur (en effet $(Cc) \parallel (AB)$) et les hauteurs ont pour longueur la distance toujours identique entre les deux droites parallèles (SB) et (Cc) . Finalement, les aires de SAB et de SBC sont donc égales car elles sont égales à l'aire de SBc . En appliquant ce raisonnement de proche en proche on déduit que les aires balayées entre des intervalles de temps égaux consécutifs sont égales. Il est bon de noter que l'égalité d'aire entre SBc et SBC provient du fait que l'action de la force en B a amené le corps en V et qu'on a reporté le vecteur BV en C . Pour toute position de V sur la droite (SB) , l'égalité d'aire des triangles aurait été vérifiée.

On a utilisé dans cette dérivation le fait que la force exercée était centrale, qu'elle s'exerçait à intervalles de temps réguliers, la composition des mouvements, le fait que l'action d'une force à un instant t procurait un changement de quantité de mouvement dans la direction de la force exercée et le fait que, quand les forces sont nulles, le principe d'inertie s'applique. Cela signifie en particulier que la loi des aires reste vérifiée que la force exercée soit continue ou non et quelle que soit l'intensité de la force. Cette force peut même dépendre du temps de façon chaotique (ce qui signifie que l'attraction gravitationnelle n'aurait pas une formule immuable), avoir une intensité donnée par une fonction non calculable (ce qui rendrait le calcul de la trajectoire impossible), sans que l'occurrence de la loi des aires s'en trouve affectée. Par ailleurs, nous n'avons pas utilisé tout le contenu du PFD, mais seulement le fait qu'une force est responsable d'un incrément de quantité de mouvement^x dans la *direction* de la force exercée (quelle que soit ensuite cette variation). En conséquence, même dans un monde où la loi fondamentale de la dynamique serait différente, la loi des aires pourrait être vérifiée pourvu que la force exercée soit centrale et l'incrément de quantité de mouvement dans la direction de la force.

Essayons maintenant d'explicitier pourquoi la dérivation N fournit une meilleure explication du fait que la Terre instancie la régularité nommée loi des aires que celle offerte par la dérivation L. Ce que la dérivation N montre c'est que la description d'une bonne partie des propriétés qui singularisent la Terre (la masse de la Terre, les conditions initiales du mouvement, l'intensité de la force gravitationnelle liée à sa distance avec le Soleil, etc.), n'est en fait pas nécessaire pour dériver K_T et que l'occurrence de ces propriétés est indépendante de l'occurrence de K_T . La dérivation de Newton explique mieux et plus profondément parce qu'elle permet d'isoler exactement ce qui dans les détails d'une situation est responsable du fait qu'on cherche à expliquer et de laisser de côté tout le reste, comme la masse de la Terre, sa position et sa vitesse initiales, etc. – même s'il s'agit de propriétés scientifiques de bon aloi utilisées par ailleurs pour expliquer de façon scientifique des faits à propos d'autres caractéristiques du comportement du système considéré. L'explication fournie par Newton est *descriptivement* moins informative à propos du système étudié puisque ses prémisses attribuent moins de propriétés au système étudié. Mais elle est en fait *explicativement*

plus informative parce qu'elle apporte des informations plus précises sur les propriétés qui sont responsables de l'occurrence de la loi des aires. D'un point de vue explicatif, elle en dit donc plus sur la connexion nomologique sous-jacente qui lie l'occurrence de certaines propriétés à celle de la loi des aires. Pour le dire de façon imagée, l'explication la moins bonne énumère plus de participants possibles $p, q, r \dots t$ au sein de la bande qui est responsable du vol et pour cela, elle doit fournir plus d'information pour décrire chaque participant possible ; mais dans ce contexte, donner de l'information explicative consiste à ne garder dans la liste que les participants qui ont effectivement contribué au vol et donc à éliminer tous les autres coupables possibles en indiquant par exemple que seuls p, q ont fait le coup. D'un point de vue descriptif, cela implique de donner moins d'information (puisqu'il suffit de décrire p et q) ; mais d'un point de vue explicatif, cela apporte l'information explicative que $r \dots t$ ne sont pour rien dans ce qui s'est passé et que même si $r \dots t$ avaient eu une journée différente, le vol aurait quand même eu lieu. De ce point de vue, ignorer la condition de pertinence intra-scientifique et affirmer que les meilleures explications sont celles qui nous renseignent le plus sur ce qui se passe dans un système – c'est l'idée sous-jacente à la notion de texte explicatif idéal développée par Peter Railton (Railton, 1979, 1981) et louée par Salmon (Salmon 1989, 159) – c'est confondre information descriptive et information explicative.

Ce caractère explicativement plus informatif se vérifie dans le fait que l'explication N nous indique que la loi des aires aurait bel et bien été instanciée dans une classe de situations plus vastes, incluant d'ailleurs des situations dans lesquelles les lois de la physique seraient différentes. Pour tout corps C vérifiant cet ensemble de propriétés, un fait analogue K_C peut être dérivé de la même façon, à savoir, 'le corps C instancie la loi des aires'. Par conséquent, en isolant les faits pertinents qui expliquent K_T , on se donne le moyen de comprendre tous les faits analogues pour les systèmes vérifiant ces propriétés. Par exemple, deux corps soumis seulement à une seule interaction coulombienne centrale doivent former un système qui instancie la loi des aires.

Retour critique sur le modèle DN et le modèle causal de l'explication

Relativement aux discussions précédentes, il convient de faire les remarques suivantes. Dans cet exemple, la condition de scientificité ou condition de pertinence générale est satisfaite en prenant pour matériel explicatif potentiel la description scientifique du système Soleil – Terre, cette description scientifique incluant notamment les lois auxquelles obéit le système, lesquelles rattachent cette description scientifique aux théories connues. Néanmoins, pour satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique, il convient d'isoler un autre énoncé type d'énoncé nomologique, à savoir la régularité nomologique qui lie la propriété à étudier aux propriétés explicatives pertinentes. Il convient donc de distinguer deux fonctions des énoncés nomologiques dans le travail explicatif. Les lois scientifiques fournissent un matériau explicatif scientifique de base pour la construction d'explication. La construction d'une explication scientifique satisfaisant la condition de pertinence intra-scientifique consiste à identifier un énoncé nomologique qui n'est pas forcément une loi fondamentale et qui lie les propriétés explicativement pertinentes à la propriété à expliquer. En résumé, contre Hempel, tout énoncé nomologique qui garantit la scientificité d'une explication et qui permet de déduire l'énoncé explanandum ne satisfait pas cette seconde fonction, même s'il s'agit d'une loi fondamentale.

L'exemple de l'explication de la loi des aires confirme par ailleurs ce que nous n'avons fait qu'entrevoir dans la section 2. Le problème de la pertinence n'est nullement

résolu par la thèse selon laquelle les propriétés explicativement pertinentes sont les propriétés causales, même dûment accompagnée d'une définition satisfaisante de la notion de processus causal. Dans le cas présent, et comme le suggérait Woodward par un argument abstrait, les propriétés qui permettraient de singulariser des processus causaux ne se retrouvent en effet pas dans le lot de propriétés explicativement pertinentes. En effet, les propriétés permettant d'identifier un processus comme causal sont relatives à la transmission de quantités qui se conservent. L'exemple est précisément choisi pour que le phénomène étudié ait lieu à la même échelle que celle des processus causaux définis en terme de quantités qui se servent, à savoir l'échelle de la trajectoire. Or l'inclusion dans l'explication de la description des processus causaux et donc de la trajectoire des corps revient à réclamer que le contenu de la seconde loi de Newton fasse partie de l'explication – puisque la seconde loi de Newton décrit la façon dont la quantité de mouvement varie ou se conserve en fonction des forces appliquées et par là même la variation de l'énergie cinétique d'un corps au sein d'un champ de force. Mais comme le montre l'explication de Newton, le détail de la trajectoire et la façon dont la quantité de mouvement, la vitesse et donc l'énergie évolue importent en fait peu dans l'explication. Dans la preuve, le fait que le principe d'inertie soit respecté (ce qui correspond au cas où les forces sont nulles) compte assurément à travers les égalités $AB=Bc$, $BC=Cd$, $CD=De$, etc. En revanche, l'action exacte de la force centrale sur le corps, et donc l'évolution de la quantité de mouvement, de la valeur de la vitesse et de l'énergie cinétique importent peu, pourvu que cette action se fasse dans la direction de la force exercée (puisque l'aire des triangles reste identique, quelle que soit la position de V sur (SB)). En montrant ainsi la non pertinence de ce qui fait la chair d'une explication causale, la preuve nous indique ainsi que la loi des aires pourrait être instanciée pour des processus non causaux n'obéissant pas aux lois de conservation et de variation des quantités invariantes comme l'énergie ou la quantité de mouvement^{xi}.

On voit donc à travers cet exemple que le modèle causal de Salmon échoue à satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique, sauf peut-être dans les cas où il est nécessaire, pour expliquer l'occurrence d'un événement, de suivre le détail des processus causaux en jeu. Par exemple, pour expliquer l'évolution précise d'un système chaotique, comme celle d'un ensemble de boules de billards s'entrechoquant, il est nécessaire d'étudier le détail des processus causaux en jeu ; en effet, chaque variation d'une quantité invariante compte puisqu'un changement de détail conduit rapidement à une modification de l'état final du système. Mais dans les autres cas, ce que fait un modèle causal du type de celui de Salmon, c'est surtout demander qu'une explication soit ancrée dans une description physique fondamentale du système étudié. De ce point de vue, il s'agit surtout d'une façon de répondre à l'exigence de pertinence scientifique ou exigence de pertinence générale, en expurgant les explications de toute référence à ce que nos théories physiques nous indiquent comme ne jouant aucun rôle physique dans la production des phénomènes observés (comme l'ensorcellement du sel).

En conséquent, même si on accorde que l'exigence selon laquelle une explication doit avoir pour base une description causale d'un système apporte quelque chose par rapport à l'exigence selon laquelle une explication doit s'ancrer dans un matériau scientifique, le problème de la pertinence intra-scientifique reste alors entier puisqu'il convient ensuite – et c'est l'essentiel du travail scientifique, une fois qu'on travaille dans le cadre d'une théorie physique donnée – d'identifier *au sein des processus causaux décrits par la théorie*, les traits explicativement pertinents dans la production de chaque phénomène.

De plus, il est clair que toute autre définition de la causalité reposant sur la mise en avant de propriétés physiques ou de relations d'un type physique donné s'expose à une réfutation similaire à travers l'identification d'exemples dans lesquels les propriétés ou les relations physiques de ce type ne sont pas pertinentes. La réfutation a donc en fait valeur générique contre les modèles explicatifs causaux dans lesquels des propriétés ou des relations *d'un genre physique particulier* jouent un rôle clef.

On peut enfin noter que, par rapport aux exemples de mise en défaut du modèle causal proposés par Batterman, le cas présent est moins susceptible d'être écarté comme étant trop atypique. Les théoriciens du modèle causal peuvent en effet arguer que les exemples de Batterman décrivent des cas d'explication d'un type particulier (statistiques, asymptotiques, concernant la physique universelle, etc.) qui ne tombent pas dans le domaine visé par le modèle causal de l'explication et constituent un genre d'explication à part – comme semble d'ailleurs le penser Batterman. Ce n'est pas le cas avec le cas de l'explication de la loi des aires qui, nous l'avons vu, devrait tomber clairement dans le domaine du modèle causal de l'explication (puisque un seul système déterministe et une propriété de sa trajectoire sont en jeu).

Résumons. Une bonne théorie de l'explication doit permettre de satisfaire le critère de pertinence générale et d'indiquer quelles explications, parmi celles qui satisfont ce critère et qui sont suffisamment riches pour rendre compte du phénomène étudié (critère de suffisance), satisfont le critère de pertinence intra-scientifique et sont sur ce point de meilleure qualité. A travers l'analyse d'un exemple, nous avons vu qu'une telle théorie de l'explication doit ainsi permettre d'indiquer que l'explication de Newton de la loi des aires est plus satisfaisante que l'explication que nous avons qualifiée de laborieuse. Et de ce point de vue, les théories de Hempel et les théories causales de l'explication du type de celle de Salmon se sont révélées insatisfaisantes.

Y a-t-il, dans l'état actuel de la littérature, des théories de l'explication qui permettraient de départager entre la bonne explication de Newton et l'explication laborieuse de la loi des aires ? On peut en proposer principalement deux, à savoir la conception de Woodward et celle de Kitcher. La conception de Woodward de l'explication repose principalement sur la notion de généralisation invariante. Selon Woodward (Woodward, 1979, 1984, 1997, 2000), une telle généralisation apporte une information explicative car elle permet de répondre à des questions contrefactuelles ou du type « que-ce-serait-il-passé-si-les-choses-avaient-été-différentes » et d'indiquer comment l'*explanandum* changerait si certaines caractéristiques du système étudié avaient été changées. Relativement à l'explication de la loi des aires, une telle piste est clairement prometteuse. En effet, comme je l'ai indiqué plus haut, l'explication de Newton est meilleure au sens où elle nous indique que la loi des aires serait instanciée dans un plus grand nombre de cas où les conditions auraient été différentes, voire où la seconde loi de Newton serait violée. En revanche, elle ne nous renseigne guère sur ce qui se passerait si, par exemple, la force n'était pas centrale. Inversement, la dérivation qui utilise la loi de Newton ne nous indique pas que la loi des aires continuerait à être instanciée dans une large gamme de cas dont certains non physiques ; mais en l'utilisant, on peut bénéficier de la grande généralité de la loi de Newton et savoir comment varierait le moment cinétique et donc l'aire balayée dans le cas, par exemple d'une loi non centrale. Savoir quelle explication la conception de Woodward indique comme la meilleure n'est donc pas complètement clair. Une discussion plus approfondie de ses mérites relativement à la condition de la pertinence intra-scientifique mériterait une longue discussion pointue que je préfère laisser pour un travail ultérieur. La fin de cet article est donc consacrée à déterminer si la dernière « grande » conception de l'explication qui a cours, à savoir la

conception unificationniste de Kitcher, est satisfaisante du point de vue de la condition de pertinence intra-scientifique, et notamment à voir si elle permet d'identifier de façon claire la dérivation de Newton comme plus explicative que la dérivation laborieuse.

6. Analyse de la théorie de l'explication de Kitcher à l'aune de l'étude de cas

Parmi les théories de l'explication existantes, celle qui a le plus de chance de rendre compte correctement du cas de la loi des aires développé ci-dessus est peut-être celle de Kitcher. Mieux on satisfait la condition de pertinence intra-scientifique en éliminant de l'*explanans* le maximum d'information inutile, plus on obtient une explication qui peut s'appliquer de façon identique à des systèmes différents se trouvant dans des situations physiques différentes. De ce point de vue, les bonnes explications contribuent ainsi à l'unification de nos connaissances. Comme la théorie de l'explication de Kitcher est construite autour de cette notion d'unification, on peut s'attendre à ce qu'elle soit particulièrement performante sur cet exemple et sur la question de la pertinence. Je montre dans cette section, après avoir rapidement présenté la théorie de Kitcher qu'il n'en est en fait rien : l'explication laborieuse et l'explication de Newton font en effet toutes les deux parties de l'ensemble des explications sélectionnées par les critères unificationnistes de Kitcher mais ces critères ne suffisent pas à indiquer laquelle est la meilleure.

Commençons par présenter le modèle unificationniste de Kitcher à partir de son article de 1989. Ce dernier considère, dans la tradition de Hempel, qu'une explication est un argument dont le fait à expliquer est la conclusion et qui prend pour prémisses certaines de nos croyances. Un tel argument valide est une explication potentielle car il montre comment le fait à expliquer dérive de croyances que nous acceptons par ailleurs. Néanmoins, tous les arguments de ce type ne sont pas de bonnes explications. Je peux ainsi utiliser la position de l'ombre sur un cadran solaire et en dériver la position du soleil. Néanmoins, la position de l'ombre sur le cadran n'explique pas la position du soleil. Il faut donc déterminer quelles explications potentielles sont des explications authentiques.

Selon Kitcher, une explication potentielle, gagne le titre d'explication quand elle appartient à l'ensemble des arguments qui, pris ensemble, fournissent la meilleure systématisation de nos croyances et qui constituent le stock explicatif (*explanatory store*), c'est-à-dire le stock d'arguments qu'on peut utiliser pour produire des explications. Toute la question est ensuite de connaître les critères qui permettent de déterminer ce qui appartient à ce stock explicatif. Kitcher défend notamment la thèse qu'il n'est pas possible de déterminer les membres de cet ensemble en examinant les explications de façon indépendante les unes des autres et qu'il faut au contraire voir en quoi ces explications permettent de construire une vision systématique et unifiée de l'ordre naturel.

Entrons plus dans le détail des concepts de Kitcher. Un énoncé schématique (*schematic sentence*) est une phrase dans laquelle une partie du vocabulaire non logique a été remplacé par des variables. Par exemple, à partir de la phrase « Les organismes homozygotes pour l'allèle délétère de l'anémie falciforme développent l'anémie falciforme », on peut par exemple construire les énoncés schématiques « les organismes homozygotes pour Y développent Z » ou « pour tout X , si X est homozygote pour Y alors X développe Z ». Des instructions de remplissage (*filling instructions*) sont des instructions qui indiquent quelles valeurs on peut donner aux variables présentes dans les énoncés schématiques. Dans les énoncés précédents, on peut ainsi remplacer Y par le

nom d'un allèle. Un schéma d'argument (*schematic argument*) est une suite d'énoncés schématiques. Il ne s'agit que d'une liste comprenant toutes les propositions qui interviennent au sein d'une dérivation. Une classification (*classification*) décrit quelles phrases d'un schéma d'argument sont les prémisses, quelles phrases sont les conclusions et quelles règles d'inférence sont utilisées. Elle permet donc de préciser la forme exacte de l'argument. Enfin, un patron d'argument (*argument pattern*) est un triplet ordonné consistant en un schéma d'argument, un ensemble d'instructions de remplissage (une pour chaque variable de chaque phrase du schéma d'argument), et une classification. En d'autres termes, un patron d'argument comprend tous les éléments nécessaires pour construire un ensemble de dérivations valides permettant, à partir d'un ensemble de faits auxquels nous croyons (c'est-à-dire toutes les prémisses qu'on peut construire à partir du schéma d'argument), de dériver un ensemble de conclusions. Plus les restrictions apportées au schéma d'argument sont fortes, plus il est contraignant (*stringent*).

A partir de là, Kitcher peut décrire comment les explications peuvent unifier nos croyances. Soit K l'ensemble des croyances acceptées à un moment donné. En utilisant certaines de ces croyances, on peut en dériver d'autres. Pour que cet ensemble soit complètement unifié, il faut que chaque croyance soit une prémisse ou la conclusion d'une dérivation, une croyance pouvant bien sûr être la conclusion d'une dérivation et servir de prémisse à une autre dérivation. Si c'est le cas, toutes nos croyances sont alors reliées, ou mieux unifiées, par des arguments explicatifs. Pour un ensemble de croyances K , il existe une multitude d'ensembles de dérivations qui unifient toutes ces croyances. La question est de savoir quel ensemble de dérivations $E(K)$ unifie le mieux ces croyances. Cet ensemble est l'ensemble des dérivations explicatives.

Comment évaluer la façon dont un ensemble de dérivations unifie un ensemble de croyances K ? L'idée générale de Kitcher est qu'il faut chercher à obtenir autant de conclusions possibles en utilisant aussi peu de patrons d'arguments possibles. Voyons cela plus précisément. Soit $C(D)$ l'ensemble des énoncés qui apparaissent comme conclusions d'un ensemble de dérivations. Tous ces énoncés sont donc des énoncés obtenus de façon dérivée. Plus ce nombre est élevé, plus on réduit le nombre d'énoncés primitifs dans K^{xii} . L'ensemble $E(K)$ doit donc être tel que $C(D)$ est maximisé.

Minimiser le nombre de dérivations (ou plus précisément, comme nous allons le voir, le nombre de patrons d'argument) est également important. Intuitivement, si pour chaque phénomène, il faut faire une dérivation radicalement singulière, l'ensemble de nos croyances est peu unifié. Le but est donc de trouver des dérivations qui sont similaires parce qu'elles instancient un même type de patron d'argument. Par exemple, on peut identifier un patron d'argument qui permet de dériver de façon générale l'évolution de tout système à deux corps. Il suffit ensuite de remplacer dans ce patron d'argument les variables (conditions initiales, masses des deux corps, distance entre les deux corps à tel instant) par les valeurs spécifiques au système étudié pour obtenir immédiatement une dérivation plus particulière d'un état plus particulier du système. Kitcher propose donc pour chaque ensemble de dérivations d'identifier, parmi les ensembles de patrons d'argument qui permettent de générer toutes les dérivations de cet ensemble, celui qui est le plus économique. L'ensemble $E(K)$ doit donc être tel que le nombre de patrons d'arguments (et non le nombre de dérivations) qui lui correspond est minimisé.

Une objection peut néanmoins être faite. De nombreuses dérivations appartenant à des domaines qui n'ont rien à voir les uns avec les autres peuvent être dites instancier un même patron d'argument parce qu'elles utilisent une même forme d'argument logique. Par exemple, de très nombreuses dérivations extrêmement différentes instancient le

modus ponens $A, A \rightarrow B \therefore B$. Mais dire que deux dérivations partagent une structure logique minimale de ce type ne suffit pas pour dire que ces deux dérivations sont fortement similaires et que l'unification de nos croyances en est par là significativement améliorée^{xiii}. Kitcher exige donc (p. 433) que les patrons d'arguments soient les plus contraignants possibles, c'est-à-dire spécifient aussi précisément que possible la façon dont ils peuvent être instanciés par des dérivations.

Pour résumer, le pouvoir unificateur d'un ensemble de patron d'arguments varie directement avec la taille de $C(D)$, c'est-à-dire l'ensemble des conclusions qu'on obtient en instanciant ces formes, le degré de contrainte pesant sur ces patrons d'arguments et il varie inversement avec leur nombre.

Kitcher n'indique pas de façon précise et générale comment ces différents critères doivent être pris en compte et pondérés, même s'il analyse quelques cas et quelques façons d'affiner la notion d'unification (1989, §7, 477-482 488-494). En ce sens, il s'agit d'un programme de recherche partiellement ouvert et pour cela difficile à mettre en défaut. En dépit de cela, je souhaite montrer qu'il ne peut pas régler de façon complètement satisfaisante la question de la pertinence intra-scientifique. La stratégie consiste à montrer que le stock explicatif, constitué de l'ensemble des dérivations qui instancient l'ensemble des patrons d'arguments décrits plus haut, contient nécessairement *plusieurs* explications pouvant rendre compte d'un fait à expliquer (dans mon exemple l'instanciation par la Terre de la loi des aires) et que la stratégie unificationniste ne possède pas en l'état de critère pour indiquer laquelle est la meilleure.

Examinons maintenant comment ce modèle permet de traiter les cas usuels de non-pertinence, comme celui du sel ensorcelé. Si on systématise nos croyances avec une dérivation (Ir) utilisant l'énoncé « tous les morceaux de sel ensorcelés jetés dans l'eau se dissolvent », alors, on ne peut déduire les conclusions portant sur la dissolution des morceaux de sel non ensorcelés : la dérivation utilisée ne s'applique qu'à une classe restreinte de cas. Si on utilise en plus de (Ir) la dérivation (R) usuelle, qui utilise des énoncés portant sur la composition de l'eau, du sel, les liaisons chimiques, etc., alors l'ensemble de dérivations devient redondant au sens suivant. On possède un patron d'argument I correspondant à la dérivation (Ir) et un autre patron d'argument II correspondant à la dérivation (R). Mais ce dernier patron d'argument II suffit déjà à produire toutes les dérivations que le patron I permet de produire. On doit donc utiliser la dérivation (R) car la systématisation qu'elle permet est plus unificatrice que la systématisation permise par l'usage de la dérivation (Ir). On peut aussi envisager d'utiliser le patron d'argument général correspondant à (R) et d'en déduire (Ir) comme cas particulier portant sur les cas de sels ensorcelés ou ensorcelables et incluant des prémisses à cet effet ; mais on obtient alors une dérivation inutilement compliquée et l'appel à un principe trivial de simplification et de suppression des clauses et des étapes inutiles (p.484) permet d'éliminer cette situation.

Le traitement de l'exemple du sel ensorcelé révèle la stratégie de Kitcher pour traiter de la question de la pertinence. Dans sa théorie, la pertinence est en effet intégralement déterminée par l'appartenance d'une proposition décrivant un fait à une dérivation appartenant au stock explicatif : « Les défenseurs de l'approche unificationniste souscrivent à la thèse selon laquelle des facteurs sont explicativement pertinents s'ils figurent dans un traitement unifié des phénomènes. » (p.495) Le diagnostic est plus précisément le suivant : « Soit l'inclusion de facteurs non pertinents engage à l'utilisation de formes d'explications qui ne s'appliquent qu'à une gamme restreinte de cas soit les faits non pertinents seront des roues de transmission inutiles que l'on trouve partout dans le système explicatif. » (p.484).

Cette stratégie, qui consiste à éliminer du stock des explications scientifiques celles qui comportent des faits non pertinents, fonctionne beaucoup moins bien sur l'exemple de la loi des aires puisque, dans ce cas, les deux dérivations concurrentes doivent faire partie du stock explicatif. Voyons plus en détails pourquoi. La dérivation laborieuse du fait que la Terre instancie la loi des aires fait partie de $E(K)$ car elle correspond à un patron d'argument qu'on doit inclure dans $E(K)$ en raison du fait qu'elle permet d'expliquer ce qu'est la valeur exacte de l'aire exacte balayée par les planètes, via le calcul exact de leur trajectoire. L'explication cherchée est ici obtenue par abstraction : on obtient par exemple que l'aire balayée est égale à 3, ce qui indique *du même coup* que cette aire est constante. Mais par ailleurs, il ne fait guère de doute que la dérivation de Newton doit également être incluse dans le stock explicatif, sinon, $E(K)$ ne comprend pas la dérivation qui, comme j'ai essayé de le montrer dans la discussion de la dérivation de Newton, est d'un point de vue scientifique la plus explicative. On peut ajouter que seule cette dérivation permet de rendre compte de la régularité transversale RT (qui porte sur des systèmes potentiellement non physiques n'obéissant pas à la seconde loi de Newton) disant que tout système de deux corps dans lequel s'exerce à intervalles réguliers (discrets ou nuls) une force centrale, où l'action d'une force est dans la direction de cette force et où le principe d'inertie est respecté obéit à la loi des aires. Le fait que la Terre obéit à la loi de aires s'obtient alors par instanciation. Notons incidemment que la demande explicative à propos de ce fait particulier est légitime. C'est ce fait qui est constaté expérimentalement dans notre monde et qu'on cherche à la base à expliquer. La régularité RT n'est jamais constatée (puisque elle porte en partie sur des cas non physiques) et ne peut motiver l'enquête. C'est l'analyse théorique qui nous informe par surcroît à propos de l'existence de cette régularité, qu'on peut ensuite vérifier dans certaines de ses instances physiques (e.g. systèmes avec une force coulombienne).

En résumé, la stratégie pour traiter les cas de non pertinence proposée par Kitcher ne fonctionne pas ici car les deux dérivations en concurrence, qui permettent de conclure au fait à expliquer, ont toute leur place dans ce que Kitcher nomme le stock explicatif. On peut par ailleurs remarquer que l'exemple ici utilisé se généralise. Prenons l'explication d'un fait précis A . Cette explication permet en même temps de rendre compte de certaines propriétés A' , A'' , A''' moins précises ou plus abstraites qui sont indissociables de l'occurrence de A . Dans certains cas, ces propriétés n'auront pas d'autre explication que celle de A . Mais dans d'autres cas, comme dans le cas présent, ces propriétés auront leur propre explication et les prémisses de cette explication seront plus pauvres que les prémisses utilisées dans l'explication de A . Et ces explications propres à A' , A'' , etc. seront meilleures que celle qui permet aussi d'expliquer A , et elles seront par ailleurs indispensables du fait qu'elles rendent compte en même temps d'une régularité associée dans lesquelles ne figurent pas les prémisses inutiles à l'explication de A' , A'' , etc.

Le problème pour la théorie de Kitcher est donc que le pouvoir explicatif de dérivations qu'il est nécessaire d'inclure dans le stock explicatif du fait qu'elles permettent de rendre compte de certains faits distincts (ici le détail des trajectoires des planètes, la valeur exacte de l'aire balayée d'une part et la régularité RT d'autre part) se recoupe largement à propos d'autres faits (ici le fait que l'aire balayée par la Terre soit constante). L'ensemble $E(K)$ est donc explicativement redondant, même si, nous venons de le voir, cette redondance ne peut être éliminée sans dommages explicatifs. Comme Kitcher ne signale pas cette redondance ni ne donne de critère pour choisir la meilleure explication dans de tels cas, la théorie unificationniste, en l'absence de développements supplémentaires, est impuissante à déterminer laquelle de ces dérivations partiellement redondantes est la plus explicative dans les cas de redondance.

En l'état, on voit donc que la théorie de Kitcher échoue à résoudre le problème de la pertinence intra-scientifique. Elle parvient à écarter les cas de non pertinence liés à l'inclusion d'explications qui incluent des prémisses inutiles ou qui correspondent à des dérivations ne jouant aucun rôle scientifique. En ce sens, elle permet d'apporter une solution au problème général de la pertinence en fournissant un critère pour éliminer certaines explications considérées comme non-scientifiques. Mais elle échoue à départager différentes dérivations qui font partie de notre arsenal explicatif quand ces dernières permettent d'expliquer un même fait. En ce sens, la théorie de Kitcher échoue à régler le problème de la pertinence intra-scientifique, c'est-à-dire la version non artificielle du problème de la pertinence^{xiv}.

Woodward (2003a, 2003b, p. 367 sq.) critique la théorie de Kitcher en la qualifiant de « jeu où le gagnant remporte toutes les mises » (*winner-take-all conception*). Il veut dire par là que, dans la théorie de Kitcher, une dérivation appartient ou n'appartient pas au stock explicatif. Comme la valeur explicative est conférée globalement au stock explicatif, une dérivation qui n'appartient pas à ce stock n'a aucune valeur explicative. Cela est gênant car, comme il a été indiqué plus tôt, on peut souhaiter considérer que, après tout, une explication qui utilise la notion d'ensorcellement, ou, pour utiliser un cas plus consensuel, une explication qui dirait que tous les échantillons de sel placés dans un champ magnétique et plongés dans l'eau se dissolvent, possède *une certaine valeur* scientifique, même si elle ne fait pas partie du stock explicatif. On aimerait donc que certaines explications soient considérées comme scientifiques et en partie acceptables même si leur valeur explicative n'est pas optimale. La théorie de Kitcher semble donc trop grossière pour rendre compte de façon fine de nos jugements à propos de la plus ou moins grande valeur des explications. Le diagnostic qui ressort de l'étude ci-dessous permet d'affiner ce diagnostic. Comme nous l'avons vu, dans certains cas, plusieurs dérivations appartenant au stock explicatif peuvent expliquer un même fait et alors que ces explications sont plus ou moins bonnes, il n'y a pas moyen dans le cadre proposé par Kitcher de différencier leur valeur. Il s'agit donc aussi d'une *winners-take-the-same conception*, dans laquelle les explications gagnantes remportent toutes la même mise, ce qui est de nouveau gênant.

Un unificationiste peut bien entendu répondre que la théorie de Kitcher est simplement incomplète et que l'ajout de critères supplémentaires devrait permettre d'évaluer la plus ou moins grande valeur des explications concurrentes, dans le cas où le stock explicatif est redondant. Néanmoins, sauf à renier l'idée de base du modèle, de tels critères doivent aussi être satisfaisants *d'un point de vue unificationiste*, surtout si on considère que la vertu de pertinence intra-scientifique est propre aux explications scientifiques (voir infra sur ce point). Je ne prétends nullement que de tels critères soient introuvables. L'analyse de la loi des aires proposée ci-dessus montre d'ailleurs que la dérivation de Newton est préférable car, en s'appuyant sur moins de prémisses, elle permet de comprendre comment le fait à expliquer peut survenir dans une classe de cas plus vastes. De ce point de vue, elle est plus unificatrice. De plus, l'unification ainsi obtenue peut être évaluée localement, c'est-à-dire en ne prenant en compte que l'étude du fait à expliquer. En effet, elle requiert seulement de trouver des dérivations reposant sur des prémisses plus pauvres^{xv}. Son épistémologie est donc plausible au sens où l'identification de ce qui unifie n'a rien d'insurmontable.

Il convient néanmoins de remarquer que, dans l'analyse de l'explication de la loi des aires, l'unification n'est ni un but premier ni un des moteurs de l'analyse explicative. Ce qui est central, c'est d'identifier au sein de la description théorique du système étudié les propriétés qui jouent un rôle dans la production du phénomène étudié et celles qui en

sont indépendantes ; les vertus unificatrices viennent par surcroît, comme le résultat de l'identification d'une régularité explicative aux prémisses plus pauvres, donc plus générales et unificatrices. L'unification ne semble donc pas ici jouer un rôle premier. De plus, l'analyse explicative se fait ici à prémisses fixées et elle ne semble pas jouer de rôle dans l'identification de ce que nous devons tenir comme les énoncés primitifs de nos croyances. L'unification dont il est question semble donc être d'un autre type que celle décrite par Kitcher.

Cette dernière dépend en effet de façon cruciale des ensembles d'énoncés qu'on considère comme primitifs et du potentiel unificateur que contient ce choix, via le choix de schémas d'arguments. Pour le dire dans le langage des philosophes, cette étape correspond au moment où une communauté scientifique choisit les théories générales qui fournissent une description fondamentale des systèmes. De ce point de vue, les analyses de Kitcher peuvent être vues comme une description de la façon dont sont choisies nos théories, ou, pour le dire en ses termes, comment sont choisis sur des critères d'unification les énoncés de base qui figurent exclusivement comme prémisses de notre ensemble de croyances et qui sont à la base du réseau d'explications qui unifient celles-ci. L'originalité de la position de Kitcher tient alors au fait que ce qui est choisi, ce n'est pas simplement une théorie ou des énoncés de base mais un couple 'énoncés de base – ensemble des explications associées'. Dans cette perspective, Kitcher répond donc principalement au problème général de la pertinence ou problème de la scientificité puisqu'il décrit les racines de la séparation entre ce qui est considéré comme explication scientifique et repose sur les énoncés de base choisis sur la base de leur potentiel unificateur, et ce qui est considérée comme explication non scientifique et repose sur d'autres énoncés. Il n'est alors pas étonnant que la condition de pertinence intra-scientifique ne soit pas toujours remplie par les explications ainsi sélectionnées. On voit mal en effet pourquoi ce qui satisfait la condition de pertinence générale devrait également comme par magie satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique, c'est-à-dire pourquoi l'ensemble des schémas explicatifs choisis avec les énoncés de base ne formerait pas un ensemble partiellement redondant d'un point de vue explicatif – ce qui n'est pas forcément un défaut scientifique d'ailleurs.

7. Mise en perspective

Récapitulons. Dans cet article, j'ai d'abord distingué différentes conditions que doit idéalement satisfaire une explication scientifique à savoir la condition de scientificité, ou condition de pertinence générale, la condition de pertinence référentielle, la condition de suffisance et la condition de pertinence intra-scientifique et j'ai essayé de montrer l'intérêt et la fécondité qu'il y a à distinguer ces différentes conditions. Je me suis notamment attaché à illustrer la spécificité de la dernière condition en montrant qu'il demeure un problème proprement scientifique de la pertinence, même quand les conditions précédentes sont satisfaites, et notamment quand on possède déjà une description scientifique des systèmes en jeu assez riche pour déduire l'occurrence du phénomène étudié. J'ai ensuite montré en quoi la théorie nomologique de l'explication, puis la théorie causaliste, dans les versions qu'en proposent Salmon, sont incapables de répondre à l'exigence intra-scientifique de pertinence. J'ai illustré et confirmé ce diagnostic à travers des exemples proposés par Batterman, dans lesquels l'explication en jeu est celle de propriétés dites universelles, puis à travers l'exemple plus usuel et plus gênant pour le modèle causal de la loi des aires, en m'attachant à montrer l'importance dans le travail scientifique explicatif de la condition de pertinence intra-scientifique. J'ai

enfin montré en quoi le modèle unificationiste, pourtant à première vue plus à même de fournir une analyse satisfaisante de l'exemple ainsi qu'une solution à l'exigence de pertinence intra-scientifique échoue néanmoins sur ce point, en raison de la redondance partielle de l'ensemble des explications qui unifient nos croyances et de l'absence de critère hiérarchique permettant de classer ces explications licites dans de tels cas de redondance.

Ma discussion a été essentiellement critique. Je laisse la tâche de proposer une théorie de l'explication permettant de répondre au problème de la pertinence intra-scientifique pour un autre article. Cela dit, on peut déjà à partir des analyses précédentes souligner quelques caractéristiques que devrait avoir une telle théorie. Elle doit permettre de caractériser, à *description scientifique d'un système donnée*, ce qu'est l'explication la plus pertinente d'un fait ayant lieu dans ce système. Le critère utilisé semble devoir être « local » au sens où il doit permettre de caractériser l'explication la plus pertinente en se concentrant sur l'étude de la description théorique du système étudié, et donc indépendamment des autres faits qu'on peut souhaiter expliquer par ailleurs. Enfin, sur la base des cas étudiés plus haut, cette théorie de l'explication doit permettre d'incorporer l'idée informelle suivante : l'explication la meilleure est celle qui repose sur des prémisses les plus pauvres possibles, c'est-à-dire constituant une description ayant la compréhension ou l'intension la plus restreinte et l'extension la plus large. Et comme nous l'avons vu, une bonne formalisation de la condition de pertinence intra-scientifique devrait ainsi permettre de souligner la différence entre information descriptive et information explicative en montrant qu'une explication apporte d'autant plus d'information explicative que le contenu en information descriptive de ses prémisses est faible. Comme cela a été souligné, la notion de texte explicatif idéal, développée par Railton, qui est souvent solidaire des positions causalistes, est insensible à une telle distinction.

Pour finir, une bonne théorie de l'explication devrait permettre de souligner qu'il peut exister plusieurs explications scientifiques d'un même fait et que la qualité de ces explications peut être variable. Il existe peut-être plusieurs critères explicatifs « quantitatifs » qu'il est possible de remplir de façon plus ou moins satisfaisante et dont l'identification permettrait de déterminer la qualité des explications scientifiques. Le critère de pertinence semble clairement être de ceux là. Pour satisfaire ce critère, il convient d'expurger les prémisses d'un argument explicatif de toute information descriptive non pertinente. Mais de fait, il n'existe guère de moyen de savoir si cette « épuration » de l'explication est menée à son terme. Il est donc tout à fait possible que de nombreuses explications scientifiques recevables ne satisfassent pas complètement ce critère et que des progrès scientifiques ultérieurs permettent d'améliorer ces explications. J'ai pour cela indiqué que, contrairement à l'explication dite du sel ensorcelé, qu'il convient de rejeter comme non scientifique, l'explication dite du sel magnétisé peut être considérée comme acceptable. En effet, elle satisfait à la condition de scientificité ou condition de pertinence générale et à la condition de pertinence référentielle, même si elle échoue à satisfaire *complètement* la condition de pertinence intra-scientifique.

Cette dernière remarque m'amène à revenir sur la place de la condition intra-scientifique de pertinence par rapport aux autres conditions décrites ci-dessus. Il convient en effet de noter que toute personne en quête d'une explication scientifique authentique, et donc au premier chef les scientifiques, doit d'abord satisfaire les conditions de scientificité et de pertinence référentielle et qu'il ne s'agit nullement de conditions triviales. Remplir la condition de scientificité nécessite de pouvoir bénéficier de théories scientifiques existantes et, s'il n'en existe pas, ou si elles ne sont pas satisfaisantes,

trouver de telles théories permettant de couvrir les phénomènes étudiés. Remplir la condition de pertinence référentielle requiert d'identifier les systèmes qui sont en jeu dans la production d'un phénomène scientifique observé, afin de pouvoir leur appliquer les théories adéquates. S'il est clair que les dinosaures ne sont guère impliqués dans la production des marées, il n'est en revanche nullement évident que des énoncés à propos de la lune doivent être inclus dans l'explication, même quand on est en possession de la théorie de Newton. De la même façon, identifier à travers différents contextes de contamination et différents vecteurs la bactérie *Vibrio Cholerae* comme le système qui cause le choléra, et par là-même satisfaire la condition de pertinence référentielle, est loin d'être trivial (Humphreys, 2000).

D'une certaine façon, satisfaire ces deux conditions de scientificité et de pertinence référentielle ainsi que la condition de suffisance explicative mentionnée plus haut – et peut-être d'autres conditions^{xvi} – constitue du point de vue scientifique un changement de régime. Pour le phénomène étudié, le cap de « l'explicativité » scientifique est désormais franchi puisqu'on possède enfin une explication scientifique suffisante (ou satisfaisante, au sens étymologique), qui permet, sur la base d'une description scientifique des systèmes particuliers impliqués dans les processus physiques à l'œuvre, de pouvoir en expliquer *assez* pour rendre compte, autant qu'il est possible^{xvii}, de l'occurrence du phénomène à expliquer. De ce point de vue, on peut considérer que, en un sens, la majeure partie du travail d'explication scientifique consiste à remplir ces conditions. Et les avoir remplies est sans doute propre à satisfaire pleinement l'attente explicative du public non scientifique, puisque se trouve alors dissipée l'auréole de mystère qui entoure l'occurrence d'un phénomène, à laquelle, pour paraphraser Hempel, on sait désormais qu'on devait s'attendre (« *it was to be expected* », Hempel, 1965, 337).

Dans tous les cas, cette mise en perspective à propos de ce qui constitue, quand on part d'un état d'ignorance totale, l'ensemble de la tâche explicative, indique que le problème intra-scientifique de la pertinence ne se pose d'un point de vue logique que dans un second temps, une fois qu'on possède *déjà* une explication scientifique suffisante, présentant un ensemble d'informations scientifiques portant sur les systèmes en jeu et suffisamment riches pour rendre compte complètement de l'événement étudié. Satisfaire la condition de pertinence intra-scientifique ne change pas notre degré d'attente rétrospectif face au phénomène dans les circonstances particulières étudiées : la prédiction de ce phénomène ne dépend pas de la satisfaction de cette condition. D'un point de vue purement pragmatique ou utilitariste, il semblerait même que la satisfaction de cette condition soit une sorte de luxe intellectuel supplémentaire pour les scientifiques souhaitant une compréhension plus profonde.

Il convient néanmoins de nuancer ce dernier jugement par les remarques suivantes. On peut d'abord remarquer que l'exigence de pertinence intra-scientifique est propre à l'activité explicative. Or, à partir du moment où on s'interroge sur la notion d'explication, il est légitime de mettre l'accent sur ce qui est spécifique aux explications – même si une importante partie de l'activité explicative est, nous venons de le voir, commune à d'autres activités scientifiques comme la prédiction. De ce point de vue (et contre Van Fraassen, 1980), on peut considérer qu'il existe une vertu explicative propre à savoir la vertu de pertinence scientifique, même si (en accord avec van Fraassen) cette vertu est possédée par les explications et non par les théories. Mettre l'accent sur ce point permet donc de souligner ce qui est spécifique à l'activité explicative. Deuxièmement, on peut voir l'exigence de pertinence intra-scientifique comme une façon de dire plus de vérités. En effet, quand on dit que l'explication du fait que le sel s'est dissous est qu'il a été magnétisé et plongé dans l'eau, on énonce plus qu'une simple régularité constatant

que les échantillons de sel placés dans un champ magnétique et plongés dans l'eau se dissolvent. En effet, alors que l'énoncé de la régularité est pleinement vrai, l'explication correspondante comprend une part de fausseté : il est en fait affirmé que la magnétisation explique en partie la dissolution alors que ces deux événements sont physiquement indépendants. La vertu de pertinence n'est donc pas une simple vertu esthétique mais porte également sur le contenu de vérité de ce qu'affirme une explication, en tant qu'explication (et non pas en tant que description d'une régularité). On peut pour finir noter que cette augmentation du contenu de vérité d'une explication, lié à la satisfaction de la condition de pertinence intra-scientifique, est concomitante d'une augmentation de l'information apportée par l'explication. Ainsi, dans le cas de la loi des aires, en satisfaisant mieux la condition de pertinence intra-scientifique et en produisant une explication plus profonde, on apprend du même coup que cette loi serait aussi instanciée dans le cas de forces coulombiennes, dans le cas d'une force non continue s'exerçant à intervalles de temps discrets, etc. Satisfaire la condition de pertinence scientifique permet donc non seulement d'avoir des explications plus profondes, mais aussi d'en apprendre plus sur ce qui peut se passer dans des conditions similaires. La vertu de pertinence n'est donc nullement une qualité purement esthétique ou intellectuelle caractérisant nos explications mais elle a des répercussions claires sur leur portée et leur utilité. De ce point de vue, même si la condition de pertinence intra-scientifique est seconde par rapport aux autres conditions, la satisfaire n'est nullement un luxe. Une explication qui remplit cette condition explique mieux, en dit plus et s'applique à d'avantage de cas semblables.

Références bibliographiques

Batterman, Robert

1998, « Why Equilibrium Statistical Mechanics Works: Universality and the Renormalization Group », *Philosophy of Science*, vol. 65, p. 183-208.

2003, *The Devil in the Details, Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*, New York, Oxford University Press.

Blay, Michel

2002, *La science du mouvement de Galilée à Lagrange*, Paris, Belin.

Dowe, Phil

2000, *Physical Causation*, Cambridge, Cambridge University Press.

Glennan, Stuart S.

1996, « Mechanisms and the nature of causation », *Erkenntnis*, vol 44 (1), p. 49-71

Hempel, Carl et Oppenheim, Paul

1948, « Studies in the Logic of Explanation », dans *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*, New York: Free Press, p.245-291.

Humphreys, Paul

2000, « Analytic and Synthetic Understanding » dans J. Fetzer, dir. *Science, Explanation, and Rationality: The Philosophy of Carl G. Hempel*. Oxford, Oxford University Press.

Kitcher, Philip

1984, *The Nature of Mathematical Knowledge*, Oxford, Oxford University Press.

1989, « Explanatory Unification and the Causal Structure of the World », dans P. Kitcher et W. Salmon, dir. *Scientific Explanation*, Minneapolis, University of Minnesota Press.

Kyburg, Henry

1965, « Comment », *Philosophy of Science*, vol. 32, p. 147-151.

Machamer, Peter

2004, « Activities and Causation: The Metaphysics and Epistemology of Mechanisms », *International Studies in the Philosophy of Science*, vol. 18, p. 27-39.

Machamer, Peter, Lindley Darden, et Carl Carver

2000, « Thinking About Mechanisms » *Philosophy of Science*, vol. 67, p. 1-25.

Newton, Isaac

1989, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, traduction française de l'édition de 1727 de la marquise du Chastelet, Paris, 1756-1759, Gabay.

Railton, Peter

1978, « A Deductive-Nomological Model of Probabilistic Explanation », *Philosophy of Science*, vol. 45, p. 206-226.

1981, « Probability, Explanation, Information », *Synthese*, vol. 48, p. 233-256.

Salmon, Wesley

1971, « Statistical Explanation », in W. Salmon, dir., *Statistical Explanation and Statistical Relevance*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, p. 29-87.

Salmon, Wesley

1984, *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton, Princeton University Press.

1994, « Causality Without Counterfactuals », *Philosophy of Science*, vol. 6, 297-312.

1997, « Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques », *Philosophy of Science*, vol. 64, p. 461-477.

van Fraassen, Bas

1980, *The Scientific Image*, Oxford, Oxford University Press.

Woodward, Jim

1979, « Scientific Explanation », *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 30, p. 41-67.

1997, « Explanation, Invariance, and Intervention » *PSA 1996*, vol. 2, p. 26-41.

2000, « Explanation and Invariance in the Special Sciences », *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 51, p. 197–254.

2003, *Making Things Happen*, New York, Oxford University Press.

2010, « Scientific Explanation », Edward N. Zalta (éd.), in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/>, version du printemps 2010.

Notes

i Cet article est issu en grande partie du travail que j'ai effectué sur la question de l'explication scientifique pendant mes années de thèse à l'IHPST. Il a ensuite été substantiellement enrichi et remanié pour sa publication dans la présente revue. Je tiens à remercier entre autres personnes pour leurs remarques précieuses Jacques Dubucs, Anouk Barberousse, Marion Vorms, Maximilien Kistler et Alexandre Guay ainsi que deux évaluateurs anonymes pour leur lecture attentive.

ii Je ne considérerai dans cet article que la partie DN du modèle de Hempel, qui incarne le mieux l'esprit de sa théorie de l'explication, ainsi que les cas scientifiques les plus favorables pouvant être analysés dans ce cadre (notamment la physique mathématisée). Il est possible que les notions d'explication discutées dans cet article ne puissent pas s'appliquer dans certains domaines scientifiques soit qu'elles soient trop contraignantes, soit qu'elles soient inadaptées et que les analyses tirées du domaine restreint considéré ne soient pas exportables à d'autres domaines scientifiques.

iii De façon notoire, cette condition n'est elle-même toujours pas suffisante. Si une prémisse a fait partie de façon essentielle d'un argument explicatif, alors le remplacement de la prémisse a par la prémisse a et p , où p est une proposition vraie quelconque, fournira un argument explicatif dans lequel la proposition a et p est également une prémisse essentielle.

iv On suppose ici que la régularité est authentique, ce qui n'est bien sûr pas le cas. Par exemple, si l'eau utilisée est déjà saturée en sel, la dissolution n'aura pas lieu.

v L'approche manipulationniste de Woodward (2003) – que je ne discuterai pas dans ce papier – est ici prometteuse. Dans cette approche, on peut considérer que la question de ce qui est scientifique est traitée indépendamment par les scientifiques. Et les relations causales sont identifiées dans un second temps, sur la base des propriétés identifiées par les scientifiques, au moyen de la notion de manipulabilité qui est, pour le dire vite, une propriété de propriété, c'est-à-dire, une propriété de second ordre.

vi Pour citer Salmon et localiser le problème dans son texte : « Suppose we want to explain some event E . We may look at E as occupying a finite volume of four-dimensional space-time. If we want to show why E occurred, we fill in the causally relevant processes and interactions that occupy the past light cone of E ». Comme l'indique le terme souligné, Salmon a implicitement besoin d'une condition de pertinence supplémentaire.

vii « A more general way of putting the problem revealed by these examples is that those features of a process P in virtue of which it qualifies as a causal process [...] may not be the features of P that are causally or explanatorily relevant to the outcome E that we want to explain [...]. <So> mark transmission, does not provide the resources for distinguishing those features or properties of a causal process that are causally or explanatorily relevant to an outcome and those features that are irrelevant. » (Woodward, 2003).

viii Je présente ici l'équivalent moderne de la dérivation de Newton et ne prétends nullement toujours utiliser les concepts historiquement utilisés par Newton. Pour plus de détails historiques, voir Blay, 2002 ou Newton, 1727.

ix Le principe d'inertie indique qu'un corps soumis à des forces de somme vectorielle nulle poursuit sa trajectoire en mouvement rectiligne uniforme. Il s'agit d'un cas particulier du PFD mentionné plus haut.

x Le PFD montre comment la quantité de mouvement mv varie en fonction de la force. En effet $d(mv)/dt = m dv/dt = m a$, puisque m est une constante.

xi Ironiquement, dans le cas précis de l'explication de la loi des Aires, est bien en jeu un invariant du mouvement correspondant à une symétrie du problème, à savoir la quantité du moment cinétique. Le défenseur du modèle causal ne s'en trouve pas plus avancé. En effet, cela montre au mieux que, selon le phénomène étudié, il faudrait définir les processus causaux en fonction de l'invariant *pertinent*, la notion de pertinence étant de nouveau à définir ; de plus, un seul invariant, comme le moment cinétique, ne suffit pas à déterminer une seule ligne d'univers (*world line*) permettant de singulariser un processus causal (voir Salmon, 1997, pp. 462, 468 pour la définition des processus causaux en terme de *world-lines*); enfin, l'ensemble des arguments proposés reste valide pour l'explication d'une propriété d'un système non lié à un invariant du système étudié.

xii Comme certains énoncés peuvent apparaître comme conclusions et prémisses de nouvelles dérivations, l'ensemble des énoncés qui sont des prémisses est plus large que l'ensemble des énoncés primitifs servant à dériver les autres énoncés de K.

xiii Il y a là une tension très nette entre d'une part l'exigence de contraintes fortes qui vise à rendre non triviale et non abstraite l'unification et d'autre part l'exigence de généralité. Kitcher donne un peu plus loin

(p. 477-480) plus de détails sur le degré de contrainte (*stringency*) qui pèse sur les patrons d'argument. Ses analyses sont beaucoup plus compliquées et, comme il le reconnaît lui-même, seulement partiales. Elles devraient donc au moins être prolongées pour que sa théorie soit complète et générale. Comme je n'ai pas besoin de tous ces détails pour la suite, je n'en dirai pas moi-même plus sur ce point.

xiv Kitcher se plaint par ailleurs que les débats sur la notion d'explication utilisent trop d'exemples complètement artificiels. Il déclare notamment (Kitcher, 1989, p. 493) que « la discussion portant sur les recours avérés à l'unification et sur le rôle de ces recours dans la croissance de la connaissance scientifique indique un projet plus important que la résolution de problèmes artificiels portant sur l'asymétrie et la non pertinence ». L'exemple que j'ai développé souligne que la théorie de Kitcher est au moins incomplète sur un point très important et non artificiel et que les seuls contre-exemples relatifs à la notion de non pertinence que résout la théorie de Kitcher sont dans l'immédiat des exemples pathologiques et non scientifiques.

xv Woodward souligne (Woodward, 2003b, p. 369-371) le caractère peu plausible de l'épistémologie attachée au modèle unificationiste : puisque le critère d'unification est global et pour le moins compliqué, comment les agents cognitifs finissent-ils eux-mêmes par identifier l'ensemble $E(K)$ et déterminer ce qui est explicatif ?

xvi On pourrait par exemple ajouter des conditions sur le type de théorie utilisé, sur le degré plus ou moins fondamental des descriptions utilisées des systèmes physiques et supprimer ainsi les régularités phénoménologiques des explications, etc.

xvii Cette modalisation est nécessaire puisque, dans le cas d'un système non déterministe, avoir autant d'information qu'il est nécessaire sur les systèmes en jeu peut au mieux nous amener à affirmer que l'événement avait une probabilité p d'arriver.