SCIENCES DIFFERENTES, EXPLICATIONS SIMILAIRES, REGULARITES TRANSVERSALES

Cyrille IMBERT[1]

<Merci de se référer à la version publiée pour citer ce texte. >

Imbert, Cyrille. « Sciences différentes, explications similaires, régularités transversales ». In *L'unité des sciences Nouvelles perspectives*, édité par Martin, Thierry, 27-44. Paris: Vuibert, 2009.

Résumé en français :
Je pars dans cet article du constat qu'il existe dans des sciences différentes des phénomènes récurrents qui possèdent des explications similaires, à tel point que ces phénomènes peuvent être décrits par des régularités transversales qui semblent de bon aloi même si elles ne sont pas des lois. On peut néanmoins se demander si le rapprochement entre des phénomènes aussi divers n'est pas le produit de procédures d'abstraction artificielles. Je montre qu'il n'en est rien en expliquant comment la procédure qui permet d'opérer ce rapprochement, à savoir l'adimensionnement des équations, est avant tout motivé par la recherche de représentations plus intrinsèques et d'explications de meilleure qualité. Les régularités étudiées semblent donc authentiques et j'indique pourquoi la solution consistant à les réduire à de simples analogies n'est pas très satisfaisante.

Mots-clés : Explication. Pertinence. Loi. Régularité. Analyse dimensionnelle. Unité des sciences. Structuralisme. Analogie.

Abstract in English:
Throughout the different sciences, there are recurrent phenomena, such as Poisson distributions, which seem to have similar explanations. These phenomena can be described by transversal regularities which are not laws, but do not seem spurious. One may wonder if these phenomena really have something in common, and if these similarities are not artificial by-products originating in abstraction procedures which are extraneous to scientific activity. In this paper, I emphasize that this is not the case. I show that the procedure that unveils these similarities, namely nondimensionalization, is used by scientists themselves to create more intrinsic and more explanatory representations. This raises the question of the status of the corresponding regularities. I argue that reducing them to mere analogies is not satisfactory.

Keywords : Explanation. Relevance. Law. Regularity. Dimensional analysis. Unity of science. Structuralism. Analogy.

[1] IHPST / université Paris 1 Panthéon Sorbonne / université de Caen.

Au XX^{e} siècle, la question de l'unité des sciences a surtout été abordée à partir de la question du réductionnisme inter-théorique, c'est-à-dire de la possibilité de réduire les théories supposées moins fondamentales aux théories supposées plus fondamentales. Sans rentrer dans les détails, on peut dire que ce programme a, dans sa forme originelle, en partie échoué (Sklar, 1967, 1993, Feyerabend, 1962), même si le programme réductionniste se poursuit en développant des notions de réduction plus fines (Batterman, 2002, Nickles, 1973). Cela étant, d'autres types de facteurs peuvent faire que la science et les phénomènes qu'elle étudie comportent une certaine unité. L'unité peut être trouvée par exemple dans les méthodes des diverses sciences. Humphreys (2004) a par ailleurs suggéré que l'unité pouvait également venir de l'utilisation récurrente de *templates*, c'est-à-dire de « patrons » mathématiques solubles analytiquement ou numériquement et servant à représenter des situations extrêmement diverses. Sans discuter dans cet article cette notion nouvelle (et sans doute encore problématique), je souhaite aller dans cet article dans la même direction que Humphreys et montrer que, malgré l'échec du réductionnisme, des facteurs d'unité peuvent encore être trouvés dans l'examen logique minutieux des théories, des modèles et plus généralement des énoncés scientifiques. J'essaye plus particulièrement de montrer comment il peut exister des explications fortement similaires, voire identiques, dans des sciences et des domaines de phénomènes complètement différents.

Mon propos s'organise de la façon suivante. J'étudie d'abord un exemple type d'explications similaires et indique comment les scientifiques rendent compte de cet état de fait. J'expose ensuite quelques questions que pose ce type de situations. La suite de l'article est consacrée à donner un début de réponse à ces questions. Pour cela, j'examine un trait que doivent posséder les bonnes explications, à savoir ne comporter que des phénomènes pertinents. Puis je montre en quoi l'application de l'analyse dimensionnelle permet selon ce critère de produire de meilleures explications, ainsi que de faire le rapprochement entre des situations similaires. J'étudie pour finir les conséquences des résultats obtenus pour la question initialement posée.

Existence de phénomènes communs dans différents domaines : le cas de la distribution de Poisson

Certains phénomènes naturels, quoique appartenant à des domaines différents, semblent avoir des explications au moins en partie similaires. C'est par exemple le cas des phénomènes qui sont décrits par ce qu'on appelle, en théorie des probabilités, une loi de Poisson. La loi (ou distribution) de probabilité de Poisson est la suivante :

$$P(N=k)=\frac{(\lambda t)^k}{k!}e^{-\lambda t}$$

Pour obéir à cette distribution, des événements doivent être tels que la probabilité que k événements surviennent dans un intervalle de taille finie t soit égale à $P(N=k)$. De nombreux phénomènes obéissent à des lois de Poisson dans des domaines aussi divers que la physique nucléaire (e.g. le nombre de particules émises par rayonnement radioactif par une substance instable), la biologie (e.g. la distribution des récepteurs visuels dans la rétine), la physique statistique (e.g. la statistique des collisions entre particules dans un gaz), la sociologie (e.g. le nombre d'appels téléphoniques arrivant à un standard ou le nombre de soldats tués par une ruade de cheval dans la cavalerie prussienne), etc.

Même si ces phénomènes sont décrits par la même distribution, il s'agit de faits totalement différents puisqu'ils mettent en jeu des entités aussi différentes que des molécules radioactives, des particules classiques, des récepteurs visuels, des appels téléphoniques, etc. Toutes ces entités obéissent à des lois ou à des mécanismes également différents : lois de la mécanique quantique, lois de la mécanique classique, mécanismes de la morphogénèse, etc.

Nous n'avons donc à première vue aucune raison de nous attendre à des explications identiques ou très fortement similaires de ces différents faits. En effet, on considère d'ordinaire qu'une explication scientifique d'un fait doit reposer sur la théorie scientifique qui s'applique au domaine auquel appartient ce fait et les théories qui régissent les domaines des phénomènes cités sont extrêmement différentes.

L'explication de la récurrence de la loi de Poisson par les scientifiques

Examinons maintenant comment on explique scientifiquement le fait que les phénomènes mentionnés plus haut obéissent à une loi de Poisson. Cela se fait en recourant au théorème mathématique des probabilités que voici. Supposons qu'un processus puisse être décrit comme obéissant aux propriétés mathématiques suivantes :

i) le nombre d'événements dans des intervalles qui ne se recouvrent pas est indépendant, quels que soient les intervalles ;

ii) la probabilité qu'il y ait exactement un seul événement dans un intervalle suffisamment petit de taille $h=1/n$ est $P=\lambda h$;

iii) dans un intervalle suffisamment petit, la propriété qu'il y ait plus d'un événement est nulle.

On peut alors montrer mathématiquement qu'un tel processus est caractérisé par la distribution de Poisson mentionnée ci-dessus. À partir de ce théorème mathématique, on peut alors proposer la généralisation suivante, qui correspond à une régularité dans les phénomènes :

(F_g) : « Tous les systèmes naturels qui peuvent être vus comme instanciant les propriétés i), ii) et iii) vérifient la distribution de Poisson. »

On voit aisément comment, en utilisant (F_g), on peut expliquer le fait que les phénomènes mentionnés ci-dessus obéissent à des lois de Poisson. Par exemple, on peut proposer l'explication suivante : les désintégrations de particules radioactives vérifient les propriétés i), ii) et iii) donc, en vertu de (F_g), leur distribution est conforme à la loi de Poisson. Si on ne souhaite pas faire jouer à (F_g) un rôle explicatif[2], on peut plus prudemment constater que les désintégrations de particules radioactives vérifient les propriétés i), ii) et iii) et en déduire au moyen du théorème mathématique que leur distribution est conforme à la loi de Poisson. *Mutatis mutandis*, on obtient l'explication des autres cas. Quelle que soit la position adoptée, ce que ces explications ont en commun, ainsi que les propriétés que les systèmes correspondants partagent, devient ainsi manifeste. Pour les scientifiques, le lien entre ces différents cas est avéré et solidement établi par le théorème mentionné ci-dessus. Les manuels de physique indiquent d'ailleurs comme application du théorème de Poisson les différents cas de distribution de Poisson présentés ci-dessus. En d'autres termes, (F_g) ne semble pas être pour les scientifiques une généralisation accidentelle. Si ces différents cas sont expliqués de la même façon, ils doivent posséder quelque chose en commun et la régularité (F_g) est vraisemblablement une régularité authentique (quoique peut-être d'un nouveau genre) dont on peut rendre compte au moyen du théorème mathématique précédent.

Un scientifique ayant recours au théorème cité considèrerait sans doute que l'existence d'une régularité comme (F_g) mérite également explication en tant que régularité – en plus des explications particulières que réclame l'existence d'une distribution de Poisson dans chacun des cas mentionnés ci-dessus – et que le théorème et sa démonstration fournissent cette explication. Au même titre, le fait d'être capable de rendre compte de la régularité (F_g) au

[2] J'essaierai dans tout ce qui suit d'être le plus neutre possible sur ce qui constitue une explication scientifique. En effet, cette question reste très conversée et je n'ai nullement besoin de m'engager précisément sur la nature de ce qu'est une explication pour mon projet dans cet article.

moyen du théorème atteste d'une meilleure compréhension de l'existence d'une loi de Poison dans chaque cas et du lien qui existe entre tous ces cas. En effet, quelqu'un qui est capable de rendre compte de la présence d'une loi de Poisson dans un cas donné doit *ipso facto* comprendre pourquoi on doit obtenir une même distribution dans des cas similaires, quoique appartenant à d'autres domaines scientifiques. Si cela n'est pas le cas, c'est qu'il n'a pas bien identifié les propriétés usuelles de base qui sont responsables de la distribution de Poisson dans le cas qu'il étudie (à savoir les propriétés i), ii) et ii) dans (F_g)).

Tout cela bien sûr ne vaut pas argument : il ne s'agit que d'une explicitation de la façon dont les scientifiques utilisent le théorème cité ci-dessus. Néanmoins, cela montre ce dont il faut être capable de rendre compte en décidant du statut de la nature de l'énoncé (F_g).

Quelques questions philosophiques posées par l'exemple

Les explications des différents cas de distribution de Poisson utilisent toutes le même théorème mathématique. On peut néanmoins se demander si cela est suffisant pour dire que ces explications, au-delà de l'utilisation d'un même formalisme et d'un même théorème, sont réellement similaires, c'est-à-dire si les ressemblances relevées dans l'explication dénotent des propriétés partagées par les systèmes dont il est question. A partir du moment où différentes sciences utilisent les mathématiques, il n'est pas étonnant que différentes équations finissent par être réutilisées ça et là, *a fortiori* quand il s'agit d'équations solubles. (Les équations mathématiques solubles (même avec un ordinateur) sont rares et la nécessité de modéliser les phénomènes d'une façon telle qu'on puisse faire des prédictions peut très bien expliquer qu'on fasse rentrer de force la description des systèmes physiques dans des « camisoles de force » toujours identiques (*straightjacket*) (Cartwright, 1983).)

On peut également se demander si les propriétés que semblent partager les différents systèmes en question (à savoir les propriétés i), ii) et iii) ci-dessus) correspondent bien à des propriétés réelles. La description de ces systèmes comme instanciant des propriétés mathématiques n'est-elle pas en effet une vue très abstraite sur ces systèmes qui permet de les rapprocher artificiellement – en laissant de côté les lois du domaine en question, c'est-à-dire ce qui est d'ordinaire vu comme essentiel à une explication et ce dans quoi on trouve les prédicats scientifiques légitimes et projetables (Goodman, 1965) pouvant figurer dans des régularités de bon aloi ? Le fait qu'un même théorème mathématique puisse s'appliquer ne révèle-t-il pas seulement une ressemblance dans la façon dont nous décrivons ces objets et dans le traitement mathématique que nous faisons de ces descriptions et non dans les systèmes eux-mêmes et dans leurs propriétés ?

Il est donc légitime de se demander si (F_g) constitue bien une régularité authentique et plus généralement de s'interroger sur ce qu'il faut conclure philosophiquement à partir du fait que des systèmes obéissant à des lois différentes semblent pouvoir être décrits comme des processus de Poisson similaires. Dans les pages qui suivent, j'essaie d'apporter quelques éléments philosophiques et scientifiques permettant de poser le problème avec encore plus de précision et d'acuité. Je ne répondrai pas dans ce qui suit à toutes les interrogations précédentes et je me contenterai

1° de donner des arguments permettant de montrer par quelle procédure on peut arriver à produire des représentations des systèmes a) qui permettent d'expliquer les faits étudiés et b) qui sont dans un format permettant de mettre en évidence les similarités entre ces explications et donc de produire des régularités comme (F_g) ;

2° de montrer que l'utilisation de cette procédure est par ailleurs complètement justifiée de façon indépendante par la recherche de bonnes explications. En d'autres termes, mon but est dans la suite de cet article de montrer que des régularités comme (F_g) ne sont pas obtenues par un processus de pure abstraction et identifiées quand on adopte une perspective globale et qu'on a le souci de comparer différents systèmes de différents domaines, mais qu'elles sont le produit légitime et scientifique d'une bonne activité d'explication des phénomènes particuliers de chaque domaine.

Un principe de l'explication scientifique : sélectionner seulement ce qui est pertinent

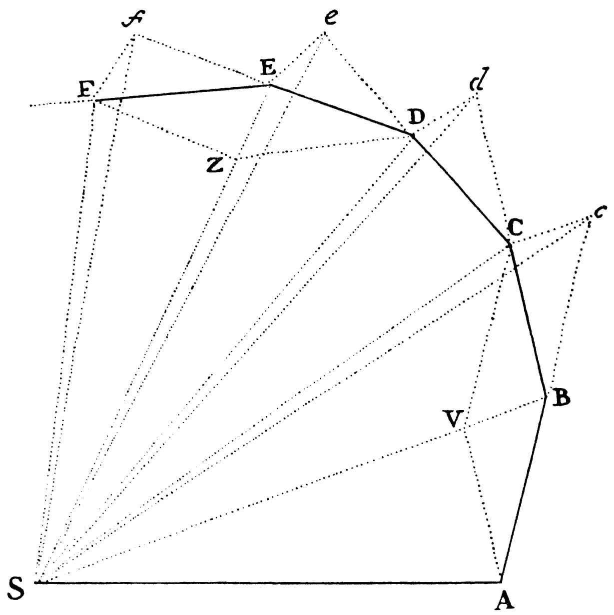
Je passe maintenant à la partie constructive de cet article. Elle est constituée de trois parties, à savoir 1° une discussion de la notion de pertinence dans les explications scientifiques, à partir de laquelle je propose un critère de comparaison de la qualité des explications ; 2° une discussion de la technique de l'adimensionnement des équations, qui illustre ce que je dis sur la notion de pertinence et illustre le fait que les explications adimensionnées ont une plus grande valeur explicative ; 3° une partie dans laquelle j'utilise les résultats obtenus pour revenir sur les questions formulées plus haut.

Etude de cas : l'explication de la loi des Aires

Le point que je montre d'abord est que, même quand on possède la bonne théorie régissant le système, le travail de sélection de l'information explicative pertinente n'est pas pour autant achevé. En d'autres termes, un travail scientifique supplémentaire de sélection des faits qui sont pertinents pour expliquer telle ou telle propriété d'un système peut souvent venir améliorer des explications existantes. Illustrons ce point à travers un exemple classique.

La seconde loi de Kepler dit : « 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 est vérifiée pour tout système de deux corps célestes suffisamment isolé. Dans ce qui suit, je me place dans le cadre théorique de la mécanique newtonienne. Les corps sont soumis au principe fondamental de la dynamique (PFD) $\Sigma \boldsymbol{F} = m\,\boldsymbol{a}$. Par ailleurs, entre deux corps existe une force gravitationnelle d'attraction d'intensité $F=G.M_{Terre}.M_{Soleil} / R^2$. Le fait *K* qu'on cherche à expliquer est que la quantité dA_X/dt est constante, où A_X dénote l'aire balayée par le corps *X* depuis le temps de référence $t=0$. Pour vérifier que la description précédente d'un système de deux corps céleste permet bien d'expliquer *K*, il faut maintenant montrer qu'elle permet de dériver *K*.

Une dérivation laborieuse (explication L) consiste à calculer de façon générale la trajectoire des deux corps célestes, en intégrant l'équation du mouvement ($\boldsymbol{F} = m\,\boldsymbol{a}$), dans laquelle on a remplacé $\boldsymbol{F}$ par la seule force exercée, à savoir la force gravitationnelle. On obtient alors une loi horaire qui décrit précisément et explicitement l'évolution de la trajectoire des deux corps. À partir de cette loi horaire, il est aisé de déduire par dérivation que la loi des Aires est vérifiée dans le cas étudié. Newton propose une dérivation beaucoup plus élégante, générale, et économique (explication N).



Démonstration géométrique par Newton de la loi des Aires (*Principia, I, 2,1*).

On considère qu'une seule force centrale s'exerce à intervalles de temps discrets en A, B, C, etc. Si aucune force ne s'exerçait, après avoir parcouru [AB], la Terre devrait poursuivre sa trajectoire et parcourir [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 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 en C.

A partir de là, on obtient aisément la loi des Aires. Les triangles SAB et SBc ont même aire car ils ont même hauteur et leur base a une longueur égale. 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, en composant les mouvements, on a reporté le vecteur **BV** en C et (BV) et (cC) sont donc parallèles. C et c sont donc à même distance de (SB). Pour toute position de V sur la droite (SB) et donc toute action centrale de la force, on aurait eu la même égalité d'aire de SBC et SBc. 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 en déduit que les aires balayées entre des intervalles de temps égaux consécutifs sont toujours égales.

On a seulement utilisé dans cette dérivation le fait que la force exercée était centrale, qu'elle s'exerçait à intervalles de temps réguliers, et que l'action d'une force à un instant procurait un changement de quantité de mouvement dans la direction de la force exercée. Cela signifie en particulier que la loi des Aires reste vérifiée 1° quelle que soit l'intensité de la force, tant que cette force est centrale ; 2° pourvu que l'action des forces se fasse selon leur direction (le PFD pourrait donc changer et la loi des Aires être néanmoins instanciée).

Nous pouvons maintenant comparer l'explication laborieuse et l'explication de Newton. Celle de Newton est meilleure et plus profonde car elle utilise moins de faits à propos du système étudié et permet de mieux identifier les propriétés explicativement pertinentes : elle montre par exemple que l'intensité de la force n'est pas pertinente pour expliquer la loi des Aires, ni la position ou la vitesse des deux corps célestes impliqués. L'explication de Newton est du même coup plus générale car elle s'applique à d'autres systèmes dans lesquels la force aurait une valeur différente, par exemple à un système où la force serait coulombienne. Cette explication permet d'expliquer non seulement le fait que tel ou tel système de deux corps instancie la loi des Aires, mais également d'expliquer la loi des Aires, c'est-à-dire une régularité portant sur tous les systèmes qu'on peut décrire comme des systèmes de deux corps dans lesquels s'exerce une seule force centrale.

Sur la base de cet exemple, je puis maintenant généraliser ce que l'exemple permet d'illustrer. Plaçons nous dans les cas où on possède une explication E_1 d'un fait F reposant sur la déduction[3] de ce fait à partir de la description D de ce système en terme des lois qui le gouvernent et de faits particuliers qui le caractérisent. Supposons maintenant qu'on arrive à déduire F à partir d'une description D' qui ne comprend qu'une partie des faits qui composent D (et dont par exemple les faits $D_1 \dots D_k$ sont absents). On produit par là une explication E_2 qui est meilleure puisqu'à la fois elle permet de montrer que les faits $D_1 \dots D_k$ ne sont pas pertinents et plus générale parce qu'elle peut s'appliquer à tous les systèmes qui sont correctement décrits par D' mais pour lesquels les faits $D_1 \dots D_k$ ne sont pas forcément vérifiés. On obtient par là un critère pour comparer la qualité de deux explications d'un même fait qui reposent sur la même théorie scientifique : plus la description d'un système sur laquelle repose une explication déductive est informativement pauvre, meilleure est cette explication et plus elle est générale.

Définir plus précisément la notion de pertinence et voir son importance à propos des débats sur la notion d'explication scientifique serait long et difficile, mais ce n'est pas ici mon propos et j'en ai assez dit pour l'objet de cet article. J'ai en particulier montré que la sélection des faits pertinents était bénéfique pour les explications scientifiques et donc scientifiquement souhaitable.

Application : de l'utilité d'adimensionner les problèmes

Je puis maintenant présenter la pratique de l'adimensionnement des équations ou des relations entre quantités dimensionnées. Mon but à travers cette section est de montrer que l'adimensionnement des quantités est une façon d'obtenir des descriptions des systèmes à la fois plus pertinentes (au sens esquissé ci-dessus) et de surcroît plus propres à montrer les similarités entre systèmes obéissant à des lois différentes.

Examinons l'exemple de l'adimensionnement de l'équation de Navier-Stokes, qui est l'équation utilisée pour étudier les fluides. Cette équation (en version simplifiée et à une seule dimension) est

$$\rho.[\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}+\vec{v}.\nabla\vec{v}]=\eta.\Delta\vec{v} \quad \text{(NS)},$$

où $\vec{v}$ désigne le vecteur vitesse et ρ et η des constantes dimensionnées. Dans cette équation, il semble qu'on ait deux variables qui déterminent le problème, à savoir ρ et η.

La description d'une situation physique comprend d'ordinaire ce qu'on appelle des dimensions ou constantes caractéristiques. Par exemple, si on étudie un sous-marin, les dimensions caractéristiques sont la longueur L du sous-marin et sa vitesse V, ce qui nous donne un temps caractéristique $T=L/V$. Les variables initiales dimensionnées désignent en fait le rapport à des grandeurs étalons extérieures au système. Par exemple mesurer 2 m, c'est être dans un rapport 2 par rapport au mètre étalon. On peut réécrire l'équation en utilisant non les variables dimensionnées initiales mais des variables adimensionnées construites comme le rapport (sans dimension cette fois) entre les quantités étudiées et les grandeurs caractéristiques du système dont dépend son comportement. On décrit ainsi le système dans son propre système interne d'unités. On a ainsi :

---

[3] Je ne souhaite pas prendre ici position sur une théorie de l'explication. Je me place délibérément dans des cas consensuels où les explications reposent sur des déductions du fait expliqué à partir d'une même théorie dont la validité est non problématique. Dans de tels cas, l'existence de déductions nous garantit que les explications en jeu, quoique plus ou moins bonnes, sont toutes de bon aloi. La différence de qualité entre les deux explications en jeu ne repose notamment pas sur le fait qu'on ait trouvé une théorie nouvelle et meilleure.

$$\vec{v}^*=\frac{\vec{v}}{V}\ ;\ t^*=\frac{t}{T}\ ;\ \nabla^*=L.\frac{\partial}{\partial x}=L\nabla\ ;\ \Delta^*=L^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}=L^2\Delta\,,$$

d'où en remplaçant dans (NS) :

$$\frac{\rho.L^2}{\eta.T}.[\frac{\partial \vec{v}^*}{\partial t^*}+\vec{v}^*.\nabla^*\vec{v}^*]=\eta.\Delta^*\vec{v}^*\ \text{(NS*)},$$

ou encore, en posant $Re=\frac{\rho.L^2}{\eta.T}$,

$$Re.[\frac{\partial \vec{v}^*}{\partial t^*}+\vec{v}^*.\nabla^*\vec{v}^*]=\eta.\Delta^*\vec{v}^*\,.$$

Ce nouveau format permet de décrire et d'expliquer le fonctionnement du système de façon beaucoup plus intrinsèque et simple. La représentation ainsi produite est notamment invariante par un changement de système d'unités. En effet, si on change les grandeurs étalons, la valeur des quantités dimensionnées change. Cette relativité de la représentation à un étalon disparaît dans une représentation adimensionnée. Cela découle du fait que la nouvelle représentation adimensionnée est intrinsèque car elle indique le rapport des grandeurs caractérisant le système entre elles, et non pas le rapport des grandeurs à des quantités extérieures au système et choisies arbitrairement comme les grandeurs étalons.

De plus, la nouvelle représentation indique que la seule variable pertinente importante est le nombre de Reynolds Re et non les deux variables ρ et η. En d'autres termes, le nombre de paramètres décrivant le problème a baissé d'une unité. Ce que nous avons vu sur cet exemple a en fait une valeur générale. Le théorème Pi, qui est le théorème central de l'analyse dimensionnelle, indique en effet que, quand on décrit un système en référant ses variables les unes aux autres, le nombre de variables baisse du nombre de variables ayant des dimensions indépendantes (Barenblatt, 1996). Deux systèmes caractérisés par des grandeurs ρ et η différentes, mais par un nombre de Reynolds identique, ne sont différents qu'extérieurement puisque, quand on les décrit en utilisant seulement les variables adimensionnées, c'est-à-dire des quantités qui décrivent intrinsèquement le système, ils sont identiques.

Au final, on peut conclure que c'est la représentation adimensionnée, c'est-à-dire la représentation du système *comme instanciant une pure structure mathématique*, qui s'avère être la meilleure pour décrire le système et expliquer ses propriétés. Cette représentation adimensionnée n'est en particulier *pas* obtenue par un procédé d'abstraction indépendant de l'activité scientifique mais produite par les scientifiques afin de mener à bien leurs activités. Elle est obtenue en partant des quantités dimensionnées permettant de décrire de façon particulière le système, en enlevant dans leur représentation ce qu'elles pouvaient avoir d'arbitraire (le rapport à un étalon choisi conventionnellement) et en exprimant le rapport entre ces différentes quantités caractérisant le système[4] afin de pouvoir mieux expliquer les phénomènes qui ont lieu dans le système particulier étudié.

Une fois que des systèmes sont décrits sous forme adimensionnée, le rapprochement entre systèmes similaires qui partagent une description adimensionnée devient immédiat. Le fait que des systèmes différents partagent une représentation adimensionnée est d'ailleurs bien connu des scientifiques, qui mettent à profit cet état de fait quand l'investigation

[4] Pour le dire en termes plus simples : « petit » et « grand » ne signifient pas grand-chose dans l'absolu à propos d'une quantité. L'importance d'une quantité donnée doit être mesurée par rapport aux autres quantités de même dimension dans le système étudié. 1kg est une quantité importante si on étudie la déshydratation d'un bébé (qui pèse 5 kg) mais peu importante si on étudie l'effet sur les mouvements de la Terre (beaucoup plus lourde) que cause une pierre rapportée de la Lune par des astronautes.

expérimentale d'un système particulier n'est pas possible. A la place, ils font des expériences sur un système analogue, c'est-à-dire partageant la même description adimensionnée (Kundu, 2004). C'est ainsi le cas quand on étudie un sous-marin via son modèle réduit. Dans ce cas là, les lois physiques et la dimension des quantités en jeu sont les mêmes. Ce n'est par contre plus le cas quand on procède à une simulation analogique d'un système donné (par exemple un système de ressorts ou un circuit thermique) à partir d'un système électrique. Les deux systèmes partagent alors une même description adimensionnée, mais la dimension des quantités qu'on trouve dans les lois régissant les deux systèmes sont différentes.

En d'autres termes, les scientifiques utilisent eux-mêmes dans leur propre travail le fait que tous les systèmes obéissant à la même description mathématique adimensionnée ont le même comportement, *même quand ces systèmes sont d'un type complètement différent et appartiennent à des domaines de phénomènes différents*.

Bilan des résultats obtenus et interprétations philosophiques

Récapitulons. Nous avons établi dans les sections précédentes que la représentation mathématique adimensionnée, qui permet le rapprochement entre des systèmes décrits par des théories différentes, n'est pas une façon abstraite de représenter le système, mais au contraire la façon la plus profonde et la plus pertinente d'identifier les faits responsables du comportement du système (à savoir les relations internes entre les grandeurs caractérisant le système). Revenons à notre exemple initial. C'est quand on les décrit sous cette forme adimensionnée, qui est la meilleure d'un point de vue explicatif, que des systèmes peuvent être décrits mathématiquement comme des processus de Poisson et peuvent donc sous ce point de vue être similaires. De plus, les scientifiques, notamment par leur pratique des simulations analogiques, utilisent *de facto* des régularités transversales aux diverses sciences, qui sont du type suivant :

(R*) : « À chaque fois que les conditions (exprimées en termes adimensionnés) X*, Y* et Z* sont remplies par un système, on observera dans ce système le comportement (exprimé en termes adimensionnés) T*. »

D'une certaine façon, j'ai déjà rempli le programme que je m'étais fixé, à savoir fournir les arguments philosophiques et les faits scientifiques permettant de donner plus de crédit à la thèse qu'il semble exister des régularités de bon aloi et transversales à différentes sciences. À ce stade, j'avoue une certaine perplexité philosophique : faut-il vraiment considérer (R*) comme une régularité authentique ? Si c'est le cas, s'agit-il d'une régularité du même type qu'une loi physique ? A défaut de trancher, j'indique dans ce qui suit deux interprétations complètement opposées qui me semblent possibles.

L'interprétation forte « structuraliste » (la plus difficile à défendre) consiste à dire que la régularité est une vraie régularité, et d'autant plus qu'il s'agit d'une pure régularité entre faits structurels dont les éléments non pertinents, qui pouvaient venir indûment masquer la régularité, ont été écartés. Dans cette perspective, l'explication du comportement structurel T* est bien donnée par le fait que le système instancie la structure identifiée par les conditions structurelles X*, Y* et Z*. Certes, cette structure est instanciée différemment dans différents systèmes obéissant à différentes lois, mais aucune des circonstances particulières[5] qu'apporte chaque instanciation ne semble jouer un rôle dans l'explication de T*. (R*) constitue donc une régularité authentique, quoique peut-être plus difficile à détecter, puisqu'il s'agit d'une

[5] Ces circonstances particulières sont par exemple la nature des variables dimensionnées qui constituent un nombre adimensionné, ou les lois physiques gouvernant le système quand elles n'apparaissent pas dans l'explication (ce qui est le cas dans l'explication d'une loi de Poisson).

régularité à propos de systèmes possédant des mêmes propriétés structurelles appartenant à des domaines distincts.

Dans cette perspective, il faut séparer nettement deux activités scientifiques. 1° La recherche de lois physiques générales auxquelles obéissent les systèmes et les entités physiques tient compte de tous les phénomènes qui les caractérisent. Tenir compte de tous ces phénomènes caractérisant un type d'entités ou un domaine du réel est assurément la meilleure façon de découvrir le fonctionnement exact et complet de ces entités ou les lois de base (ou régularités du premier type) spécifiques à ce domaine, lois auxquelles sont associés des prédicats projetables (Goodman, 1965). Mais une fois ce travail fait, 2° l'explication d'un fait particulier ayant lieu dans un système se fait au moyen des propriétés structurelles pertinentes de ce système (que les lois gouvernant ce système nous servent à identifier) et ces propriétés structurelles peuvent être ponctuellement les mêmes dans des systèmes différents obéissant à des lois différentes. De plus, le travail explicatif et l'identification de ces propriétés structurelles explicatives permettent de repérer des régularités authentiques d'un second type entre des systèmes instanciant des propriétés structurelles communes qui s'articulent dans des explications similaires – régularités dont le statut resterait à analyser plus en détails, en les comparant notamment aux régularités du premier type que sont les lois. Ainsi, les lois fondamentales et les régularités du second type n'ont pas le même statut dans l'architecture de notre connaissance puisque les secondes sont obtenues en construisant des explications ; néanmoins, les deux correspondent à des régularités observables de la même façon dans les phénomènes.

L'interprétation faible consiste à reconnaître seulement qu'il existe une similarité de structure entre les explications de T* portant sur des systèmes appartenant à des domaines différents et à refuser de voir en ces propriétés structurelles des propriétés indépendantes projetables qui pourraient être possédées identiquement par des systèmes obéissant à des lois différentes. Cela revient sur le fond à refuser de voir en (R*) une régularité authentique s'ajoutant aux régularités du premier type que constituent les lois de chaque domaine.

Dans le cadre de cette interprétation, le cas des simulations *analogiques* peut être analysé ainsi. Explication 1 : le système 1 obéit à la loi 1, et du même coup pour ce système, les conditions (exprimées en termes adimensionnés) X*, Y*, Z* expliquent le comportement (exprimé en termes adimensionnés) T*. Explication 2 : le système 2 obéit à la loi 2, et du même coup, etc. Étant donné la ressemblance structurelle entre les deux explications, le comportement T* du système 2 peut être exploré en étudiant le comportement du système 1. Il n'est nul besoin de supposer une régularité supplémentaire pour cela. L'analyse de ces simulations comme analogies peut alors servir à décrire le statut de (R*). Cet énoncé n'est pas une régularité, mais une façon de décrire un ensemble de systèmes qui se prêtent de façon parfaite à des raisonnements analogiques.

Cette interprétation faible est celle qui correspond le mieux aux principales théories de l'explication existantes, car toutes rattachent très fortement l'explication d'un fait singulier dans un domaine particulier à la mention ou l'utilisation dans l'explication des lois de ce domaine : le modèle de Hempel (Hempel, 1965) réclame explicitement qu'une explication mentionne des lois ; le modèle causal de Salmon (Salmon, 1984, 1994) réclame lui qu'on rattache l'explication à des causes singulières distinguées par des quantités invariantes (par exemple l'énergie) ; le modèle unificationniste de Kitcher (Kitcher, 1989) enfin indique qu'une explication se fait en utilisant des schémas d'arguments (*argument patterns*) et, à en juger par les exemples qu'il donne, ces schémas d'arguments et les lois ou généralités qu'ils contiennent sont à chaque fois spécifiques à un domaine.

Peut-être l'interprétation faible est-elle la plus prudente. La conséquence de ce que j'ai exposé dans les sections précédentes est néanmoins que les théories de l'explication actuelles sont insatisfaisantes en ceci qu'elles ne permettent pas d'identifier comme meilleures les explications qui sélectionnent les faits pertinents – et qui, par là même, mettent légitimement l'accent sur les ressemblances structurelles réelles et profondes qui existent entre des explications appartenant à différents domaines, comme dans le cas des processus de Poisson détaillés plus haut.

Je souhaite donner pour finir trois autres arguments qui militent également contre l'adoption de l'interprétation faible et pour l'adoption d'une interprétation dans laquelle des énoncés comme (R*) sont des régularités authentiques et non une façon rapide de résumer un ensemble d'analogies.

1° Des énoncés comme (F_g), qui sont des instances de (R*), permettent de trouver des régularités (en l'occurrence des distributions de Poisson) dans des domaines comme la sociologie ou l'épidémiologie, qui n'appartenient pas aux sciences fondamentales (chimie, physique, etc.) et ils permettent par là même de développer notre compréhension de ces domaines et de produire des explications sur la base de ces régularités. Il ne semble pas de plus que, pour expliquer et comprendre les phénomènes en question (ici l'existence de distributions de Poisson), il soit souhaitable de considérer plus en détails les systèmes impliqués (dans nos exemples les chevaux et les soldats, les téléphones et les êtres humains, etc.) ainsi que leurs propriétés particulières et les régularités authentiques du premier type ou lois auxquelles ils obéissent peut-être. De telles lois n'existent souvent pas et les régularités comme (F_g) sont souvent dans de tels domaines ce qui se rapproche le plus des lois, autant par leur forme que par le rôle épistémologique qu'elles peuvent tenir.

2° Les régularités de type (F_g*) sont en fait nombreuses. Toutes les distributions statistiques fréquemment utilisées dans la modélisation (distribution gaussienne, loi normale, log-normale, etc.) et les propriétés dites universelles en physique statistique (e.g. valeur des exposants critiques) sont par exemple de ce type.

3° Certaines de ces régularités (notamment celles que je viens de citer en 2) sont omniprésentes[6] dans la Nature pour des raisons physiques profondes, que je n'exposerai pas ici, mais sur lesquelles Robert Batterman a déjà longuement écrit (voir notamment Batterman, 1998 et 2002). Pour résumer, l'analyse statistique permet de montrer pourquoi le détail physique des situations, et notamment le détail des lois et de ce qui différencie les systèmes, n'a souvent pas d'importance dès qu'on change d'échelle (ce qui revient à étudier un comportement asymptotique). En d'autres termes le fait qu'autant de situations extrêmement différentes soient similaires peut également être expliqué par la physique statistique et il n'y a pas simplement une analogie qu'on se borne à constater entre différents systèmes. Cela signifie notamment qu'une très grande partie des régularités authentiques qu'on peut observer dans la Nature n'a pas à être attribuée à l'existence de lois, mais doit être décrite en termes de régularités transdisciplinaires du type de (R*).

Conclusion

J'ai montré dans cet article qu'il existait dans différents domaines des phénomènes similaires qui semblaient posséder des explications similaires (à savoir le fait d'instancier certaines propriétés décrites en termes mathématiques). J'ai par ailleurs montré que le format mathématique qui permet le rapprochement entre ces différents cas est aussi celui qui permet de produire des explications qui sont meilleures, plus générales, et apportent plus de compréhension. J'ai également indiqué que les scientifiques utilisaient pour leur travail d'exploration du monde cette généralité des explications. J'ai souligné pour finir que cette généralité des explications permettait peut-être de définir des régularités authentiques d'un nouveau type ne correspondant pas à des lois. Si cela est bien le cas, leur statut reste encore à

[6] Plus précisément, de très nombreux phénomènes tombent sous ces régularités qui ont donc une très large portée.

éclaircir. J'ai enfin proposé deux interprétations philosophiques possibles de ces similarités structurelles qui existent entre différentes explications ainsi que des régularités correspondant à ces similarités.

BARENBLATT, G. I., 1996, *Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics,* Cambridge University Press.

BATTERMAN, R., 2002, *The Devil in the Details: Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*. Oxford University Press, New York.

CARTWRIGHT, N., 1983, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press.

FEYERABEND, P.K., 1962, "Explanation, reduction, and empiricism", in H. Feigl and G. Maxwell (eds), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, volume 3, pages 28–97. D. Reidel Publishing Company.

HEMPEL, C., 1965, "Aspects of Scientific Explanation", *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science,* New York: Free Press.

HUMPHREYS, P., 2004, *Extending Ourselves*, Oxford University Press.

KITCHER, P., 1989, 'Explanatory Unification and the Causal Structure of the World', in *Scientific Explanation,* P. Kitcher and W. Salmon, 410-505. Minneapolis: University of Minnesota Press.

KUNDU, P., 2004, chapitre 8 : "Dynamical Similarities", *Fluid Mechanics*, Elsevier.

NAGEL, E., 1961, *The Structure of Science*, Routledge and Kegan Paul, London.

NEWTON, I., 1727, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Cambridge University Press, 1972, troisième édition.

NICKLES, T., 1973, "Two concepts of intertheoretic reduction", *The Journal of Philosophy*, 70/7: 181–201.

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

SALMON, W., 1994, 'Causality Without Counterfactuals.', *Philosophy of Science,* 61: 297-312.

SKLAR, L., 1967, "Types of inter-theoretic reduction", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 18: 109–124.

SKLAR, L., 1993, *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.