



PHILOSOPHIE

ÉMERGENCE ET INTRICATION

Mémoire présenté par Jean-Christophe Ronnet
pour l'obtention du master 2 de philosophie
Spécialité « Philosophies allemande et française dans l'espace européen »
Sous la direction de M. Paul-Antoine Miquel

PH30801 – Mémoire de Master 2 de Philosophie

Émergence et intrication

Avant-Propos.....	1
Introduction.....	2
Première partie : le concept d'Émergence.....	4
BREVE HISTOIRE DE L'EMERGENTISME.....	4
Causalité et dualisme	4
Thèses dualiste et moniste	5
Les débuts du concept d'émergence moderne	6
Évolution émergente – hiérarchie des niveaux	6
Se démarquer du vitalisme – déclin de l'émergentisme.....	7
Mécanique quantique et réductionnisme physique.....	8
Systèmes complexes et automates cellulaires.....	9
BREVE HISTOIRE DE LA CAUSALITE	10
Cause naturelle	10
Cause divine.....	13
Cause illusoire et scepticisme	14
Catégories de l'entendement – cause épistémique.....	15
Mort de la cause épistémique – Le positivisme scientifique.....	15
Retour de la cause finale et apparition du vitalisme.....	17
Dépendance Fonctionnelle.....	18
Causalité nomologique-déductive.....	20
COMMENT DEFINIR L'EMERGENCE ?.....	22
Pourquoi un nouveau concept ?.....	23
Un concept médiateur aux interprétations multiples.....	24
Émergence faible et émergence forte.....	25
Caractérisation de phénomènes d'émergence forte.....	27
Causalité descendante.....	29
Cas d'une causalité descendante, dans un cadre d'ontologie moniste.....	29
Cas d'une causalité descendante sans ontologie du niveau haut.....	31
Deuxième partie : spécificités de la physique quantique.....	32
PHYSIQUE CLASSIQUE ET PHYSIQUE QUANTIQUE : DEUX COSMOLOGIES DIFFERENTES	32
Mécanique classique : états des systèmes et déterminisme des lois.....	32
Naissance de la mécanique classique	33
Une mécanique classique dans tous ses états	34
Objets ontologiquement faibles et indétermination	35
L'objet de la théorie classique.....	36
Mécanique quantique : reversement du paradigme	38
Naissance des quanta : corps noirs et catastrophe ultraviolette.....	38
Première interprétation quantique : l'effet photo-électrique.....	41
L'objet de la théorie quantique	42
QUELQUES ELEMENTS DU FORMALISME DE LA THEORIE QUANTIQUE.....	44
Vecteurs réels et vecteurs complexes.....	44
Notation vectorielle classique	44
Algèbre matricielle.....	45
Notation de Dirac.....	46
L'équation de Schrödinger dans la notation de Dirac	47
Opérateurs hermitiques.....	48

<u>Vecteurs propres et valeurs propres</u>	49
PREPARATION ET MESURE EN PHYSIQUE QUANTIQUE	50
Probabilité quantique et contexte expérimental.....	50
<u>Postulats de la mesure quantique</u>	51
<u>La règle de Born : la mesure de probabilité comme projection</u>	51
<u>Différence entre probabilité d'évènement et survenue d'un évènement</u>	52
<u>Probabilité classique - axiomes de Kolmogorov</u> :	53
<u>Spécificité de la probabilité quantique : la contextualité</u>	54
Ce que l'on peut retenir	55
INTERPRETATIONS DE LA THEORIE QUANTIQUE	56
De l'atome de Rutherford à l'atome de Bohr.....	56
La théorie quantique et le problème du réalisme classique	58
<u>Le paradoxe EPR</u>	58
<u>Les inégalités de Bell</u>	62
L'interprétation orthodoxe et les autres.....	64
Les idées forces de l'interprétation orthodoxes.....	66
<u>Double nature déterministe et indéterministe du monde quantique</u>	66
<u>Interaction de la mesure</u>	66
<u>Le concept de complémentarité</u>	66
<u>Le concept de réduction du paquet d'onde</u>	67
<u>L'interprétation orthodoxe en résumé</u>	68
L'expérience des fentes d'Young	68
<u>Première expérience : la mitrailleuse</u>	70
<u>Deuxième expérience : la propagation de vagues</u>	71
<u>Troisième expérience : le canon à électron</u>	72
LE SYSTEME QUANTIQUE A DEUX PARTICULES	76
Spin quantique.....	76
Système de spin à deux particules	77
Relation du tout et des parties.....	78
Interventionnisme au niveau du système quantique	80
<i>Troisième partie : la thèse interventionniste-constitutive</i>	82
SITUATION PARADOXALE DE LA CAUSALITE DESCENDANTE	83
Approche relationnelle et interventionniste.....	83
Problème de la survenance et de la causalité descendante.....	85
<u>Le problème de la survenance</u>	85
<u>Le problème de la causalité descendante</u>	87
<u>Les apories des conceptions substantialiste et configurationnelle de niveaux</u>	87
TENTATIVES CLASSIQUES D'INTERPRETATION DES CAUSES	89
Causes matérielles et formelles	89
Kant et le retour de la cause finale.....	89
LA CONCEPTION INTERVENTIONNISTE DES CAUSES	92
Interprétation de la causalité descendante dans le cadre interventionniste.....	93
Trois bénéfices de l'interprétation interventionniste.....	94
Différence entre émergence faible et interventionnisme.....	95
Deux critiques de l'interventionnisme.....	96
PHYSIQUE QUANTIQUE : CHANGEMENT DE PARADIGME	98
La double nature des particules quantiques.....	98
Symétrie des niveaux quantiques.....	99
Une approche constitutive	100
UN MODELE QUANTIQUE DE CAUSALITE DESCENDANTE	101
Intrication des niveaux quantiques	102
Causalité descendante.....	102

Deux remarques.....	103
Un modèle non-dualiste et anti-fondationnaliste.....	104
CONCEPTION INTERVENTIONNISTE-CONSTITUTIVE : ECLAIRCISSEMENTS.....	106
Cause ontologique et cause épistémique.....	106
Physique quantique : exception exotique de la nature ?.....	107
<u>Le problème des caractéristiques intrinsèques</u>	107
<u>Autres disciplines scientifiques</u>	109
Relations intra-niveau, cohérence et clôture causale.....	109
EXTENSION DU DOMAINE DE LA CAUSALITE DESCENDANTE.....	112
Causalité descendante sans intervention	112
Auto-causalité descendante	116
Bilan sur l'approche Interventionniste-Constitutive de la causalité descendante	118
<i>Au bout de l'enquête.....</i>	<i>120</i>
SUBSTANCE ET EXISTENCE	120
CONSTITUTION ET INTERVENTION	122
REALISME VERSUS IDEALISME ?	124
<i>Bibliographie.....</i>	<i>1</i>
Émergence.....	1
Causalité.....	1
Philosophie de la Physique.....	1
<i>Annexe I : traduction de l'article de M. Bitbol.....</i>	<i>1</i>
<i>"Downward causation without foundations"</i>	<i>1</i>
1. Introduction.....	2
2. Paradoxes et difficultés de la causalité descendante	2
3. Des solutions partielles : l'héritage d'Aristote et de Kant	4
4. Une conception interventionniste de la cause descendante	7
5. Interprétation interventionniste de la causalité descendante : premières objections et réponses.	9
6. Un modèle quantique de causalité descendante	10
7. À propos de quelques malentendus possibles.....	13
8. La causalité descendante au-delà d'interventions actuelles.....	17
9. Auto-causalité descendante.....	18
10. Conclusion et résumé.....	20
Références	21

Avant-Propos

Jeune étudiant en physique appliquée au laboratoire d'électronique de l'École de Physique et Chimie de Paris qui explorait alors les possibilités de calculateurs parallèles, je me suis retrouvé confronté à un problème particulier d'émergence. Suivant un article du physicien John J. Hopfield, le laboratoire commençait à expérimenter des réseaux de neurones entièrement connectés¹ dont la caractéristique essentielle est de présenter une fonction de mémoire associative à l'échelle du réseau qui n'est pourtant pas présente au niveau des automates cellulaires qui composent ce réseau. Bien que ce n'était pas le sujet de son article de 1982², cette singularité n'avait pas échappée à John J. Hopfield qui note : « In contrast, our model obtains its emergent computational properties from simple properties of many cells rather than the circuitry ». Il y avait quelque chose de profond dans cette phrase qui m'apparaissait alors complètement énigmatique. Des propriétés qui émergent des éléments cellulaires plutôt que du circuit qui les interconnecte : que voulait-il dire ? Mon travail de recherche portant sur un dispositif de reconnaissance des chiffres manuscrits, je ne me suis plus vraiment attardé sur cette question que j'ai laissée en sommeil.

Lorsque j'ai entrepris, tardivement, des études de philosophie, j'avais sans doute ce problème d'émergence en tête, quoique longtemps mis en sourdine. Il y a quelque chose de dérangentant pour quelqu'un qui a fait des études en physique, à penser l'émergence, plus exactement à penser à des fonctions qui « surgissent » à un certain niveau de complexité. La physique classique préfère s'occuper de choses en équilibre métastable, parfaitement descriptibles à l'aide des outils mathématiques classiques, beaucoup moins à des choses qui bougent sans régularité et encore moins à des choses qui « surgissent ». C'est lorsque j'ai suivi mes premiers cours en philosophie de la conscience et en philosophie du vivant que ce problème d'émergence s'est alors rappelé à moi et c'est, conjointement avec mon professeur, que nous avons décidé du sujet de ce mémoire.

¹ L. Personnaz, I. Guyon and G. Dreyfus - Information Storage and retrieval in spin-glass like neural network, *Journal de Physique Lettres*, 1985, 46 (8), pp.359-365

² John J. Hopfield, - Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities – *Biophysics - Proc. Ntl. Acad. USA*, Vol.79, pp.2554-2558, April 1982,

Il se peut qu'un véritable savoir de la nature ait toujours été l'affaire d'une petite élite, mais on a le droit de douter que le contemporain cultivé de Newton ait été aussi démuni devant son œuvre que l'homme d'aujourd'hui devant les mystères de la mécanique quantique. [...]

Poursuivre le risque de la connaissance est un devoir suprême et si c'est là le prix, eh bien, il faut le payer.

Hans Jonas – *Le principe responsabilité*³

Introduction

N'ayant pas de compétences particulières en biologie, nous avons décidé avec mon professeur de travailler ce thème de l'émergence dans le contexte de la physique quantique, en partant d'un article de Michel Bitbol : *Downward causation without foundations*⁴, dont nous proposons une traduction française en annexe.

Michel Bitbol, neurologue de formation, docteur en médecine, docteur en physique, est un philosophe des sciences néokantien, mondialement réputé. Un de ses centres d'intérêt est la mécanique quantique et ses paradigmes qui provoquent un bouleversement de la pensée scientifique, aujourd'hui encore, plus de cent dix ans après que Planck en ait formulé les premiers fondements.

Les deux paradigmes les plus dérangeants de la mécanique quantique pour la pensée humaine, sont ceux de la « superposition des états » et de leur « intrication » et pourtant, c'est à partir d'eux que M. Bitbol va tenter d'éclaircir la question de la causalité descendante dans les phénomènes d'émergence.

Ce mémoire est une « tentative » pour analyser les concepts de l'émergence et de l'intrication quantique, qui semblent, à première vue, si éloignés l'un de l'autre. Une tentative, car si l'auteur a bien eu une formation universitaire en physique, il s'agit de physique appliquée et non pas de physique fondamentale. C'est donc sur une base rudimentaire de physique quantique que s'est engagée cette enquête, en replongeant dans certains ouvrages de références, tant théoriques que philosophiques.

³ Hans Jonas – *Le principe responsabilité* – Ed ; du Cerf – 1997 – p. 223.

⁴ Michel Bitbol, *Downward causation without foundation* – Synthese - An International Journal for Epistemology, Methodology and Philosophy of Science, Ed. Springer, March 2012, Volume 185, Issue 2, pp 233–255. Note : dans la suite de ce mémoire, nous mentionnerons en référence abrégée : *Downward causation without foundation*

Nous avons partagé ce mémoire en trois parties distinctes, les deux premières parties ayant pour objectif de questionner les fondements de la causalité et de l'émergence, puis les fondements mathématiques et philosophiques de la théorie quantique. La première partie fera une brève histoire des concepts de causalité et d'émergence afin de mieux comprendre les représentations du monde auxquels ils renvoient. La deuxième partie consistera à donner quelques rudiments mathématiques de la théorie quantique afin d'appréhender les questions philosophiques auxquels ils renvoient. Cette deuxième partie a aussi pour but de donner tous les éléments qui permettent de se familiariser avec la symbolique mathématique et comprendre ainsi l'exemple d'un système à deux particules que Michel Bitbol introduit au paragraphe 6 de son article.

Enfin, dans la troisième partie, nous nous attarderons sur l'interprétation que propose Michel Bitbol de la notion de causalité descendante, une interprétation qu'il qualifie lui-même d'« interventionniste-constitutive ». Il s'agira d'explorer, à travers son article, en quoi une telle approche permet une interprétation plus convaincante de la causalité descendante et si elle peut s'étendre au-delà de l'exemple de l'intrication quantique, en dépassant ce que Jaegwon Kim avait appelé le cercle vicieux de la causalité descendante.

Première partie : le concept d'Émergence

BREVE HISTOIRE DE L'EMERGENTISME

Causalité et dualisme

Il est possible de faire remonter la genèse du concept d'émergence au moins à partir de la constatation aristotélicienne que le tout est plus que la simple somme de ses parties. Une idée basée sur la constatation que certaines entités, comme un organisme ou un être vivant, ne sont pas de simples agrégats de « parties » : il y a quelque chose de plus qui relie ces parties entre elles. On peut, en effet, considérer que la thèse de l'émergence vient de la double difficulté à considérer, d'une part que l'ensemble des propriétés se réduirait aux seules propriétés des parties et d'autre part, que toutes les propriétés rencontrées seraient liées causalement, et de manière nécessaire, soit en remontant des parties vers le tout, soit en descendant du tout vers les parties. Il y a un questionnement sur le rôle de l'immanence et de la transcendance qui est sous-jacent. De ce point de vue, on peut considérer que le concept d'émergence, au moins dans sa forme classique et bien qu'il n'ait pas été exprimé sous cette forme par Aristote, est lié au concept de causalité. L'émergence n'apparaît pas de rien : elle surgit de quelque chose, elle est l'effet de quelque chose que l'on serait tenté d'identifier comme étant sa cause.

Il y a aussi quelque chose d'extrêmement dynamique dans le concept d'émergence. Si quelque chose émerge, ce n'est pas de manière lente et graduée : il y a une discontinuité brusque, quasiment instantanée. Si le mot anglais pour émergence est le même qu'en français, l'adjectif « emergency », quant à lui, traduit bien ce caractère brusque, soudain, du phénomène.

Le mot « émergence » vient de l'infinitif présent du verbe latin « *emergere* » qui signifie « sortir de ». Par ailleurs, il n'est pas inintéressant de voir que la racine grecque du verbe « surgir » est « *épignesthai* » qui a donné le mot épigénèse, aujourd'hui utilisé dans un sens beaucoup plus restreint⁵. Dans les deux cas, il y a une notion de discontinuité et une notion de dualisme de niveaux : le niveau d'où cela émerge et le niveau émergent. Ces deux niveaux entretiennent des relations du type cause/effet entre eux.

⁵ Anne Fagot-Largeault, dans son cours « Ontologie du devenir » du 21/02/2008, au Collège de France, dit : « Depuis les années 1970, on appelle épigénétique tout ce qui modifie l'action des gènes sans modifier la séquence d'ADN »

Thèses dualiste et moniste

On peut considérer que le dualisme, celui initié par Platon et qui sera « formalisé », au sens propre comme au sens figuré, par Aristote, est la condition d'existence d'un concept comme celui d'émergence. En effet, comme l'a souligné Hans Jonas⁶, le monisme matérialiste démocritéen, ne permettait pas de penser l'émergence dans la mesure où tous les éléments de base, les atomes, sont déjà là. Dans ce cadre moniste antique, l'émergence est tout au plus une « combinaison » d'atomes qui s'entrechoquent et s'agglomèrent. Il y a un recouvrement parfait entre le tout et les parties qui le composent.

Le modèle hylémorphique proposé par Aristote permet, lui, en séparant matière et forme, de penser l'émergence, même s'il ne permet pas de la conceptualiser⁷. En effet, à trop vouloir définir les termes extrêmes de la dualité, que ce soit la matière et la forme ou le corps et l'esprit, le dualisme casse les relations entre les termes qui finissent par devenir irréconciliables.

Il faudra attendre les sciences modernes de la Renaissance pour qu'apparaisse en Occident un nouveau monisme matérialiste, un monisme qui était déjà en germe avec le concept platonicien de soma/sema, d'un corps tombeau de l'âme, c'est-à-dire d'une matière morte. Ce nouveau monisme va finir par prendre place avec l'arrivée de la physique mécanique, c'est-à-dire, une physique des corps « morts ». Comme le dit Hans Jonas⁸, nous sommes passés d'une conception moniste pan vitaliste, où la mort était l'exception et où toute la nature était vivante, montagnes comprises, à une conception moniste mécaniste, où le monde entier est devenu une tombe et où la vie est l'exception. Mais pour y arriver il a fallu en passer par le dualisme.

Ce n'est que lorsque ce nouveau monisme post dualiste sera véritablement en place, vers la fin du XIX^{ème} siècle que l'on conceptualisera véritablement l'émergence. Si Jonas qualifie ce nouveau monisme matérialiste de post dualiste, c'est parce, d'une part il n'est pas équivalent au premier monisme matérialiste pan vitaliste - il est pan mécaniste -, et

⁶ Hans Jonas – « La vie, la mort et le corps, dans la théorie de l'être » – *Le Phénomène de la vie*, Ed. De Boek Université (2001), p. 20-49

⁷ Nous y reviendrons plus loin, à la fin de cette première partie, lorsque nous aborderons le cas de la causalité descendante.

⁸ Hans Jonas – « La vie, la mort et le corps, dans la théorie de l'être » – p. 26 : « Si le dualisme fut la première grande correction apportée à l'unilatéralité du monisme animiste, le monisme matérialiste qui resta comme son résidu est alors le triomphe total et non moins unilatéral de l'expérience de la mort sur l'expérience de la vie »

d'autre part, il n'oublie pas qu'il est une réponse moderne au dualisme. C'est-à-dire que c'est un matérialisme qui n'oublie pas que la vie, même si elle reste une exception dans le monde de la nature, existe et fait partie du même monde. Derrière cette remarque, Jonas se démarque nettement de la phénoménologie husserlienne, qu'il qualifie de monisme idéaliste. Un idéalisme qui dénie au corps sa part de connaissance du monde, une connaissance non rationnelle, faite d'empirisme et d'induction.

Les débuts du concept d'émergence moderne

Ce n'est qu'à la fin du XIX^{ème} siècle avec la montée en puissance des sciences telles que la biologie et la psychologie, que le concept d'émergence a vraiment pris corps. C'est d'abord John Stuart Mill qui dans *Système de logique déductive et inductive*⁹, analyse le problème de composition des causes et montre qu'il existe deux modes possibles, l'un pour les problèmes physiques de type « mécanique » pour lesquels existent des lois causales, l'autre pour des systèmes dans les lesquels suivant la formulation aristotélicienne, le tout est plus que la somme des parties. Mill dit que ce second mode de composition des causes, qu'il nomme « hétéropathique », englobe non seulement la chimie et la biologie, mais aussi les sciences sociales et la politique. Il faudra attendre quelques années pour que les idées de Mill se mêlant à celles de l'évolutionnisme darwinien permettent d'aboutir au concept d'émergence pour les systèmes vivants. Le philosophe anglais George Henry Lewes, reprend les arguments de Mill dans son livre *Problèmes de la vie et de l'esprit*¹⁰, et il est le premier à suggérer, alors qu'il analyse le cas des « sensations », que ce mode de composition est de l'ordre d'une émergence : « *Sensations and ideas spring up in the mind as flowers spring up in the fields. We see them only when they have emerged.* »¹¹

Évolution émergente – hiérarchie des niveaux

C'est en 1921 que le philosophe, biologiste et psychologue anglais Conwy Lloyd Morgan développe, en s'appuyant largement sur les thèses du philosophe Samuel Alexander, sa thèse de l'évolution émergente dans son livre éponyme¹². Selon cette thèse,

⁹ John Stuart Mill - *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive*, Harpers & Brothers publisher, New York, 1882

¹⁰ G. H. Lewes, *Problems of life and mind* – Boston: Houghton, Osgood and Company, The Riverside Press Cambridge, 1879

¹¹ *Ibid.* – p. 17. Plus loin dans le livre, p.180, il reprendra l'exemple de la molécule d'eau qu'avait pris Mill pour l'étendre au cas des perceptions : "All the stages of a process must be completed before the feeling emerges."

¹² C. L. Morgan, *Emergent Evolution*, Williams & Norgate, London, 1923

il existe des points de rupture au niveau de l'évolution lorsqu'un certain degré de complexité est atteint. Points de rupture qui se manifestent par l'apparition de nouvelles propriétés non déductibles des propriétés antérieures et totalement imprévisibles à partir de celles-ci.

Morgan considère une réalité holistique qui part d'un niveau de base physique, commun à toute la nature, pour aboutir à un niveau psychique considéré comme le sommet de la pyramide de tout système biologique, en passant par différents niveaux de complexité croissante. De la couche de base, formée des atomes communs à la physique, « émergerait » une couche de complexité supérieure biologique, constituée d'organismes, de laquelle émergerait enfin le niveau psychique qui serait l'aboutissement final de tout organisme vivant complexe. Morgan défend une thèse moniste de l'émergence qui lui fait dire : « *Pas d'esprit sans vie. Pas de vie sans base physique.*¹³ »

Beaucoup d'autres philosophes se saisiront du concept d'émergence sous le prisme de l'évolution, entre autres James K. Feibleman, Nicolaï Hartmann et Joseph Needham.

Se démarquer du vitalisme – déclin de l'émergentisme

Les partisans de ce nouveau monisme que représente la thèse émergentiste évolutionniste veulent à tout prix se démarquer des thèses vitalistes, dont Henri Bergson a été le penseur le plus influent en Europe (Morgan mentionne *Matière et Mémoire* dans ses textes de référence). Lloyd Morgan lui-même met en garde contre cet amalgame : « *Comme il semble assuré que le fait de parler de qualités émergentes a une saveur de vitalisme, on devrait faire remarquer avec insistance que si le vitalisme connote toute chose qui ressemble à une entéléchie ou à un élan – n'importe quelle influence étrangère à la nature qui devrait être invoquée pour expliquer l'évolution physico-chimique des phénomènes de la vie – à l'opposé, le concept d'évolution émergente, loin de l'impliquer, la rejette explicitement.*¹⁴ ».

Cependant cet émergentisme des débuts sera très vite contesté par la science positiviste de cette époque, comme un cache-misère métaphysique douteux. En particulier

¹³ *Ibid.*, p.15

¹⁴ *Ibid.* p.12 – traduction libre de « *Since it is pretty sure to be said that to speak of an emergent quality of life savours of vitalism, one should here parenthetically say, with due emphasis, that if vitalism connote anything of the nature of Entelechy or Elan - any insertion into physico-chemical evolution of an alien influence which must be invoked to explain the phenomena of life - then, so far from this being implied, it is explicitly rejected under the concept of emergent evolution* »

lorsque les émergentistes évolutionnistes prétendent qu'il faut accepter que l'apparition de la vie sur terre soit « inexplicable¹⁵ ». Une assertion qui sera sévèrement critiquée, notamment par Reuben Ablowitz qui y verra là le « *défaut peut-être le plus important de toute la théorie* »¹⁶. Une remarque faite par Olivier Sartenaer qui ajoute que l'autre raison de ce déclin provisoire est liée à un manque de support empirique scientifique « *En substance, l'existence supposée d'émergents, tels la nature liquide de l'eau, la respiration cellulaire ou l'esprit humain, n'a reçu, dans le meilleur des cas, aucun support empirique, sinon a été tout bonnement réfutée par divers développements scientifiques subséquents.* »¹⁷

Soupçonnées de métaphysique obscure et de vitalisme, les théories de l'émergence vont décliner à partir des années 1930 et ne seront réactivées que vingt ans plus tard. Durant toute cette période, le courant dominant est celui d'un physicalisme optimiste qui a « *une foi de plus en plus partagée en une unification possible des sciences* »¹⁸

Mécanique quantique et réductionnisme physique

Conjointement aux développements des sciences de la vie, des sciences sociales et des sciences de l'esprit, la physique va connaître une « révolution culturelle » avec l'avènement de la physique quantique à partir des années 1925-30. L'émergence évolutionniste ne sera plus la seule à s'attaquer au réductionnisme et à l'idée d'unification de toutes les sciences.

Le physicien Erwin Schrödinger et le mathématicien Émile Borel tentent de repenser ce réductionnisme à l'aune des nouvelles sciences comme la thermodynamique et la physique quantique, et il apparaît très vite que la théorie quantique, appelons la T2, ne se laisse pas « réduire » aux lois plus générales de la mécanique classique, y compris la théorie générale de la relativité publiée par Einstein en 1916, que l'on appellera T1¹⁹. Les deux

¹⁵ Il faut entendre ici le verbe « expliquer » dans le sens de « relier un effet à une cause ». Or si l'on accepte l'idée qu'un niveau émergent présente des propriétés absolument nouvelles, non réductibles aux propriétés des éléments du niveau de base, on ne peut que rejeter toute explication de type causal.

¹⁶ Reuben Ablowitz, *The theory of Emergence*, Philosophy of Science, vol. 6, January 1939, p.14

¹⁷ Olivier Sartenaer – « Émergence » - In *La philosophie de A à Z* (<http://encyclo-philos.fr/?s=%C3%A9mergence>)

¹⁸ *ibid.*

¹⁹ Ce problème de la réduction des théories a été formalisé par H. Putnam et P. Oppenheim sous la forme suivante : « Étant donné deux théories T1 et T2, on dit que T2 est réduite à T1 si et seulement si : 1) le vocabulaire de T2 ne contient aucun des termes du vocabulaire de T1 ; 2) toutes les données observationnelles explicables par T2 sont explicables par T1 ; 3) T1 est au moins aussi bien systématisé que T2. (Normalement,

théories on bien leurs formalismes mathématiques propres (leur « vocabulaires »), mais ce qui est observable avec T2 ne l'est pas avec T1 et l'inverse est vrai aussi. Il semble bien alors que la thermodynamique et la mécanique quantique peuvent être qualifiées de « lois émergentes » comme le souligne Patrick Juignet²⁰.

Nous verrons, dans la deuxième partie de ce mémoire, que la physique quantique réserve bien d'autres surprises, comme par exemple le fait qu'elle ne s'occupe pas des mêmes « objets » que ce ceux de la physique classique.

Systèmes complexes et automates cellulaires

Mais il faudra attendre les années 1950, avec les recherches du groupe d'Alamos²¹ sur les systèmes complexes pour que l'on recommence à parler d'émergence : Von Neuman et les automates cellulaires, puis Von Forester dans les années 1960.

Durant cette période de nombreux débats seront lancés, principalement au sein de l'école de philosophie analytique américaine avec des noms prestigieux comme ceux de Willard van Quine, Hilary Putnam, Ernest Nagel, Carl Hempel, et Rudolph Carnap.

Le concept d'émergence a véritablement retrouvé ses lettres de noblesse avec la publication en 2005, du livre du physicien américain, Robert Laughlin, prix Nobel de physique en 1998, intitulé « *Un univers différent* »²².

Enfin le débat est relancé au tournant des années 1990 et 2000 autour du concept de causalité descendante, à savoir : un niveau haut peut-il à son tour influencer et modifier un niveau bas ? Ce sera notre point de départ pour ce mémoire.

T1 est plus compliquée que T2. Ce qui est acceptable, parce que la théorie réductrice explique normalement plus de choses que la théorie réduite).»

²⁰ Patrick Juignet – *Le concept d'émergence* – Philosophie, Science et Société ;

<https://philosciences.com/philosophie-generale/complexite-systeme-organisation-emergence/38-le-concept-d-emergence>

²¹ Source Wikipédia : Le Laboratoire national de Los Alamos (en anglais : Los Alamos National Laboratory (LANL), connu aussi sous les noms Los Alamos Laboratory et Los Alamos Scientific Laboratory) est un laboratoire du Département de l'Énergie des États-Unis, géré par l'université de Californie, situé à Los Alamos, dans l'État du Nouveau-Mexique.

²² Voir le numéro spécial que lui a consacré le journal La Recherche, N° 405, daté de février 2007. Voici la définition de l'émergence qu'il donne : « Par « émergence », j'entends un principe physique d'organisation : l'apparition de lois qui ne peuvent pas être déduites de principes physiques plus fondamentaux. La nature est remplie d'objets qui, par analogie, pourraient être comparés à des peintures « impressionnistes ». Rendu par Monet, un champ de fleurs suscite notre intérêt car il apparaît comme un tout « parfait ». Les taches de peinture ont néanmoins des formes aléatoires ... »

BREVE HISTOIRE DE LA CAUSALITE

Cause naturelle

Comme nous l'avions souligné en début de ce mémoire, il y a un lien entre le concept d'émergence et de celui de causalité tel qu'il apparaît avec Aristote. La première fois où Aristote parle de causalité, c'est dans son livre *Physique*. Le terme grec de l'ouvrage est « phusis » et il faut se méfier de sa traduction par le mot « physique » qui est aujourd'hui très connoté par la science physique moderne et qui est donc très réducteur par rapport à la signification grecque. « Phusis » est en effet rattaché à la racine du verbe « phuo » qui désigne l'acte d'avancer, de se lever ou encore de s'épanouir. Autant d'actions qui pourraient qualifier l'émergence. Une signification que l'on retrouve aussi dans sa traduction latine « natura » qui vient du verbe « nascor » : naître.

Dans la pensée grecque antique qui précède celle d'Aristote, la nature à l'origine était Une, composée d'un élément unique, tour à tour eau, apeiron, air et feu, puis de quatre éléments (eau, terre, air, feu), et enfin d'éléments illimités (Les atomes de Leucippe et Démocrite). Pour reprendre les mots de Lambros Couloubaritsis²³ :

« La physis de l'Un qui s'épanouit laisse place à la physis du Multiple des choses produites, une physis résiduelle, où toute chose produite devient, par nature »

Il ajoute : « l'originalité d'Aristote est d'avoir réhabilité la possibilité d'épanouissement ». En effet, dans *Métaphysique Delta, IV*, Aristote évoque l'idée d'une forme finale, en germe (un « plan organisationnel » en quelque sorte) dès le début de l'épanouissement : « *Ce qui s'épanouit à partir de quelque chose va vers quelque chose en tant qu'il s'épanouit* »

Pour ne pas trahir les idées de Platon sur un cosmos immuable, avec lesquelles il est d'accord, Aristote divise alors le monde en deux : le monde « sous la lune » où toutes les choses sont périssables et finissent par se dégrader et le monde du « ciel », le monde parfait des astres et des cercles, le monde supra lunaire. C'est l'équilibre entre ces deux mondes qui forme l'harmonie, c'est-à-dire le cosmos. Ce qui intéresse Aristote c'est la « connaissance » du monde sublunaire, celui où les choses qui nous entourent, naissent, se dégradent et finissent par périr. Pour pouvoir le faire, il démarre son ouvrage *Physique* en

²³ Aristote - *Sur la Nature (Physique II)* – trad. Lambros Couloubaritsis, Éd. Vrin, Paris (1991)

faisant de cette discipline une des trois sciences théoriques, avec la théologie et la mathématique :

« Cette nouvelle science s'occupe de l'étant (to on) dans son rapport au mouvement et donc aussi à l'étance²⁴ (oussia) en tant qu'elle s'épanouit fréquemment conformément à sa raison d'être »

Au début du chapitre 3 du Livre II, Aristote déclare :

« Dans la mesure en effet ou [...] nous ne pensons pas connaître chaque chose avant d'en avoir établi le pourquoi (ce qui signifie établir la cause première). »

Ainsi, pour Aristote, la tâche de la physique est clairement définie : elle doit répondre au « pourquoi » des choses. Nous pouvons remarquer qu'il y a là une différence fondamentale avec les sciences mécanistes, positivistes, contemporaines qui ont abandonnées l'idée du « pourquoi » et se sont assignées pour tâche de se limiter au « comment » des choses, c'est à dire comment les effets sont reliés entre eux et non plus ce qui les a produits.

Expliquer, pour Aristote, c'est plus que relier les effets entre eux, c'est relier un effet à sa cause, c'est répondre à la question du pourquoi²⁵ et remonter de proche en proche à la cause première, qui doit être cause de soi (causa sui). Sans plus d'explications, parce qu'elles sont déjà mentionnées dans les traités classiques, sauf la cause finale qui est son véritable apport, Aristote expose les quatre causes dans l'ordre suivant²⁶ :

- 1) **la cause matérielle** : ce par quoi une chose « devient et qui lui appartient de façon immanente ». Il cite comme exemple, l'airain de la statue et l'argent de la coupe,

²⁴ Lambros Couloubaritsis justifie l'usage du mot étance plutôt que celui de substance ou d'essence, dans son index des termes techniques. « Substance » suppose une interprétation réductionniste d'une matière qui se tiendrait « sous » tout être et « essence » renvoie trop au monde immatériel des idées platoniciennes. Le mot « étance », dérivé du vieux français « estance », équivalant à « se tenant », lui paraît plus neutre.

²⁵ On peut noter qu'en langue anglaise, à la question Why ? (pourquoi ?) on répond « Because » et « be cause », en français, c'est « être cause ». Autrement dit, la cause c'est ce par ce qu'une chose advient [parce que] : ce par quoi une chose advient.

²⁶ Aristote - *Sur la Nature (Physique II)* – trad. Lambros Couloubaritsis, Éd. Vrin, Paris (1991) – pp. 50-51 ou [194b16 à 195a1]

- 2) **La cause formelle** : la raison d'être propre à la chose « *et des genres qui la concerne* ». Par exemple, la cause de l'octave musicale, n'est autre que le « *rapport de deux à un* »²⁷.
- 3) **La cause efficiente** : « *ce d'où vient le principe premier du changement ou du repos* ». Aristote en donne quelques exemples « *celui qui a délibéré est cause (de l'action), le père aussi de l'enfant et, en général, ce qui produit de ce qui se produit et l'agent du changement de ce qui change* ». Il semble bien, avec ces exemples, que derrière la cause d'un changement, il y ait nécessairement une « volonté » qui, par conséquent ne peut appartenir qu'à un agent « animé », c'est-à-dire pourvu d'une âme.
- 4) **La cause finale** : « *cause au sens de fin... par exemple, la cause de la promenade est la santé* ». Autrement dit, je me promène en vue d'améliorer ma santé.

Dans son livre, Aristote ne revendique l'invention que de la cause finale, les trois autres causes étant héritées d'une tradition plus ancienne. Le mieux, pour synthétiser ces quatre causes, nous dit John Stuart, c'est de prendre l'exemple classique de la maison :

« Pour construire une maison, la première cause est la cause matérielle : les briques, le ciment, le bois et tous les matériaux qui sont nécessaires pour la fabriquer. On comprend pourquoi sans ces matériaux, pas de maison. La deuxième cause, efficiente, ce sont tous les ouvriers qui gâchent le ciment, montent les briques, agencent le bois et assurent tout le processus de construction. La cause formelle est le plan de l'architecte qui, ici, intervient dans l'ordre chronologique, avant les ouvriers, ce qui préside à l'agencement des causes matérielles et efficientes pour que le résultat soit effectivement la maison que l'on souhaite. Souhait qui constitue le quatrième type de causalité qui va être au centre et qui est crucial pour nous : la cause finale ou fonction, le fait d'être un lieu où des êtres humains vont pouvoir habiter. »²⁸

²⁷ C'est un exemple assez surprenant de cause formelle et pas des plus évident, mais qui a l'avantage (à ses yeux en tout cas) d'avoir une argumentation mathématique : le passage d'une octave musicale à la suivante, se fait en doublant la tonalité.

²⁸ John Stuart - (Costech, Université de Technologie de Compiègne) – *La physique, la biologie et la clôture sous causalité efficiente* – in science - Causalité et finalité, Septième rencontre « Physique et interrogations fondamentales » 22 mai 2002, p. 71 ; Édité par Gilles Cohen-Tannoudji et Émile Noël

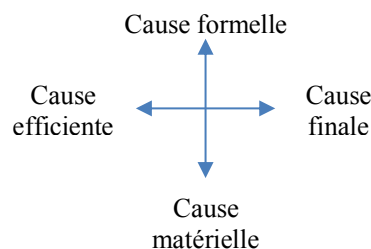
Nous reviendrons plus loin, sur cette dernière remarque de John Stuart à propos de la cause finale. À ce stade, ce qu'il est important de retenir, c'est que la notion de cause est essentiellement « naturelle » : la cause et son effet « existent » et sont du même « monde de la nature ». Elles possèdent donc, chacune, la même valeur ontologique.

Cause divine

En premier lieu, nous pouvons remarquer qu'il est possible de grouper ces quatre causes en deux couples :

- Un couple hylémorphique composé de la cause matérielle et de la cause formelle et dont l'agent est le plus souvent un être inanimé.
- Un couple intentionnel initial/final avec les causes efficiente et finale et dont l'agent est le plus souvent un être animé – l'homme - ou, en tout cas, un être intentionnel, une subjectivité²⁹.

On peut synthétiser ces quatre causes sous la forme d'une croix avec un axe horizontal spatiotemporel où se situent, à gauche la cause efficiente et, à droite la cause finale ; et un axe vertical avec en bas, la cause matérielle et en haut, la cause formelle. La verticalité suggérant une transcendance où la cause formelle serait l'« idée » de la forme tandis que la cause matérielle serait la réalisation matérielle de cette forme. Une représentation hylémorphique de l'âme héritée d'Aristote.



La tétrade aristotélicienne sera très commentée par les médiévaux et va recevoir ses premiers coups de boutoir avec l'arrivée des sciences modernes.

Dans un premier temps, avec la chrétienté dominante en occident, la cause finale va sortir du domaine naturel pour devenir le « dessein » de Dieu dans une logique dans

²⁹ Pour Aristote, la cause efficiente est celle qui permet le mouvement et il n'est pas anodin de constater qu'il ait choisi, dans sa *Physique*, comme exemple de cause efficiente, celui d'un père qui donne naissance à son fils. C'est à dire de choisir un cas où l'agent est un être animé, plutôt qu'inanimé. Ce n'est que par la suite, avec l'apparition des sciences modernes de Galilée et de Newton, que l'agent de la cause efficiente sera exclusivement un être inanimé, un objet. Seule la cause finale restera majoritairement attribuée à un être animé.

laquelle le monde et tous les êtres qui l'habitent ont été créés par Dieu. Parallèlement, à partir de la Renaissance les premiers scientifiques *modernes*, Kepler, Copernic puis Galilée, vont se passer de la notion de cause finale pour expliquer le monde qu'ils observent. Les mathématiques devenant « le langage de la nature », il suffit que l'homme apprenne ce langage pour qu'il comprenne la nature. Nul besoin de Dieu pour ce type de connaissance.

L'intentionnalité étant devenue celle du sujet pensant, causes formelle et matérielle ne peuvent prétendre à l'objectivité, puisqu'elles sont toutes deux définies par le sujet. Quant à la cause finale, elle est sortie du domaine naturel et ne saurait donc être utile aux hommes pour expliquer un monde qui a quitté tous ses oripeaux organiques pour devenir un vaste monde mécanique.

Progressivement, ne restera donc plus que la cause efficiente, cause par contact d'un monde mécanique que conceptualiseront Descartes et Malebranche et où Dieu est cantonné au rôle de grand horloger.

Cause illusoire et scepticisme

David Hume, en héritier de l'empirisme de Locke, va montrer que la perception sensorielle, comprise comme pure réceptivité passive, ne peut pas être la source de l'action causale. À la question « d'où vient le fait que l'on puisse énoncer des relations causales nécessaires ? », sa réponse, qui exclut toute intervention divine, est que cela nous vient de deux facteurs empiriques : a) la contiguïté spatiotemporelle d'événements³⁰, b) la fréquence d'apparition de ces événements, ou régularité.

C'est alors le sujet pensant qui interprète ces faits comme étant le résultat d'une action causale. Il s'agit d'une « illusion » qui est due, pour Hume, au fait que nous sommes enclins à faire des associations d'esprit en permanence, et que l'habitude et la répétition de ces phénomènes nous confortent dans cette illusion. Comme le dit Jean-Michel Besnier : *« La causalité relève donc d'un mécanisme de croyance. Ainsi, la science résulte des propriétés de la nature humaine, et non pas de la réalité elle-même ou de quelque garantie divine. Toutes les difficultés ne sont pas résolues, loin s'en faut, mais on comprend que le*

³⁰ Hume veut remettre en cause le rationalisme classique pour qui l'association nécessaire de la cause est ramenée à une simple opération logique : A implique B. Pour lui, au contraire, une cause A étant donnée et observée empiriquement (par exemple, le refroidissement de l'eau), il est impossible de déduire son effet B de manière nécessaire (la transformation de l'eau liquide en eau solide). La relation que les humains établissent ne se fait que par l'association de deux faits empiriques contigus. On parle d'*associationnisme*.

*scepticisme va désormais miner l'entreprise scientifique, puisque la recherche de relations causales objectives devient vaine.*³¹ »

Catégories de l'entendement – cause épistémique

En réaction aux thèses empiristes de David Hume, dont il dit qu'il l'a réveillé de son sommeil dogmatique, Emmanuel Kant veut absolument « sauver » la science du scepticisme humien. Pour lui, il ne s'agit pas d'une illusion de l'esprit : il y a, au niveau de l'espèce humaine, des catégories de qualité, de quantité, de relation ou de modalité, qui préexistent dans l'esprit et qui permettent à chaque individu de pouvoir « construire » le lien de causalité à travers nos expériences. Voici comment Kant le dit dans ses *Prolégomènes* : « *Les concepts de l'entendement pur n'ont donc aucune signification s'ils dépassent les objets de l'expérience et sont appliqués aux choses en soi (noumena). Ils ne servent pour ainsi dire qu'à épeler les phénomènes afin de les lire sous forme d'expérience* »³². Pour lui, ce sont bien les catégories, ces concepts de l'entendement, qui nous permettent d'« épeler » les effets et les causes des objets naturels auxquels nous avons accès. Car, pour Kant, nous n'avons pas accès à toute la nature : les choses en soi, les noumènes, nous échappent.

Quoiqu'il en soit, sa théorie des catégories de l'entendement permet de réhabiliter la science et de sortir de l'arbitraire et du scepticisme humien : il y a bien une rationalité à attribuer une cause à son effet. La contrepartie de cette réhabilitation de la cause est qu'elle sort complètement du champ de la nature pour rentrer dans celui de l'entendement humain et devenir ainsi purement « épistémique » : parler de relations causales permet d'expliquer et par extension d'avoir accès à la connaissance.

Mort de la cause épistémique – Le positivisme scientifique

Mais avec le développement des sciences au XIX^{ème} siècle, même la nature épistémique de la cause pose problème. Pour certains philosophes, comme Auguste Comte, la théorie kantienne est suspecte d'une métaphysique qui ne permettrait pas d'accéder à une pensée positive des sciences, à commencer par les sciences physiques. On doit pouvoir

³¹ Jean-Michel Besnier– *La causalité entre métaphysique et science* - Causalité et finalité, Septième rencontre « Physique et interrogations fondamentales » 22 mai 2002, p. 15 ; Édité par Gilles Cohen-Tannoudji et Émile Noël.

³² E. Kant - *Prolégomènes à toute métaphysique future*, §30, Deuxième partie : « Du problème capital de la philosophie transcendantale – comment la physique pure est-elle possible ? »

expliquer les phénomènes naturels sans passer par des entités abstraites comme les catégories de l'entendement.

Auguste Comte, dans ses *Cours de philosophie positive*, pense pouvoir établir une loi d'évolution de la connaissance humaine en trois étapes, qui sans discréditer l'avancée de la pensée kantienne, la voit comme une étape « transitoire » : « *Chaque branche de nos connaissances, passe successivement par trois états théoriques différents : l'état théologique, ou fictif ; l'état métaphysique, ou abstrait ; l'état scientifique, ou positif. En d'autres termes, l'esprit humain, par sa nature, emploie successivement dans chacune de ses recherches trois méthodes de philosopher, dont le caractère est essentiellement différent et même radicalement opposé : d'abord la méthode théologique, ensuite la méthode métaphysique, et enfin la méthode positive. De là, trois sortes de philosophies, ou de systèmes généraux de conceptions sur l'ensemble des phénomènes, qui s'excluent mutuellement : la première est le point de départ nécessaire de l'intelligence humaine ; la troisième, son état fixe et définitif ; la seconde est uniquement destinée à servir de transition.*³³ »

Comment parvenir à cette troisième étape de la connaissance ? En abandonnant, nous dit Comte, l'idée d'absolu, c'est-à-dire l'idée d'une cause de la cause. Pour Comte, la science doit se contenter de trouver les lois qui régissent les effets entre eux : « *Enfin, dans l'état positif, l'esprit humain reconnaissant l'impossibilité d'obtenir des notions absolues, renonce à chercher l'origine et la destination de l'univers, et à connaître les causes intimes des phénomènes, pour s'attacher uniquement à découvrir, par l'usage bien combiné du raisonnement et de l'observation, leurs lois effectives, c'est-à-dire leurs relations invariables de succession et de similitude. L'explication des faits, réduite alors à ses termes réels, n'est plus désormais que la liaison établie entre les divers phénomènes particuliers et quelques faits généraux, dont les progrès de la science tendent de plus en plus à diminuer le nombre*³⁴ ». Le positivisme renonce à la question du *Pourquoi*, pour ne s'attacher qu'à la question du *Comment*.

L'ensemble des causes efficientes se clôt de lui-même dans l'ensemble des faits observables par les sciences positives.

³³ Auguste Comte - *Cours de philosophie positive*, 1^{ère} Leçon, t. IV-VI, Paris, 1908. Édition identique à la première, parue au commencement de juillet 1830.

³⁴ Auguste Comte - *Cours de philosophie positive*, 1^{ère} Leçon, t. IV-VI, Paris, 1908. Édition identique à la première, parue au commencement de juillet 1830.

Retour de la cause finale et apparition du vitalisme

Si ce positivisme des sciences satisfait bien la physique classique, essentiellement mécanique et où, effectivement, on peut expliquer les enchaînements des faits observables (les effets) par des lois mathématiques qui en définissent les structures invariables, il ne satisfait, par contre, pas du tout les sciences naissantes que sont la chimie, puis la biologie et enfin, à la fin du XIX^{ème} siècle, les sciences sociales et les sciences de l'esprit.

Le premier philosophe à repenser le problème des causes est John Stuart Mill qui en 1843, dans son livre *Système de Logique*³⁵, s'intéresse, au chapitre VI, aux compositions de causes. Plusieurs causes, ou antécédents, pouvant être à l'origine d'un effet, il note qu'il existe deux classes de phénomènes naturels :

- I. Les phénomènes pour lesquels on connaît la loi qui relie l'effet aux causes, loi qui reste la même que ce soit pour une cause isolée ou une combinaison de causes. C'est, nous dit-il, le cas des phénomènes mécaniques : « *This condition is realized in the extensive and important class of phenomena commonly called mechanical, namely the phenomena of the communication of motion (or of pressure, which is tendency to motion) from one body to another.* ». Mill qualifie le mode de cette classe de phénomène de « composition des causes³⁶ », ou encore de mode de causes « homopathiques ». C'est, nous dit Mill, le cas général de la nature, l'autre classe étant plus exceptionnelle : « *The former case, that of the Composition of Causes, is the general one; the other is always special and exceptional.* »
- II. Pour identifier l'autre classe de phénomènes naturels, Mill commence par évoquer le cas bien connu en chimie, nous dit-il, de la molécule d'eau dont les propriétés ne peuvent pas être déduites de celles de ses constituants que sont les atomes d'hydrogène et d'oxygène « *Not a trace of the properties of hydrogen or of oxygen is observable in those of their compound, water.* ³⁷ ». Il prend ensuite des exemples

³⁵ John Stuart Mill – A system of logic, ratiocinative and inductive – Book III, Chapter VI On the composition of causes, pp. 458-466; Harpers and Brothers Publisher, Franklin Square, 1882.

³⁶ Ce terme de « composition » est directement emprunté à la mécanique et à la « composition des forces » : le vecteur force résultant est la composée des deux forces orthogonales, la force tangentielle et la force radiale, considérées comme les « causes » de la force résultante.

³⁷ Cet exemple de l'eau dont les caractéristiques « émergent » de celles de ses constituants que sont les atomes d'hydrogène et d'oxygène, sera longtemps repris dans la littérature sur l'émergence jusqu'à ce que la chimie quantique permette d'établir la loi causale qui relie les éléments atomiques de bases au système moléculaire de l'eau. Les physicalistes modernes qualifieraient donc ce mode causal d'homéopathique pour reprendre la terminologie proposée par John Stuart Mill. Cela dit, nous verrons, dans la section sur

en biologie pour montrer qu'il est n'est pas possible de déduire « les lois de la vie » à partir des lois qui gouvernent ses constituants. Enfin, nous dit-il, on retrouvera des cas similaires dans le domaine des phénomènes de la pensée, et même dans les phénomènes sociaux et politiques : « *This will be found equally true in the phenomena of mind; and even in social and political phenomena, the results of the laws of mind.* »

Mill a bien identifié que la classe des phénomènes « hétéropathiques » ne peut pas s'expliquer sans réhabiliter l'idée d'une cause qui ne soit pas une simple cause efficiente et qui expliquerait comment les parties d'un organisme vivant forment un « tout » de cet organisme qui est plus que leur simple addition. Mill a en tête les sciences de la vie : « *To whatever degree we might imagine our knowledge of the properties of the several ingredients of a living body to be extended and perfected, it is certain that no mere summing up of the separate actions of those elements will ever amount to the action of the living body itself.* »³⁸

Mais en réhabilitant le concept d'une cause qui ne serait plus simplement épistémique, on a réouvert la boîte de Pandore des causes supra-mondaines dans laquelle s'engouffrera le mouvement vitaliste.

Dépendance Fonctionnelle

Après Kant, la question qui hante le concept de cause est de savoir s'il faut s'en tenir, comme il le préconise, à une nature exclusivement épistémique de la cause ou bien s'il existe, dans la nature, de véritables causes – des causes réelles –, indépendamment du fait que l'on puisse les utiliser ou non à des fins de démonstration scientifique.

Au début du XXème siècle, Bertrand Russell, dans son article « *On the Notion of Cause* »³⁹, déclarait que le concept de « cause », trop lié à toutes sortes d'associations trompeuses, devrait être banni du vocabulaire scientifique : « *In the following paper I wish, first, to maintain that the word "cause" is so inextricably bound up with misleading associations as to make its complete extrusion from the philosophical vocabulary desirable*

l'émergence, que les recherches récentes du chimiste Pier Luigi Luisi, contestent à leur tour cette vision réductionniste.

³⁸ John Stuart Mill – A system of logic, ratiocinative and inductive – Book III, Chapter VI On the composition of causes, p. 460; Harpers and Brothers Publisher, Franklin Square, 1882.

³⁹ Bertrand Russell – *On the Notion of Cause* - Proceedings of the Aristotelian Society, New Series, Vol. 13 (1912 - 1913), pp. 1-26

⁴⁰. Pour Russell, très au fait de la physique théorique de son temps, le concept de causalité doit progressivement être remplacé par celui de *Dépendance Fonctionnelle*.

Avec le concept de Dépendance Fonctionnelle (FD), Russell veut sortir du champ ontologique des causes en « formalisant » la notion et en se débarrassant de l'ancienne terminologie. Une Dépendance Fonctionnelle sur un schéma de relation R , est une expression formelle de la forme $R : X \rightarrow Y$ (ou simplement $X \rightarrow Y$ lorsque R est implicite), avec $X, Y \subseteq R$.

Le mot « cause » contient en effet, de par son étymologie et son sens implicite, une connotation métaphysique : celle d'un événement qui posséderait une « *volonté* » d'agir. Russell dénonce cette croyance qu'un événement naturel soit « activement » responsable d'un autre événement naturel qui suit, comme si l'évènement possédait une volonté propre : « *The belief that causes "operate" results from assimilating them, consciously or unconsciously, to volitions.*⁴¹ ».

Comme le fait remarquer Max Kistler⁴² « Cette critique ne remet pas en cause la réalité de la causalité en elle-même, mais seulement le bien-fondé des attributions de causalité à la nature inanimée. » et Russell le sait bien⁴³ qui avance d'autres critiques, en particulier l'argument sous-jacent de régularité, souvent utilisé pour définir les causes suivant l'adage que « les mêmes causes entraînent les mêmes effets ».

Cet argument de « régularité » avait déjà été utilisé par Hume. Pour Russell, cette loi générale de la causalité se trouve contredite dès que l'on a à faire à des événements macroscopiques complexes : plus la description d'un événement complexe s'affine, moins il semble probable que cet événement particulier puisse se répéter. Ce que rejette Russell, c'est le concept de causalité « générique », c'est-à-dire une loi causale trop vague dans laquelle peut s'inclure une multiplicité de lois singulières : « *All such uniformities, as we saw, depend upon a certain vagueness in the definition of the "events." That bodies fall is*

⁴⁰ *Ibid*; loc cit., p.1

⁴¹ *Ibid.* loc cit., p. 11

⁴² Max Kistler– *La causalité dans la physique contemporaine* – Intellectica, 2004/1, 38, p. 140

⁴³ *Ce n'est pas tant la réalité de certaines relations causales que remet en cause* Bertrand Russell – elles existent bien, notamment en physique mécanique -, mais c'est l'élargissement abusive de ce type de relations à des associations qui font intervenir l'interprétation humaine.

*a vague qualitative statement; science wishes to know how fast they fall. This depends upon the shape of the bodies and the density of the air.*⁴⁴.

Cependant, Russell ne nie pas qu'il existe des régularités observables dans la vie quotidienne, et que l'on puisse se servir du principe de causalité comme d'une *aide pratique* à la réflexion notamment pour les sciences qui n'ont pas atteint encore leur pleine maturation : « *I also do not deny that the observation of such regularities, even when they are not without exceptions, is useful in the infancy of a science*⁴⁵ ».

Causalité nomologique-déductive

Si l'on rapproche la notion de loi avec celle de régularité, alors Hume est le premier promoteur de la causalité nomologique : dire d'un événement *c* qu'il est la cause d'un événement *e* revient à dire qu'il existe une régularité qui fait que, le plus souvent, lorsqu'un événement *c* se produit, il est suivi d'un événement *e*. Par exemple : chaque fois que le fermier lui apporte à manger, la dinde se précipite vers lui. Mais il se peut qu'un jour elle finisse par douter des bonnes intentions du fermier et décide de s'enfuir à la veille de Noël.⁴⁶

Si maintenant on identifie une « loi universelle de la nature » à une régularité, on peut reformuler l'analyse nomologique de la manière suivante : dire d'un événement *c* qu'il est la cause d'un événement *e* revient à dire qu'il existe une loi de la nature garantissant que chaque fois qu'un événement *c* se produit, il est suivi d'un événement *e*.

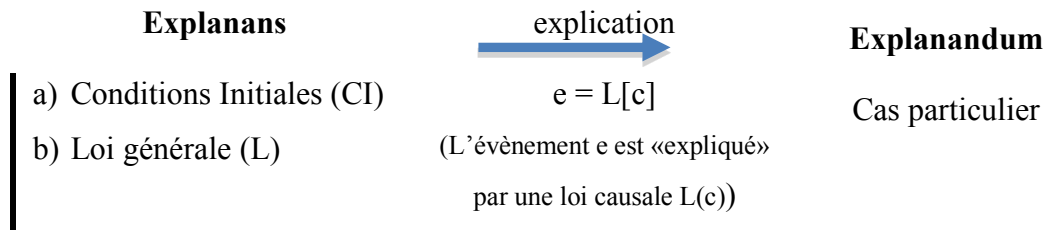
Le modèle dit « nomologique-déductif » (en abrégé D-N), encore appelé modèle « hypothético-déductif », relie un « Explanans⁴⁷ » qui contient des prémisses - les Conditions Initiales -, à un « Explanandum » obtenu à partir d'une loi de la nature *L*.

⁴⁴ Bertrand Russell – *On the Notion of Cause* - Proceedings of the Aristotelian Society, New Series, Vol. 13 (1912 - 1913), p. 8

⁴⁵ *Ibid.* p. 8

⁴⁶ Il s'agit là d'une variante, sous forme de clin d'œil, de la parabole de Bertrand Russell quand il dénonce les défauts de la pensée inductive.

⁴⁷ *Explanandum* : ce qui est à expliquer ; *Explanans* : ce qui explique



Les lois jouent le rôle englobant dévolu aux principes premiers dans la « démonstration » : on « explique » en montrant que les phénomènes examinés se comportent comme des cas particuliers relativement à une ou plusieurs lois.

Prenons par exemple, une loi générale du type : « Toutes les fois que l'on porte de l'eau à ébullition, le thermomètre indique 100 degrés Celsius ». Il s'agit là d'une loi générale et il existe bien une « loi de la nature » qui permet de relier le point d'ébullition de l'eau à l'indication de 100 °C du thermomètre. C'est le physicien Émile Clapeyron qui, en 1834, propose des relations permettant de relier les variables macroscopiques pression P et température T et de tracer le diagramme pression-température de l'eau.

Mais cette loi comporte des conditions initiales, comme la pression atmosphérique et la pureté de l'eau. Ce que montre la loi de Clapeyron, c'est qu'il n'existe pas de point d'ébullition constant, que cela dépend à la fois de la pression exercée sur le liquide et de la pureté de l'eau. La cause « l'eau portée à ébullition », va produire un effet « température de l'eau » et cet effet sera un cas particulier qui dépendra de la pression atmosphérique de l'endroit où l'on pratique l'expérience et de la pureté de l'eau qui sera utilisée pour l'expérience. Les différents cas particuliers sont « expliqués » par la loi de Clapeyron.

Cette théorie nomologique-déductive a été adoptée, pour une large part par les philosophes de la tradition de l'empirisme logique comme Carl Hempel et Paul Oppenheim, ou ceux du cercle de Vienne, comme Rudolf Carnap. Pour la plupart, ils identifient l'explication du modèle D-N à l'explication causale. Cependant, dans les années 1965-1970, Hempel comme Carnap reviendront sur leurs premiers jugements et considéreront un certain nombre de raisons qui s'opposent à la théorie D-N.

COMMENT DEFINIR L'ÉMERGENCE ?

Olivier Sartenaer⁴⁸ donne une liste non exhaustive des domaines scientifiques qui ont recours aujourd'hui au concept d'émergence dont voici un aperçu :

- **[Mécanique quantique non relativiste]** L'intrication quantique – nom donné à l'enchevêtrement de deux systèmes corrélés dont il n'est pas possible de décrire les états individuels – est parfois présentée comme le cas archétypique d'émergence en physique. Voir : Teller 1992 ; ou Humphreys 1997.
- **[Théorie du chaos]** La nature hautement non-linéaire de certains phénomènes, notamment ceux dits « chaotiques », est souvent exploitée pour affirmer l'existence de propriétés émergentes, en lien avec l'idée d'imprédictibilité. Voir : Newman 1996 ; ou Scott 2007.
- **[Thermodynamique]** L'émergence peut être associée aux processus d'auto-organisation de structures dissipatives, comme par exemple les cellules convectives dites « de Bénard » ou la réaction de Belousov–Zhabotinsky. Voir : Nicolis et Prigogine 1977 ; ou, plus récemment, Bishop 2008.
- **[Chimie organique et biologie moléculaire]** La transition entre chimie prébiotique et biologie, théâtre de l'« émergence de la vie », est aujourd'hui encore un lieu propice pour l'émergentisme, dans la lignée des racines historiques du mouvement. Pour des traitements récents, voir : Luisi 2006 ; ou Malaterre 2010.
- **[Biologie cellulaire]** Le fonctionnement de la cellule (et plus généralement de tout organisme vivant) est souvent conçu comme émergeant d'un substrat matériel sous-jacent, notamment dans la mesure où il implique de nombreuses boucles de rétroaction causale, conférant au « tout » une place déterminante dans la dynamique du système. Voir : Boogerd *et al.* 2005 ; ou Denton *et al.* 2013.
- **[Biologie évolutionniste]** Le statut d'émergent est parfois attribué à certaines adaptations ou innovations évolutionnaires. Voir : Huneman 2008 ; ou Reid 2009.
- **[Psychologie et neurosciences]** Dans ce contexte très large sont rassemblées toutes les contributions qui suggèrent que l'esprit ou la conscience émergent d'une structure matérielle sous-jacente, probablement le système nerveux central de certains êtres vivants. C'est certainement ici que la littérature émergentiste est la plus prolifique et diversifiée. Pour une défense de l'émergence de la conscience, voir : Chalmers 1996 ; ou Vision 2011. Pour une défense plus générale de l'émergence de l'esprit, voir : O'Connor 2000 ; ou Lowe 2008.
- **[Sociologie]** Dans ce contexte, la question de l'émergence se pose essentiellement sous la forme : une société (ou une institution sociale particulière) est-elle plus que la somme des individus qui la composent (ou qui y participent) ? Voir : Sawyer 2005 ; ou Elder-Vass 2010.
- **[Écologie]** Depuis l'avènement de l'écologie scientifique, la question de la dynamique mutualiste des écosystèmes et de leurs composants se pose en des termes holistes et, par extension, émergentistes. Voir Bergandi et Blandin 1998 ; ou Nielsen et Müller 2000.
- **[Sciences computationnelles et vie artificielle]** Bien que les émergentistes entendent généralement exemplifier l'émergence au sein de certains phénomènes mondains, dont la liste dressée jusqu'à présent donne un aperçu non limitatif, il est à noter qu'une autre perspective où l'émergence se retrouve souvent convoquée

⁴⁸ Olivier Sartenaer – « Émergence » - In *La philosophie de A à Z* (<http://encyclophilo.fr/?s=%C3%A9mergence>)

consiste en l'emploi de modèles ou de simulations destinés à représenter, expliquer ou prédire de tels phénomènes. Les sciences computationnelles constituent ainsi un théâtre récent où la question de l'émergence se pose, par exemple dans le contexte de réseaux d'automates cellulaires comme le « jeu de la vie » de Conway. Voir à cet égard : Kauffman 1984 ; ou Bedau 1997. Sur les relations plus larges entre émergence et vie artificielle, voir : Cariani 1991 ; ou Ronald *et al.* 1999.

Compte-tenu de la variété des disciplines qui utilisent aujourd'hui le concept d'émergence, il serait vain de chercher une définition unique qui satisfasse tout le monde. Mais avant d'essayer de définir le concept d'émergence, posons la question de savoir pourquoi le concept de cause ne suffit pas ?

Pourquoi un nouveau concept ?

Comme nous avons pu le voir dans la section précédente, l'histoire de la causalité a subi de nombreuses transformations, passant d'une causalité purement naturelle à une causalité surnaturelle, puis à une causalité purement épistémique. Cependant, elle a gardé une constante : celle de servir une explication discursive linéaire en argumentant les étapes successives. Elle est donc utile dans de très nombreuses classes de problèmes, et principalement dans le domaine des sciences.

Le concept de causalité pose cependant un problème qui paraît insoluble dès que l'on passe à des systèmes complexes, c'est à dire des systèmes regroupant un grand nombre d'éléments de base qui, interagissant entre eux, semblent produire des propriétés nouvelles à un niveau d'échelle supérieur. En effet, seulement deux attitudes extrêmes semblent se dessiner si on suit le principe de causalité :

- 1) Une attitude moniste réductionniste qui considère que tous les niveaux se ramènent à un niveau de base ultime constitué de particules de matière physique ;
- 2) Une attitude dualiste spiritualiste qui considère qu'il existe un niveau supérieur ultime, le plus souvent de nature psychique, susceptible à son tour de produire des effets sur les niveaux inférieurs et qui par conséquent serait doué d'une existence propre. Il paraît en effet difficilement concevable de « produire » quelque chose à partir de rien.

Face aux problèmes que posent les systèmes complexes, le concept de causalité se présente comme un concept disjonctif du même ordre que celui de la figure de canard-lapin

de Jastrow. Il ne permet pas de conceptualiser, de par sa nature disjonctive clivante, les problèmes liés à l'apparition de propriétés nouvelles, apparemment sans rapport avec celles des niveaux inférieurs.

Un concept médiateur aux interprétations multiples

Comme le dit Michel Bitbol, le concept d'émergence a été inventé précisément pour trouver une alternative médiatrice aux deux formes extrêmes d'ontologie proposées par le concept de causalité : « *Après tout, le concept d'émergence a été inventé pour trouver un compromis satisfaisant entre deux ontologies extrêmes.*⁴⁹ »

Un cas typique de système complexe est celui des systèmes « vivants » qui ne peuvent pas se réduire à un enchaînement causal de type mécanique. Il n'est donc pas étonnant que le concept d'émergence ait pris forme avec la naissance des sciences chimiques et biologiques. Dans le cas de la biologie, l'émergence peut se définir comme une relation qui se noue entre un Tout (T) - la cellule-, à ses Parties (P) - les molécules chimiques. On peut alors exprimer l'émergence par deux conditions :

- i) T dépend de {Pi} et que malgré cela,
- ii) T est irréductible à {Pi}.

Mais on peut étendre le concept d'émergence à d'autres classes de phénomènes où la notion de parties, ou d'objets, n'est pas pertinente, comme celui de l'émergence de la conscience. Dans ce cas, une formulation plus générale est nécessaire, ne faisant intervenir que le niveau bas, ou niveau de Base (B) et le niveau haut, ou niveau Émergent (E) :

- i) E dépend de B et malgré cela,
- ii) E est irréductible à B ».

Cette dernière formulation, nous dit Olivier Sartenaer, « *est neutre quant à la nature exacte des relata de l'émergence, qui peuvent tout aussi bien être des objets (comme des tous et des parties), mais aussi des propriétés, des lois, des processus, des pouvoirs causaux, etc. Tout ce qui est d'emblée requis pour l'émergence, c'est que la relation entre E et B allie (i) dépendance et (ii) irréductibilité, dans l'esprit du refus (i) de la dichotomie et (ii) de la pure identité.*⁵⁰ »

⁴⁹ Michel Bitbol - *Ontology, Matter and Emergence*. - Phenomenology and the Cognitive Sciences, 6, Issue 3, 293-307, 2007.

⁵⁰ Olivier Sartenaer - « Émergence » - In *La philosophie de A à Z* (<http://encyclophilo.fr/?s=%C3%A9mergence>)

Au refus des deux extrêmes proposés par le concept de causalité - identité ou dichotomie -, le concept d'émergence lui substitue une relation de dépendance et une irréductibilité du niveau émergent par rapport au niveau de base.

Mais comme nous avons pu le constater à travers cette brève histoire de l'émergentisme, ce concept médiateur autorise de multiples interprétations qui couvrent un large spectre entre les deux extrêmes que sont le monisme matérialiste d'une part, et le dualisme ontologique d'autre part. Ce que Michel Bitbol résume en ces termes « *L'émergentisme penche vers le monisme matérialiste lorsqu'il considère le comportement de niveau haut comme un symptôme superficiel qui n'a rien à voir avec les processus réels qui interviennent au niveau bas (c'est le point de vue de la « survenance »).* À l'opposé, l'émergentisme penche vers le dualisme lorsqu'il attribue aux propriétés émergentes une certaine existence ontologique, avec une certaine puissance causale propre. »⁵¹

Émergence faible et émergence forte

Afin de pouvoir dialoguer sur ce thème, les auteurs, sous l'impulsion notamment du philosophe américain Mark Bedau et de son article de 1997 *Émergence faible*⁵² ont eu recours à cette dénomination pour différencier les deux types extrêmes d'émergence. L'attribut « faible » ou « fort » se faisant par rapport à l'ontologie supposée du niveau supérieur : a) l'émergence est qualifiée de « faible » si l'ontologie du niveau supérieur est considérée comme faible, b) elle est qualifiée de forte lorsqu'on considère une ontologie forte du niveau supérieur.

L'émergentisme des débuts, celui développé par Lloyd Morgan et Samuel Alexander, est un émergentisme qualifié de *nominal* dans la littérature⁵³. Un émergentisme selon lequel le niveau supérieur n'est considéré que comme un « artifice de langage ». Il s'agit d'une conception résolument moniste et substantialiste, qui veut se démarquer le plus possible des thèses vitalistes, comme celles d'Henri Bergson. Seul le niveau de base, de nature physique (composé d'atomes) a une véritable « existence » ; c'est dans ce sens que cette interprétation est qualifiée d'ontologique ; le niveau supérieur n'est perçu que comme la

⁵¹ Bitbol, Michel - *Ontology, Matter and Emergence*. - Phenomenology and the Cognitive Sciences, 6, Issue 3, 293-307, 2007.

⁵² Mark A. Bedau – *Weak Emergence* - Philosophical Perspectives: Mind, Causation, and World, Vol. 11 (Malden, MA: Blackwell, 1997), pp. 375-399.

⁵³ Mark A. Bedau, M. A. (2008). *Is weak emergence just in the mind?* Minds & Machines, 18:443–459

couche externe artificielle du niveau de base : son ontologie est extrêmement faible, pour ne pas dire inexistante. Avec le développement des sciences biologiques et des sciences neurocognitives, il est cependant apparu qu'il n'était pas possible de remonter de manière évidente au niveau de base, ou plus exactement que la complexité des interactions au niveau de base était telle qu'on ne pouvait pas en déduire des lois explicatives du niveau supérieur d'organisation. C'est cette particularité que reprend à son compte l'émergentisme faible et qui le différencie de l'émergentisme nominal. Nous y reviendrons dans la troisième partie consacrée à l'analyse de l'argumentation proposée par Michel Bitbol⁵⁴. Cette conception de l'émergence, qu'elle soit qualifiée de « standard », de « nominale », ou d'émergence « faible » par Mark Bedau⁵⁵ est la forme la plus répandue, même aujourd'hui, et elle reste compatible avec une vision réductionniste et physicaliste du monde.

Mais ce type d'interprétation s'est vite retrouvé en porte-à-faux par rapport aux découvertes en neuropsychologie, en particulier parce qu'il ne permet pas d'expliquer le cas des maladies psychosomatiques. Comment, en effet, expliquer qu'un changement de l'état mental, voulu ou provoqué, puisse altérer des fonctions corporelles ?

Pour le faire, il faut supposer que le niveau haut, le niveau psychique, puisse être à l'origine de modifications du niveau bas, celui des molécules. On est alors généralement amené à faire l'hypothèse d'une certaine ontologie du niveau haut et donner ainsi naissance à une conception d'émergence forte. Cette forme d'émergence est certainement la plus intéressante des deux, dans la mesure où elle remet en cause une interprétation purement physicaliste du monde mais, en contrepartie, c'est celle qui présente aussi le plus de problèmes épistémologiques.

Une des questions les plus ardues est celle de pouvoir caractériser concrètement quels types de phénomènes connus aujourd'hui pourraient être interprétés comme présentant une émergence forte. Un critère couramment utilisé, en première approximation, pour démarquer une émergence forte d'une émergence faible et celui de l'incapacité à le simuler par algorithme. Ce que cela sous-entend c'est que, dans le cas d'une émergence faible, il est souvent possible de relier les caractéristiques nouvelles du niveau émergent à celles du niveau de base, et donc de simuler les caractéristiques de niveau haut à partir des

⁵⁴ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation*.

⁵⁵ Mark A. Bedau– *Weak Emergence* - Philosophical Perspectives: Mind, Causation, and World, Vol. 11 (Malden, MA: Blackwell, 1997), p. 375

caractéristiques des éléments de base. C'est le cas des automates cellulaires qui sont parfaitement simulables, pourvu que l'on connaisse les caractéristiques de l'automate cellulaire de base et la manière dont les différents automates sont connectés entre eux. Cependant, ce critère de « simulabilité » n'est peut-être pas suffisant⁵⁶.

Caractérisation de phénomènes d'émergence forte

David Chalmers, est convaincu que le problème de l'apparition de la conscience est un cas typique d'émergence forte : *"I think there is exactly one clear case of a strongly emergent phenomenon, and that is the phenomenon of consciousness."*⁵⁷. L'argument de Chalmers est que le niveau haut, celui de la conscience, n'obéit pas aux lois physiques du niveau bas, mais à des lois qui sont propres au niveau haut : *"The laws that express the connection between physical processes and consciousness are what we might call fundamental psychophysical laws."*⁵⁸. Pour David Chalmers, les phénomènes fortement émergents sont systématiquement déterminés par des données du niveau bas sans pour autant être déductibles à partir de ces données. En d'autres termes, la « survenance » du niveau haut reste naturelle, bien qu'elle ne puisse pas être « logiquement » rattachée au niveau bas. L'argument de « naturalité » du niveau haut est problématique car il tendrait à attribuer une ontologie de même nature entre le niveau physique et le niveau de conscience, en contradiction avec le fait que celui-ci ne dépend pas des éléments de base physiques.

Un autre exemple d'émergence forte en physique est celui des propriétés de l'eau. Ce cas de l'eau comme exemple d'émergence forte aux propriétés nouvelles, non réductibles à celles des composants atomiques que sont l'hydrogène et l'oxygène, avait été mentionné par John Stuart Mill en 1843 (voir la section consacrée à la brève histoire de l'émergence). Or, avec l'apparition de la chimie quantique dans les années 1930, cet exemple avait été reclassifié, au mieux comme un cas d'émergence faible ou de « survenance », à partir des propriétés atomiques. Le physicalisme triomphant y voyait même la démonstration que

⁵⁶ Certains travaux de recherche en algorithmique tendent à montrer qu'il est possible de corrélérer, à partir d'algorithmes utilisant les chaînes de Markov, les caractéristiques du niveau haut, les observables, avec celles du niveau bas. Voir Bernard P. Zeigler and Alexandre Muzy - *Some Modeling & Simulation Perspectives on Emergence in System-of-Systems* - Spring Simulation Multi-conference (SpringSim'16), Apr 2016, Pasadena, CA, United States.

⁵⁷ David J. Chalmers - *Strong and weak emergence* - In P. Davies & P. Clayton (eds.), *The Re-Emergence of Emergence: The Emergentist Hypothesis From Science to Religion*. Oxford University Press (2006)

⁵⁸ *Ibid.*

toutes les lois de la nature pouvaient, en fin de compte, se ramener aux lois de la physique classique substantialiste.

Le professeur de chimie, Pier Luigi Luisi, met en garde contre une interprétation réductionniste abusive qui consisterait à assimiler « structure » et « propriétés » du niveau émergent⁵⁹. Il ne conteste pas que la structure du niveau supérieur soit sous-tendue par celle des atomes, ce qu'il conteste c'est le fait d'assimiler structure et propriétés des systèmes vivants : *« chaque fois, et à chaque niveau de complexité, il y a l'apparition de nouvelles propriétés qui ne sont pas présentes au niveau inférieur - et, surtout, qui ne peuvent pas être expliquées sur la base des constituants. »* Le phénomène émergent, dans ce cas, ne peut pas être décrit en se référant uniquement aux lois des constituants de base, mais nécessite une certaine forme de loi au niveau macroscopique⁶⁰.

Enfin, la physique quantique est un autre domaine où l'on peut voir des influences du niveau supérieur sur le niveau inférieur. Elle présente un cas très particulier où niveau de base et niveau supérieur ne sont pas séparables : on parle alors d'intrication. L'intrication quantique est un phénomène qui avait été prédit par l'équation de Schrödinger, une interprétation qu'Einstein contestait dans son article, demeuré célèbre sous le nom de « paradoxe EPR⁶¹ », publié en 1935 et qui en donnait une interprétation bien différente. Nous y reviendrons dans la deuxième partie de ce mémoire.

On appelle « intrication quantique », un phénomène dans lequel deux particules (ou, plus généralement, tout groupe de particules) ont des états quantiques dépendant l'un de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. L'intrication quantique est un phénomène non-local : il ne dépend pas des positions des particules dans l'espace. De nombreuses expériences ont été conçues pour confirmer la non-localité de l'intrication, dont celle du physicien Alain Aspect⁶², mais ce n'est que très récemment, en 2015, que l'équipe menée par Ronald Hanson, de l'université de Delft aux Pays-Bas, a enfin conçu une expérience sans faille qui confirme la réalité de l'intrication quantique. L'intrication quantique présente bien une forme d'émergence particulière : le système à deux particules forme un

⁵⁹ Pier Luigi Luisi- "The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology" - Cambridge University Press, 2006, Second edition 2016, p.233

⁶⁰ <http://complexitylabs.io/strong-weak-emergence>

⁶¹ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen - Can Quantum-Mechanical Description of Physical Description Be Considered Complete? – Physical Review Vol. 47, May 15, 1935.

⁶² Voir plus loin dans le mémoire, la section consacrée aux inégalités de Bell.

tout dont on ne peut pas décrire séparément les composants et toute modification de ce tout influe sur les parties, ce qui semble bien constituer un cas d'émergence forte avec une causalité descendante ; c'est-à-dire une influence des modifications du niveau haut sur le niveau bas.

Causalité descendante

C'est cette dernière forme d'émergence, l'émergence forte, qui est la plus intéressante d'un point conceptuel car elle semble comporter, à première vue, une contradiction. En effet, il paraît difficile d'attribuer une causalité descendante sans attribuer en retour une certaine ontologie du niveau haut et dans ce cas, soit il s'agit de la même ontologie que celle du niveau base et on se retrouve dans le cas d'une ontologie moniste, soit il s'agit d'une ontologie de nature différente, et on se retrouve alors dans le cas d'une ontologie dualiste.

Cas d'une causalité descendante, dans un cadre d'ontologie moniste

Dans le concept d'émergence standard, il y a l'idée que les éléments de bases sont des entités substantielles de matière, tandis que le niveau supérieur qui en émerge est immatériel et forme une structure. Il est possible de reprendre ce schéma avec le modèle hylémorphique d'Aristote. Dans ce cadre, on peut identifier le niveau bas à une cause matérielle et le niveau haut à une cause formelle⁶³.

Pour l'illustrer, prenons l'exemple de la formation de briques à partir de terre glaise affinée, que l'on appelle « argile ». L'argile constituerait dans cet exemple, le niveau de base, constitué des éléments matériels que sont les grains d'argile et la terre qui les lie. Le moule de bois dont on se sert pour donner la forme à la brique, constitue dans ce cas, le niveau haut : une « structure » qui va définir la forme. L'émergence de la brique résulte de l'interaction entre la pâte d'argile et la structure de bois du moule.

Les parois du moule à brique, en bois dans notre exemple, ont, nous l'avons dit, une structure. Celle-ci fixe à la fois les dimensions spatiales que l'on désire imposer à la brique, mais aussi la planéité et la rétractation du matériau grâce à la plus ou moins grande rigidité des parois ainsi que leurs plus ou moins grande porosité à l'eau. Ce sont ces caractéristiques de la structure qui fixent les conditions aux limites pour la pâte d'argile hydratée que l'on

⁶³ Cette argumentation est utilisée par Michel Bitbol dans son article « *Downward causation without foundation* »

va verser dans le moule⁶⁴. Cet exemple illustre bien comment la structure de la forme - le niveau haut -, influe sur la matière, le niveau bas.

En réalité, le schème hylémorphique, s'il apporte une satisfaction pour l'esprit, ne rend pas bien compte de la réalité. Comme l'a souligné Gilbert Simondon, c'est le schème d'une personne, trop théorique et qui n'a jamais mis le pied dans l'atelier de fabrication des briques⁶⁵. Simondon fait remarquer qu'à la fois la matière et la forme ne sont ni matière « brute », ni forme « théorique ». L'une et l'autre ont subi des activités préparatoires humaines, des « demi-chaînes d'activation ». L'argile prélevée des vasières va être débarrassée des éléments végétaux, des graviers et des galets indésirables. La pâte sera tamisée, puis pétrie, puis réhumidifiée pour atteindre la consistance d'une pâte lisse et élastique qui pourra aisément être versée dans un moule sans couler trop vite, ni faire de grumeaux. Le moule sera d'abord conceptualisé avant que les différents éléments ne soient taillés en choisissant une essence de bois appropriée, pour sa flexibilité et sa porosité. Les épaisseurs et les dimensions des parois, de même que leur assemblage, seront déterminés par une longue tradition d'essais de générations de fabricants de briques qui se seront transmis leurs savoir-faire. Bref, pour Simondon, la matière et la forme, contiendront déjà une énergie potentielle et c'est cette énergie potentielle qui rend possible l'émergence d'une brique singulière. Car si toutes les briques, sorties du même moule se ressemblent, chacune aura capté et utilisé une part de l'énergie potentielle, du moule comme de l'argile, d'une manière unique et singulière : *semblables* au niveau macroscopique, *singulières* au niveau microscopique. A la fois *une* et *multiples*.

Enfin, le schème hylémorphique n'est qu'une image analogique du schème d'émergence, car ce qui émerge n'est pas le niveau supérieur. L'émergence s'*actualise*, d'une part parce qu'il existe de l'énergie *potentielle* et d'autre part, elle se *réalise* par une relation qui s'établit entre les niveaux haut et bas. Si ce schème à l'avantage de nous faire « toucher du doigt » l'idée qu'un niveau supérieur peut interagir avec le niveau inférieur en fixant des conditions aux limites, il faut remarquer qu'il ne s'agit que d'un procédé discursif langagier, rien de plus.

⁶⁴ Cette image des parois du moule qui fixent les conditions aux limites de la forme et de la matière qui sera versée dans le moule est celle que prend Gilbert Simondon dans *L'individu et sa genèse physico-biologique*.

⁶⁵ Simondon, avec cet exemple, veut dénoncer le réductionnisme de l'approche hylémorphique. Il déclare, notamment : « *Le schéma hylémorphique correspond à la connaissance d'un homme qui reste à l'extérieur de l'atelier et ne considère que ce qui y entre et ce qui en sort* ».

Cas d'une causalité descendante sans ontologie du niveau haut

Dans l'exemple précédent, bien qu'il s'agisse d'une forme de causalité descendante, le moule comme l'argile ont une ontologie unique et naturelle. Nous prendrons, pour la suite de ce mémoire, l'exemple de l'intrication quantique, qui comme nous l'avons vu plus haut, est un cas d'émergence forte et nous verrons comment Michel Bitbol propose d'interpréter la causalité descendante du niveau haut (celui d'un système à deux particules) sans faire appel à une ontologie du niveau supérieur. C'est une approche non-dualiste et anti-fondationnaliste comme il l'indique dans son article.

Deuxième partie : spécificités de la physique quantique

L'objectif de cette deuxième partie est d'asseoir le cadre épistémologique de l'article de Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation*, dont l'argumentaire sera discuté en troisième partie. En effet, dans cet article M. Bitbol va essayer de montrer qu'une causalité descendante peut être envisagée dans le cadre d'une conception « interventionniste et constitutive » et pour cela il va utiliser un exemple connu de la physique quantique, celui d'un système quantique composé de deux particules chacune pouvant prendre deux états possibles.

Il ne s'agira pas ici, bien entendu, de développer les concepts qui sous-tendent le formalisme théorique et mathématique de la physique quantique - nous nous référerons pour cela au livre de Michel Bitbol : *Mécanique quantique, une introduction philosophique* -, mais d'en aborder certains points essentiels afin de mieux percevoir les enjeux du débat.

Cette deuxième partie va s'articuler autour de quatre grandes thématiques dont l'ambition est de mieux cerner l'intérêt de l'exemple d'un système quantique à deux particules pour illustrer un cas de causalité descendante :

- Quelques éléments du formalisme de la théorie quantique
- Préparation et Mesure en physique quantique
- Interprétations de la théorie quantique
- Formalisation du cas particulier d'un système quantique à deux états

PHYSIQUE CLASSIQUE ET PHYSIQUE QUANTIQUE : DEUX COSMOLOGIES DIFFÉRENTES

Dans cette section, nous détaillerons les différences radicales qui séparent la mécanique classique de la mécanique quantique et qui reposent chacune sur une manière de considérer le monde (une cosmologie) différente. D'une part, un système de points matériels avec une forte ontologie et un fort déterminisme, d'autre part une représentation symbolique (relation cognitive) couplée à une prédiction probabiliste.

Mécanique classique : états des systèmes et déterminisme des lois

Les concepts de la mécanique newtonienne vont dominer les sciences modernes pendant près de trois siècles. Ils reposent à la fois sur une mathématisation des lois, une conception ontologique du point et des lois d'évolution symétriques.

Naissance de la mécanique classique

Historiquement la physique moderne s'est détachée de la physique antique, essentiellement celle léguée par Aristote et largement utilisée pendant près de dix siècles, jusqu'au XVI^{ème} siècle avec Johannes Kepler qui, reprenant l'hypothèse héliocentrique de Copernic, découvre que les planètes ne décrivent pas des orbites circulaires, mais des orbites elliptiques. Cela ouvrait non seulement une brèche dans la théorie aristotélicienne, contredisant le géocentrisme et le mouvement parfaitement circulaire des planètes ; mais aussi, et peut-être surtout, cela ouvrait aussi des brèches dans le dogme chrétien, créant un « décentrement » de l'homme et par conséquent du Dieu dont il est supposé être l'image. De plus, le monde supra-lunaire, supposé représenter la perfection de son créateur, présente à son tour des imperfections, ce qui le rapproche du monde sub-lunaire et des hommes.

A la même époque, son contemporain italien, Galileo Galilei - dit Galilée -, arrivait à introduire les mathématiques en support à l'observation, afin expliquer le mouvement des corps pesants. Une pensée qu'il résumera par la célèbre phrase : « La nature est un livre écrit en langage mathématique ». Or, comme ce langage est accessible à l'homme, Galilée implicitement ouvre la porte de la science moderne : les humains n'ont plus besoin de 'déranger' Dieu pour expliquer le monde.

On peut remarquer que cette phrase est extraite de « Il Saggiatore, nel quale con bilancia squisita e giusta si ponderano le cose contenute nella Libra. » publié en 1623, Le titre, souvent traduit en français par « le testeur », ne rend pas bien compte du sens que lui donne Galilée. Il se comprend mieux par une traduction plus contemporaine et complète : « L'expérimentateur - dans lequel les choses contenues dans la Balance sont pesées avec un équilibre exquis et juste ».

On voit alors apparaître deux concepts de la science moderne : l'expérience et la mesure. L'expérience, construite par l'expérimentateur, n'est déjà plus une simple observation : elle nécessite un dispositif instrumental, lui-même fruit d'une théorie préalable. Quant à la mesure elle indique clairement que la science moderne ne veut pas s'occuper des « qualités secondes⁶⁶ » qui ne s'appréhendent qu'avec la subjectivité de chaque observateur, mais des « qualités premières » quantifiables, plus stables dans le temps et dans l'espace et que l'on peut mesurer grâce à une norme acceptée par la

⁶⁶ Nous reviendrons plus loin sur ces notions de qualités premières et seconde développées par le philosophe anglais, John Locke, et qui alimentent encore aujourd'hui le débat philosophique contemporain.

communauté scientifique et obtenir ainsi un statut d'« objectivité ». On peut remarquer que c'est ce parti-pris de la science moderne qui accentue, au point de couper toute relation avec le sujet, la position de l'objet qui prend alors pleinement son sens étymologique de « chose jetée devant ». Mais cet objet, qui a perdu toutes ses qualités secondes, est par là-même devenu un objet inanimé, non pas dans le sens cinétique mais dans le sens biologique. La physique moderne a exclu le biologique de son champ d'investigation et il faudra attendre trois cents ans pour que la biologie reprenne sa place entière en tant que science spécifique reconnue par la communauté scientifique.

Pour résumer, on peut dire que la science moderne qui apparaît au XVI^{ème} siècle, a deux objectifs : l'un, *théorique*, est de proposer des lois mathématiques pour « expliquer » - dans le sens de relier des effets entre eux -, un phénomène observé ; l'autre, pratique, est la *mesure* à partir d'expérience pour produire des données objectives. Cette physique a perdu le sens originel que les grecs lui donnaient, englobant tout ce qui aujourd'hui est compris dans la biologie, pour ne garder que l'étude des objets inanimés : des « machines ». Une mécanique d'abord céleste, puis des corps inanimés en général, au repos ou en mouvement. La correspondance entre les lois mathématiques et les observations d'expérience semblait si parfaite qu'elle a conduit à considérer que c'est la nature elle-même qui parlait le langage mathématique, gommant au passage le fait que les mathématiques, aussi bien que les expériences, n'étaient pas le fait de la nature, mais bien des hommes.

Une mécanique classique dans tous ses états

L'objectivité de la science, c'est-à-dire sa capacité à rendre compte d'objets « réels », indépendants du sujet-expérimentateur a conduit les scientifiques à considérer que les objets mathématiques et les objets phénoménaux – ceux issus de l'observation d'expériences -, ne constituaient plus qu'une seule et même réalité. Alors qu'à y regarder de plus près, cette objectivité est le fruit d'une double réduction : réduction d'un langage humain – les mathématiques - à celui de la nature et, réduction du monde physique aux seuls objets inanimés.

L'objet de la mécanique ainsi définie possède une double caractéristique : (i) une existence propre de par sa mesure expérimentale, parce qu'on ne peut mesurer que ce qui « existe », et qu'on assume par là une ontologie de l'objet physique, et (ii) un déterminisme comportemental : c'est la loi mathématique qui 'dicte' son comportement à l'objet de la

nature, ce qui par un renversement et une extension abusive, a fait dire que c'est la nature elle-même qui parlait le langage mathématique.

Ce déterminisme ontologique fait que l'on peut considérer un état propre du système étudié : l'état du système mécanique, est défini en tout lieu et en tout temps par sa position et sa vitesse. Le point mathématique - objet on ne peut plus *idéal* -, prend lui-même une valeur ontologique comme « centre de masse » de l'objet, masse dont le statut de qualité première, puisque mesurable, en fait la preuve de la « matérialité » de l'objet⁶⁷.

Cette conception mécaniste et matérialiste du monde va perdurer jusqu'à la fin du XIXème siècle avec une apogée liée à la théorie de la gravitation telle qu'énoncée par Isaak Newton et suivie d'une période intermédiaire avec l'étude d'objets à l'ontologie douteuse et l'introduction d'un indéterminisme de la mesure d'ordre statistique ...

Objets ontologiquement faibles et indétermination

L'objet roi de la mécanique classique c'est le 'solide' : ses caractéristiques physiques et géométriques restent stables dans l'étendue spatio-temporelle. Mais il existe certains objets, connus depuis longtemps, qui n'ont ni de stabilité géométrique, ni de stabilité temporelle : ce sont les liquides. Malgré tout, à condition de ne considérer que leurs caractéristiques macroscopiques et d'y adjoindre des conditions aux limites, la mécanique classique sait traiter ces fluides car ils sont pesants et occupent une portion d'espace relativement fixe. Ce sont des fluides qualifiés de 'corpusculaires' ou de 'fluide pondérables' dont on peut déduire une équation d'état, comme dans le cas de la mécanique classique.

Au XIXème siècle, avec l'industrialisation et le progrès fulgurant de nouvelles techniques, la physique va commencer à s'occuper de phénomènes encore plus difficiles à saisir, notamment : la chaleur, l'électricité et l'électromagnétisme. Ces objets récalcitrants commencent à perdre leur valeur ontologique. En effet, quelle est la nature de la combustion ? Que signifie l'« existence » de champs électriques ou magnétiques ? Quelle est la « nature » d'une « ligne équipotentielle électromagnétique » ? Quelle est la nature

⁶⁷ Ce n'est que très récemment, en 2012, que les expériences Atlas et CMS du Grand collisionneur de hadrons du CERN (le LHC) ont mis en évidence le « boson », une nouvelle particule, prévue quarante-huit ans plus tôt, par Peter Higgs. Sa théorie prédisait que la masse n'était pas une caractéristique première de la matière mais que celle-ci apparaissait comme résultant de l'application d'un champ scalaire, le champ de Higgs, qui agit comme un champ de force qui freine la particule, donnant ainsi l'illusion d'une masse propre à la particule.

des gaz ? Si on veut les comprendre à l'aune des théories classiques de l'époque, ils paraissent alors comme autant d'objets « fluides impondérables » et donc non soumis aux forces gravitationnelles. Cette façon de voir à l'avantage de conserver le cadre classique de la théorie en en faisant une généralisation des fluides corpusculaire et pondérables⁶⁸.

Un débat similaire avait déjà eu lieu au sujet de la lumière : l'autorité de Newton imposera sa vision « corpusculaire » compatible avec la mécanique classique contre la vision ondulatoire de Christian Huygens. Il faudra attendre Thomas Young et Augustin Fresnel pour que la théorie ondulatoire resurgisse.

L'autre science déterminante du XIX^{ème} siècle sera la thermodynamique. D'abord celle de Sadi Carnot qui montrera l'irréversibilité des phénomènes observés, mettant en cause la symétrie temporelle des lois mécaniques. Puis celle de Ludwig Boltzmann qui reviendra, lui, à la nature corpusculaire et à l'hypothèse atomique et introduira l'indétermination statistique au niveau corpusculaire.

L'objet de la théorie classique.

Nous avons vu tout au long de ce chapitre, que l'objet auquel s'intéresse la mécanique classique est à la fois un objet matériel et déterministe : son évolution peut être décrite de manière continue dans le temps et dans l'espace par sa position et sa vitesse (vitesse généralisée sous la forme de 'quantité de mouvement' – encore appelée impulsion -, $\vec{p} = m\vec{V}$, où m est la masse et $\vec{V}$, la vitesse). La loi d'évolution de la mécanique classique permet à la fois de relier tous les événements entre eux, créant ainsi une clôture causale, mais elle permet aussi de rendre symétrique son évolution passée et future. De plus toutes les lois de la physique classique sont reliées entre elles par une loi beaucoup plus fondamentale – une 'méta-loi' - de conservation de l'énergie.

Dans un système de coordonnées généralisées, la position (notée $\vec{q}$) et la quantité de mouvement (notée $\vec{p}$) sont les 'conjuguées'⁶⁹ l'un de l'autre à travers les équations différentielles de Hamilton :

⁶⁸ Cf. T. Masson. *La physique du XIX^e siècle face au concept de paradigme*. À paraître dans un ouvrage collectif aux Presses Universitaires d'Aix-Marseille, collection Inter., 2017. <hal-01632657>

⁶⁹ Deux variables sont dites conjuguées lorsque l'une est la dérivée de l'action par rapport à l'autre.

$$1) \quad \dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \text{ où } \dot{q}_i = \frac{dq_i}{dt} \text{ est la vitesse et } \mathcal{H}, \text{ l'opérateur Hamiltonien}$$

$$2) \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}, \text{ où } p \text{ est la quantité de mouvement}$$

On peut observer que ces équations de Hamilton, appelées équations canoniques, sont des équations aux dérivées partielles ; ce qui indique à la fois la nature continue et déterministe du cadre conceptuel de la physique classique. Leurs natures généralisées font qu'elles s'appliquent aussi bien à la mécanique classique qu'à la thermodynamique ou à l'électromagnétisme.

Comme le soulignent Prigogine et Stengers⁷⁰ : « Dès que l'on connaît l'Hamiltonien [...] on peut calculer pour chaque point, la dérivée de cette fonction par rapport à la variable de position et la variable de moment, $\frac{\partial \mathcal{H}(p,q)}{\partial q}$ et $\frac{\partial \mathcal{H}(p,q)}{\partial p}$. Ces dérivées ont un sens physique.

La première donne la variation de p , $\frac{dp}{dt}$ et la seconde, la variation au cours du temps de q , $\frac{dq}{dt}$. L'Hamiltonien constitue donc la loi du mouvement du système étudié : quelle que soit la représentation choisie, l'évolution dans le temps des variables canoniques correspondantes peut être déduite de l'Hamiltonien par les *mêmes* équations canoniques. »

Prigogine et Stengers soulignent plus loin les caractéristiques de ces équations canoniques : « la structure des équations canoniques contient les propriétés *a priori* de toute évolution dynamique.

- Les équations dynamiques sont bien *réversibles* : le renversement du temps est mathématiquement équivalent à un renversement des vitesses.
- Elles sont *conservatrices* : l'Hamiltonien qui exprime l'énergie du système dans le couple de variables canoniques choisies, est lui-même conservé par l'évolution au cours du temps qu'il détermine ; en chaque instant de cette évolution, la variation de l'énergie potentielle compense exactement celle de l'énergie cinétique.

[...] Le langage abstrait de la dynamique hamiltonienne fait, peut-on dire, advenir la conception du mouvement à sa vérité. »⁷¹

⁷⁰ I. Prigogine & I. Stengers – *La nouvelle alliance* – Ed. Gallimard, Coll. folio essais, 1979, p. 120

⁷¹ *Ibid.*, p. 121

Cette dernière remarque est particulièrement importante car elle montre la nature profondément ‘historique’ de la physique classique. Historique, dans le sens où les lois qu’elle propose relient continuellement la variable à partir d’un instant initial jusqu’à un instant final. C’est ce que veulent dire Prigogine et Stengers lorsqu’ils disent : « la structure des équations canoniques contient les propriétés *a priori* de toute évolution dynamique ».

Nous verrons que la physique quantique, au contraire, est anhistorique, puisqu’elle prédit des événements futurs sans jamais les relier causalement à des événements passés, si ce n’est de manière conditionnelle contrafactuelle.

Mécanique quantique : reversement du paradigme

On a pu voir dans la section précédente, que le XIX^{ème} siècle aura été le lieu du renouvellement d’un débat très ancien entre, d’une part les atomistes, tenants d’une physique de la discontinuité et d’autre part, les physiciens classiques, tenant d’une physique de la continuité. Mais il faut immédiatement ajouter que la conception atomiste de Boltzmann était très minoritaire et contestée par pratiquement tous ses contemporains. Il faudra attendre encore près d’un demi-siècle pour que la théorie quantique soit définitivement acceptée tout en changeant la nature profonde de l’atome avec la mise en évidence de particules subatomiques. Cette nouvelle théorie repose sur une conception du monde radicalement différente de celle proposée par la mécanique classique où la nature même l’objet à étudier s’est dématérialisée et où le déterminisme fait place à une évolution probabiliste de la nature.

Naissance des quanta : corps noirs et catastrophe ultraviolette

La base élémentaire de la physique quantique s’appuie sur le concept de quanta d’énergie, c’est-à-dire sur une nature profondément discontinue.

Assez curieusement, cette notion de quanta est venue non pas d’une théorie quantique qui n’existait pas encore, mais afin de résoudre un modèle mathématique d’énergie en mécanique classique qui ne parvenait pas à rendre compte de la réalité observée : il s’agissait de l’étude des corps noirs.

En cette fin de XIX^{ème} siècle plusieurs scientifiques veulent expliquer un phénomène déjà observé depuis le milieu du XVIII^{ème} siècle par un célèbre céramiste anglais, Josiah Wedgwood, qui avait remarqué que quel que soit les objets qu’il mettait dans son four de potier, que ce soit par leurs compositions ou par leurs formes, ceux-ci

prenaient une couleur rouge à une température fixe et stable ; ce qui était en soi un outil très pratique pour déterminer avec une bonne précision la température du four. Mais l'énigme demeurait de savoir d'où venait le fait que ces objets puissent émettre de la lumière et pourquoi la couleur émise était en relation stable avec une température. C'est donc assez naturellement que les physiciens qui ont commencé l'étude des corps, l'ont fait sous l'angle de la théorie optique classique. Le modèle idéal, proposé par Gustav Kirchhoff en 1862, pour cette étude était celui d'une cavité fermée, parfaitement opaque pouvant absorber tout rayonnement, et munit d'une seule minuscule ouverture pour observer la lumière émise : c'est ce qu'on appelle un corps noir.

L'hypothèse la plus répandue était que l'émission et l'absorption des corps noirs étaient liées à des transferts d'énergie et devaient pouvoir être décrites par des lois d'évolution d'état dans le cadre de la cinétique des gaz. Sous l'impulsion de Boltzmann, le gaz est alors considéré comme composé d'un très grand nombre de particules – qui n'étaient pas encore appelées 'atomes'⁷² -, qui peuvent être modélisées comme autant de petits oscillateurs dont les fréquences peuvent être couplées et rentrer ainsi en résonance.

En 1896, Wilhelm Wien publia une loi empirique qui rendait bien compte de cette évolution pour les hautes fréquences mais s'écartait sensiblement de la réalité pour les basses fréquences ; de plus cette loi ne s'appuyait sur aucune théorie. En juin 1900, Rayleigh et Jeans proposent une loi théorique en assimilant le corps noir à un gaz dont l'énergie est équirépartie. Mais cette formule, si elle suit bien l'expérience dans les basses fréquences, diverge en puissance cubique pour les hautes fréquences⁷³. Cette divergence entre théorie et expérience, fait que toute source de chaleur tendra vers une énergie infinie pour les hautes fréquences. Elle sera qualifiée plus tard de « catastrophe ultra-violette ». On remarquera au passage que la formule théorique utilise la constante k , introduite par Ludwig Boltzmann, et qui peut être interprétée comme un facteur de proportionnalité reliant la température thermodynamique d'un système à son énergie au niveau

⁷² Ludwig Boltzmann était convaincu de la validité de l'hypothèse de l'existence des atomes, mais il est très critiqué par la communauté scientifique de son temps, notamment par Mach et Ostwald. Sujet à des dépressions fréquentes, il fera une première tentative de suicide en 1901 à Leipzig et finira par se pendre près de Trieste en 1906.

⁷³ Loi de Rayleigh-Jeans de la densité d'énergie : $U(\nu, T) = 8\pi\nu^3 \frac{kT}{c^3}$, calculée d'un point de vue théorique en assimilant le corps noir à un gaz ; où ν est la fréquence, k est la constante de Boltzmann et c la vitesse de la lumière.

microscopique⁷⁴. Or contrairement aux *énergétistes*, Boltzmann est un *atomiste* et il n'est plus concevable, pour lui, d'essayer de décrire de manière déterministe chacune des trajectoires des atomes contenus dans une cavité : il faut passer à une interprétation statistique de la physique.

Max Planck, quant à lui, se tenait à l'écart de la querelle qui opposait physiciens-énergétistes et physiciens-atomistes⁷⁵ : il ne croyait ni à l'hypothèse d'équipartition des énergies qui a mené à la formule de Raleigh-Jeans, ni à l'hypothèse atomiste et l'interprétation statistique de l'entropie de Boltzmann. Il poursuivait ses études à Berlin en essayant d'interpréter la formule du corps noir, par le calcul de l'entropie élémentaire de chacun des résonateurs qui constituaient les parois d'un corps noir. En octobre 1900, il présente une première formule qui connaît un énorme succès puisqu'elle suit parfaitement l'expérimentation sur toute la gamme de fréquence, mais qui comporte deux constantes α et β ⁷⁶ qui n'ont pas d'interprétation physique. Pendant deux mois, Planck relate dans ses mémoires qu'il va s'attaquer à la résolution de la signification de ces constantes. Lui qui ne croit pas à l'hypothèse atomiste de Boltzmann, va faire l'hypothèse que l'énergie du corps noir est distribuée sur différents modes de fréquence et va utiliser l'interprétation statistique de l'entropie proposée par Boltzmann. C'est ce qu'il appelle lui-même un « acte de désespoir » qui l'amène à publier une seconde formulation du spectre du corps noir, en décembre 1900, en remplaçant les deux constantes précédentes par une seule constante h et en faisant l'hypothèse que l'énergie se distribue sous la forme de quanta d'énergie ' $h\nu$ '⁷⁷:

$$U(\nu, T) = 8\pi h(\nu/c)^3 \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}.$$

Mais, comme le souligne Etienne Klein : « Max Planck ne sut pas trop quel sens il convenait de donner à sa découverte, qu'il considéra dans un premier temps comme un

⁷⁴ Formule de l'entropie de Boltzmann : $S = k \log W$; formule qu'il a voulue gravée sur sa tombe, où S , l'entropie, est une mesure de l'état de désordre du système et W est un nombre, dit de complexion, qui indique le nombre de manière de combiner les atomes entre eux. Pour la première dans l'histoire de la physique, Boltzmann propose une conception probabiliste de la physique.

⁷⁵ Les arguments avancés dans ce paragraphe sont principalement extraits de trois cours d'Etienne Klein à l'École Centrale de Paris, intitulés « Comment la physique quantique est-elle née ? », donnés en janvier 2007.

⁷⁶ Première formule de Planck : $U(\nu, T) = \alpha(\nu/c)^3 \left[\exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}$

⁷⁷ C'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échanges possibles autres que par paquets d'énergie égale à $h\nu$, ou bien à $2h\nu$, ou bien à $3h\nu$, etc.

simple ‘truc’. La suite de l’histoire allait montrer que son idée avait signé l’acte de naissance de la physique quantique. »⁷⁸

Première interprétation quantique : l’effet photo-électrique

La section précédente a permis de montrer que la transition entre la mécanique classique à la physique quantique a pris plusieurs décennies en partant de considérations qui n’avaient à l’origine rien à voir, ni avec une double interprétation corpusculaire et ondulatoire de la matière, ni avec la notion de quanta d’énergie. Elle a permis de mettre en exergue le débat, souvent féroce, qui opposait la communauté scientifique en physique entre une interprétation classique déterministe et une interprétation probabiliste, entre une interprétation corpusculaire et une interprétation ondulatoire. Elle a permis enfin de montrer le rôle éminent de la sérendipité dans les grandes découvertes scientifiques.

Einstein sera le premier, en 1905 à reprendre le concept de quanta d’énergie que Planck avait utilisé, et à lui en donner une interprétation physique convaincante : il faut considérer la lumière comme étant composé de ‘grains’ lumineux – appelé photons -, et dont la quantité de mouvement $p = h\nu$. Mais ici encore, on peut noter que cette découverte est le fruit d’une double ironie. La première ironie est qu’Einstein va transposer ce concept en passant de la matière à la lumière, de l’interprétation corpusculaire à l’interprétation ondulatoire de la matière. La deuxième ironie, c’est qu’Einstein est bien le premier découvreur de la physique quantique mais qu’il aura toute sa vie des problèmes à en accepter les théories qui apparaîtront dans les années 1920-1930. Il y a pour lui comme une rupture radicale entre son interprétation continuiste – le continuum espace-temps - et l’interprétation quantique, profondément discontinue et non-locale.

L’effet photoélectrique avait été observé, sans être compris comme tel, par Becquerel dès 1839 dans une expérience d’électrodes plongées dans un liquide. Il faudra attendre 1887 pour que le physicien Allemand, Heinrich Hertz, mette réellement en évidence l’effet photoélectrique. Il s’était rendu compte que lorsqu’on mettait un métal à la lumière, il produisait parfois une étincelle lumineuse d’une certaine fréquence.

Mais les observations expérimentales entraient en contradiction avec la théorie de la mécanique classique : la mesure de l’intervalle de temps nécessaire pour que les électrons

⁷⁸ Références prises dans « La physique quantique et ses interprétations - A l’occasion d’un centenaire », Etienne Klein, S.E.R. | « Études », 2001/5 Tome 394 | pages 629 à 639.

soient éjectés, obtenue par les calculs était beaucoup plus grande que la valeur expérimentale observée. En reprenant la publication de Planck, Einstein comprend qu'il peut utiliser le concept de quanta d'énergie $h\nu$ à condition de considérer qu'il existe des 'particules' de lumières : les photons. Cette découverte fera l'objet d'une des trois contributions majeures qu'Einstein fera lors de cette année 1905.

L'objet de la théorie quantique

Nous avons vu précédemment que le cadre mathématique de la mécanique classique est parfaitement bien balisé : les objets étudiés y sont supposés avoir une existence réelle et leur évolution dans le temps et l'espace est parfaitement déterminée. Mais qu'en est-il de l'objet de la physique quantique ?

Ou, plus exactement quelles sont les objets décrits dans l'équation d'évolution de la physique quantique ?

Le cadre théorique de la physique quantique est très novateur et perturbant pour les physiciens classiques : il faut admettre une dualité onde-corpuscule à l'échelle des atomes, il faut aussi admettre un formalisme mathématique continu et déterministe avant la mesure, puis un formalisme mathématique discontinu et stochastique pour la mesure elle-même :

- (i) Une équation d'évolution de forme ondulatoire, d'objets symboliques - des vecteurs dans un espace des nombres complexes $\mathbb{C}$, notés $|\Psi\rangle$ (nous reviendrons plus loin sur cette notation particulière des vecteurs quantiques, appelée notation bra-ket, introduite par Paul Dirac en 1939), représentants des catalogues de probabilités. C'est Erwin Schrödinger qui en proposa la formulation en 1925. Cette équation, qui est à la fois linéaire, continue et ondulatoire, ne permet pas de déduire une mesure : elle représente un « catalogue⁷⁹ » de prévision de toutes les mesures possibles dans une préparation donnée. Le vecteur général est appelé *vecteur d'état* mais ici l'état n'a rien à voir avec l'état d'un système de physique classique : il s'agit d'un catalogue de mesures probabilistes dont chacune des différentes mesures possibles sont des vecteurs propres du vecteur d'état. On peut aussi noter que la probabilité d'obtenir une mesure, à condition que chaque vecteur propre

⁷⁹ Erwin Schrödinger – *Physique quantique et représentation du monde* – Ed. du Seuil, Coll. Points Sciences, §7 « La fonction Ψ comme catalogue de prévision », p. 109

soit indépendant, s'écrit comme la somme de toutes les probabilités de mesure⁸⁰, c'est ce qui fait dire, de manière discursive, que tous les états possibles sont superposés. Une déclaration surprenante qui a donné lieu à la métaphore célèbre du chat de Schrödinger dont ni dirons quelques mots plus tard.

- (ii) Une règle de mesure, appelée règle de Born, qui va créer une discontinuité en sélectionnant une des mesures possibles et faire apparaître la nature quantique de l'observation. Cette règle dit que « la probabilité pour que l'événement e_{ai} survienne (c'est-à-dire que la mesure de la variable A donne le résultat a_i) n'est autre que le carré du module de la projection c_i du vecteur $|\Psi\rangle$ »⁸¹. Cette règle, que Max Born a établie en 1926, fait appel à une mathématique matricielle, hautement discontinue : celle construite par Werner Heisenberg, Max Born, et Pascual Jordan pendant la même année 1925. On peut noter que c'est le dispositif expérimental et la mesure, ce que l'on nomme aussi la 'contextualité', qui va fixer une des prévisions du catalogue. Ce qui signifie, d'une certaine façon, que c'est l'expérimentateur, incarné par son dispositif instrumental puis effectuant la mesure, qui va, en quelque sorte, orienter le résultat de celle-ci. Une manière plus mathématique de le formuler est de dire que si chaque vecteur propre représente une mesure possible – auquel on peut associer une valeur propre -, il y a alors une « réduction » du paquet d'onde représenté par le vecteur d'État général par la mesure⁸².

Nous voyons donc que l'objet de la physique quantique n'a plus rien de comparable avec celui de la physique classique : il est symbolique et non plus réel, il est probabiliste et non plus déterministe.

⁸⁰ Ce qui s'exprime par : $P(m) = \sum_{i=1}^n P(i)$, $m \in [1, n]$

⁸¹ Michel Bitbol – *Mécanique Quantique, une introduction philosophique* -, Champs Flammarion, 1996, p. 149.

⁸² Sans rentrer dans le détail de l'algèbre vectorielle linéaire, on appelle « vecteur propre » $\vec{V}_0$ d'un autre vecteur $\vec{\Psi}$, la projection non nulle, de valeur λ , de $\vec{V}_0$ sur $\vec{\Psi}$, telle que $\vec{V}_0 = \lambda \vec{\Psi}$; λ est appelée la valeur propre. Appliqué à la théorie quantique, le vecteur propre $\vec{V}_0$ représente une des mesures possibles, c'est-à-dire une des valeurs possibles du paquet d'onde dont l'évolution est décrite par la fonction d'onde de Schrödinger ; quant à la valeur propre λ , elle est le résultat de cette mesure.

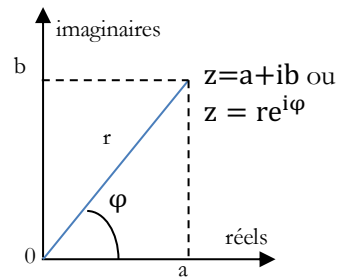
QUELQUES ELEMENTS DU FORMALISME DE LA THEORIE QUANTIQUE

Vecteurs réels et vecteurs complexes

De même qu'en mécanique classique, les états de position et de quantité de mouvement sont représentés par des vecteurs réels, respectivement $\vec{q}$ pour la position et $\vec{p}$ pour la quantité de mouvement, de même la physique quantique utilise-t-elle aussi une notation vectorielle pour désigner un état ; la différence étant qu'en physique quantique, cet espace vectoriel est complexe et non plus réel.

D'un point de vue mathématique, l'espace des complexes est une extension de l'espace des réels incluant le nombre imaginaire i , avec $i^2 = -1$.

Tout nombre complexe est composé d'une partie réelle et d'une partie imaginaire et s'écrit sous la forme $z = a + ib$ où a et b sont des nombres réels.



On montre que cette notation peut aussi s'exprimer sous la forme d'un module, noté r , avec $|r| = \sqrt{a^2 + b^2}$, et d'une phase φ . Ce qui permet alors d'écrire : $z = re^{i\varphi}$ où 'e' est la fonction 'exponentielle'⁸³ et où la norme de z s'exprime par $|z|^2 = r^2$.

Nous n'entrerons pas plus loin ici dans le formalisme mathématique des nombres complexes. Il nous suffit de faire remarquer, à ce stade, que la structure $e^{i\varphi}$ de la phase est une structure de fonction d'onde et que c'est elle qui rendra compte de la nature ondulatoire de l'état quantique global. C'est cette caractéristique qu'a repris Erwin Schrödinger dans son équation de propagation.

Notation vectorielle classique

Un vecteur dans un espace vectoriel classique, possède, lui aussi, un module, noté $|v|$, qui désigne son amplitude, ainsi qu'une direction. Il est noté par une petite flèche au sommet de la lettre qui le désigne : $\vec{v}$. L'espace vectoriel est un groupe mathématique qui

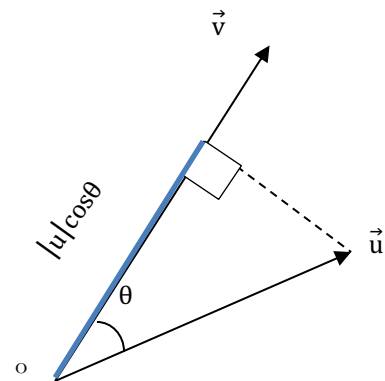
⁸³ Le mathématicien suisse Leonhard Euler a établi la relation trigonométrique suivante : $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$. Formule que l'on peut facilement vérifier sur cercle de rayon 1, centré sur deux axes orthogonaux ayant l'axe imaginaire en ordonnée et l'axe réel en abscisse.

permet de faire un certain nombre d'opérations vectorielles sur le corps des nombres (rationnels, réels, ou complexes) appelés 'scalaires'⁸⁴.

Une des opérations les plus importantes en algèbre et en géométrie vectorielle est le « produit scalaire ». Il s'agit d'une opération algébrique entre deux vecteurs, notée $\vec{u} \cdot \vec{v}$, qui permet de leur associer un nombre scalaire. Le produit scalaire dont l'étymologie renvoie à la notion d'échelle, permet de faire une mesure comparative en projetant orthogonalement un vecteur sur un autre. En mathématique, on dit alors que le produit scalaire propose une 'métrique' à l'espace vectoriel, c'est-à-dire qu'il fournit un outil de mesure de cet espace.

Par exemple, le produit scalaire entre deux vecteurs $\vec{u}$ et $\vec{v}$, faisant un angle θ entre eux, noté $\vec{u} \cdot \vec{v}$ ou encore $(\vec{u}, \vec{v})$, est le produit de la projection de $\vec{u}$ sur $\vec{v}$ par le module de $\vec{v}$: $\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cos \theta$. Deux remarques importantes :

- 1) Si $\vec{v}$ est un vecteur normé à 1, alors le produit scalaire $\vec{u} \cdot \vec{v}$ est directement la projection de $\vec{u}$ sur $\vec{v}$, soit $|\vec{u}| \cos \theta$.
- 2) Si $\vec{u}$ et $\vec{v}$ sont orthogonaux, leur produit scalaire est nul.



Algèbre matricielle

Une autre caractéristique mathématique importante du produit scalaire, dans un espace à n dimensions que nous voulons exposer ici, est qu'il peut s'exprimer sous forme de *tableaux de nombres*, appelés « matrices », que l'on peut manipuler dans une algèbre dite 'matricielle'. Chaque élément de la matrice est un nombre résultant des produits scalaires de deux vecteurs. Avec la notation matricielle, chaque vecteur se présente comme un tableau composé d'une colonne et de n lignes représentant les coefficients du vecteur dans l'espace à n dimensions. Quant au produit scalaire de deux vecteurs, il sera noté comme le produit d'un vecteur 'colonne' par la 'transposée' de l'autre vecteur colonne. La transposée d'un vecteur colonne est un tableau horizontal, appelé 'vecteur ligne'. Le résultat du

⁸⁴ Le qualificatif 'scalaire' dont la racine est commune au nom 'échelle', est attribué à la partie numérique 'réelle' du vecteur : son module. En algèbre linéaire, on appelle 'scalaire' les nombres qui, lorsqu'ils sont multipliés à un vecteur, redonnent un autre vecteur

produit d'un vecteur colonne par un vecteur ligne est un tableau de n lignes et n colonnes. C'est ce tableau carré que l'on appelle 'matrice carrée'. On peut aussi écrire une matrice carrée M d'une manière plus condensée sous la forme :

$$M = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}.$$

La 'trace' d'une matrice carrée est la somme de tous les coefficients de la matrice et s'exprime par : $\text{Tr}(M) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$. Son résultat représente une valeur algébrique du produit scalaire.

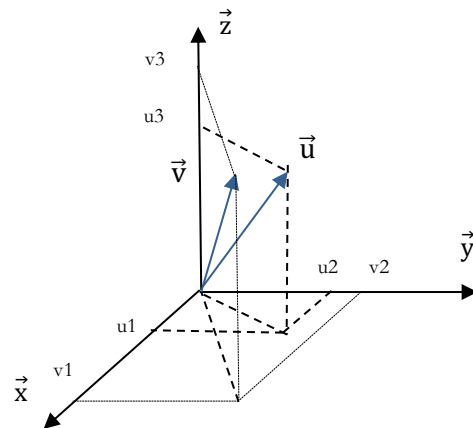
Dans le cas particulier d'un espace orthonormé à trois dimensions le produit scalaire $\vec{u} \cdot \vec{v}$ s'exprime comme la 'trace' du vecteur 'colonne' $\vec{u} : \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$ par le vecteur ligne $\vec{v} : (v_1, v_2, v_3)$, sur la base orthonormée x, y, z :

Le résultat du produit du vecteur 'colonne' $\vec{u}$ par le vecteur ligne $\vec{v}$, est la matrice M suivante :

$$M = \begin{bmatrix} u_1 v_1 & u_1 v_2 & u_1 v_3 \\ u_2 v_1 & u_2 v_2 & u_2 v_3 \\ u_3 v_1 & u_3 v_2 & u_3 v_3 \end{bmatrix}$$

La trace d'une matrice est la somme de toutes les composantes du tableau. Elle s'exprime par l'expression :

$$\text{Tr}(M) = \sum_{i=1}^3 u_i v_i$$



Du fait que la base est orthonormée, la trace est fortement simplifiée : il ne reste plus que les termes non orthogonaux, c'est-à-dire, ceux qui se trouvent sur la diagonale de la matrice, soit $\text{Tr}(M) = u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3$. La physique quantique utilise cette propriété de base orthonormée pour ses calculs de probabilité.

Notation de Dirac

Nous avons vu précédemment que l'espace vectoriel complexe se différenciait de l'espace vectoriel des réels par sa dimension 'imaginaire' qui introduisait un élément d'information supplémentaire : la phase. D'un point de vue mathématique, cela se traduit par un double espace vectoriel couplé entre eux, appelés espaces duaux associés de Hilbert.

Afin de différencier les opérations algébriques entre les espaces vectoriels réels et complexes et simplifier son écriture, le mathématicien et physicien britannique Paul Dirac a introduit en 1939 une notation particulière, appelée ‘bra-ket’⁸⁵, qui permet de distinguer l’espace des vecteurs, nommés ‘kets’ et représentés par le symbole $|\psi\rangle$, de l’espace associé (on parle aussi d’espace dual associé) des vecteurs ‘bra’, représentés par le symbole $\langle\psi|$. Avec cette notation, on note un vecteur d’état $|\psi\rangle$ (au lieu de $\vec{\psi}$). Cela correspond à un vecteur ‘colonne’, dont le transposé (vecteur ligne) ou vecteur dual ‘bra’ est noté $\langle\psi|$.

Bra et ket sont associés par une correspondance biunivoque. En pratique ils sont complexes conjugués l’un de l’autre⁸⁶. Avec cette notation le produit scalaire $(\vec{X}, \vec{Y})$ s’écrit : $\langle X|Y\rangle$.

L’équation de Schrödinger dans la notation de Dirac

Dans la notation bra-ket, l’équation de propagation d’onde de Schrödinger, $|\psi(t)\rangle$, s’exprime par :

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi(t)\rangle}{\partial t} = H|\Psi(t)\rangle^{87}, \text{ où } \hbar \text{ est la constante de Planck, et } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$H = \frac{\vec{P}^2}{2m} + V(\vec{R}, t)$, est l’opérateur Hamiltonien associé à l’énergie totale du système, où P et R sont les observables, c’est-à-dire des opérateurs de mesure, respectivement de l’impulsion⁸⁸ et de la position. On reconnaît avec H l’écriture classique de l’énergie totale comme étant la somme de l’énergie cinétique et de l’énergie potentielle.

De plus, on reconnaît dans l’équation de propagation de Schrödinger, l’équation classique aux dérivées partielles de la loi du mouvement, ou loi de propagation, du système étudié.

⁸⁵ Le terme anglais ‘braket’ désigne une parenthèse de type ‘crochet’

⁸⁶ On rappelle qu’étant donné un nombre complexe $z = a + ib$, le nombre complexe conjugué correspondant, noté z^* ou $\bar{z}$, s’exprime par $\bar{z} = a - ib$. Ainsi, on a : $z\bar{z} = a^2 + b^2$, ou encore $z\bar{z} = |z|^2$, le module au carré de z , c’est-à-dire sa mesure.

⁸⁷ Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë – *Mécanique Quantique I*- Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1, p. 222.

⁸⁸ On rappelle que l’impulsion, ou quantité de mouvement, en mécanique classique s’exprime par $p = mv$, où m est la masse en mouvement et v , sa vitesse.

Dans cette équation, le vecteur $|\psi(t)\rangle$ est appelé le « vecteur d'état ». Nous verrons plus bas qu'il n'est pas une mesure de probabilité lui-même, mais la superposition de toutes les mesures possibles dans un contexte expérimental donné. Schrödinger parle de lui comme d'un 'catalogue'.

Dans le cas particulier d'une particule libre – soumise à aucune force -, et où l'énergie potentielle est nulle (ou constante), l'équation de Schrödinger admet des solutions de la forme :

$$|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle = Ae^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)}$$

$$\text{où } \mathbf{k} \text{ et } \omega \text{ sont liés par la relation } \omega = \frac{\hbar \mathbf{k}^2}{2m}$$

On remarque au passage, la similitude entre l'expression de ω et celle de l'énergie cinétique en mécanique classique : $E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m}$.⁸⁹

Par ailleurs, comme nous l'avons vu dans la section consacrée aux espaces vectoriels complexes, la norme du vecteur $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 = |A|^2$, où A est une constante qui apparaît comme la mesure, suite à l'opération qui a mené à la résolution du vecteur d'état $|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle$.

Opérateurs hermitiques

Dans la section consacrée à l'algèbre matricielle, nous avons vu qu'une matrice pouvait être utilisée comme un 'opérateur'. Cela permet par exemple de faire faire une rotation ou une translation à un vecteur donné. C'est cette même notion d'opérateur qui a été reprise en physique quantique avec la particularité qu'il ne s'agit plus d'espace de nombres réels, mais de nombres complexes. Dans la section précédente, nous avons vu qu'un opérateur pouvait agir sur les 'kets' sous la forme : $A|\psi\rangle = |\psi'\rangle$

Mais on peut aussi définir une action de A sur les 'bras'. Prenons par exemple un bra $\langle\varphi|$ et appliquons-le au vecteur $A|\psi\rangle$, on obtient alors le nombre complexe $\langle\varphi|(A|\psi\rangle)$. Et comme A est linéaire on peut aussi écrire ce nombre sous la forme $(\langle\varphi|A)|\psi\rangle$ et définir, ainsi que nous l'avons fait pour le ket $|\psi'\rangle$, un nouveau bra $\langle\varphi'| = \langle\varphi|A$. On obtient une

⁸⁹ Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Lalœ – *Mécanique Quantique I*- Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1, p. 22

‘conjugaison hermitique’ : $\langle \varphi | (A | \psi) \rangle = (\langle \varphi | A) | \psi \rangle$ et comme la place de la parenthèse n’a pas d’importance, on peut aussi écrire cette égalité sous la forme $\langle \varphi | A | \psi \rangle$ ⁹⁰.

Considérons maintenant un bra $\langle \psi |$ correspondant au ket $|\psi\rangle$ sur lequel on applique l’opérateur A : il existe un *opérateur* spécifique, appelé ‘adjoint’, noté $A^\dagger$, tel que $\langle \psi' | = \langle \psi | A^\dagger$, avec $(A^\dagger)^\dagger = A$ et $(AB)^\dagger = B^\dagger A^\dagger$ ⁹¹.

Pour résumer, le conjugué d’un ket est un bra et inversement ; tandis que le conjugué d’un opérateur est son transposé.

Un opérateur A est dit *hermitique* lorsqu’il est égal à son transposé : $A = A^\dagger$. Dans ce cas, on obtient :

$$\langle A\varphi | \psi \rangle = \langle \varphi | A\psi \rangle$$

Ces opérateurs hermitiques sont particulièrement importants dans le cas de la mesure quantique car ils permettent de choisir une base orthonormée des vecteurs propres, ce qui a l’avantage de simplifier le calcul matriciel des valeurs propres des vecteurs propres.

Vecteurs propres et valeurs propres

On appelle $|\psi\rangle$ *vecteur propre* d’un opérateur linéaire A s’il satisfait à l’équation : $A|\psi\rangle = \lambda|\psi\rangle$, où λ est un nombre complexe, appelé *valeur propre*.

Nous n’allons pas entreprendre ici une analyse exhaustive et philosophique de la théorie quantique et de ses outils, pour cela nous renvoyons le lecteur au livre de Michel Bitbol : *Mécanique quantique - une introduction philosophique* ainsi qu’au livre de Claude Cohen-Tannoudji *Mécanique quantique – Tome I*⁹², auquel nous nous sommes référés ici-et-là en mentionnant les passages.

⁹⁰ *Ibid.* p. 117 – Remarque : l’ordre dans la notation de Dirac est très important. L’écriture $\langle \varphi | A$ ou l’écriture $A \langle \varphi |$ n’ont absolument pas le même effet. En effet, nous avons vu que $\langle \varphi | A$ est un autre vecteur bra qui appliqué au ket $|\psi\rangle$ donne un nombre, tandis que l’écriture $A \langle \varphi |$ appliquée au même ket $|\psi\rangle$ donnerait un opérateur : $A \langle \varphi | \psi \rangle$.

⁹¹ *Ibid.* p. 119 – Remarque : l’ordre change quand on prend l’adjoint d’un produit d’opérateurs.

⁹² Coécrit avec, Bernard Diu et Frank Lalœ

PREPARATION ET MESURE EN PHYSIQUE QUANTIQUE

Nous avons vu plus haut que la théorie propose deux formalismes théoriques très différents :

- Un formalisme mathématique de type classique pour la phase préparatoire d'une expérience avec la loi de propagation aux dérivées partielles de Schrödinger et,
- Un formalisme mathématique matriciel et des lois probabilistes, de Heisenberg, Jordan et Born, pour la phase de mesure de l'expérience.

Il s'agit là d'une première rupture radicale avec la physique classique pour laquelle la préparation consiste simplement à fixer les conditions aux limites de la mesure sans changer ni le formalisme ni les lois. La deuxième rupture fondamentale, nous l'avons vu, est que l'objet quantique manipulé par le formalisme, n'est pas l'objet réel de l'expérience : c'est un outil purement symbolique, soit un vecteur complexe dans la phase préparatoire, soit une densité de probabilité pour la mesure elle-même. Il faut faire un effort de transposition plus important en physique quantique pour faire coïncider l'objet symbolique et l'objet réel. Ou, pour être plus précis, là où la physique classique admettait sans problème la *réalité* d'un centre masse représenté par un point géométrique – ce qui, si on y réfléchit un peu n'est pas sans poser de sérieuses questions sur ce que représente la réalité d'un point –, la physique quantique ne peut plus le faire.

Probabilité quantique et contexte expérimental

Nous avons abordé dans le paragraphes précédent la particularité de la phase de préparation, où l'outil mathématique le plus approprié pour décrire la nature ondulatoire et déterministe d'évolution du vecteur d'état (l'équation de Schrödinger) était l'espace vectoriel complexe munie d'opérateurs (espace de Hilbert).

La phase de mesure, avec l'intervention de son dispositif de mesure, va provoquer une brusque discontinuité de l'équation de propagation en isolant une des mesures possibles à l'instant t de la mesure. La mesure se fait sur un des vecteurs propres du vecteur d'état qui, du coup, se trouve modifié et va continuer d'évoluer dans sa nouvelle forme tant qu'aucune autre mesure n'intervient. Cette phase est souvent appelée « réduction du paquet d'onde » dans la littérature car elle isole un vecteur propre parmi tous les vecteurs propres possibles du vecteur d'état. La mesure elle-même n'est pas déterminée : elle donne une mesure probabiliste sur une des propriétés sélectionnées par le dispositif instrumental.

Nous allons simplement explorer quelques concepts fondamentaux qui nous permettront de mieux saisir les interprétations d'une science à la fois théorique et expérimentale, qui s'appuie aujourd'hui sur près de cent ans de résultats, avec des marges d'erreur extrêmement faibles, et qui n'ont jamais mis à défaut la théorie quelle que soit l'interprétation que l'on peut lui donner.

Postulats de la mesure quantique⁹³

L'interprétation de la physique quantique repose sur un certain nombre de postulats. Nous avons déjà évoqué le premier d'entre eux qui consiste à dire que la connaissance d'un état quantique, représenté par un ket $|\psi(t)\rangle$, appartenant à l'espace des états $\mathcal{E}$ est complètement contenue dans ce vecteur.

Le deuxième postulat consiste à dire que toute propriété observable des vecteurs propres de $|\psi(t)\rangle$ se fait au moyen d'un opérateur hermitique linéaire de l'espace de Hilbert, appelé « observable ». Par exemple, l'observable $\hat{Q} = \mathbf{r}$, pour la position et l'observable $\hat{P} = -i\hbar\nabla$ ou ∇ désigne le gradient des coordonnées de la position $\mathbf{r}$, pour la quantité de mouvement.

Nous abordons maintenant le troisième postulat qui dit que la mesure d'une propriété physique représentée par une observable, par exemple A , appliquée sur le vecteur $|\psi(t)\rangle$, ne peut fournir que l'une des valeurs propres de A .

$A|\psi\rangle = \lambda|\psi\rangle$, où λ est une valeur propre de l'observable A .

La règle de Born : la mesure de probabilité comme projection⁹⁴

Max Born fait une interprétation probabiliste des coefficients linéaires du principe de superposition. Il établit un quatrième postulat selon lequel la mesure d'une grandeur physique, représentée par l'observable A , effectuée sur l'état quantique normalisé $|\psi(t)\rangle$, s'écrit :

$$P(a_i, \psi) = |c_i|^2$$

Ce qui signifie que la probabilité pour que le résultat a_i soit obtenu à la suite d'une mesure de la variable A , si la préparation expérimentale est caractérisée par le vecteur d'état $|\Psi\rangle$, est égale au carré du module de la projection de $|\Psi\rangle$ sur l'axe parallèle au vecteur $|a_i\rangle$

⁹³ Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë – *Mécanique Quantique I*- Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1, pp. 214-222.

⁹⁴ Ce paragraphe est largement inspiré du paragraphe 2.2.1. « Vecteurs d'état et préparations » du livre de M. Bitbol – – *Mécanique Quantique, une introduction philosophique* – Flammarion, 199, p. 149.

La probabilité quantique est bien, comme toute probabilité, une projection, mais avec le formalisme des espaces de Hilbert elle devient une projection géométrique dans l'espace vectoriel complexe.

Mais cette probabilité quantique suit-elle toutes les règles des probabilités classiques ?

Différence entre probabilité d'évènement et survenue d'un évènement

Avant de considérer ce qui fait la spécificité de la probabilité quantique, nous allons adresser dans ce paragraphe un présupposé largement répandu en théorie classique qu'une probabilité $P(e_i)$ donne une information sur la survenue de l'évènement particulier e_i , or cette probabilité ne dit rien sur l'évènement particulier lui-même, mais sur la survenue 'en général' d'évènements du même type.

Wittgenstein l'avait déjà fait remarquer : « Quand les gens disent que la proposition "il est probable que P se produise" énonce quelque chose sur l'évènement P, ils oublient que la probabilité subsiste même si l'évènement P ne se produit pas. Certes, avec la proposition "P va probablement se produire", nous énonçons quelque chose sur l'avenir, mais rien "sur l'évènement P", comme nous le ferait croire la forme grammaticale de l'énoncé⁹⁵ »

Ce que souligne Wittgenstein dans cette citation c'est que la probabilité classique est d'ordre fréquentiste : elle se base sur la survenue de très nombreux évènements en faisant l'hypothèse que la classe d'évènement est parfaitement définie et homogène. Elle détermine alors une certaine « fréquence d'apparition » d'un évènement dans ce contexte, mais elle ne dit rien de l'évènement particulier qui survient lors d'une expérience, par exemple que l'évènement « six » survienne (évènement que ce soit la face représentant le six qui apparaisse en haut lors d'un jet de dés, le dé restant le même pour toutes les expériences de jet). Pour vérifier cet évènement de survenue *a priori*, il faut faire un nombre important d'expériences de jet de dés avant que la moyenne des résultats se rapproche de sa prédiction fréquentiste. On ne sait pas *a priori* quelle face du dé va se montrer avant qu'on ne le lance. On note au passage la différence entre les *Probabilités*, qui s'appuient sur une théorie *a priori* pure et qui est déductive – une théorie sur le futur –, et les

⁹⁵ Citation reprise à Michel Bitbol dans – *Mécanique Quantique, une introduction philosophique* –, Champs Flammarion, 1996, p. 117

Statistiques, qui s'appuient sur une théorie empiriste inductive *a posteriori* – une théorie sur le passé.

En d'autres termes, nous dit Michel Bitbol, la probabilité, si elle dit quelque chose sur le futur, ne dit rien quant à l'événement lui-même : « Elle énonce quelque chose sur l'avenir tout en n'énonçant ni la survenue ni la non-survenue d'un événement.⁹⁶ »

Probabilité classique - axiomes de Kolmogorov :

La théorie classique des probabilités, qui repose sur la théorie des ensembles, a été publiée en allemand, en 1933 sous le titre *Fundements de la théorie des probabilités ((de) Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung)* par le mathématicien russe, Andreï Kolmogorov. Cette théorie repose sur trois axiomes :

1. $P(E) = 1$; ce qui signifie que l'ensemble des événements e_i de E ($E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$) est complet. C'est l'hypothèse fréquentiste énoncée plus haut.
2. Si deux événements e et e' sont mutuellement exclusifs, c'est-à-dire si $e \cap e' = \emptyset$, alors,

$$P(e \cup e') = P(e) + P(e')$$

Ce qui peut s'énoncer par : « la probabilité que deux événements e et e' , mutuellement exclusifs, se produisent simultanément est impossible, seule la probabilité que l'un OU l'autre se réalise est possible⁹⁷ ».

3. $P(\emptyset) = 0$. Ce dernier énoncé est le complément logique des deux précédents axiomes : si on connaît de manière exhaustive la classe des événements E et que tous les événements sont exclusifs les uns des autres, alors la classe de $\bar{E}$ (non- E) est l'ensemble vide, et sa probabilité d'occurrence est nulle.

On peut remarquer que ces trois axiomes de Kolmogorov sont tous compatibles avec le principe de non-contradiction (encore appelé principe de bivalence) et le principe du tiers-exclu de la logique formelle classique.

⁹⁶ *Ibid.*

⁹⁷ Cf. Henry Aubert -

<http://hpa.free.fr/CalProba.htm#IV%20Ev%C3%A9nements%20mutuellement%20exclusifs>

Spécificité de la probabilité quantique : la contextualité

Dans ce paragraphe, nous allons voir que la probabilité quantique s'écarte de la probabilité classique et n'obéit pas tout à fait aux mêmes règles. Une des bizarreries les plus féconde en théorie quantique, sur laquelle nous reviendrons pour son interprétation, est le principe de superposition qui affirme que toute combinaison linéaire d'état est elle-même un état possible. Un thème qui a mené Schrödinger à développer une expérience de pensée à l'échelle macroscopique d'un chat dans une boîte qui serait à la fois mort et vivant.

Nous nous contenterons de faire deux remarques à ce sujet.

La première remarque est que ce principe de superposition des états n'est pas propre à la physique quantique, mais à tout phénomène ondulatoire en physique. Il nous suffit d'évoquer le cas de deux ondes de même nature, par exemple toute combinaison de deux ondes aquatiques donne lieu à une onde résultante qui est la superposition des deux ondes. Dans certaines conditions, cette onde résultante additionne les maximums d'énergies de ces deux ondes : c'est ce phénomène qui est à l'origine de ce qu'on appelle les *vagues scélérates*, des vagues dont l'amplitude et la violence sont totalement imprévisibles et dont la formation a été mise en évidence récemment par des chercheurs de l'université de Buffalo, aux États-Unis⁹⁸. On peut aussi prendre l'exemple des ondes sonores et de l'effet de résonance qui peut apparaître dans certaines conditions.

La deuxième remarque est que le principe de superposition rompt avec la logique classique du principe de non-contradiction et du tiers exclu. En effet, il permet d'affirmer que deux états antagonistes peuvent coexister (A ET non-A, le chat mort ET le chat vivant, etc.) et que, par ailleurs, il existe toute une gamme de niveaux intermédiaires entre deux états pourvus qu'ils obéissent à des combinaisons linéaires du type $\lambda_1 a_1 + \lambda_2 a_2$.

Nous donnerons plus loin une illustration de ce que le principe de superposition signifie avec l'exemple des fentes d'Young proposé par Richard Feynman.

Nous allons enfin aborder la question relative au type de corrélation qu'exprime le calcul quantique des probabilités et comment il s'éloigne de la corrélation classique. Il s'agit de la question de la contextualité. Michel Bitbol tient à rappeler en effet que « son expression [*de la probabilité*⁹⁹] par des vecteurs d'état relatifs 'entremêlés' plutôt que par

⁹⁸ Pr. Gino Biondini - University at Buffalo, The State University of New York | SUNY Buffalo · Department of Mathematics

⁹⁹ Rajouté par nous.

des probabilités conditionnelles, tient au fait qu'elle s'établit non pas entre des événements d'une gamme pré-déterminée, mais entre des événements définis relativement à un contexte (faisant partie d'une gamme qui n'est fixée qu'une fois le programme d'expérimentation fixé).¹⁰⁰ ».

Le vecteur d'état correspond à une gamme de préparation que l'on s'est fixé à l'avance, c'est-à-dire dont le contexte expérimental est prédonné. Rappelons aussi que ce vecteur d'état, comme le disait Schrödinger, est un catalogue de solutions possibles correspondant à *cette* préparation expérimentale. Un catalogue sous la forme d'une superposition linéaire de tous les vecteurs propres correspondants qui se retrouvent donc tous 'intriqués'.

Michel Bitbol nous dit que contrairement aux probabilités classiques, on ne peut donc pas parler de « simple corrélation mais d'une pré-corrélation dont les manifestations possibles en termes de corrélations effectives sont aussi variées que les programmes d'expérimentation qui pourraient être menés à bien à la suite de la préparation¹⁰¹ »

Ce que l'on peut retenir

En résumé, cette section a montré plusieurs aspects essentiels du formalisme de la physique quantique :

- a) Le caractère ondulatoire lié aux nombres complexes
- b) Le lien étroit qui existe entre l'outil Espace Vectoriel et l'outil Matrice
- c) Le caractère profondément discontinu de l'algèbre matricielle qui ne retient dans ses tableaux que les 'mesures' associées aux produits scalaires.

Ce sont ces trois caractéristiques a), b) et c) qui ont permis de réunifier l'aspect ondulatoire et corpusculaire de la physique quantique sous le même formalisme.

- d) Le vecteur d'état $|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle$ est un catalogue de mesures possibles correspondant à une préparation donnée, dont seule la résolution de son équation de propagation permet d'isoler une des solutions - un des vecteurs propres -, et de donner une mesure d'une de ses propriétés observables – une des valeurs propres -, sous la forme d'une prédiction probabiliste.

¹⁰⁰ Michel Bitbol – *Mécanique Quantique, une introduction philosophique* -, Champs Flammarion, 1996, p.190.

¹⁰¹ *Ibid.*

INTERPRETATIONS DE LA THEORIE QUANTIQUE

Les problèmes d'interprétation sont nombreux en physique quantique et ont été marqués, dès l'origine, par trois grandes étapes :

- 1) L'introduction d'une composante discontinue dans le modèle atomique planétaire de Rutherford par Niels Bohr.
- 2) L'école dite de la Mécanique Ondulatoire, représentée principalement par De Broglie et Schrödinger, privilégiant l'interprétation continue et ondulatoire des interférences, très proche de la conception d'Einstein, et
- 3) L'école dite de Copenhague, représentée par Heisenberg, Born, Pauli et Bohr lui-même, privilégiant l'interprétation corpusculaire et quantique de la mesure

Nous reviendrons plus loin sur les différentes interprétations de la physique quantique, mais on peut déjà ici résumer pourquoi on parle tant d'interprétation en physique quantique et si peu en physique classique. La raison principale tient en ce que, en physique classique, il y a presque toujours une relation directe entre l'objet d'étude et le formalisme utilisé pour décrire son évolution. En quelque sorte, l'objet du formalisme et l'objet d'expérience coïncident. Alors qu'on a vu plus haut combien l'objet du formalisme de la physique quantique, essentiellement symboliste et probabiliste est éloigné de l'objet d'expérience. Or, la théorie quantique n'a, à ce jour, jamais été démentie par les expériences. Il faut donc faire un effort d'interprétation pour faire coïncider l'objet du formalisme avec l'objet de l'expérience quantique.

De l'atome de Rutherford à l'atome de Bohr

C'est en 1811 que le chimiste italien, Avogadro énonce une hypothèse selon laquelle le volume occupé par un nombre N de particules, sous une pression et une température donnée, est le même quel que soit le gaz. Cette notion de 'particule' est difficilement acceptable pour les scientifiques de son époque alors emprunts de mécanique continuiste et il faudra attendre un demi-siècle pour qu'une majorité de chimiste, lors du congrès de Karlsruhe en 1860 donne du crédit à l'hypothèse d'Avogadro. Pour autant comme nous l'avons vu avec Boltzmann, cette vision atomiste du monde était encore loin d'être partagée par tout le monde dans la communauté des physiciens de la fin du XIX^{ème} siècle. Il faudra attendre les expériences de Jean Perrin en 1911, expériences destinées à mesurer le nombre N d'Avogadro et la concordance remarquable des résultats de six expériences indépendantes pour que soit enfin acceptée l'idée d'« existence » de particules atomiques.

Restait encore à définir quel type d'objet étaient ces particules atomiques.

C'est lors de la même année 1911 que le physicien britannique, Ernest Rutherford, déjà connu pour ses découvertes sur les rayonnements radioactifs α et β , publie un article retentissant qui décrit l'atome comme un système planétaire à l'échelle microscopique. Les électrons avaient déjà été mis en évidence par Joseph Thomson en 1897, prouvant indirectement qu'il existait des particules plus petites que l'atome qui, dès lors, ne pouvait plus être la particule *insécable* des atomistes grecs. L'hypothèse de Rutherford était que pour que les électrons restent stables, il fallait qu'une force égale et opposée les y contraignent. Par ailleurs la loi mathématique de la force électrique à une forme identique à celle de la force de gravitation. Rutherford imagine donc un système composé d'un noyau de particules positives – le protons, qu'il mettra en évidence en 1913 –, avec des électrons gravitant autour. Un système planétaire microscopique très séduisant par sa simplicité et qui satisfaisait tous les physiciens classiques qui retrouvaient là, à la fois des objets « réels » et des lois compatibles avec les lois électromagnétiques récentes qui expliquaient le rayonnement lumineux des électrons.

Le problème de ce modèle est très vite apparu : les électrons sont supposés décrire des orbites elliptiques, telles des planètes, mais s'ils émettent de la lumière ils perdent nécessairement de l'énergie, ce qui devrait très rapidement aboutir à ce qu'ils s'écrasent dans le noyau de l'atome. Or, ce n'est absolument pas ce que montrent les expériences : la durée de vie des électrons et des atomes est bien plus stable que celle de ce modèle.

Deux ans après que Rutherford ait présenté son modèle, Niels Bohr qui étudiait le spectre émis par l'atome d'hydrogène a compris que le modèle planétaire ne rendait pas compte de l'aspect discontinu des raies observées lors de l'émission ou de l'absorption. Il comprend que la physique classique ne permet pas de rendre compte de ce caractère discontinu et propose un autre modèle orbital *ad hoc* dans lequel seuls quelques niveaux d'énergie, c'est-à-dire certaines orbites, sont autorisés ; niveaux d'énergie qui correspondent aux raies lumineuses observées expérimentalement. De plus, dans son modèle, Bohr dit qu'un électron qui reste sur son orbite n'émet pas de lumière ; il n'émet que lorsqu'il change d'orbite. Par exemple, si l'on considère deux niveaux d'énergie adjacents n et m , d'énergie respective E_n et E_m , si un électron passe du niveau d'énergie E_n au niveau d'énergie inférieure E_m il va émettre une fréquence d'énergie lumineuse ν_{nm} donnée par la formule : $h\nu_{nm} = E_n - E_m$.

Il s'agit là de postulats : Niels Bohr ne peut pas encore expliquer pourquoi. Mais son modèle, raffiné par Arnold Sommerfeld, à l'avantage de rendre compte de faits expérimentaux : les différences de niveau d'énergie correspondent parfaitement aux raies lumineuses observées de l'atome d'hydrogène.

On voit qu'on est passé d'un modèle classique à un modèle qui, s'il n'est pas encore quantique, introduit une notion de discontinuité qui rend compte des résultats d'expérience.

C'est un modèle bien adapté pour l'atome d'hydrogène qui ne possède qu'un seul électron, mais il ne peut expliquer le spectre d'éléments à plusieurs électrons, ni la nature des liaisons chimiques. Il faudra attendre les premiers fondements de la théorie quantique en 1925 pour les expliquer.

La théorie quantique et le problème du réalisme classique

Suite à la thèse de Louis de Broglie sur la nature ondulatoire de la matière, Erwin Schrödinger publie au début de l'année 1926, une équation de propagation de cette onde. Dans son livre *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* Franck Laloë écrit : « Sur le plan conceptuel, au moment de son introduction, la théorie ondulatoire a été accueillie comme une énorme simplification de la nouvelle mécanique, d'autant plus que Schrödinger et d'autres (Dirac, Heisenberg) ont pu rapidement montrer qu'elle permettait de retrouver les prédictions de la mécanique des matrices »¹⁰².

Lorsque Heisenberg, Born et Schrödinger jetèrent les bases théoriques de la mécanique quantique, à partir de l'année 1925, ils renversèrent complètement le cadre conceptuel de la physique classique, ce qui amena de nombreux débats et controverses dont certaines ne furent éteintes que très récemment¹⁰³.

Le paradoxe EPR

Einstein, pourtant l'inventeur du quanta de lumière, était réticent aux théories quantiques proposées à cause, notamment, du principe d'indétermination qui allait à l'encontre du présupposé déterministe de la majorité de la communauté scientifique. En 1935, alors qu'il s'était exilé aux États Unis, il écrit avec deux de ses collègues, Nathan Rosen et Boris Podolsky, un article devenu célèbre intitulé : « La description de la réalité

¹⁰² Franck Laloë - *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* - CNRS Éditions, coll. Savoirs actuels, 2017

¹⁰³ e.g. : 1) non localité des événements quantiques : expérience d'Alain Aspect, 2) la masse comme « effet secondaire » et non plus comme caractéristique intrinsèque : confirmation des bosons de Higgs

par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ?¹⁰⁴ », plus connu sous le nom de « paradoxe EPR ».

Einstein a alors 56 ans et fait partie de la première génération des théoriciens quantiques. Pour lui, il est inconcevable qu'une particule de matière ne puisse ni être « isolée », ni être représentée par des caractéristiques intrinsèques. La seule explication possible est qu'il doit exister des variables que la théorie quantique n'a pas prises en compte : des variables « cachées ».

Dans cet article, il ne s'agit pas pour lui de proposer une théorie alternative, éventuellement dérivée de sa théorie de la relativité générale avec des arguments continuistes propres aux théories classiques, il s'agit de proposer une double expérience de pensée (*Gedankenexperiment*) pour faire suite à l'expérience de pensée que Niels Bohr lui avait proposée huit ans auparavant, lors du cinquième congrès de Solvay, « une réflexion de logique pure »¹⁰⁵, qui prend aux sérieux la théorie quantique et permet de mettre en lumière un paradoxe qui donnera son nom à l'article de « paradoxe EPR », d'après les initiales des trois auteurs.

Comme le fait remarquer Franck Laloë¹⁰⁶, il est important de réaliser qu'Einstein a parfaitement compris et accepté la théorie quantique probabiliste issue des règles de Max Born et de l'algèbre matricielle. Ce n'est donc pas du tout le problème du formalisme mathématique probabiliste qui le gêne mais bien celui soulevé par le « principe d'indétermination » de Heisenberg, connu aussi sous le terme impropre de « principe d'incertitude¹⁰⁷ », aux termes duquel, en physique quantique, on ne peut connaître avec la même précision de mesure la position (q) et la vitesse (p) d'une particule. Toute amélioration de l'une entraînera une détérioration de l'autre et vice-versa, ce qui se traduit par l'inégalité : $\Delta q \times \Delta p \geq \frac{h}{2}$, où h est la constante de Planck.

¹⁰⁴ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen - Can Quantum-Mechanical Description of Physical Description Be Considered Complete? – Physical Review Vol. 47, May 15, 1935. Par la suite, nous ferons référence à cet article par l'abréviation « EPR »

¹⁰⁵ Franck Laloë, « L'argument de Einstein, Podolsky et Rosen », Bibnum [En ligne], Physique, mis en ligne le 01 octobre 2010, consulté le 03 mai 2017. URL : <http://bibnum.revues.org/826>

¹⁰⁶ *Ibid.*

¹⁰⁷ Il n'existe qu'un seul adjectif anglais « uncertainty » pour désigner, à la fois l'incertitude et l'indétermination. Dans le cas qui nous intéresse ici, il ne s'agit absolument pas d'incertitude, mais bien d'indétermination.

Le point de départ de l'article est qu'une théorie est dite « complète » lorsqu'à chacun des éléments de la théorie correspond un « élément de la réalité ». Einstein est un physicien « classique » pour qui la réalité a un sens ontologique fort. Dans *Comment je vois le monde*, il dit : « *Quelques physiciens, au rang desquels je me situe, ne peuvent croire que nous devons abandonner, maintenant et à jamais, l'idée d'une représentation directe de la réalité dans l'espace et le temps ; ou que nous devons accepter cette vue selon laquelle les événements de la nature sont analogues à un jeu de hasard.* »¹⁰⁸ Einstein a donc une conception à la fois réaliste et déterministe du monde et c'est à partir de cette conception classique qu'il développe son expérience de pensée.

Einstein et ses deux collègues partent de trois hypothèses :

- 1) La théorie quantique est juste (Einstein le réaffirme au début de en disant que la question de savoir si la théorie est juste, n'est pas considérée dans son article).
- 2) « Les éléments de réalité physique ne peuvent pas découler de considérations philosophiques *a priori*, mais doivent être trouvés en faisant appel aux résultats d'expérience et de mesure »¹⁰⁹.
- 3) « Si, sans perturber d'aucune manière le système, on peut prédire avec certitude (c.à.d. avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité correspondant à cette quantité physique ».¹¹⁰

Dans la première partie de l'article la première expérience de pensée est celle d'une particule quantique dont on voudrait déterminer la position et la vitesse. Cette expérience de pensée porte donc sur la mesure et elle utilise le formalisme matriciel et probabiliste proposé par Heisenberg, Born et Jordan. La conclusion à ce stade, du fait de la *non commutabilité* des opérateurs 'position' et 'impulsion', « lorsque l'impulsion est connue, ses coordonnées n'ont pas de réalité physique »¹¹¹.

¹⁰⁸ Albert Einstein, « Comment je vois le monde », Paris, Flammarion, 1979, p. 127.

¹⁰⁹ Notre traduction de l'article EPR, bas de page 777 : "The elements of the physical reality cannot be determined by a priori philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements."

¹¹⁰ Notre traduction de l'article EPR, bas de page 777 : "If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity."

¹¹¹ Notre traduction de l'article EPR, bas de page 778 : "when the momentum of a particle is known, its coordinate has no physical reality."

La deuxième partie de l'article va s'attaquer à un autre problème : celui de la superposition des états avant la mesure, tel que le propose l'équation de Schrödinger dont, là encore, ils ne remettent pas en doute la validité. Ce que sous-entendent Einstein, Podolsky et Rosen à travers la deuxième hypothèse, c'est que des résultats d'expériences ne peuvent pas contredire le fait déjà prouvé que la vitesse de la lumière, bien qu'élevée, soit finie. Par conséquent si on considère deux événements à deux endroits de l'espace très éloignés l'un de l'autre, sur une durée de temps très courte, alors, du fait de la finitude de la vitesse de la lumière, ils ne peuvent pas s'influencer mutuellement et instantanément, comme le prétend la théorie quantique. Pour le prouver, l'article propose une deuxième expérience de pensée en considérant un système à deux particules et non plus une seule. Il s'agit là encore de mesurer la position ou la vitesse des particules, mais cette fois-ci situées dans deux régions éloignées A et B de l'espace avec l'hypothèse que la mesure en A ne perturbe en rien la mesure en B. Sur cette base d'hypothèses, la conclusion est que « nous sommes donc obligés de conclure que la description de la réalité physique donnée la fonction d'onde est incomplète »¹¹².

En conclusion, à partir de ces trois hypothèses, Einstein et ses collègues montrent qu'en suivant le double formalisme de la théorie quantiques, on arrive au paradoxe que la théorie quantique est incomplète et que par conséquent, il doit y avoir des « éléments de réalités » qui n'ont pas été pris en compte¹¹³.

Niels Bohr va répondre, deux mois plus tard et sous le même titre¹¹⁴, à l'article « EPR », en s'opposant à sa conclusion. Il explique notamment que le critère de réalité 3), tel qu'il est proposé, n'est pas adapté au formalisme quantique qui couvre intrinsèquement toute procédure de mesure et que, par conséquent, il est impossible de séparer le comportement propre aux objets quantiques de ceux des dispositifs de mesure.

Il y a dans ce dialogue de sourds, la preuve manifeste d'une rupture radicale d'avec la conception classique d'Einstein que perçoit Niels Bohr lors qu'il déclare : « En effet l'interaction finie entre l'objet et le dispositif instrumental précisément conditionnée par

¹¹² Notre traduction de l'article EPR, bas de page 780 : "We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete."

¹¹³ C'est le terme de « variables cachées » qui sera le plus souvent utilisé dans le long débat qui suivra la publication de l'article.

¹¹⁴ N. Bohr - Can Quantum-Mechanical Description of Physical Description Be Considered Complete? – Physical Review Vol. 48, July 13, 1935.

l'effet quantique *oblige* – à cause de l'impossibilité de contrôler la réaction des objets sur les instruments de mesure si ceux-ci doivent remplir leur fonction – à *la renonciation définitive de l'idée classique de causalité et une révision radicale de notre attitude en ce qui concerne la réalité physique*¹¹⁵ ».

Les inégalités de Bell

Contrairement à l'article EPR, la réponse de Bohr restera quasiment inaperçue et il faudra attendre près de trente ans pour que ressurgisse ce débat inachevé. En 1964, le physicien irlandais John Stewart Bell publie un article¹¹⁶ dans lequel il montre que les positions respectives de Bohr et d'Einstein conduisent à des prédictions différentes. Il prend en compte, dans son article, un certain nombre de mesures portant sur des particules intriquées et en arrive à formuler des inégalités qui devraient permettre de trancher le débat entre le comportement classique des particules, tel que défendu par Einstein et le comportement quantique défendu par Bohr et l'école de Copenhague. Lui-même est plus convaincu par la position d'Einstein que de celle de Bohr.

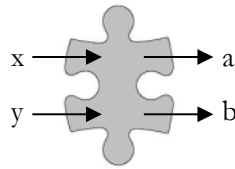
En août 1969, quatre physiciens américains, John F. Clauser, Michael Horne, Abner Shimony et Richard Holt, propose une expérience sur la base de l'article de Bell et reformulent les inégalités sous la forme de quatre *corrélateurs d'évènements*.

Nous n'utiliserons pas ici le formalisme développé par John Bell pour expliquer ce qu'est un *corrélateur d'événement* mais celui que propose Alexeï Grinbaum avec ses deux personnages, Alice et Nob, qui ne peuvent communiquer entre eux qu'avec deux mots symbolisés par « 0 » et « 1 »¹¹⁷. Ils communiquent entre eux au moyen d'une boîte noire possédant deux entrées : une pour Alice, notée x, l'autre pour Nob, notée y. Il existe donc 4 combinaisons d'entrée

¹¹⁵ *Ibid.*, p.697: "Indeed the finite interaction between object and measuring agencies conditioned by the very existence of the quantum of action entails – because of the impossibility of controlling the reaction of the object on the measuring instruments if these are to serve their purpose – the necessity of a final renunciation of the classical ideal of causality and a radical revision of our attitude towards the problem of physical reality."

¹¹⁶ John Stewart Bell – *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox* - Physics Vol. 1, No. 3, pp. 195-290, 1964

¹¹⁷ Alexeï Grinbaum – *Mécanique des étirements* – Ed. Les belles lettres, coll. Encre Marine, Paris, 2014, pp. 93-98.



La question est de savoir quelle réponse va donner la boîte aux sorties a et b, sachant que nous n'avons aucune connaissance du fonctionnement interne de la boîte (c'est pourquoi elle est représentée par une pièce de puzzle).

C'est une question de probabilités conditionnelles : sachant que les entrées x et y ont été données, quelle est la probabilité pour que les sorties coïncident – cas (i) - ou, au contraire, qu'elles ne coïncident pas – cas (ii) ? Cela s'écrit :

- (i) $P(a = b|xy)$: probabilité pour que les valeurs a et b soient identiques, étant données les entrées x et y)
- (ii) $P(a \neq b|xy)$: probabilité pour que les valeurs a et b soient différentes, étant données les entrées x et y)

Chacune de ces probabilités ne peut pas dépasser 100% et, d'après le deuxième axiome de Kolmogorov, leur somme doit être égale à 1 :

$$P(a = b|xy) + P(a \neq b|xy) = 1.$$

Rappelons que cet axiome repose sur une conception logique classique du tiers exclu et de la non-contradiction.

Mais qu'en est-il de leur différence ? C'est précisément cette probabilité des différences que l'on nomme un *corrélateur* : $E_{xy} = P(a = b|xy) - P(a \neq b|xy)$, avec E_{xy} compris entre -1 et +1 ($-1 \leq E_{xy} \leq +1$)¹¹⁸. On peut remarquer que la valeur absolue de chaque corrélateur ne peut pas dépasser 1.

Comme nous avons quatre états possibles des entrées a et b, il leur correspond quatre corrélateurs : E_{00} , E_{01} , E_{10} et E_{11} . Tout le génie de John Bell a été, plutôt que de proposer une simple somme des quatre corrélateurs, d'en soustraire le dernier et d'en prendre la valeur absolue. Ce qui a donné sa fameuse inégalité :

$$|E_{00} + E_{01} + E_{10} - E_{11}| \leq 2$$

¹¹⁸ Si par exemple les sorties a et b coïncident toujours, on dira qu'elles sont parfaitement corrélées et, dans ce cas $E_{xy} = +1$ (avec $P(a = b|xy) = +1$ et $P(a \neq b|xy) = 0$)

En l'honneur de l'expérience proposée par Clauser, Horne, Shimony et Holt, la valeur de cette inégalité est désignée par la variable 'CHSH'. En physique classique, $CHSH \leq 2$, mais est-ce le cas en physique quantique ? Si le CHSH est lui aussi ≤ 2 , alors cela signifie que la physique quantique obéit aux mêmes règles que celles de la physique classique, en particulier, elle obéit elle aussi aux lois de localité de l'espace, et dans ce cas Einstein avait raison : la théorie quantique est incomplète, elle n'a pas pris en compte un certain nombre de variable.

Il faudra attendre que l'équipe d'Alain Aspect mène des expériences entre 1980 et 1982 à l'Institut d'optique à Orsay pour démontrer, de façon très convaincante, que les inégalités de Bell ne sont pas respectées en physique quantique où le $CHSH \leq 2\sqrt{2}$. La physique quantique a enfin atteint le statut de théorie physique complète : il n'y a plus aucune variable cachée à prendre en compte. Le paradoxe EPR n'a plus lieu d'être.

Alexei Grinbaum fait remarquer au passage que le CHSH peut théoriquement prendre toutes les valeurs entre 2 et 4 et que cela laisse le champ ouvert à d'autres sciences physiques d'émerger.

L'interprétation orthodoxe et les autres

Nous avons vu précédemment que l'histoire de la théorie quantique s'est déroulée en trois étapes et que les deux dernières – l'interprétation ondulatoire et l'interprétation matricielle probabiliste – ont émergées quasi simultanément entre les années 1925 et 1926. Le problème de l'interprétation ondulatoire, outre qu'elle est une interprétation déterministe de la propagation, est qu'elle est isotrope dans l'espace. Or dans toutes les expériences qui ont été menées sur les particules, celles-ci suivent des directions bien spécifiques de l'espace : elles ne « se "diluent" jamais dans toutes les directions de l'espace !¹¹⁹ ». C'est cette constatation qui a conduit Werner Heisenberg à proposer une interprétation probabiliste de l'équation de Schrödinger : « les processus quantiques comme les collisions sont fondamentalement non déterministes, et la seule prédiction qui puisse être calculée est un ensemble de probabilités, données par le carré du module de la fonction d'onde¹²⁰ ».

¹¹⁹ Franck Laloë - *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* - CNRS Éditions, coll. Savoirs actuels, 2017, p. 2

¹²⁰ *Ibid.*, p. 6

Cette interprétation de la physique quantique est celle dite de l'école de Copenhague en hommage à Bohr, mais n'a cessé d'évoluer depuis sa création en intégrant toutes les nouvelles découvertes. Notamment elle a enrichi son domaine d'application, restreint à son origine aux champs électromagnétiques, pour intégrer, dans sa version actuelle, la théorie des champs. C'est cette interprétation consolidée que l'on retrouve majoritairement dans la plupart des manuels de physique quantique dans le monde, que l'on appelle l'interprétation « orthodoxe » ou « standard ».

Dans l'approche orthodoxe, on considère deux phases avec deux formalismes mathématiques très différents : une phase préparatoire dans laquelle l'état du système évolue au cours du temps de façon continue selon l'équation de Schrödinger et une phase de mesure qui inclut un dispositif expérimental sur un objet quantique.

Dans la phase préparatoire, l'objet considéré, l'état du système, est un objet mathématique : un vecteur de coordonnées complexes représentant l'ensemble des mesures possibles à un instant donné – incluant le dispositif expérimental pour y parvenir –, des propriétés d'un objet quantique donné : un atome, un électron, un proton, etc., ou toute combinaison de ces objets. Les propriétés pouvant être aussi variées que la position, la quantité de mouvement, le moment magnétique interne (spin), l'énergie cinétique, etc. Si aucune mesure n'est effectuée, l'état du système évolue simplement dans le temps avec toutes les mesures possibles. Le système reste purement ondulatoire.

Dans la phase de mesure, c'est le formalisme matriciel et probabiliste qui intervient, isolant un des états du vecteur d'état et donnant une probabilité sur une des propriétés détectées par le dispositif instrumental.

Il existe aussi d'autres écoles interprétatives dont celle développée par David Bohm en 1952 et celle développée par Hugh Everett en 1957, dite des Multivers, qui toutes deux s'affranchissent du postulat d'indétermination de la mesure de l'interprétation orthodoxe. Nous n'en dirons pas plus dans le cadre de ce mémoire et renvoyons le lecteur, par exemple vers le petit livre de Thomas Boyer-Kassem : *Qu'est-ce que la mécanique quantique ?*¹²¹

¹²¹ Thomas Boyer-Kassem : *Qu'est-ce que la mécanique quantique ?* – Ed. Vrin, Coll. Chemins philosophiques, Paris, 2015

Les idées forces de l'interprétation orthodoxes

Pour synthétiser ce qui a été dit plus haut, nous dressons ici une liste des principales idées forces de l'interprétation orthodoxe :

Double nature déterministe et indéterministe du monde quantique

La fonction d'onde est un « outil » qui permet de déterminer les différentes probabilités d'une mesure. Lorsque la prédiction atteint 100%, la valeur observée peut être considérée comme une propriété de l'objet observé, mais en physique quantique ces prédictions peuvent atteindre, au moment de la mesure, des valeurs inférieures à un. Il ne s'agit pas là de notre incapacité – de nos limitations – à connaître l'objet, mais bien de la nature fondamentalement indéterminée du monde quantique.

Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, dans la phase préparatoire à la mesure, le monde quantique reste déterministe tant qu'aucune mesure n'est faite. L'expérience des fentes d'Young appliquée à des objets quantiques – des photons - en est une bonne illustration. Lorsque les deux fentes sont ouvertes au début de la mesure, des points d'impact apparaissent sur l'écran de manière aléatoire : ils dénotent de la nature discontinue et indéterminée des objets quantiques. Mais si on laisse l'expérience évoluer dans le temps sans modifier le système, ces impacts vont petit-à-petit former des franges sombres et brillantes, espacées de manière régulière, révélant une nature ondulatoire et continue.

Interaction de la mesure

Contrairement à ce qui se passe en physique classique, les conditions expérimentales interfèrent sur le résultat de la mesure. Il s'établit une relation entre l'objet de la mesure et le dispositif de mesure. Ce constat amène à deux concepts philosophiques différents : a) le concept de « complémentarité », cher à Niels Bohr et b) le concept de réduction du paquet d'onde, défendu par Heisenberg.

Le concept de complémentarité

Selon Bohr, il faut accepter cette double nature contradictoire de la théorie quantique, juxtaposition d'une image corpusculaire et d'une image ondulatoire dont aucune ne représente de manière adéquate la réalité de l'objet quantique. Un point de vue proche de

celui de Schrödinger qui disait que la physique quantique, telle qu'elle est interprétée de façon orthodoxe, conduit à la non picturabilité des choses¹²².

Bohr va même jusqu'à dire que la réalité physique telle que nous la connaissons dépend du contexte dans lequel elle est observée. Pour lui, tant qu'on n'a pas mesuré la réalité, cette réalité n'*existe* pas : l'état de la particule n'est pas déterminé et reste probabiliste.

Le langage humain a certaines limitations anthropologiques qui fait que, lorsqu'il décrit le monde qui l'entoure, même de manière scientifique, il utilise des concepts classiques, tel que celui d'« objet » auquel il associe des propriétés intrinsèques. Il fait une partition du monde qui lui est propre et, s'il ne peut y échapper, il peut du moins en être conscient et développer des points de vue contradictoires. Heisenberg, dans *Physique et Philosophie*¹²³, dit que cela ne sert à rien de discuter de ce que nous aurions pu dire si nous avions été d'autres intelligence qu'humaine et il cite une phrase du physicien Carl Friedrich von Weizsäcker : « La nature est antérieure à l'homme, mais l'homme est antérieur aux sciences de la nature ». Le monde quantique est donc étrange non pas de par ses « propriétés » mais de par l'usage de notre langage.

Le concept de réduction du paquet d'onde

Pour Heisenberg, plus pragmatique et orienté vers l'expérience que Bohr, il faut considérer les deux phases que sont la préparation et la mesure : « Il est très important de se rendre compte que notre objet a forcément été en contact avec les autres parties du monde, à savoir les conditions expérimentales, l'appareil de mesure, etc., avant l'observation et, au minimum, pendant l'observation.¹²⁴ ». Le physicien Michel Paty se range du même avis lorsqu'il écrit : « les propriétés d'un système physique ne peuvent être pensées indépendamment de ses conditions d'observation, qui se ramènent nécessairement, en dernier ressort, à des dispositifs d'observation et de mesure de caractère macroscopique,

¹²² Selon Etienne Klein dans sa conférence donnée, en janvier 2007, à l'École Centrale de Paris, intitulée « Comment la physique quantique est-elle née ? ».

¹²³ Werner Heisenberg - *Physique et philosophie : La science moderne en révolution* - Traduit de l'anglais par Jacqueline Hadamard, Première édition, Albin Michel, coll. Les savants et le monde, Paris, 1961.

¹²⁴ Werner Heisenberg - *Physics and philosophy: the revolution in modern science*, Harpers & Brothers publishers, New-York, 1958, p. 53 - notre traduction de : "When we now come to the next observation, the result of which should be predicted from the theory, it is very important to realize that our object has to be in contact with the other part of the world, namely, the experimental arrangement, the measuring rod, etc., before or at least at the moment of observation."

appropriés à nos sens, et faisant appel aux grandeurs de la physique classique, supposées plus naturelles que toute autre¹²⁵ ».

Si la fonction d'onde contient toutes les états potentiels liés au dispositif instrumental mis en place, si elle décrit bien toute les 'potentialités' dans un contexte instrumental donné, c'est l'acte de mesure lui-même qui vient introduire une discontinuité en sélectionnant une mesure parmi toutes celles potentielles et en l'*actualisant*. C'est qu'on appelle la réduction du paquet d'onde. Mais, nous dit Heisenberg, le saut quantique observé, n'est pas un saut de la nature (*Natura non facit saltus*), mais bien un saut de notre connaissance¹²⁶.

L'interprétation orthodoxe en résumé

Pour résumer, on peut dire que l'interprétation orthodoxe, différencie la connaissance d'un phénomène selon qu'il est observé ou non :

- Lorsqu'il n'est pas observé, il n'est pas possible de le connaître. La seule connaissance que nous en avons est à travers l'équation de Schrödinger qui nous donne tous les états possibles du système ;
- Lorsqu'on fait une observation, le fait même d'observer apporte suffisamment d'éléments au système observé pour qu'il se manifeste sous la forme d'un des états possibles décrits par la formule de Schrödinger.

L'expérience des fentes d'Young

Comme nous l'avons vu à travers les sections précédentes, la difficulté conceptuelle de la physique quantique, surtout au moment de sa formulation théorique, tient à une dualité que l'on retrouve à tous les niveaux :

- Au niveau de la physique théorique avec la dualité onde/corpuscule ;

¹²⁵ Michel Paty. *Interprétations et significations en physique quantique*. Revue Internationale de Philosophie, Presses Universitaires de France, 2000, pp.199-242. halshs-00170473

¹²⁶ Werner Heisenberg - *Physics and philosophy: the revolution in modern science*, Harpers & Brothers publishers, New-York, 1958, p. 54 - notre traduction de : "Since through the observation our knowledge of the system has changed discontinuously, its mathematical representation also has undergone the discontinuous change and we speak of a "quantum jump." When the old adage "Natura non facit saltus" is used as a basis for criticism of quantum theory, we can reply that certainly our knowledge can change suddenly and that this fact justifies the use of the term "quantum jump."

- Au niveau du formalisme mathématique avec l'équation aux dérivées partielles des ondes dans la partie préparatoire de l'expérience et l'analyse matricielle associée aux probabilités dans la partie mesure sur les corpuscules ;
- Au niveau de l'interprétation avec une interprétation continuiste déterministe dans la partie préparatoire de l'expérience et une interprétation quantique discontinuiste et stochastique pour la partie mesure sur les corpuscules ;
- Enfin, au niveau philosophique avec d'un côté, une vision classique déterministe et réaliste de la nature, de l'autre une vision probabiliste et non réaliste de la nature.

L'illustration la plus convaincante de la double nature ondulatoire et corpusculaire de la matière au niveau atomique et subatomique est celle que Richard Feynman a proposée dans son cours en 1960, celle des doubles fentes d'Young appliquée à la physique quantique.

Dans son cours des années 1960, destiné aux étudiants de licence de physique au California Institute of Technology (Caltech), le grand physicien américain Richard Feynman, prix Nobel 1965, consacrait une section sur le 'comportement quantique' en proposant une expérience de pensée basée sur les fentes d'Young. Dans cette expérience, il considérait la possibilité de pouvoir envoyer des électrons un à un, ce qui d'un point de vue pratique est très difficile à réaliser. Il faudra attendre 60 ans et plusieurs tentatives pour réaliser cette expérience telle que décrite par Feynman :

- 1976 : l'expérience italienne de Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli et Giulio Pozzi – mais il s'agit en réalité d'une succession de différents réglages d'expérience ;
- 1989 : l'expérience japonaise de A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki et H. Ezawa – il ne s'agit pas vraiment de double fente mais d'un bi-prisme ;
- 2013 : il faudra finalement attendre l'expérience de Roger Bach, Damian Pope, Sy-Hwang Liou et Herman Batelaan, du Centre de Recherche de la Matière et des Nanosciences de l'état du Nebraska, pour que soit enfin concrétisée pleinement l'expérience de pensée proposée par Feynman.

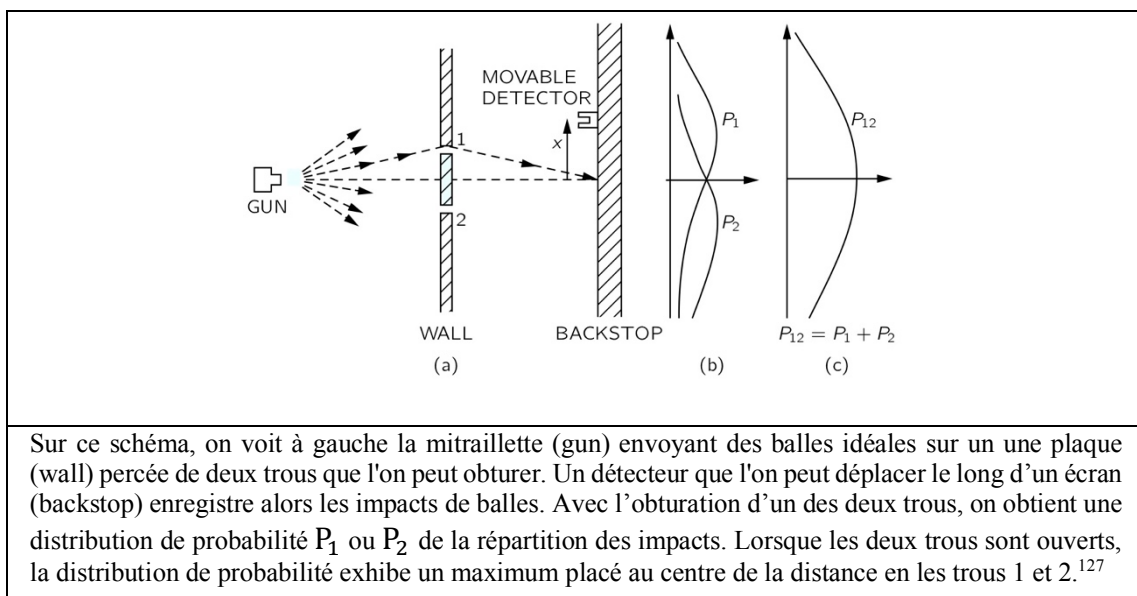
Pour son expérience de pensée, Feynman propose le même dispositif que celui utilisé par Thomas Young en 1801 pour démontrer la nature ondulatoire de la lumière, grâce aux

figures d'interférences observées sur écran placé derrière une plaque percée de deux trous devant laquelle on a placé une source lumineuse.

Richard Feynman propose trois sources différentes : a) une mitrailleuse qui envoie des balles idéales qui ne se brisent pas, b) une source vibratoire placée dans un liquide et qui provoque une onde aquatique d'amplitude réglable et, enfin, c) une source qui émet des électrons.

Première expérience : la mitrailleuse

Dans l'expérience a) un dispositif qui se déplace le long de l'écran permet de compter le nombre d'impacts en chaque point de l'écran et permet d'obtenir ainsi une courbe de distribution des impacts dans le cas où les deux trous 1 & 2 sont ouverts (P_{12}) ; dans le cas où la trou 2 est obturé (P_1) et dans le cas où la trou 1 est obturé (P_2).



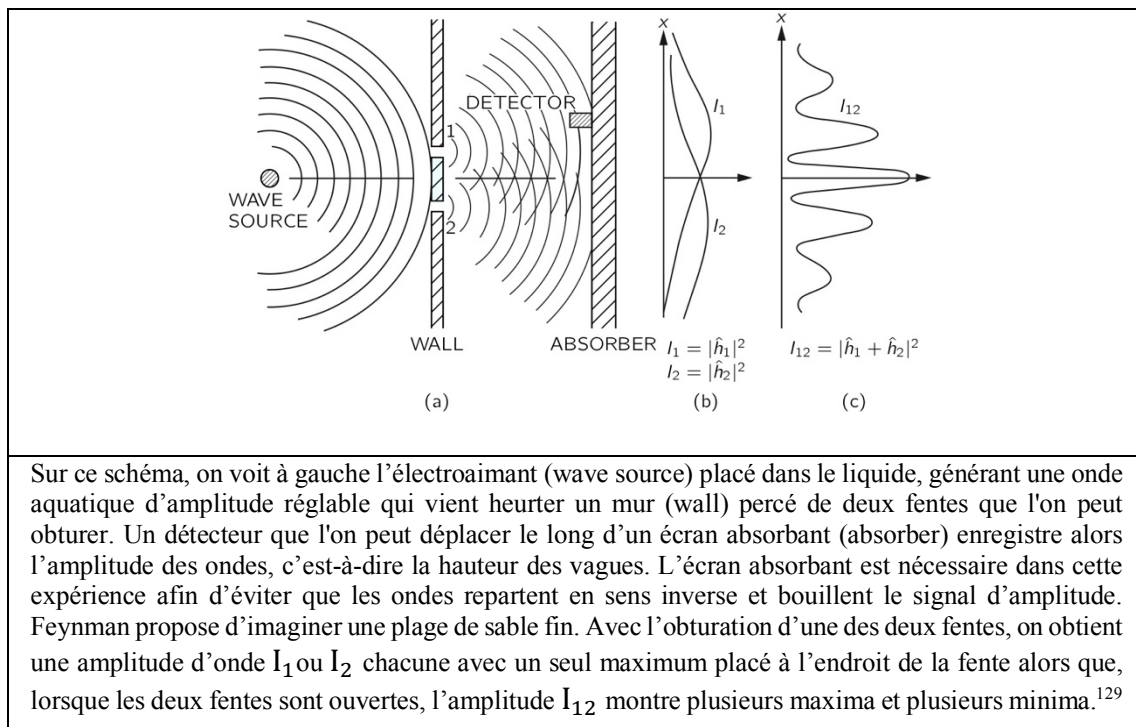
Dans ce premier cas de figure, lorsque les deux trous sont ouverts, on a une distribution P_{12} qui est égale à la somme des distributions lorsque chacun des trous est obturé : $P_{12} = P_1 + P_2$. On retrouve une loi qui obéit au deuxième axiome Kolmogorov de la théorie des probabilités classiques et on n'observe aucune figure d'interférence. Les balles, lorsqu'elles passent par le trou 1 ou le trou 2, ne sont pas 'corrélées' entre elles lorsqu'elles atteignent le mur. Ou, pour le dire dans les termes de la théorie : les deux événements e (balle par le trou 1) et e' (balle par le trou 2) sont mutuellement exclusifs ce qui, en théorie des ensembles, s'écrit : $e \cap e' = \emptyset$. En ce qui concerne cette expérience

¹²⁷ *The Feynman lectures on physics – Volume I* – the Millennium Edition, published by Basic Books, a member of the Perseus Books Group 2010, p. 37-3.

avec des balles, le fait que les deux événements e et e' , soit mutuellement exclusifs, revient à dire qu'il est impossible qu'une balle passe simultanément par le trou 1 'ET' par le trou 2 : seule la probabilité que l'un 'OU' l'autre se réalise est possible¹²⁸.

Deuxième expérience : la propagation de vagues

Dans l'expérience b) un dispositif vibratoire – un électroaimant déplaçant une masse perpendiculairement à la surface de l'eau -, est placé dans un liquide provoquant des vagues : une onde aquatique circulaire qui se propage à partir de la source.



Le choix de Feynman d'une onde aquatique plutôt qu'une onde lumineuse est astucieux pour deux raisons essentielles à sa démonstration : i) les vagues liquides permettent de mieux visualiser les minima et maxima dans l'espace à travers des courbes sinusoïdales ; ii) la lumière est déjà un objet quantique et cette expérience aquatique montre que le phénomène d'interférence ondulatoire n'est pas lié à la nature quantique ou classique de l'objet étudié. Il ne s'agit pas d'une 'caractéristique' de l'objet, mais d'un mode de propagation.

¹²⁸ En algèbre booléenne, le ET logique se transcrit par l'opération de multiplication, tandis que le OU logique est transcrit par l'addition.

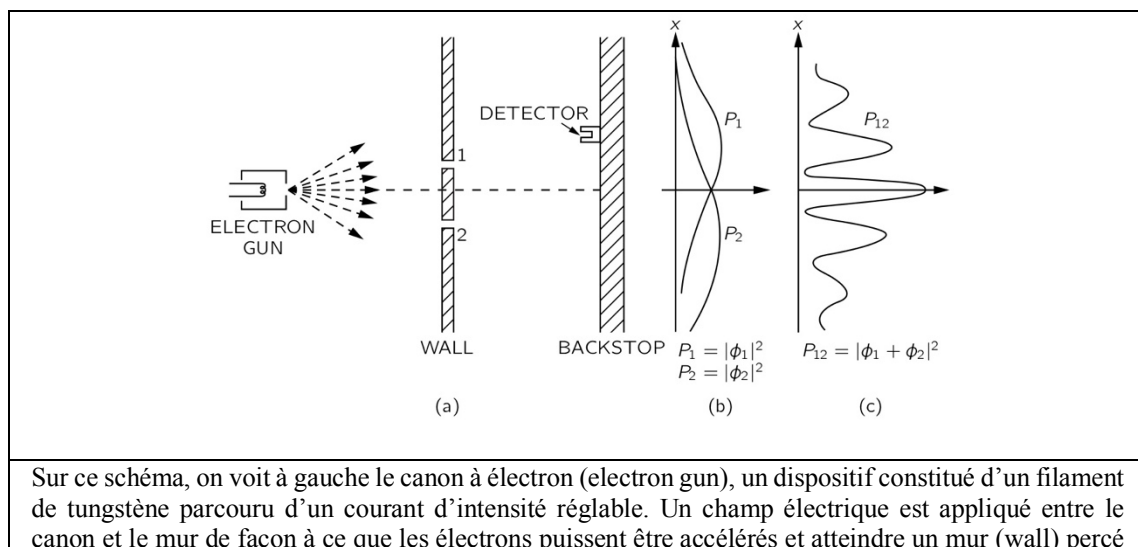
¹²⁹ *The Feynman lectures on physics – Volume I* – the Millennium Edition, published by Basic Books, a member of the Perseus Books Group 2010, p. 37-3.

Nous avons vu, dans la section consacrée aux formalisme mathématique, qu'une fonction sinusoïdale peut se représenter sous la forme d'un nombre complexe $z = a + ib$ que l'on peut aussi écrire $z = re^{i\varphi}$, où r est le module (la partie réelle du nombre), avec $|r| = \sqrt{a^2 + b^2}$, et d'une phase φ . Dans l'exemple de Feynman, c'est l'amplitude qui est exprimée par un nombre complexe et il utilise le symbole 'caret' pour le signaler : $I_1 = |\hat{h}_1|^2$, où h est la hauteur de vague, dont la valeur instantanée, à l'instant t , s'exprime par $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$.

Dans cette expérience, la courbe observée lorsque les deux fentes sont ouvertes, ne correspond pas à la somme des courbes lorsque chacune des fentes est obstruée : $I_{12} \neq I_1 + I_2$. Ici, $I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$ dont le développement fait apparaître un terme 'croisé' $|\hat{h}_1||\hat{h}_2|$, ce qui conduit à l'égalité suivante : $I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$, où δ représente la différence de phase entre $\hat{h}_1$ et $\hat{h}_2$. Le troisième terme de cette égalité, le terme 'croisé', est ce que l'on appelle le terme d'interférence.

Troisième expérience : le canon à électron

Finalement, dans la dernière expérience, Feynman propose de placer un canon à électron en appliquant un champ électrique entre le canon et le mur de façon à ce que les électrons puissent être accélérés vers le mur qui est constitué de deux fentes par où ils peuvent continuer leur course jusqu'à un écran où est placé un détecteur mobile capable de compter le nombre d'impact (un compteur Geiger).



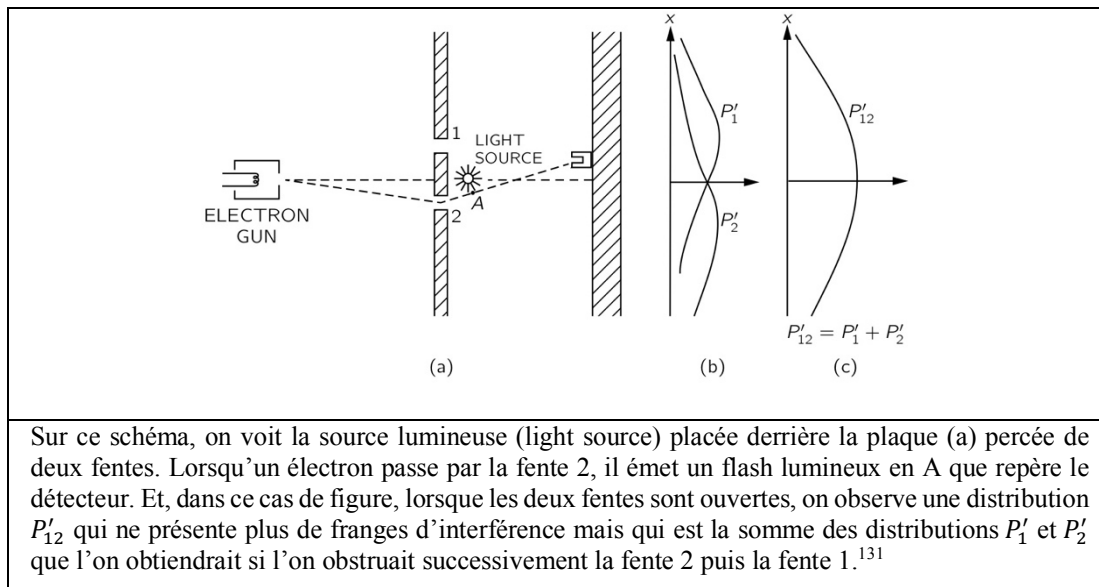
de deux fentes que l'on peut obturer. Un détecteur que l'on peut déplacer le long d'un écran (backstop) compte le nombre d'impact reçu à chaque position.¹³⁰

Or, dans cette expérience, les électrons, qui sont considérés comme des corpuscules puisqu'on peut les compter, ne se comportent pas comme les balles de la première expérience, mais comme les 'vagues' de la deuxième expérience. Avec la règle de Born que nous avons vu plus haut, on peut écrire $P_1 = |\hat{\Phi}_1|^2$, où $\hat{\Phi}_1$ est le vecteur propre correspondant aux électrons qui passent par la fente 1. Lorsque les deux fentes sont ouvertes, on se retrouve alors avec $P_{12} = |\hat{\Phi}_1 + \hat{\Phi}_2|^2$ qui répond au principe de superposition de deux fonctions d'onde $\hat{\Phi}_1$ et $\hat{\Phi}_2$ et donc avec l'apparition d'un terme d'interférence.

Contrairement à ce que l'on pouvait affirmer avec les balles de la mitrailleuse, on ne peut plus exclure qu'un électron puisse passer simultanément par la fente 1 et la fente 2. Cela heurte notre 'bon sens' seulement si on a en tête une réalité de l'électron comme d'une 'particule' assimilable à une balle de mitrailleuse. Pour en avoir le cœur net, il faudrait placer un détecteur derrière les fentes et observer si c'est possible.

C'est ce que propose Feynman dans une quatrième expérience dans laquelle il reprend le dispositif de l'expérience avec le canon à électron, mais il place, cette fois-ci, une source lumineuse très puissante de l'autre côté de la plaque, entre les deux fentes. A chaque fois qu'un électron passera à proximité de la source, il va émettre un photon qui sera visible par le petit éclair émis pour conserver sa charge et il sera possible ainsi de repérer s'il est passé par la fente 1 ou la fente 2. Avec ce dispositif on peut alors retracer les distributions en indiquant quel chemin a suivi un électron : P'_1 si l'éclair est observé du côté de la fente 1 ou P'_2 s'il est observé du côté de la fente 2.

¹³⁰ *The Feynman lectures on physics – Volume I* – the Millennium Edition, published by Basic Books, a member of the Perseus Books Group 2010, p. 37-5



Lorsque la source lumineuse est active et que le détecteur peut repérer si le flash émis provient de la fente 1 ou de la fente 2, on n'observe aucune frange d'interférence et $P'_{12} = P'_1 + P'_2$, comme dans le cas des balles de mitraille. Mais lorsque la source lumineuse est éteinte, on retrouve les franges d'interférences et la distribution retrouve alors la forme $P_{12} = |\hat{\Phi}_1 + \hat{\Phi}_2|^2$ avec le terme d'interférence. Une explication possible serait que la disparition des franges d'interférence est liée au fait que l'énergie de la source lumineuse vient perturber la trajectoire des électrons mais si on baisse l'intensité de plus en plus, on s'apercevrait premièrement que le flash lumineux émis par le photon a toujours la même intensité et deuxièmement, que certains électrons sont détectés tandis que d'autres passent sans émettre de flash lumineux.

On pourrait alors penser, nous dit Feynman, que plutôt que de jouer sur l'intensité lumineuse, on pourrait jouer sur la fréquence émise par le photon d'énergie $h\nu$. Pour ce faire, on baisse la fréquence de la source lumineuse en utilisant par exemple des ondes radiofréquences (comme celles d'un radar) de façon à ne pas perturber la trajectoire de l'électron lorsqu'il passe à proximité de la source. Mais si on conduisait une telle expérience, on s'apercevrait très vite qu'il y a une limitation lorsque la longueur d'onde lumineuse atteint un ordre de grandeur proche, ou est supérieure à la distance entre les fentes. Au lieu d'observer un flash ponctuel, on obtient un flash très étalé et on ne peut plus dire si l'électron est passé par la fente 1 ou la fente 2. On retrouve là le principe

¹³¹ *The Feynman lectures on physics – Volume I* – the Millennium Edition, published by Basic Books, a member of the Perseus Books Group 2010, p. 37-7

d'indétermination d'Heisenberg : on ne peut pas connaître simultanément avec le même degré de certitude la quantité de mouvement (caractérisée par le flash lumineux au voisinage de la source) et la position de l'électron (passé par la fente 1 ou la fente 2).

La conclusion est que dès que l'on cherche à connaître le chemin suivi par l'électron (le flash lumineux émis lors du passage par la fente 1 ou 2), dès que l'on place un dispositif de mesure, on perturbe le phénomène et on n'observe plus de franges d'interférences.

Feynman conclut son chapitre par une remarque importante concernant la physique quantique : cette expérience de pensée nous montre qu'il n'est plus possible de prédire, à coup sûr, la trajectoire d'un électron. Nous ne pouvons qu'estimer la probabilité d'un tel événement.

Cela veut-il dire que nous devons abandonner définitivement en physique l'idée de pouvoir prédire de manière déterminée la survenue d'un événement ? Feynman répond : « oui, la physique a abandonné. Nous ne savons pas comment prédire un événement dans des circonstances données, et nous pensons maintenant que c'est impossible et que la seule chose que nous puissions prédire, c'est la probabilité d'occurrence de différents événements. ¹³² »

¹³² *The Feynman lectures on physics – Volume I* – the Millennium Edition, published by Basic Books, a member of the Perseus Books Group 2010, p. 37-10

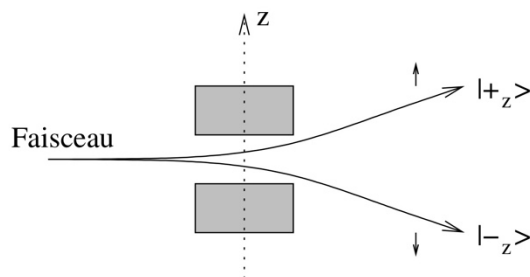
LE SYSTEME QUANTIQUE A DEUX PARTICULES

Il s'agira d'expliquer, dans cette section, l'exemple d'un système à deux particules tel que M. Bitbol le présente dans son article¹³³ et d'opérer ainsi une transition sur la troisième partie du mémoire qui se consacrera aux arguments développés par M. Bitbol pour donner une interprétation.

Avant de commencer, remarquons qu'il y a une similitude entre l'exemple des fentes d'Young avec une source électronique et celui d'un système à deux particules dont on veut mesurer le spin. Dans ces deux exemples, il y a superposition de deux états et intrication quantique : impossible de séparer les électrons venant des fentes 1 ou 2 dans le cas des fentes d'Young ; impossibilité de séparer le moment magnétique des états individuels de celui de l'état du système dans l'exemple de M. Bitbol.

Spin quantique

Rappelons aussi qu'une particule quantique possède un certain nombre de propriétés dont un moment dipolaire magnétique qui ne dépend pas de son mouvement autour du noyau. Par exemple, pour un électron, ce moment magnétique intrinsèque, appelé 'spin', peut prendre deux valeurs $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$ suivant un axe privilégié 'z' :



Expérience de Stern et Gerlach

Une particule (a) préparée pour mesurer sa valeur de spin va être représentée dans un espace de Hilbert $\mathcal{E}_{spin}^{(a)}$ à deux dimensions $\{|+_z\rangle, |-_z\rangle\}$, encore appelée base $|\pm_z\rangle$. L'état de spin de la particule, noté $|s\rangle$, est défini alors comme la superposition des deux valeurs possibles de spin suivant l'axe z :

$$|s\rangle = \alpha|+_z\rangle + \beta|-_z\rangle$$

Et, selon le principe de superposition, le vecteur d'état $|s\rangle$ appartient lui-même à l'espace de Hilbert $\mathcal{E}_{spin}^a$ de la particule (a). Le problème avec l'écriture de l'état $|s\rangle$ ci-

¹³³ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation*.

dessus, est que l'axe z semble avoir un rôle privilégié ce qui est en contradiction avec le principe qu'en physique il n'existe aucune direction privilégiée dans l'espace.

Pour s'affranchir de ce problème et ne plus faire référence à une direction privilégiée, il faudra faire intervenir des opérateurs de rotation R que nous ne détaillerons pas ici. Le résultat sont des matrices carrées à deux dimensions, appelées « matrices de Pauli » appliquée sur chaque projection x, y, z de l'espace¹³⁴.

Pour revenir à l'expérience de Stern-Gerlach, décrite plus haut, qui privilégie l'axe z , la mesure du spin est associée à l'observable $\hat{S}_z$ et donne deux résultats possibles : $|+_z\rangle$ ou $|-_z\rangle$.

Système de spin à deux particules

Si maintenant, au lieu d'une seule particule, on considère un système à deux particules, on obtient un nouveau vecteur d'état $|\Psi_T\rangle$ appartenant à un nouvel espace de Hilbert $\mathcal{E}_S$, de dimension 4, qui est le *produit tensoriel* entre les espaces de Hilbert de la particule 1, noté $\mathcal{E}_S(1)$ et celui de la particule 2, noté $\mathcal{E}_S(2)$:

$$\mathcal{E}_S = \mathcal{E}_S(1) \otimes \mathcal{E}_S(2).$$

Comme chaque particule peut avoir deux valeurs de spin chacune, le produit tensoriel, noté $\otimes$, donne une combinaison de quatre états possibles, quatre vecteur propres notés :

- $|+ +\rangle = |1: +\rangle |2: +\rangle$
- $|+ -\rangle = |1: +\rangle |2: -\rangle$
- $|- +\rangle = |1: -\rangle |2: +\rangle$
- $|- -\rangle = |1: -\rangle |2: -\rangle$

où (1) et (2) désignent respectivement, le spin de la particule (1) et celui de la particule (2). Lorsque le système a été préparé pour une mesure au niveau du système à deux particules, le vecteur d'état total s'écrit alors comme une combinaison linéaire des vecteurs propres :

$$|\Psi_T\rangle = c_{++}|+ +\rangle + c_{+-}|+ -\rangle + c_{-+}|- +\rangle + c_{--}|- -\rangle$$

Que l'on peut écrire sous une forme plus condensée :

¹³⁴ Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloe – *Mécanique Quantique I*- Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1, pp. 415-417.

$$|\Psi_T\rangle = \sum_{ij} c_{ij} |ij\rangle$$

où les coefficients c_{ij} sont des combinaisons des composantes α et β des vecteurs de bases des particules (1) et (2).

Dans ce qui précède, nous avons construit $|\Psi_T\rangle$ à partir du produit tensoriel, mais si l'on prépare un système, tel qu'il puisse être décrit sous cette forme, il n'est généralement pas possible de retrouver les deux vecteurs de base d'origine dont il est le produit tensoriel. Pour que ce soit le cas, il faudrait une condition sur les coefficients difficile à remplir¹³⁵. On dit alors du système qu'il n'est pas « factorisable » ou bien que ses états sont « intriqués ».

D'un point de vue philosophique, une intrication quantique correspond donc un mélange dans lequel chaque composant du mélange garde son identité propre, sans qu'il soit possible de les séparer les uns des autres. Nous n'irons pas plus loin sur ce sujet mais nous conseillons le petit livre d'Alexeï Grinbaum – *Mécanique des étrennes*¹³⁶ –, qui traite de l'intrication quantique d'une manière très originale et abordable.

Relation du tout et des parties

La raison qui pousse Michel Bitbol à choisir un système quantique à deux particules, où chaque particule peut prendre deux valeurs possibles de spin, est qu'il donne un exemple concret de relations entre un niveau supérieur, représenté par le vecteur d'état total $|\Psi_T\rangle$, et les états propres de chaque particule prise isolément. Cet exemple va permettre de répondre à deux questions à propos du concept d'émergence et des relations entre les niveaux haut et bas de celle-ci :

- 1) Un changement dans la description du tout, implique-t-il un changement dans la description des parties ? Question à laquelle l'émergentisme faible – nous l'avons vu dans la première partie du mémoire avec le concept de survenance (*supervenience*) –, serait tenter de répondre positivement : toute modification du

¹³⁵ Voir Cohen-Tannoudji et Al. – *Mécanique Quantique I* – Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1, p. 432. Pour que la condition soit remplie, il faudrait que les identités suivantes soient réalisées : $c_{++} = \alpha_1\alpha_2$; $c_{+-} = \alpha_1\beta_2$; $c_{-+} = \alpha_2\beta_1$; $c_{--} = \beta_1\beta_2$.

¹³⁶ Alexeï Grinbaum – *Mécanique des étrennes* – Ed. Les belles lettres, coll. Encre Marine, Paris, 2014.

niveau supérieur doit nécessairement être rattachée à des modifications du niveau inférieur, de même que sa description.

- 2) Peut-on décrire les parties indépendamment du tout ? Une question un peu plus délicate pour les émergentistes mais à laquelle un physicien classique répondrait par ‘oui’ sans hésiter. Pour lui, en effet, les parties élémentaires ont des propriétés propres (intrinsèques) qui ne sauraient être affectées par le tout.

Pour répondre à la question 1), Michel Bitbol propose de prendre une description du tout par quatre états orthogonaux du vecteur d’état total :

$$|\Psi^+\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle + |-+\rangle)$$

$$|\Psi^-\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle - |-+\rangle)$$

$$|\Phi^+\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle + |--\rangle)$$

$$|\Phi^-\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle - |--\rangle)$$

Avec ce choix de vecteurs, chaque sous-système est une combinaison d’état propres des particules (1) et (2) sans qu’il soit possible d’isoler l’état de chaque particule : il n’est pas possible d’obtenir leurs vecteurs propres respectifs. La seule chose que l’on puisse faire est d’utiliser l’opérateur densité ρ ¹³⁷ de chaque sous-système et de les comparer. L’opérateur densité est un opérateur « moyen » qui permet une description simple du mélange statistique d’état. Or, cet opérateur densité est strictement le même pour les quatre sous-systèmes :

$$\rho = \frac{1}{2}(|+\rangle\langle+| + |-\rangle\langle-|).$$

Nous avons là une illustration où la description d’un tout qui a été modifiée (description en quatre sous-systèmes) sans que les parties ne l’aient été (elles ont toutes le même opérateur densité). Autrement dit, le changement au niveau du tout n’est pas le fruit d’un phénomène de *survenance* à partir de changements au niveau des parties.

¹³⁷ L’opérateur densité est une matrice définie par $\rho = |\Psi\rangle\langle\Psi|$, qui a la propriété d’être un opérateur hermitique. L’opérateur densité est aussi qualifié d’« opérateur moyen », dans le sens où il donne une information similaire à une moyenne statistique. Pour plus de développement, se référer à Cohen-Tannoudji et Al. – *Mécanique Quantique I* - Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1, pp. 297-304.

Qu'en est-il maintenant de la deuxième question 2) ? Est-il possible de décrire les parties indépendamment du tout ? En réalité, dans un système à deux particules où les états sont superposés, nous avons vu qu'il n'est généralement pas possible de le factoriser à cause de la présence de termes croisés – caractéristiques des phénomènes d'interférence. On dit alors du système qu'il est dans un état « impropre » qui ne permet pas d'isoler chacun des sous-systèmes. L'opérateur densité ne contient pas toute l'information du sous-système : il n'est qu'une mesure statistique du mélange ; la partie manquante de l'information se trouve au niveau du tout, dans le vecteur d'état total $|\Psi_T\rangle$. Ainsi toute tentative de décrire des parties indépendamment du tout ou l'inverse, n'a plus vraiment de sens en physique quantique : l'information est partagée dans les relations entre les parties et le tout. C'est ce qui conduit Michel Bitbol à dire que « Comme il n'y a aucun moyen de séparer les états des parties de celui du tout, cela semble absurde d'appeler l'un la cause, et l'autre l'effet, comme s'ils étaient deux choses différentes »¹³⁸.

Interventionnisme au niveau du système quantique

Après avoir montré qu'il n'y a pas de sens, d'un point de vue descriptif, à séparer le tout et ses parties, ni à attribuer une action causale active ou un effet passif à l'un ou à l'autre des niveaux, Michel Bitbol veut investiguer s'il est possible d'intervenir sélectivement sur chacun des niveaux et quel est l'effet de cette intervention sur le résultat.

L'interventionnisme dont se réclame Michel Bitbol¹³⁹ est un interventionnisme guidé par le désir de connaissance. L'intervention qu'il propose va consister à préparer un système à deux particules de façon à ce que les vecteurs propres correspondent à une valeur globale de spin S_z dont la valeur est soit nulle soit égale à un¹⁴⁰. On obtient alors une liste de quatre vecteurs se décomposant en un Singulet et un Triplet :

¹³⁸ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation*.

¹³⁹ Il s'agit de l'interventionnisme de Georg Henrik Von Wright et de James Woodward

¹⁴⁰ Pour mémoire, le spin d'un électron est égal à $1/2$; il faut donc une paire $\{+1/2, -1/2\}$ pour obtenir une valeur de spin égale à zéro et une paire, soit $\{-1/2, -1/2\}$ soit $\{+1/2, +1/2\}$ pour obtenir une valeur de spin égale à un.

$$\text{(Singulet)} \quad \left| \Psi^{-} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+ - \rangle - |- + \rangle)$$

$$\text{(Triplet)} \quad \left\{ \begin{array}{l} |\Phi^0\rangle = |++\rangle \\ |\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+-\rangle + |-+\rangle) \\ |\Phi^1\rangle = |--\rangle \end{array} \right.$$

On remarque que lorsque le système $|\Psi^T\rangle$ est préparé de façon à obtenir un singulet et un triplet, c'est-à-dire en modifiant le niveau supérieur, on obtient, au niveau des particules, soit des paires de spin opposés (un spin $+$ et un spin $-$, correspondants aux états $|\Psi^+\rangle$ et $|\Psi^-\rangle$), soit des paires de spin alignés (les deux spins sont soit $-$, soit $+$, correspondants aux états $|\Phi^1\rangle$ et $|\Phi^0\rangle$).

Ce cela signifie qu'en intervenant au niveau du système à deux particules, nous avons modifié l'état au niveau des particules sans jamais intervenir à leur niveau. On a là un exemple de ce qui peut être qualifié de causalité descendante.

Nous reviendrons, dans la troisième partie sur la signification que lui en donne Michel Bitbol dans le contexte d'une conception interventionniste-constitutive.

Troisième partie : la thèse interventionniste-constitutive

Après avoir posé les bases des concepts de causalité et d'émergence dans la première partie de ce mémoire, puis, dans la deuxième partie, avoir donné les éléments d'histoire des concepts de la physique qui ont conduit à la physique quantique, ainsi que quelques éléments du formalisme utilisés par la théorie quantique, nous avons maintenant en place tous les éléments conceptuels qui nous permettent de comprendre et de discuter l'article de Michel Bitbol : *Downward causation without foundation*¹⁴¹.

Cet article de 2010 vient s'insérer dans un débat, plutôt anglo-saxon, autour du concept d'émergence et de l'impasse dans lequel celui-ci semble se trouver depuis que Jaegwon Kim a mis en évidence un défaut de circularité conceptuel, au tournant de années 2000, donnant lieu à une « crise de la causalité descendante ».

D'emblée Michel Bitbol prévient qu'il veut reprendre ce problème d'émergence dans un cadre de pensée non dualiste, c'est-à-dire sans faire de distinction métaphysique entre les niveaux haut et bas, mais simplement une distinction sur les « modes d'accès » tout en précisant que ces modes d'accès ne *révèlent* pas les niveaux, mais qu'ils les *constituent* au sens kantien.

Le point délicat à traiter est celui de la causalité descendante du niveau supérieur qui, dans cette approche n'a pas d'ontologie sans cependant être idéaliste dans le sens classique, mais un idéalisme transcendantal néokantien. Selon les mots de Michel Bitbol, il s'agit d'une causalité « objective au sens de l'épistémologie transcendantale » dans une approche néokantienne. Nous y reviendrons.

L'approche proposée par Bitbol a donc pour cadre l'idéalisme transcendantal, la phénoménologie de Husserl et le pragmatisme. Elle s'oppose donc à l'approche dominante réaliste en épistémologie contemporaine.

¹⁴¹ Dans cette troisième partie, les extraits de l'article de M. Bitbol, marqués entre guillemets, sont ceux de la traduction que nous proposons en annexe de ce mémoire.

SITUATION PARADOXALE DE LA CAUSALITE DESCENDANTE

Le concept de cause descendante est apparu avec le développement des sciences cognitives et des faits observés où un état mental donné pouvaient générer des modifications de l'état physiologique. Le langage discursif va avoir tendance à attribuer un certain pouvoir causal du niveau psychique supérieur sur le niveau cellulaire inférieur lors de la description de ces expériences. Pour autant, ce pouvoir causal est-il la démonstration d'un pouvoir psychique réel ? Et si ce n'était pas le cas, cela signifierait-il que les observateurs ont été victimes d'illusions ?

Approche relationnelle et interventionniste

Ce serait le cas, nous dit M. Bitbol, si nous adoptions des présupposés à la fois fondationnalistes et dualistes. Fondationnaliste dans le sens où le pouvoir causal serait originaire du niveau à partir duquel il est observé, c'est-à-dire qu'il aurait pour fondement le niveau sur lequel il est observé. Dualiste, car il suppose deux niveaux distincts : celui de base et un niveau considéré comme supérieur, correspondant à deux métaphysiques différentes.

L'idée que développe Bitbol est que ce ne sont pas les faits observés qui sont eux-mêmes des paradoxes mais bien la façon de les interpréter. Avec une telle approche à la fois fondationnaliste et duale, chaque niveau serait le siège d'un pouvoir causal : ascendant quand il s'applique du niveau bas vers le niveau haut et, descendant dans l'autre sens. De plus, dans l'approche standard de l'émergence, il y a une dissymétrie de niveau puisque seul le niveau de base est doté d'une ontologie ; le niveau supérieur étant un niveau organisationnel seulement doté de structures.

Les paradoxes d'une telle conception sont nombreux et tiennent à la fois, à la nature substantielle du niveau de base – siège de la causalité ascendante -, et au caractère existentiel du niveau haut et à son supposé pouvoir causal conduisant à la critique de circularité de Jaegwon Kim.

Pour sortir de ces paradoxes, M. Bitbol propose deux hypothèses qui permettent, l'une de remplacer le dualisme ontologique par un dualisme fonctionnel, l'autre à enlever toute nature fondationnelle aux deux niveaux. Dans un tel cadre conceptuel :

- i) Les causalités montante et descendante sont *indexées* par un certain niveau d'intervention : elles ne sont pas des concepts de substances, mais de relations ;
- ii) Les termes de la relation ne préexistent pas à la relation : c'est la relation qui les définit. Les niveaux deviennent alors des niveaux d'interaction et il n'est pas nécessaire de faire une hypothèse ontologique sur leur degré d'existence.

On peut remarquer que, dès cette introduction, Michel Bitbol a déjà en tête les problèmes soulevés par la théorie quantique, en particulier le problème de la mesure par des instruments dont la structure macroscopique interagit avec le niveau microscopique observé. Un problème qu'avait déjà soulevé Heisenberg lorsqu'il écrivait que l'instrument de mesure apportait une certaine dose d'indétermination du fait que sa propre structure est elle-même composée d'éléments microscopiques semblables à ceux observés et que le langage de la physique classique ne prend pas en compte. C'est ce qu'il appelle une 'indétermination objective' qui, dans une certaine mesure, est le reflet d'une autre indétermination, cette fois-ci subjective : une limitation de connaissance qui nous empêche une description suffisamment fine et détaillée du monde qui nous entoure :

« Ces indéterminations peuvent être qualifiées d'objectives dans le sens où elles sont les conséquences de notre description dans les termes d'une physique classique et ne dépendent donc pas de l'observateur. Elles peuvent aussi être qualifiées de subjectives puisqu'elles reflètent notre connaissance incomplète du monde »¹⁴².

Un exemple simple serait de prendre la description d'une table ordinaire par la physique classique et la description de la même table par la physique quantique. La table a beau être une simple et même réalité, nous aurons deux modes d'accès différents – deux approches relationnelles au même objet –, qui nous donneront deux interprétations différentes mais non contradictoires. Dans un cas, l'analyse macroscopique utilisera un mètre gradué et une balance pour rendre compte des caractéristiques au niveau macroscopique de la table, dans l'autre cas un microscope à balayage électronique rendra compte de la structure au niveau microscopique et des types d'atomes qui la composent.

¹⁴² Werner Heisenberg - *Physics and philosophy: the revolution in modern science*, Harpers & Brothers publishers, New-York, 1958, p. 53-54 - notre traduction de : "These uncertainties may be called objective in so far as they are simply a consequence of the description in the terms of classical physics and do not depend on any observer. They may be called subjective in so far as they refer to our incomplete knowledge of the world."

On ne présuppose en aucun cas une ontologie des niveaux macroscopiques et microscopiques : il s'agit simplement de deux niveaux d'intervention dans le même monde. A noter que, dans les deux modes d'accès, les instruments expérimentaux de mesures sont des objets macroscopiques – mieux adaptés à l'interface humaine – chacun interagissant avec le niveau d'observation qu'on leur assigne. Dans le cas de l'observation macroscopique, l'interférence de l'instrument de mesure produit un effet négligeable qui ne perturbe pas la mesure, dans l'autre cas, au contraire, l'interférence de l'instrument avec l'objet est du même ordre de grandeur et modifie le résultat de la mesure. Dans un microscope à balayage électronique on peut, par exemple, utiliser l'effet tunnel quantique pour faire des observations sur éléments microscopiques observés. On obtiendra donc deux descriptions, chacune correspondant à un mode d'accès différent à l'objet et qu'il est impossible de réunifier dans un seul langage discursif humain, fût-il mathématique, sans pour autant qu'il soit possible de dire qu'une des descriptions est plus vraie que l'autre. Chacune est adaptée au mode d'accès et rend compte d'une seule et même réalité, même si d'un point de vue anthropologique, mesurer une table avec un mètre, ou la peser avec une balance, nous donne l'impression de saisir la réalité et d'avoir ainsi une connaissance des qualités intrinsèques de l'objet-en-soi dénommé 'table'.

Problème de la survenance et de la causalité descendante

Dans son article de 1999, Jaegwon Kim dit qu'il veut s'attaquer à la fois au problème d'interprétation lié au concept de survenance et surtout, à celui de la causalité descendante du niveau supérieur.

Le problème de la survenance

L'argumentation des promoteurs du concept de survenance, dit Kim¹⁴³, tient en ce que de nouvelles propriétés imprédictibles apparaissent qui ne peuvent pas être expliquées, ou en tout cas ne sont pas réductibles au niveau de base. Mais, si on suppose un système qui peut être décrit complètement par i) tous ses constituants de base, ii) toutes les propriétés intrinsèques de ces constituants et, iii) toutes les relations entre ces constituants ; comment alors expliquer que des propriétés soient entièrement nouvelles et imprédictibles ? Comment faire la distinction entre des propriétés qui seraient « résultantes » et d'autres qui seraient « émergentes » ? Il cite Lloyd Morgan sur ce point :

¹⁴³ Jaegwon Kim (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95, 3-36

« Le mot "émergent", par opposition à "résultant", a été suggéré par G.H. Lewes ... Les deux font référence à des exemples tirés de la chimie et de la physiologie : tous deux traitent des propriétés ; les deux distinguent les propriétés (a) qui sont uniquement additives et soustractives et prédictibles de celles (b) qui sont nouvelles et imprédictibles. »¹⁴⁴

Kim fait remarquer que les termes faisant référence à l'addition et à la soustraction sont simplement là pour évoquer le fait que les propriétés du niveau haut sont « calculables » à partir de celles du niveau bas, ce qui est redondant avec leur caractère prédictible. La prédictibilité devient donc le seul critère pertinent pour discriminer les propriétés « résultantes » de celles qui sont « émergentes ». Mais même un système émergent peut être prédit, par induction, à partir des propriétés d'un microsystème. Il faut donc distinguer entre une prédictibilité théorique et une prédictibilité par induction. Les propriétés émergentes seraient donc celles qui ne seraient pas prédictibles d'un point de vue strictement théorique.

Il reconnaît qu'il existe bien un domaine dont les propriétés sont imprédictibles à partir des propriétés microphysiques, d'un point de vue théorique : c'est celui des propriétés « phénoménales », c'est-à-dire des propriétés relatives aux sensations brutes, encore appelées des *qualia*, ou bien des propriétés relevant de l'intentionnalité. L'erreur de l'émergentisme standard, selon Kim, est d'avoir étendu ce concept d'émergence à des propriétés chimiques et biologiques où l'on ne peut pas parler de propriétés imprédictibles théoriques, en particulier du fait du progrès des connaissances scientifiques dans ces domaines.

On peut remarquer, cependant, qu'avec une telle affirmation, Kim se place d'emblée dans le domaine des sciences déterministes où toute évolution est prédictive et il fait donc l'impasse sur tout un pan des sciences contemporaines qui ont un caractère profondément imprédictible avec, en particulier, la théorie de l'évolution, la théorie du chaos et la théorie quantique. Une imprédictibilité qui n'est pas due à un manque de connaissances mais à la nature même du phénomène observé.

¹⁴⁴ Texte extrait de l'article de Kim *op. cit.* : "The word 'emergent', as contrasted with 'resultant', was suggested by G.H. Lewes ... Both adduce examples from chemistry and from physiology; both deal with properties; both distinguish those properties (a) which are additive and subtractive only, and predictable, from those (b) which are new and unpredictable." Extrait de : C. Llyod Morgan, *Emergent Evolution*

Le problème de la causalité descendante

L'autre problème auquel veut s'attaquer Kim est celui de l'attribution d'une puissance causale du niveau supérieur. Si des propriétés émergentes ont une puissance causale qui leur est propre et qui ne peut pas être réduite à la puissance causale des constituants de base, de quelle manière cette puissance causale descendante peut-elle se manifester ? Comment agit-elle ?

Au terme de sa démonstration, Kim montre le double paradoxe dans lequel semble englué le concept de causalité descendante :

- a) Ou bien le niveau supérieur a un réel pouvoir causal en modifiant les lois des microprocessus du niveau inférieur, auquel cas il y aurait contradiction avec l'image scientifique du monde sur deux points :
 - i) Pas de clôture nomologique du niveau bas (puisque ses constituants peuvent être modifiés par le niveau haut)
 - ii) Pas de causalité fondationnaliste, donc pas de survenance possible à partir du niveau bas

Une telle vision renvoie à un dualisme ontologique.

- b) Ou bien cette émergence du niveau supérieur n'est qu'une simple survenance du niveau inférieur, auquel cas la causalité descendante n'est qu'un artifice verbal et peut être ramenée à la causalité ascendante du seul niveau de base.

Une telle vision renvoie à un réductionnisme moniste.

C'est ce basculement incessant entre une métaphysique moniste et une métaphysique dualiste que Kim appelle un problème de circularité vicieuse.

Les apories des conceptions substantialiste et configurationnelle de niveaux

Michel Bitbol se rallie en partie à la critique de circularité de l'émergentisme standard soulevé par Kim, mais pour lui ce sont précisément les conceptions classiques, celles faisant intervenir des hypothèses substantialistes pour caractériser le niveau de base et des hypothèses purement organisationnelles, dépourvue de toute substance, du niveau supérieur, qui conduisent à des apories. Il en cite trois :

- a) Lorsqu'on adresse le concept de causalité, on implique généralement qu'il y a transfert d'une quantité physique, le plus souvent l'énergie. Or si le niveau

supérieur n'était que purement organisationnel, comment pourrait-il conserver ce transfert d'énergie sans posséder lui-même des constituants matériels ?

- b) Une causalité par transfert implique nécessairement une temporalité, ne serait-ce que par la limitation de la vitesse de la lumière. Or on n'observe généralement pas de décalage dans l'apparition du niveau haut à partir du niveau bas. Parler de causalité ascendante à partir d'un niveau de base qui serait la source de l'apparition d'un niveau supérieur, lequel niveau provoquerait, en retour, des contraintes sur le niveau inférieur, apparaîtrait alors comme « un pur artifice de notre langage discursif et séquentiel ».
- c) La conception d'émergence standard est, comme l'a souligné Kim, de nature dualiste : le niveau haut est supposé être de type purement organisationnel – non substantiel, tandis que le niveau bas est constitué de composants matériels. Ce modèle, nous dit-il, est emprunté à la physique classique, par exemple celle de l'électrodynamique, où les N particules du niveau de base, ayant des propriétés intrinsèques de charge et de position, provoque un effet de survenance de propriétés purement organisationnelles au niveau macroscopique : un champ électromagnétique. Or une telle conception implique une vision dualiste qui empêche de comprendre comment une causalité descendante pourrait agir sur le niveau inférieur.

TENTATIVES CLASSIQUES D'INTERPRÉTATION DES CAUSES

Certaines approches classiques permettent de répondre en partie à la conception substantialiste du niveau inférieur, mais elles ne permettent pas, en revanche, d'expliquer le concept de causalité descendante.

Causes matérielles et formelles

Cette catégorisation des causes matérielles et formelles, par Aristote, permet de mieux rendre compte du caractère substantialiste du niveau de base. En effet, il paraît naturel dans ce cadre, de considérer les constituants du niveau bas comme étant les *causes matérielles* qui font survenir le niveau supérieur et, en retour, de considérer ce niveau supérieur comme étant la *cause formelle* qui contraint le domaine d'action du niveau inférieur. Nous renvoyons à l'exemple, emprunté à Gilbert Simondon, de la fabrication des briques, cité dans la première partie de ce mémoire.

Pour M. Bitbol, ce concept de *cause formelle* devient un moyen élégant qui permet d'expliquer les concepts de *conditions-aux-limites* et d'*attracteur global* de la physique dynamique : « parmi toutes les solutions possibles des équations différentielles décrivant le comportement dynamique des parties, une telle condition aux limites va permettre de sélectionner une gamme de solutions accessibles¹⁴⁵ ». Et, par ailleurs, dans les systèmes dynamiques, le niveau supérieur peut être caractérisé comme un attracteur global dans l'espace des phases.

Kant et le retour de la cause finale

Emmanuel Kant, dans sa *Critique de la faculté de juger*, reprend le concept de cause finale de la tradition aristotélicienne pour l'adapter à son concept de téléologie des organismes vivants. Une téléologie que Weber et Varela¹⁴⁶ qualifient d'interne par rapport au concept d'évolution darwinienne, qualifié d'externe, dans le sens où ce sont l'environnement et les conditions extérieures qui fixent les fins d'évolution des espèces. Chez Kant, l'organisme, à la différence de la machine, a un pouvoir organisateur interne, une force formatrice (*bildende Kraft*) qui le fait évoluer vers un stade où chacune de ses parties remplit une fonction propre, « comme si » la nature les avait agencés dans le sens des fonctions respectives qu'ils remplissent. Ce qui fait dire à Kant : « Je dirai

¹⁴⁵ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* – Section 3

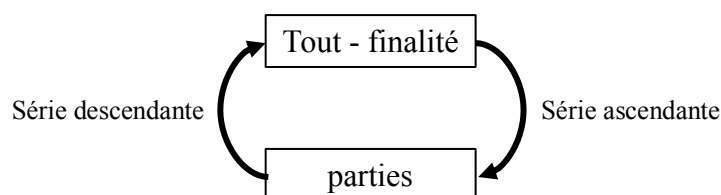
¹⁴⁶ Weber, A. & Varela, F. J. (2002). *Life after Kant*. Phenomenology and the Cognitive Sciences, 1, 97-125. Cité par M. Bitbol.

anticipativement qu'une chose existe comme fin naturelle, lorsqu'elle est cause et effet d'elle-même (bien que ce soit en un double sens)¹⁴⁷ ». Varela avait bien noté que cette description par Kant d'une chose qui était à la fois cause et effet d'elle-même, était bien à l'origine de son concept d'autopoïèse.

On peut noter qu'en matière de connaissance, Kant oppose causalité efficiente et finalité naturelle. S'il ne fait aucun doute pour lui que l'on peut « expliquer » les processus naturels non vivants, comme trouver une loi causale qui permet de prédire l'éclipse de soleil, il n'est par contre pas possible de connaître *a priori* les lois du vivant où seule l'expérience et l'observation *a posteriori* sont possibles. L'entendement humain, de par ses capacités *a priori*, est capable de relier des causes efficientes entre-elles, mais c'est la raison et non pas l'entendement qui lui permet d'envisager une fin naturelle. C'est la faculté du jugement à faire « comme si » la nature avait mis en place cette finalité.

Michel Bitbol fait remarquer combien la description des relations entre les parties et le tout que relate Kant à propos de l'être organisé, est conceptuellement proche des concepts utilisés par les émergentistes. Voici ce qui dit Kant au paragraphe 65 : « Toutefois on peut aussi concevoir une liaison causale d'après un concept rationnel (des fins) qui, considérée comme série, présenterait une relation de dépendance aussi bien en un sens descendant qu'ascendant ; et dans cette liaison la chose qui est désignée comme effet mérite cependant, en remontant, le nom de cause de la chose, dont elle est l'effet.¹⁴⁸ »

Kant utilise le nom de série descendante lorsqu'elle part des causes efficientes vers le tout organisé, et de série ascendante, lorsqu'elle descend de la finalité vers les parties qui la constitue. Nous retrouvons un schéma proche de l'émergentisme standard, même si c'est avec un vocabulaire inversé :



¹⁴⁷ Kant – *Critique de la Faculté de Juger* – Trad. Philonenko, Ed. Vrin, p. 290

¹⁴⁸ *Ibid.*, p. 295

Nous avons là aussi un cadre conceptuel qui permet de penser l'émergence, en termes d'un *tout* comme attracteur et de fixations de contraintes des parties dans une boucle dynamique.

Mais, constate Michel Bitbol, si les causes formelles et matérielles aristotéliennes ou la finalité kantienne nous permettent d'appréhender le problème de l'émergence sous un angle de vue différent, ces cadres conceptuels ne permettent toujours pas de répondre à la question de l'*existence* et de la *substantialité* du niveau supérieur.

LA CONCEPTION INTERVENTIONNISTE DES CAUSES

Nous avons terminé notre parcours d'une brève histoire de la causalité, en première partie de ce mémoire, sur le modèle dit « nomologique-déductif », mais il existe aujourd'hui bien d'autres modèles et celui auquel Michel Bitbol s'intéresse est celui de l'*interventionnisme*. Nous avons vu, dans la deuxième partie du mémoire, comment l'intervention était installée au cœur de la théorie quantique, avec ses phases de préparation et de mesure, et l'on comprend alors pourquoi la théorie interventionniste peut avoir de l'intérêt dans ce domaine des sciences.

Héritière de la théorie de l'action de von Wright¹⁴⁹, la théorie interventionniste est principalement portée par le philosophe américain James Woodward¹⁵⁰. Ces nouvelles théories de la causalité sont apparues, essentiellement dans le milieu philosophique anglo-saxon, avec le développement des sciences sociales et comportementales, mais aussi de la biologie et des sciences environnementales. Il s'agit de domaines scientifiques où l'apparition d'un effet, ou son changement, peuvent être multifactoriels et où il s'agit de discriminer lequel parmi ces facteurs peut être considéré comme cause principale de la modification.

La théorie interventionniste proposée par Woodward est une théorie de type contrafactuel qui fait intervenir une *intervention* extérieure au système observé et qui va modifier, de manière limitée et sans nécessité d'action humaine, un événement du système. Tel événement apparaît si telle intervention préalable, limitée dans son amplitude, est configurée.

Woodward insiste sur le fait que cette intervention, qui peut être d'origine humaine pour des raisons heuristiques, n'a pas besoin de cette hypothèse dans sa théorie : « Je ne propose pas une théorie où les dépendances causales ou explicatives ne seraient possibles que dans le cas d'interventions humaines¹⁵¹ ». D'autre part, pour garantir la stabilité de la relation causale, l'intervention devra rester modeste de façon à ne pas perturber l'ensemble du système. C'est ce qui la différencie essentiellement de la *manipulation* : « Une

¹⁴⁹ Georg Henrik von Wright - *Explanation and Understanding* - Londres, Routledge and Kegan Paul, 1971.

¹⁵⁰ James Woodward - *Making Things Happen*, Oxford University Press, 2003.

¹⁵¹ Woodward, James - *Explanation, Invariance, and Intervention*, Philosophy of Science, Vol. 64, Supplement. Proceedings of the 1996 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association. Part II: Symposia Papers (Dec., 1997), pp. S26-S41

manipulation ou un changement de la valeur d'une variable qui a cette caractéristique 'chirurgicale' est ce qui est appelé *intervention* dans la littérature récemment¹⁵² »

Interprétation de la causalité descendante dans le cadre interventionniste

Michel Bitbol simplifie la causalité interventionniste en disant qu'un événement A est appelé 'cause' de B si les deux critères suivants sont réalisés :

- i) « chaque fois que A est activement configuré par quelque moyen que ce soit, B apparaît (avec une probabilité P)
- ii) chaque fois que A a été activement éliminé, B n'a pas lieu (ou se produit avec une probabilité $P' < P$)¹⁵³ »

Une définition de la causalité très proche de celle de Galilée, fait-il remarquer : « *la cause est ce qui, lorsqu'elle est appliquée, est suivie d'un effet et lorsqu'elle est enlevée, fait disparaître l'effet* »¹⁵⁴.

Depuis le début de son article, M. Bitbol a en tête l'exemple d'un système quantique à deux particules et la manière d'expliquer comment le fait d'intervenir au niveau du système va influencer, dans le sens d'une causalité descendante, les états des deux sous-systèmes qui le composent. Nous avons vu, dans la deuxième partie de ce mémoire, comment les instruments macroscopiques utilisés en physique quantiques interfèrent avec le système quantique, l'instrument jouant le rôle de l'*intervention*. D'autre part nous avons aussi vu comment une expérience quantique peut être « préparée » pour effectuer une mesure, soit au niveau du système, soit au niveau des particules. Il propose alors d'appliquer le schéma interventionniste, sous la forme d'une causalité descendante, de la manière suivante :

- i) « chaque fois qu'un antécédent de niveau supérieur a été activement préparé au moyen d'un instrument à granularité élevée capable de modifier le niveau macroscopique, on observe certains phénomènes élémentaires au moyen de dispositifs expérimentaux adaptés à l'analyse microscopique ;

¹⁵² [Stanford Encyclopedia of Philosophy](#) - Causation and Manipulability – Article by James Woodward, First published Fri Aug 17, 2001; substantive revision Fri Oct 14, 2016

¹⁵³ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* – Section 4

¹⁵⁴ *Ibid.* – Section 4

- ii) chaque fois que cet antécédent du niveau supérieur a été éliminé au moyen d'un instrument à granularité élevée, on n'observe plus ces phénomènes élémentaires au niveau bas.¹⁵⁵ »

Trois bénéfices de l'interprétation interventionniste

Pour Michel Bitbol, l'intérêt d'une telle conception interventionniste est triple : 1) elle permet d'attribuer un statut crédible aux conditions aux limites, 2) elle permet d'abandonner toute métaphysique ontologique des niveaux et enfin 3) elle permet de répondre à la question du décalage temporel.

- 1) L'interprétation interventionniste permet de prendre en compte le statut des contraintes liées aux conditions aux limites, ce dont ne pouvaient pas rendre compte les causalités classiques. En effet, l'intervention est toujours antérieure à toute modification des contraintes du niveau visé. Michel Bitbol donne l'exemple, en neurophysiologie, d'une approche causale naïve où l'on interpréterait un changement du métabolisme par un supposé pouvoir causal de la conscience. Avec cette approche interventionniste, on a une alternative plus crédible où les deux événements sont considérés *coextensifs* et où il est possible d'intervenir préalablement, par exemple en déclenchant un état émotionnel chez le patient (intervention sur le niveau supérieur) qui va se traduire par des modifications du métabolisme au niveau cellulaire, comme une montée du taux d'adrénaline si le patient est soumis à un stress psychologique (causalité descendante du niveau supérieur sur le niveau inférieur).
- 2) Le deuxième intérêt de cette conception interventionniste est qu'il n'est plus nécessaire de faire une hypothèse ontologique sur les niveaux telle que dans l'approche dualiste. En effet, dans l'approche interventionniste, l'intervention est adaptée à la granularité du niveau sur lequel on veut intervenir. Il n'est plus nécessaire alors de parler de dualité de niveau puisqu'il s'agit d'une dualité de cible d'action, ce qui est particulièrement adapté à la physique quantique lorsqu'il y a intrication entre les niveaux haut et bas. On se souvient que c'est dans l'étape de préparation du vecteur d'état que se situe le ciblage de la mesure.
- 3) Le troisième intérêt est que l'intervention, comme elle nécessairement antérieure à toute modification du niveau supérieur, permet de s'affranchir du problème de

¹⁵⁵ *Ibid.* – Section 4

temporalité évoqué précédemment. S'il est vrai qu'une intervention au niveau macroscopique ne peut pas altérer *rétroactivement* les conditions microscopiques à partir desquelles il émerge, par contre cette intervention peut altérer les micro-conditions (modifications des conditions aux limites) du niveau inférieur et par conséquent influencer sur l'évolution *future* du niveau supérieur. Il s'agit là encore, pour Michel Bitbol, de faire référence à ce qui se passe en physique quantique : lorsqu'on vient de faire une mesure sur un état quantique préparé, on modifie le vecteur d'état initial en sélectionnant un de ses vecteurs propres et ce nouveau vecteur d'état va continuer, à son tour, à évoluer dans cette nouvelle configuration jusqu'à la mesure suivante.

Différence entre émergence faible et interventionnisme

Nous avons vu précédemment qu'avec l'interventionnisme on ne pouvait pas dire que l'intervention sur le niveau supérieur jouait un rôle rétroactif sur les modifications des conditions aux limites du niveau bas, mais qu'elle pouvait les préparer dans le cas d'une intervention ultérieure. De ce point de vue, Michel Bitbol nous fait remarquer qu'elle se rapproche de la conception d'émergence faible telle que Mark Bedeau la définit : « ... une causalité faible au niveau macroscopique ne peut pas altérer les conditions à partir desquelles elle émerge. Tout au plus, peut-elle modifier les conditions de sa survie future ...¹⁵⁶ ».

La différence majeure, cependant, est que dans l'interventionnisme, l'intervention est une perturbation extérieure au système étudié et qui est toujours *ciblée* pour un niveau donné, tandis que dans l'émergentisme faible, il s'agit d'un processus dynamique d'interaction des éléments du niveau de base. Dans ce cas on ne peut plus vraiment parler de perturbation du niveau de base si ce n'est comme d'un artifice verbal pour faire une analyse conceptuelle entre deux niveaux d'un processus dynamique entièrement établi entre les éléments microscopiques du niveau de base.

Michel Bitbol utilise l'exemple d'un embouteillage de voiture pour expliquer ce cas de l'émergence faible. Dans cet exemple, l'embouteillage représente le niveau supérieur d'organisation, qui *survient* (émergence faible) de par les conditions aux limites des éléments de base que sont les voitures. Il faut, de plus, faire abstraction du facteur humain

¹⁵⁶ M. Bedeau, *Downward causation and the autonomy of weak emergence*. Principia, 6, 5-50, 2002.

– les conducteurs –, et considérer les voitures comme des êtres autonomes. On peut considérer alors l’embouteillage comme la *cause* (descendante) du ralentissement des voiture et dans ce cas : « On peut *dire* d’un embouteillage en cours qu’il modifie les conditions futures de circulation des automobiles qui le provoque. Mais il est admis, dans le cas d’émergence faible, qu’il s’agit d’une façon de parler, pour masquer le manque de compréhension détaillée, mais tout à fait incapable de masquer le fait qu’*en toute hypothèse, tout ce qui existe* n’est qu’un ensemble de voitures qui bougent à chaque instant en fonction de la distance avec sa voisine immédiate.¹⁵⁷ »

Deux critiques de l’interventionnisme

Cependant, utiliser l’argument interventionniste sur le niveau supérieur, au lieu de l’argument de causalité descendante, ne résout pas tous les problèmes, nous dit Michel Bitbol.

D’abord, on peut lui reprocher de n’être qu’une façon de masquer notre ignorance sur de possibles interactions microscopiques fines réelles : on ne se pose plus la question de la nature causale descendante mais seulement celle sur la façon dont nous en avons connaissance. Ensuite, on pourrait objecter que l’interventionnisme causal pourrait être assimilé à une cause *libératoire* et par là, ne pas rendre compte la cause physique *intégrale* qui fait intervenir le réseau très complexe des interactions des constituants de base au niveau microscopique. Pour illustrer ce concept de *causes libératoires* et de *causes physique intégrales*, nous prendrons l’exemple suivant, emprunté au philosophe américain, Jonathan Schaffer¹⁵⁸ : imaginons qu’une jeune femme, Pam, soit la cause d’une vitre brisée. Il y a alors deux manières de considérer sa participation comme cause de la vitre brisée. Premièrement, si Pam tombe contre une vitre, elle est elle-même la cause physique intégrale mais si, deuxièmement, elle jette une brique contre la vitre, elle devient la cause libératoire de la brique et non plus la cause physique intégrale ; la brique devient elle-même une cause physique partielle : elle ne s’est pas jetée toute seule contre la vitre.

¹⁵⁷ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* – Section 4

¹⁵⁸ Stanford Encyclopedia of Philosophy (<https://plato.stanford.edu/entries/causation-metaphysics/>)

Mais, remarque Michel Bitbol, on pourrait adresser ces mêmes critiques aux arguments avancés par l'émergence standard¹⁵⁹ dont on rappelle qu'elle repose sur une double asymétrie :

- i) Asymétrie des substances des niveaux avec un niveau bas composé de substances élémentaires et un niveau haut composé de pures structures organisationnelles
- ii) Asymétrie des propriétés qui seraient intrinsèques pour les éléments de base alors qu'elles ne seraient que relatives aux instruments de connaissance au niveau supérieur.

Lesquelles asymétries sont contredites par les avancées faites en théorie quantique, comme nous allons le voir dans la section suivante.

¹⁵⁹ On rappelle que dans la conception standard, seul le niveau de base existe ontologiquement et que le niveau haut, purement organisationnel et non substantiel, apparaît alors comme pur artifice de langage. La conception d'émergence faible, se différencie de la conception standard parce qu'elle considère qu'il existe un réseau complexe d'interactions microscopiques, au niveau inférieur, qu'il est impossible de décrire dans le détail et qui est à l'origine de la survenance du niveau haut. Ceci étant rappelé, les deux asymétries que Michel Bitbol relate dans son article, sont communes à l'émergence standard et à l'émergence faible.

PHYSIQUE QUANTIQUE : CHANGEMENT DE PARADIGME

La double nature des particules quantiques

La double asymétrie de l'émergence standard est essentiellement liée à une interprétation substantialiste des éléments constitutifs du niveau de base, supposés être, le plus souvent, des atomes par ses promoteurs. Cela présuppose une conception de l'atome comme une particule de matière, très proche de la vision atomiste démocritéenne. Pourtant, à l'époque où se sont développées ces conceptions émergentistes, la théorie quantique naissante en avait déjà donné une toute autre interprétation. Nous en avons donné les éléments fondamentaux dans la deuxième partie de ce mémoire et nous n'en rappelleront ici que les principaux.

Avec la physique quantique l'atome a perdu son statut de « partie insécable » et a acquis celui de *système quantique*, composé de plusieurs particules. Ces particules ont à leur tour perdu toute interprétation substantialiste pour être désignée au mieux comme « objet conceptuel mathématique », même celles qui sont qualifiées de particules élémentaires, ou fermions, par la théorie quantique des champs. Aujourd'hui, on a identifié deux particules élémentaires : les quarks et les leptons, qui sont à l'origine de douze particules quantiques caractérisées par leur masse/énergie exprimée en Giga électronvolts (GeV) :

Constituants de la matière : les fermions ¹⁶⁰			
	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille
Quarks	Up (u) (0,003 GeV)	Charm (c) (1,3 GeV)	Top (t) (174 GeV)
	Down (d) (0,006 GeV)	Strange (s) (0,14 GeV)	Bottom (b) (4,3 GeV)
Leptons	Electron (e^-) (0,0005 GeV)	Muon (μ^-) (0,106 GeV)	Tau (τ^-) (1,7 GeV)
	Neutrino électronique (ν_e) (~ 0 GeV)	Neutrino muonique (ν_μ) (~ 0 GeV)	Neutrino tautique (ν_τ) (~ 0 GeV)

¹⁶⁰ Etienne Klein, dans L'unité de la Physique – PUF, 2000, rappelle, p. 305, que : « le formalisme quantique, cadre actuel de la physique des particules, distingue deux types de particules : d'un côté les particules plutôt solitaires qu'on appelle les fermions, de l'autre les particules avides d'attroupement, qu'on nomme les bosons. On considère aujourd'hui que les fermions fondamentaux sont les vrais constituants de la matière. Ce sont les six quarks (fermions sensibles à l'interaction forte) et les six leptons (fermions insensibles à l'interaction forte. »

Il existe, par ailleurs, d'autres particules, *non isolables*, appelées bosons en hommage au physicien indien Satyendranath Bose, dont les travaux permettront à A. Einstein de prédire l'existence d'un gaz quantique à basse température : le condensat de Bose-Einstein.

Mais revenons à la nature des particules quantiques. Comme nous l'avons vu, à travers l'expérience des fentes d'Young proposée par Feynman, une interprétation purement substantialiste des particules ne peut pas rendre compte des franges d'interférences observées, il faut aussi admettre une nature ondulatoire. On ne peut absolument plus considérer la particule quantique comme une entité individuelle – une petite bille de matière –, et par conséquent, parler d'interaction entre les particules n'a plus de sens. La meilleure caractérisation que l'on puisse en donner est celle d'entité mathématique, de 'densité de probabilité de présence', de champ vectoriel ou scalaire. Dans ce cas, dit Michel Bitbol, « les particules sont *de facto* traitées comme structures ou configurations, plutôt que comme entités substantielles¹⁶¹ ». Ce qui signifie aussi que la différence faite, dans le cadre de l'émergentisme standard, entre un niveau élémentaire composé de particules de matière, par rapport à un niveau haut, purement organisationnel, disparaît dans le cadre de la théorie quantique.

Symétrie des niveaux quantiques

Pour classer des propriétés, on peut distinguer entre des propriétés *objectives*, *relationnelles* ou *contextuelles*. Or, nous dit Michel Bitbol, nous voyons qu'en physique quantique « les déterminations sont exclusivement relationnelles et contextuelles¹⁶² ». Avec la physique quantique, nous n'avons plus affaire à des « objets dotés de propriétés intrinsèques qui attendent seulement d'être *révélées* par une expérience effective, ou sur des événements qui surviennent d'eux-mêmes¹⁶³ ». Les objets quantiques ne sont plus *révélés*, ils sont *constitués* de par la préparation dans une gamme de mesure déterminée par l'expérimentateur, reflétée par le vecteur d'état.

Dans son article, Michel Bitbol met le mot *constitution* en italique pour faire sans doute référence à l'approche kantienne du rôle constitutif de l'entendement ainsi que de la force formatrice (*Bildende Kraft*)¹⁶⁴. Nous avons vu, en effet, dans la deuxième partie de

¹⁶¹ Michel Bitbol, *Downward causation without foundation* – section 5

¹⁶² *Ibid.* – section 5

¹⁶³ Michel Bitbol – *Mécanique Quantique, une introduction philosophique* -, Champs Flammarion, 1996, p. 163

¹⁶⁴ Selon la traduction proposée par Alain Renaut de *Critique de la raison pure* – Ed. GF

ce mémoire, que la constitution du vecteur dépendait entièrement de la phase de préparation choisie par l'expérimentateur. Ce vecteur d'état peut être préparé aussi bien pour faire une mesure au niveau d'un système de particules ou bien au niveau d'une particule. En conséquence, les limitations liées à l'instrument de mesure peuvent tout autant affecter le niveau bas (celui des particules) que le niveau haut (celui d'un système de particules), ce qui élimine la dissymétrie de niveau dans la conception d'émergence standard.

Et, nous dit M. Bitbol, s'il est tentant de privilégier le niveau microscopique au prétexte que les limitations de l'instrument de mesure, nécessairement macroscopique, ne permettent pas, ou en tout cas plus difficilement, de rendre compte des interactions de ses constituants, il ne faut pas oublier l'universalité des attributs liés aux modes d'accès expérimentaux. Nous avons vu en effet, qu'en physique quantique, la phase de préparation permettait de sélectionner la gamme de mesure d'un niveau bas comme d'un niveau haut sans jamais faire intervenir la granularité liée à l'instrument de mesure.

Une approche constitutive

Lorsque nous avons examiné l'approche interventionniste, nous avons pointé l'objection épistémique que pouvait lui opposer une conception substantialiste classique. Or, avec l'approche constitutive de la théorie quantique, nous avons maintenant un moyen de nous affranchir totalement cette approche substantialiste. Le reproche que l'on avait pu faire à l'approche interventionniste comme moyen de masquer son ignorance sur la nature de la cause descendante disparaît. De même disparaît le reproche qu'il n'y avait aucun moyen de savoir si ce n'était pas l'intervention elle-même qui modifiait les interactions des éléments microscopiques du niveau de base. Comme nous l'avons vu, la préparation permet à la fois de sélectionner le niveau cible et, d'autre part, le choix d'un niveau exclut l'autre. Ce qui fait dire à Michel Bitbol : « Les relations de connaissance et les interventions expérimentales sont constitutives, à tous les niveaux, à la fois de leur objet (de connaissance) et de leur cible (d'expérience)¹⁶⁵ »

Enfin, disparaît aussi le reproche d'une possible indétermination entre une cause libératoire et une cause physique intégrale puisque cette cause libératoire est elle-même *constitutive* de la préparation : elle n'est plus une cause indépendante simplement déclenchée.

¹⁶⁵ Michel Bitbol, *Downward causation without foundation* – section 5

UN MODELE QUANTIQUE DE CAUSALITE DESCENDANTE

A ce stade de son article, Michel Bitbol a mis en place tout le cadre conceptuel, inspiré par la physique quantique, pour analyser la causalité descendante. Une conception à la fois non substantialiste du niveau bas et symétrique entre les niveaux haut et bas : la conception interventionniste-constitutive :

- constitutive dans la phase préparatoire à l'observation et
- interventionniste par l'appareillage de mesure.

Pourquoi choisir un exemple dans la théorie quantique ?

Essentiellement, nous l'avons vu dans la deuxième partie de ce mémoire, parce que dans la théorie quantique :

- 1) Les observables sont définies par des opérateurs mathématiques. Ce que l'on observe, ce n'est pas un objet réel, c'est sa trace associée à un objet mathématique : l'observable de l'espace vectoriel de Hilbert. Il n'y a donc pas lieu de questionner une quelconque ontologie des particules observées.
- 2) L'intervention est constitutive de la mesure. Nous avons vu, en effet, que le choix de la cible de l'intervention (niveau global ou niveau des particules) se fait lors de la phase préparatoire à la mesure. C'est elle qui détermine le vecteur d'état du système considéré qui contient tous les résultats possibles. Ainsi, la mesure ne va pas *révéler* un résultat, elle le *co-constitue* lors de la phase préparatoire.

Michel Bitbol présente un exemple de système quantique à deux particules, chacune pouvant prendre deux valeurs possibles de spin et dont nous en avons exposé le détail en fin de la deuxième partie de ce mémoire.

Rappelons ici que dans un tel système il existe quatre combinaisons possibles et que, du fait de la superposition linéaire, le vecteur d'état global, $|\Psi_T\rangle$, du système s'écrit :

$$|\Psi_T\rangle = \sum_{ij} c_{ij} |ij\rangle = c_{++} |++\rangle + c_{+-} |+-\rangle + c_{-+} |-+\rangle + c_{--} |--\rangle$$

Nous avons vu aussi, dans la deuxième partie du mémoire, que dans ce formalisme, les modules des coefficients c_{ij} sont les probabilités d'obtenir chacun des quatre états $|ij\rangle$. Les vecteurs d'état $|ij\rangle$, s'interprètent comme des combinaisons des deux particules, désignée par l'indice i pour la première et par l'indice j pour la seconde. Les indices i et j

ne peuvent prendre que les valeurs Spin Up (+) ou Spin Down (-). Enfin, il est important de rappeler que dans un tel système, il n'est généralement pas possible de séparer l'état de chacune des particules. On dit que le système n'est pas *factorisable* ou encore qu'il est *intriqué*.

Intrication des niveaux quantiques

Nous avons là un exemple d'un tout (le système à 2 particules) en relation avec ses parties (chacune des particules). Que signifie alors un concept comme celui de causalité descendante dans un tel exemple ? Une modification au niveau du système est-elle le résultat d'une modification des parties ?

Pour le savoir, Michel Bitbol propose de prendre quatre états intriqués possibles (vecteurs orthogonaux deux-à-deux) et de voir s'il est possible d'observer une différence au niveau de chacune des deux particules. Si tel était le cas, cela signifierait que ce sont les changements aux niveaux des particules qui sont à l'origine des changements au niveau du système et que l'on peut interpréter ce phénomène comme une survenance du niveau haut à partir du niveau de base.

Or, dans un tel système intriqué, il n'est pas possible de séparer complètement le vecteur propre de chaque particule. La seule information que l'on puisse avoir sur elles l'est par l'opérateur densité ρ du système à deux particules, et cet opérateur est *identique* pour chacun des quatre états :

$$\rho = 1/2 (|+\rangle\langle+| + |-\rangle\langle-|)$$

L'opérateur densité ne contient pas toute l'information du sous-système : il n'est qu'une mesure statistique du mélange. L'autre partie de l'information se trouve dans le vecteur d'état total $|\Psi_T\rangle$. Ainsi toute tentative de décrire des parties indépendamment du tout ou l'inverse, n'a plus vraiment de sens en physique quantique : l'information est partagée dans les relations entre les parties et le tout.

Le concept de survenance et de dualité de niveau est inopérant dans ce contexte.

Causalité descendante

Après avoir montré qu'il n'était pas possible de séparer les contributions respectives des niveaux haut et bas, Michel Bitbol veut montrer qu'il est cependant possible d'*intervenir* sur chacun des niveaux. Il prend l'exemple d'une intervention au niveau haut :

il est possible de préparer un niveau haut à deux particules de façon à ce que la valeur de spin total soit égale à un ou à zéro sous différentes formes. On peut en particulier, obtenir quatre états sous la forme d'un singulet et d'un triplet qui est une manière alternative aux doublets de combiner les spins de deux électrons.

$$\begin{array}{ll}
 \text{(Singulet)} & \left| \Psi^{-} \right\rangle = 2^{-1/2} (|+ - \rangle - |- + \rangle) \\
 & \\
 \text{(Triplet)} & \left| \Phi^0 \right\rangle = |+ + \rangle \\
 & \left| \Psi^{+} \right\rangle = 2^{-1/2} (|+ - \rangle + |- + \rangle) \\
 & \left| \Phi^1 \right\rangle = |- - \rangle
 \end{array}$$

On est bien intervenu au niveau haut, puisque l'on a obtenu un singulet dont le spin total est nul et un triplet dont le spin total est égal à un. Mais l'intérêt de cet exemple est que l'on remarque que cette intervention de niveau haut a une influence sur le niveau bas.

En effet, il y a deux familles de vecteur d'état possibles : une famille $\{|\Psi^{+}\rangle, |\Psi^{-}\rangle\}$, pour laquelle on obtient, au niveau des particules, des paires de spin opposés (un spin + et un spin -), tandis que pour la famille $\{|\Phi^0\rangle, |\Phi^1\rangle\}$, on obtient des paires de spin alignés (les deux spins sont soit +, soit -).

L'intervention au niveau haut a bien modifié l'état des particules au niveau bas.

C'est ce qui fait dire à Michel Bitbol que : « préparer un système à deux particules dans un certain état d'une observable globale, équivaut à réaliser une variété de *causalité descendante*¹⁶⁶ ».

La démonstration inverse est vraie elle aussi : intervenir au niveau bas des particules va modifier l'état global au niveau haut du système. On retrouve, dans ce cas, le schéma classique de causalité ascendante.

Deux remarques

- i) Il est important de rappeler que l'intervention sur l'un ou l'autre niveau, en physique quantique, est *constitutive* dans le sens où c'est bien la préparation du vecteur d'état qui détermine le niveau de l'intervention ainsi que le type d'observables qui va être mis en jeu.

¹⁶⁶ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* – Section 6

- ii) Par contre une fois que le système est préparé pour une mesure sur un niveau donné, il n'est généralement plus compatible pour une mesure sur l'autre niveau : les observables globales et locales ne sont pas permutable.

A partir de ces deux remarques, Michel Bitbol souligne qu'on ne peut même plus attribuer contrafactuellement des valeurs aux variables locales comme cause de la valeur de la variable globale du niveau supérieur. Autrement dit : « il est alors faux de dire qu'il existe des propriétés locales sous-jacentes sur lesquelles on agit 'en réalité'.¹⁶⁷ »

Un modèle non-dualiste et anti-fondationnaliste

Après avoir présenté les caractéristiques de ce système quantique à deux particules, Michel Bitbol en récapitule les différentes caractéristiques qui s'opposent au modèle classique d'émergence standard :

- (a) La représentation du système par un vecteur d'état, combinaison linéaire de toutes les solutions d'une préparation donnée, rend toute description à deux niveaux inopérante et artificielle ;
- (b) La possibilité de trouver des différences dans les états du niveau global sans qu'il n'y ait de différences au niveau local (même valeur de l'opérateur densité) duquel il serait sensé émerger, rend caduc toute idée de survenance ;
- (c) Les supposées propriétés intrinsèques du niveau de base sont remplacées par des *observables*, c'est-à-dire, des objets mathématiques qui établissent une relation avec l'observation et qui, de plus, sont relatifs à une mesure pour lesquelles ils ont été préparées ;
- (d) Les mesures expérimentales sélectionnent et définissent simultanément un type de propriété : soit globale, soit locale avec l'observable qui leur correspond. De plus, nous avons vu que ces observables sont généralement non commutables ;
- (e) Dans ce cadre constitutif-interventionniste, les concepts de causalité ascendante et descendante prennent un sens si on fait abstraction de la représentation d'état et si l'on s'attache aux interventions lors de la mesure. Nous avons vu qu'une intervention sur le niveau supérieur influent sur le niveau bas, exerçant une causalité descendante. La réciproque est vraie : une intervention sur

¹⁶⁷ *Ibid.* – Section 6. Notons, au passage, que cette remarque détruit l'argumentation qu'Einstein avait développé dans son article de 1935.

expérimentale va influencer l'état du niveau haut, exerçant cette fois-ci, une causalité ascendante.

CONCEPTION INTERVENTIONNISTE-CONSTITUTIVE : ECLAIRCISSEMENTS**Cause ontologique et cause épistémique**

Une bonne partie de l'opposition à la vision interventionniste-constitutive vient principalement des défenseurs de l'émergentisme standard pour lesquels il y a une différence de principe entre *cause ontologique* (due à une action causale provoquée par des éléments substantiels) et *cause épistémique* (due à une intervention de connaissance – intervention expérimentale –, sur un des niveaux).

Cette différence principielle a pour origine un présupposé sur l'existence d'un niveau de base ultime, constitué d'éléments substantiels possédant des propriétés intrinsèques. Une intervention expérimentale sur ce niveau permettrait alors de « révéler » que les causes réelles sont liées aux micropropriétés intrinsèques à ces éléments de base.

Cette croyance en un niveau ultime présuppose en retour qu'il existe d'autres niveaux qui n'ont pas cette caractéristique ontologique du niveau de base. Suivant cette interprétation, le niveau supérieur ne peut donc être que non-substantiel et constitué de structures organisationnelles. Dans ce cas, parler de causalité descendante est une façon d'expliquer que l'intervention expérimentale à ce niveau va perturber le réseau organisationnel qui en retour va déclencher une réaction en chaîne des micro-causes réelles du niveau de base. L'intervention joue le rôle d'une *cause libératoire*. Ainsi, la supposée action causale du niveau supérieur est-elle en réalité toujours relative aux micro-interactions d'un niveau de base ultime.

Michel Bitbol fait remarquer qu'il est inutile, dans ce raisonnement, de faire intervenir un quelconque niveau intermédiaire car, soit ses caractéristiques se ramènent aux mêmes caractéristiques non-ontologiques et de type organisationnel d'un niveau haut, soit il peut lui-même être considéré comme ayant des caractéristiques ontologiques ultimes vis-à-vis du niveau supérieur.

Mais un tel niveau de base ultime avec des caractéristiques intrinsèques et substantielles existe-t-il vraiment ?

Nous avons montré, dans la deuxième partie de ce mémoire, et M. Bitbol le souligne dans cet article, que la théorie quantique a permis d'analyser précisément ces composants supposés ultimes de la matière et ce qu'elle a montré c'est qu'« à *aucun* niveau, même le niveau plus profond et (vraisemblablement) le plus élémentaire de la microphysique, y a-

t-il quelque chose comme des propriétés absolues et des causes absolues à opposer à des causes (dites) anthropologiques, épistémologiques, ou relatives ». Avec la théorie quantique, la notion de cause a perdu toute *qualité première*¹⁶⁸ puisqu'elle reste, en permanence, relative à la préparation expérimentale et à la procédure d'intervention.

Physique quantique : exception exotique de la nature ?

Ceux qui doutent de la pertinence de l'approche constitutive ontologique pourraient rétorquer qu'elle est trop spécifique à la philosophie de la physique quantique. Michel Bitbol montre qu'en réalité sa portée est beaucoup plus large qu'il n'y paraît pour au moins deux raisons :

- i) Les caractéristiques de la physique quantique ne sont qu'une version renforcée d'une situation universelle ;
- ii) Il existe d'autres disciplines scientifiques qui utilisent les mêmes caractéristiques épistémologiques.

Le problème des caractéristiques intrinsèques

En ce qui concerne la première raison, il est possible de considérer que même la physique classique ne traite pas de qualités réellement intrinsèques.

C'est Kant le premier qui le montre pour critiquer l'argument idéaliste de Wolfe. Michel Bitbol fait référence au § 13 des *Prolégomènes*¹⁶⁹ et, plus particulièrement à la deuxième remarque. Ce paragraphe treize critique précisément Wolfe et tous les « idéalistes effectifs », comme il les nomme, sur le fait de penser que le temps et l'espace seraient des choses absolues qui auraient des « qualités réelles inhérentes aux choses-en-soi¹⁷⁰ ». La deuxième note vient préciser sa pensée concernant le statut de qualité première et seconde et pourquoi on ne peut pas assimiler sa pensée à un idéalisme effectif.

¹⁶⁸ Le qualificatif de *cause première* fait référence à la distinction que faisait le philosophe anglais Locke entre qualités premières et qualités secondes. Une distinction que reprendra Kant pour montrer que ce que nous prenons comme qualités premières ne sont, en fait, que des qualités secondes puisque nous n'avons accès qu'aux phénomènes et non pas aux choses-en-soi.

¹⁶⁹ Kant, Emmanuel - *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*, trad. Léon Brunschvicg, Louis Chambert, Jean Cresson, Fernand Gazin, Henri Havard et Paul Landormy, Ed. Hachette, Paris, 1891.

¹⁷⁰ *Ibid.*, §13, introduction

Pour Kant, les qualités premières ne sont en réalité que des qualités secondes au sens de Locke. Seconde dans le sens où ces qualités ne sont pas celles de l'objet-en-soi mais de sa représentation que nous nous faisons à travers nos sens, et Kant montre dans le § 13 que le temps et l'espace ne peuvent pas être des qualités intrinsèques du monde, par le biais du problème de la chiralité, mais qu'elles doivent nécessairement être des intuitions¹⁷¹ que nous avons *a priori* sur le monde. Pour Kant, nous possédons les cinq sens *a posteriori* classiques (vision, ouïe, audition, goût et toucher) et deux sens *a priori* qui sont le temps, sens interne, et l'espace, sens externe.

Les qualités que nous attribuons aux objets du monde sont toujours des qualités des phénomènes et non pas des choses-en-soi, auxquelles nous n'avons pas accès.

On peut noter que s'il est assez fréquent d'assimiler la pensée de Kant à de l'idéalisme, mais que lui-même réfute, dans cette deuxième remarque, une telle assimilation. La représentation phénoménale dont il est question chez lui, n'est pas une représentation idéale *a priori*, une imagination : c'est une représentation à partir des données brutes fournies par nos sens. Et pour lui, il n'y a aucun doute sur l'existence de la chose derrière son phénomène : « il n'y a pas plus de raison pour nommer ma théorie idéaliste en s'appuyant simplement sur ce fait qu'à mon sentiment un plus grand nombre de propriétés, toutes les propriétés même qui constituent l'intuition d'un corps appartiennent seulement à son phénomène, car l'existence de la chose qui apparaît n'est pas pour cela supprimée comme par l'idéalisme effectif, mais on montre seulement que nous ne pouvons pas la connaître par les sens, comme elle est en soi.¹⁷² »

Donc, si on suit l'argument kantien, attribuer à quelque chose un statut de substance ou de cause, ne peut l'être que comme qualité seconde dans la mesure où elles sont toutes deux « relatives » au phénomène et non pas à une chose-en-soi. Avec l'approche kantienne on a bien un cadre universel¹⁷³ avec une approche relationnelle et contextuelle – contextuelles dans le sens où la représentation phénoménale est fortement dépendante du contexte anthropologique.

¹⁷¹ Chez Kant, 'intuition' fait référence à la donation sensible – c'est-à-dire à travers nos sens –, du monde. Les intuitions sont les données brutes du monde

¹⁷² *Ibid.*, §13, deuxième remarque.

¹⁷³ On rappelle que chez Kant, l'*universel* est ce qui est commun aux intelligences humaines. Par exemple, en sciences, une loi devient universelle si elle peut être partagée par la communauté scientifique qui pour ce faire devra en vérifier la véracité par l'expérience – « la possibilité de l'expérience » comme le rappelle Kant.

Ce cadre conceptuel universel dépasse largement celui de la physique quantique.

Autres disciplines scientifiques

L'approche interventionniste-constitutive, nous dit Michel Bitbol, dépasse aussi le cadre de la physique quantique. Cette approche est maintenant reconnue dans des disciplines aussi variées que les sciences sociales, l'économie, la psychologie de la perception ou la théorie de choix rationnels. Ces disciplines, nous dit-il, utilisent « *exactement les mêmes* (et pas seulement de manière analogue) caractéristiques et structure de base que la mécanique quantique¹⁷⁴ ».

Relations intra-niveau, cohérence et clôture causale

Jusqu'à présent l'analyse interventionniste-constitutive s'était focalisée sur les relations inter-niveau que sont les causalités montante et descendante. Mais peut-elle aussi servir à l'analyse des relations intra-niveau ?

Michel Bitbol examine deux problèmes auxquels la conception interventionniste-constitutive peut permettre d'apporter des réponses :

- 1) Les influences à l'intérieur d'un même niveau
- 2) La cohérence et la clôture causale à l'intérieur de chaque niveau

En ce qui concerne la première question, nous avons vu que les instruments expérimentaux, qui permettent de faire des interventions et des observations, sont précisément conçus pour être effectifs à un niveau donné.

On peut ainsi intervenir à un niveau donné et activer un certain antécédent qui va favoriser certains phénomènes détectables par des moyens d'observations spécifiques à ce niveau ; et si ce même antécédent est désactivé, par un autre dispositif d'intervention, alors les phénomènes ne sont plus observés.

La conception interventionniste-constitutive est donc un outil conceptuel puissant pour la compréhension des relations intra-niveau.

Concernant la deuxième question, nous avons vu à quel point l'approche émergentiste substantialiste provoquait une dissymétrie conceptuelle des niveaux. D'une

¹⁷⁴ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* - Section 7

part, elle nécessitait de concevoir une certaine ouverture de la clôture causale du niveau de base pour expliquer une causalité ascendante vers le niveau supérieur et, d'autre part elle déniait tout pouvoir causal, et par conséquent toute clôture causale, du niveau supérieur puisque cette causalité est censée reposer sur des éléments substantiels.

Dans une conception interventionniste-constitutive, c'est l'aspect constitutif, au sens kantien du terme, qui permet de « symétriser » les niveaux et leur accorder à chacun leur propre clôture causale. Michel Bitbol fait de nouveau référence à Kant et à sa célèbre expression de « rhapsodie de perception ». Il n'est pas inutile de rappeler ce passage de la *Critique de la raison pure* :

« la possibilité de l'expérience est donc ce qui donne de la réalité objective à toutes nos connaissances *a priori*. Or, l'expérience repose sur l'unité synthétique des phénomènes, c'est-à-dire sur une synthèse, opérée d'après des concepts de l'objet, des phénomènes en général, sans laquelle elle ne serait jamais une connaissance, mais une rhapsodie de perceptions qui ne s'intégreraient pas toutes ensemble en une texture structurée d'après les règles d'une conscience (possible) universellement liée, et par conséquent ne s'intégreraient pas non plus dans l'unité transcendentale et nécessaire de l'aperception.¹⁷⁵ »

On voit à quel point, avec la conception kantienne, la notion de schéma causal considérée à un certain niveau, est relative à la possibilité que nous avons d'activer ou non un antécédent au moyen d'un instrument d'intervention adapté à ce niveau. De plus, comme tout ce qui peut être interprété comme un schéma causal dépend de la possibilité d'intervention et d'observation à un certain niveau, aucun niveau ne peut se réclamer d'une réalité plus forte que les autres.

Enfin, la théorie de la connaissance kantienne exclut l'idée d'un méta-observateur qui pourrait justifier qu'un niveau spécifique, appelé niveau de base ultime, puisse revendiquer un statut de causalité *réelle* par rapport aux autres niveaux.

En ce qui concerne le concept de clôture causale, la conception interventionniste-constitutive apporte aussi son éclairage dans la mesure où cette clôture, lorsqu'elle est

¹⁷⁵ Emmanuel Kant - *Critique la raison Pure* - trad. A. Renault – GF, 2006 - *Deuxième section du système des principes de l'entendement pur* [AK, IV, 110] – p. 235

démontrée, reflète le fait que les procédures d'intervention et d'observation à un niveau donné sont complètes et cohérentes.

La conception interventionniste-constitutive offre donc un cadre conceptuel qui garantit à la fois la cohérence et la clôture causale à l'intérieur de chaque niveau.

Un dernier point que souligne Michel Bitbol, c'est que cette cohérence et cette clôture causale à chaque niveau ne sont pas mutuellement exclusives – comme dans la conception émergentiste standard –, mais qu'au contraire, elles sont mutuellement *compatibles*. Ce qui ne signifie pas, bien entendu, qu'elles soient identiques et donc substituables d'un niveau à l'autre, mais – nous dit-il « qu'elles sont inter-traduisibles, comme s'il s'agissait de deux langues différentes (disons un micro et un macro-langage).¹⁷⁶ ».

Il donne un exemple, en biologie, d'exprimer un schéma causal sur a) un niveau de biologie génétique et b) un niveau de chimie moléculaire, qui ne sont pas exclusif l'un de l'autre et offrent une clôture causale suffisante – et donc d'un pouvoir explicatif satisfaisant –, à chacun des niveaux :

- a) « Un gène *cause* une caractéristique phénotypique de la cellule.
- b) L'ouverture d'un brin d'ADN offre des régions d'affinités sélectives pour la base nucléotidique, l'ARN polymérase se déplaçant le long de l'ADN, puis *cause* l'appariement successif de la base nucléotidique de l'ARNm avec la base nucléotidique de l'ADN (appelée « transcription »), et finalement l'ARNm, avec les ribosomes et l'ARN de transfert, *causent* un appariement systématique avec les acides aminés, ce qui entraîne une certaine structure primaire des protéines (c'est ce qu'on appelle la « traduction »).¹⁷⁷ »

¹⁷⁶ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* – Section 7

¹⁷⁷ *Ibid.* – Section 7

EXTENSION DU DOMAINE DE LA CAUSALITE DESCENDANTE

A ce stade de son article où la conception interventionniste a pris une place prépondérante, on pourrait objecter qu'il existe des phénomènes qui se produisent sans qu'aucune intervention humaine ne soit requise. Qu'est que la thèse interventionniste-constitutive a à nous en dire ?

Causalité descendante sans intervention

Dans le cas d'une causalité descendante sans intervention, la thèse interventionniste-constitutive n'est-elle pas face à une impasse et cela ne met-il pas en évidence l'existence de causes-en-soi ?

La réponse de Michel Bitbol est qu'il n'est pas nécessaire de faire référence aux causes-en-soi mais qu'il faut étudier de près les relations « entre les domaines de connaissance définis par rapport aux différents modes d'accès et de concepts¹⁷⁸ »

Si l'on étudie un système où un niveau peut être considéré comme étant constitué de parties élémentaires et où un autre niveau peut être considéré comme un composé de ces parties – disons un niveau moléculaire –, chacun de ces niveaux va être expliqué avec un appareil conceptuel adapté au domaine de connaissance. La question est alors de savoir dans quelles conditions on peut assimiler certains changements du niveau de base comme résultant d'une causalité descendante.

On peut d'emblée exclure, nous dit Michel Bitbol, l'idée qu'il y aurait une quelconque réalité d'interaction entre ces deux niveaux puisque chacun d'eux est définis par un domaine de connaissance relatif à son mode d'accès propre. Par contre, on peut noter comme le fait Leonardo Bich¹⁷⁹, s'inspirant des concepts développés par Robert Rosen¹⁸⁰, qu'il existe deux modes de connaissance pour un observateur qui peuvent permettre des comparaisons indirectes de ces niveaux : la *synthèse* à partir des constituants de base et l'*analyse* qui part d'un niveau supérieur composite.

Dans des systèmes linéaires simples, nous dit L. Bich, les modèles analytiques et synthétiques sont les exacts inverses l'un de l'autre et le système est fractionnable : les

¹⁷⁸ *Ibid.* – Section 8

¹⁷⁹ L. Bich - *Downward causation and relatedness in emergent systems: Epistemological remarks*. In G. Minati, E. Pessa & M. Abram (Eds.), *Processes of emergence of systems and systemic properties: Towards a general theory of emergence* (pp. 591-602), Singapore: World Scientific. (2009).

¹⁸⁰ R. Rosen, (1991). *Life itself: A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. (New York: Columbia University Press

propriétés du système sont localisées dans les constituants matériels et elles peuvent être exprimées par le modèle qui les décrit.

Ou, pour le formuler autrement, il y a coïncidence entre les *éléments* de la synthèse et les composants obtenus par l'analyse. Mais, un grand nombre de systèmes ne peuvent pas être réduits à des systèmes linéaires simples et, dans ce cas, il n'y a plus coïncidence entre les parties issues de l'analyse et les composants observés par la synthèse. Le tout du système S global est *plus* que la simple somme des parties du niveau de base : c'est ce que dans ce cas que l'on peut parler de causalité descendante.

Pour illustrer ce qui précède, Michel Bitbol prend l'exemple de l'hybridation orbitale de l'atome de carbone, en chimie quantique.

Avant d'aller plus loin, rappelons que le concept d'orbitale électronique est hérité du modèle de l'atome de Bohr modifié par Sommerfeld afin de faire correspondre des raies spectrales observées au modèle orbital initial. Aujourd'hui, la chimie organique définit ces orbitales comme des surfaces d'iso-densité de probabilité de présence de l'électron. Chacun de ces électrons est désigné par un nombre entier n , appelé nombre quantique principal et par un nombre entier l , appelé nombre quantique secondaire ou nombre azimutal¹⁸¹. Chaque orbitale désigne en fait un niveau d'énergie (exprimé en giga électronvolt ou GeV) et peut elle-même se décomposer en sous-couches d'énergie. Les quatre premières sous-couches correspondant aux quatre premières valeurs de l sont désignées par les lettres s, p, d et f¹⁸². De plus chaque orbitale électronique peut contenir un nombre maximum d'électrons égal à $2n^2$.

Ainsi, pour l'atome d'hydrogène, l'atome le plus simple, avec $n = 1$ et donc, $l = 0$, il n'y a qu'une seule orbitale s qui peut contenir un maximum de deux électrons. Sa configuration électronique s'écrit : $1s^1$.

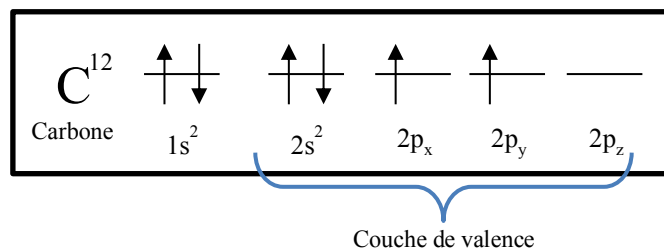
L'atome de carbone, dans sa configuration normale, possède un total de 12 électrons répartis en 3 couches (avec $n = 3$ et $l = 2$) : 1s, 2s et 2p. La règle de remplissage se fait à partir du niveau d'énergie le plus bas en suivant la règle $2n^2$:

¹⁸¹ Les nombres entiers n et l vérifient les inégalités suivantes : $n \geq 1$ et $0 \leq l \leq n - 1$. Les électrons d'un atome sont également caractérisés par deux autres nombres quantiques : le nombre quantique magnétique m_l et le nombre quantique magnétique de spin m_s , qui vérifient $-l \leq m_l \leq l$ et $m_s = \pm 1/2$, ces deux dernières valeurs étant couramment représentées par les symboles $\uparrow$ et $\downarrow$.

¹⁸² La sous-couche s correspond à $l = 0$, pour *sharp* ou *simple* ; p correspond à $l = 1$, pour *principal* ; d correspond à $l = 2$, pour *diffuse* ; et f correspond à $l = 3$, pour *fine* ou *fundamental*.

- $n = 1, l = 0$: 2 électrons sur la 1^{ère} orbitale, noté $[1s^2]$;
- $n = 2, l = 1$: 4 électrons sur la 2^{ème} orbitale, avec 2 sous-couches notée $[2s^2, 2p^2]$;
- $n = 3, l = 2$: 6 électrons sur la 3^{ème} orbitale, avec 3 sous-couches notée $[1s^2, 2s^2, 2p^1, 2p^1, 2p^0]$.

La dernière couche devrait pouvoir contenir un total de 8 électrons théoriques, mais on doit réduire ce nombre à 6 pour retrouver le nombre atomique 12 du carbone C^{12} ($2+4+6=12$). Cette dernière couche électronique joue un rôle essentiel. En effet, ce sont les électrons les plus externes (ceux de la couche de valence) qui sont concernés par la chimie pour combiner des atomes entre eux et former des molécules. Par conséquent pour le carbone, il s'agit des 4 électrons situés dans la couche 2 :



Nous voyons sur ce schéma¹⁸³ qu'il reste suffisamment d'orbitales vacantes (c.à.d. non complètes) qui peuvent accueillir des électrons provenant, par exemple, d'atomes d'hydrogène, réalisant ainsi des liaisons carbone-hydrogène.

Cette distribution des 2 électrons sur la dernière sous-couche 2p entraîne, nous dit Michel Bitbol, « la *di*-valence du carbone (car seuls deux électrons sont dissociés : ceux des couches $2p_x$ et $2p_y$), et l'angle entre les deux liaisons prédites égal à 90° .¹⁸⁴ »

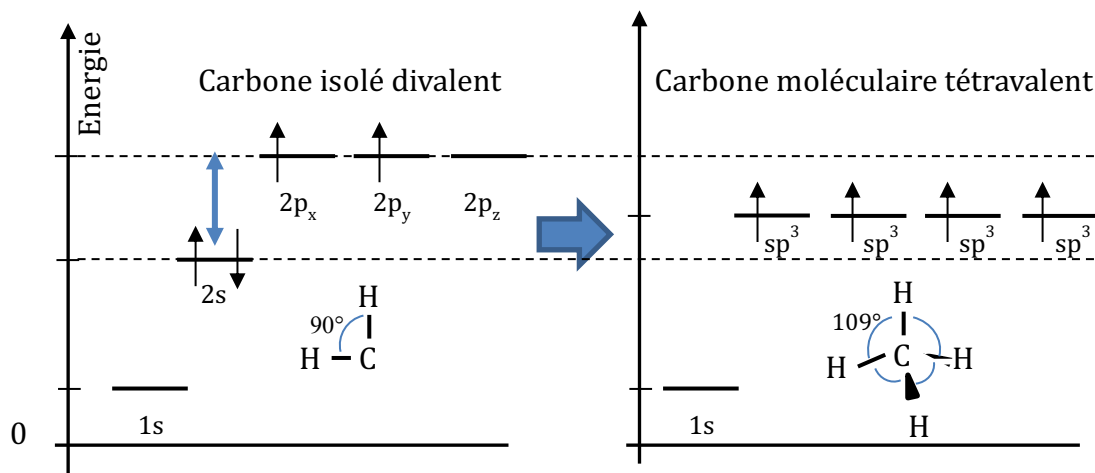
Mais nous dit-il, « c'est presque toujours faux.¹⁸⁵ ». Ce qu'on observe dans la réalité c'est une structure géométrique *tétraédrique* de l'atome de carbone avec un angle proche de 109° . C'est à la suite de cette différence observée que la chimie quantique a introduit le concept d'hybridation orbitale. « Une astuce *ad hoc* », nous dit Michel Bitbol, qui permet de faire une combinaison linéaire des énergies des deux électrons de la sous-couche 2s

¹⁸³ Dans ce schéma, les flèches haute et basse symbolisent le moment magnétique de spin haut ou bas. La couche la plus basse est notée 1 et la couche immédiatement supérieure est notée 2

¹⁸⁴ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation*. Section 8

¹⁸⁵ *Ibid.* Section 8

avec les énergies des deux électrons de la sous-couche 2p pour ne faire qu'une seule énergie de cette couche hybride appelée sp^3 :



Nous voyons, à travers cet exemple, que le modèle de l'atome de carbone isolé, qui présente une structure élémentaire divalente avec un angle de 90° ne coïncide pas avec les éléments obtenus à partir d'une molécule de carbone (exemple du méthane), dans une structure tétravalente avec un angle de 109°, sans qu'aucune intervention immédiate ne soit intervenue.

Pour Michel Bitbol : « Cette non-coïncidence entre les procédures ascendantes et descendantes et les modèles associés peut être comprise comme ce que nous pourrions appeler un cas de « causalité descendante », *au-delà de la situation d'une intervention immédiate.* »

On pourrait objecter, nous dit-il, qu'on pourrait interpréter ce résultat comme étant l'influence de la molécule de méthane sur l'atome de carbone, mais ce type de reproche tomberait immédiatement sous la critique ontologique du raisonnement circulaire de J. Kim. Par contre, une telle critique de circularité du raisonnement ne s'applique pas dans ce cas de non-coïncidence des procédures basées sur deux modèles différents.

Nous avons ici une démonstration que l'approche interventionniste-constitutive peut parfaitement donner un sens dans le cas où, en l'absence d'intervention immédiate, un événement de niveau N+1 peut provoquer des changements au niveau N.

Mais, pour pouvoir donner cette explication, encore faut-il comprendre quels schémas d'interventions expérimentales ont été utilisés qui ont permis de définir des lois et ensuite pouvoir relier ces différents modèles entre eux.

Auto-causalité descendante

Après avoir exploré le cas d'une causalité descendante sans intervention extérieure, essentiellement due à la différence de modèles utilisés entre les niveaux haut et bas et la relation qu'ils entretiennent entre eux, Michel Bitbol veut explorer le cas d'une auto-causalité descendante. Même si cela peut paraître aberrant à première vue, pourtant, nous dit-il, tout le monde a fait l'expérience, ou en a été le témoin, où l'on peut observer une modification de la physiologie provoquée par un changement d'état mental volontaire. Le problème est de savoir ce que l'on entend par « volontaire » : sommes-nous vraiment libres de changer notre état d'esprit ?

Deux positions s'affrontent : a) celle des *fondationnalistes* pour qui il y a une 'réalité' du libre-arbitre, ce qui conduit à une conception réifiée de l'esprit. Une position similaire à celle des promoteurs d'un émergentisme fort – dualistes -, pour justifier une causalité descendante effective ; et, à l'autre extrême, b) celle de ceux qui s'opposent à la réalité du libre-arbitre, et qui peuvent aller jusqu'à penser que l'expérience ressentie est une illusion et que seule la description physiologique a une réalité. Une position proche des monistes-substantialistes.

Entre ces deux extrêmes, Kant, principalement dans sa *Critique de la raison pratique* et dans *Fondements de la métaphysique des mœurs*, propose une voie alternative qui accepte les deux positions, mais en donnant des points de vue différents de la réalité.

Michel Bitbol fait référence au philosophe américain, Lewis White Beck, qui propose une interprétation intéressante : « La croyance spontanée au libre arbitre provient ici du point de vue d'un acteur immergé dans la nature, alors que refuser le libre arbitre devient inévitable avec le point de vue d'un spectateur qui s'engage à poser une partie de cette nature comme objet de description. »

En effet, Kant dit : « tout être qui ne peut agir autrement que sous l'idée de liberté est *ipso facto*, du point de vue pratique, réellement libre ; ce qui revient à dire que toutes les lois qui sont liées indissolublement à la liberté valent pour lui exactement comme si sa

volonté était proclamée aussi libre en elle-même, et cela d'une manière qui puisse valoir aux yeux de la philosophie théorique.¹⁸⁶ »

Pour Michel Bitbol, dans ce passage, Kant a compris qu'on ne pouvait rationnellement pas prouver l'existence du « libre arbitre » comme fondement théorique de la volonté, mais qu'il suffisait à l'*acteur* de croire à cette possibilité du libre arbitre (comme si sa volonté était proclamée aussi libre en elle-même) pour agir librement, et ainsi être réellement libre.

L.W. Beck insiste d'ailleurs sur le fait que Kant écrit sa deuxième *Critique*¹⁸⁷ pour précisément éclairer d'un nouveau regard la troisième antinomie de sa *Critique de la Raison Pure* :

- i) « Thèse : La causalité qui s'exerce d'après les lois de la nature n'est pas la seule d'où puisse être dérivés les phénomènes du monde considérés dans leur totalité. Il est encore nécessaire d'admettre en vue de leur explication une causalité par liberté »
- ii) Antithèse : Il n'y a pas de liberté mais tout arrive uniquement d'après les lois de la nature¹⁸⁸ »

Kant lui-même s'en explique longuement dans sa préface. Son but est, en particulier, d'éclairer les concepts de libre-arbitre et de liberté.

Beck en tire une interprétation du double point de vue :

- Le point de vue de l'acteur, qui agit dans l'idée de la liberté de son action – voir de sa performance, si l'on prend le mot acteur dans sa deuxième acception. Et, comme le souligne Kant, le simple fait de croire en sa liberté d'action, le rend réellement libre dans sa pratique. Si l'acteur peut modifier son propre état d'esprit, on peut assimiler cela, dans une vision émergentiste, à une modification du niveau haut ;

¹⁸⁶ Emmanuel Kant – *Fondement de la métaphysique des mœurs* – trad. A. Renaut, éd. GF, 1994 - p.133 [448]

¹⁸⁷ Emmanuel Kant - *Critique la raison Pratique* - trad. F. Picavet, 1921

¹⁸⁸ Emmanuel Kant - *Critique la raison Pure* - trad. A. Renault – GF, 2006 ; (A444-445, B472-473) pp. 442-443

- Le point de vue du spectateur, c'est-à-dire de l'agent passif qui s'observe et peut éventuellement observer des changements physiologiques liés à l'état psychologique dans lequel l'acteur (l'autre lui-même) l'a plongé.

Avec un tel schéma conceptuel, il n'est pas nécessaire de présupposer que c'est une altération des lois de la nature qui a provoqué un tel changement : l'acteur et le spectateur sont la même personne avec deux points de vue différents. On peut bien alors considérer, dans ce cas, que l'on a affaire à une auto-causalité descendante.

Ce qui fait dire à Michel Bitbol : « Sur la base de ce point de vue, on pourrait dire (en accord avec ma formulation initiale du statut de causalité descendante) que le libre arbitre n'est ni illusoire ni intrinsèquement existant, mais simplement indexé ou situationnel.¹⁸⁹ »

Enfin, M. Bitbol termine ce cas d'auto-causalité en soulignant que l'exemple que nous avons vu était celui d'une auto-causalité directe, où l'état d'esprit est focalisé directement sur l'action qu'il va entreprendre, mais qu'il existe aussi une possibilité d'auto-causalité indirecte :

« quand nous souhaitons modifier notre propre état (psycho-physiologique), il est souvent préférable d'agir indirectement en choisissant de nous influencer latéralement, plutôt que d'agir directement en essayant de provoquer l'état recherché. Par exemple, quand nous souhaitons dormir, mieux vaut ne pas chercher à atteindre ce but, mais plutôt nous influencer en promouvant d'autres processus (apparemment sans rapport), tels que la concentration sur une tâche mentale répétitive ou le renoncement à quelque but que ce soit.¹⁹⁰ »

Bilan sur l'approche Interventionniste-Constitutive de la causalité descendante

Au terme de son article, Michel Bitbol donne un bilan de l'approche interventionniste-constitutive qu'il propose pour résoudre le problème de circularité de l'approche émergentiste lié à la causalité descendante.

Tout d'abord, avec cette approche, il n'est plus nécessaire de faire une distinction métaphysique sur l'existence des niveaux haut et bas, ni même de faire une distinction entre propriétés intrinsèques du niveau inférieur et propriétés organisationnelles du niveau

¹⁸⁹ Michel Bitbol, *Downward Causation without Foundation* – Section 9

¹⁹⁰ *Ibid.* – Section 9

supérieur : « Il suffit de supposer une dualité de modes d'accès, ou de modes d'intervention.
¹⁹¹ ».

En effet, dans l'approche interventionniste, il est possible d'interpréter l'observation des modifications sur un niveau avec des moyens expérimentaux adapté à ce niveau tandis que l'on intervient sur l'autre niveau avec des moyens expérimentaux adaptés à celui-ci.

D'autre part, ces modes d'accès des niveaux ne sont pas seulement des *révélateurs* des phénomènes observés : ils sont *constitutifs* de ces phénomènes. Ils ont été conçus et construits à cette fin particulière et participent à ce titre à l'élaboration du phénomène en tant que cause constitutive.

En conséquence, dire qu'une intervention, par exemple sur le niveau supérieur, cause de manière descendante une altération qui peut être détectée au niveau inférieur est l'expression correcte du double mode d'accès des niveaux, car l'inverse est vrai aussi, de manière symétrique avec une intervention sur le niveau inférieur et d'altérations détectée au niveau supérieur.

Nous avons aussi vu que cette interprétation interventionniste-constitutive s'étendait au-delà de la causalité descendante externe, au cas d'autotransformation de niveau et de causalité descendante interne.

Une interprétation interventionniste-constitutive qui fait qu'un niveau émergent, ou bien l'auto-organisation d'un niveau, ne sont ni illusoires, ni ontologiques, mais objectifs dans le sens de l'objectivité transcendantale, c'est-à-dire d'une constitution épistémique de l'objet d'investigation.

Enfin, cette interprétation permet de se défaire du traditionnel débat entre cause épistémique et cause ontologique puisqu'il n'y a plus besoin de spécifier la nature du niveau lorsqu'on intervient : il suffit de définir le mode d'accès propre à ce niveau.

¹⁹¹ *Ibid.* – Section 10

Au bout de l'enquête

Nous voici arrivé au terme de cette enquête dont le fil conducteur a été l'article de Michel Bitbol¹⁹² commenté dans la troisième partie de ce mémoire.

La première partie, à travers les histoires respectives des concepts de causalité et d'émergence, nous a permis de comprendre comment ces deux concepts se sont nourris l'un l'autre, chacun évoluant au fur et à mesure des avancées scientifiques. Nous avons pu voir, notamment, comment le concept de cause, partant d'une conception aristotélicienne substantialiste, s'est progressivement enrichi d'un concept de causes multiples, comme autant de conditions initiales influençant directement ou indirectement les phénomènes observés : cause physique intégrale, cause libératoire ou cause contrafactuelle. Nous avons pu voir comment la philosophie analytique de Bertrand Russell a même dénié le statut dissymétrique de la relation cause/effet pour lui substituer celui de relation fonctionnelle, de pures lois mathématisables.

SUBSTANCE ET EXISTENCE

Nous avons aussi pu voir comment le concept d'émergence, déjà présent chez Aristote, était indissolublement lié à une nature 'vivante' – une *phusis* –, décidément peu encline à se laisser réduire à l'état de simple 'machinerie' et où le tout est irréductiblement *plus* que la somme des parties. Un concept d'émergence qui est apparu comme nécessaire médiateur entre une conception moniste substantialiste, celle de la mécanique classique et de sa clôture causale, et une conception dualiste idéaliste d'une cause primordiale extra-mondaine, d'un *mobile immobile* céleste. Nous avons vu aussi comment avec le retour du vivant, avec l'arrivée de la psychologie et des sciences sociales dans les sciences du XIXe siècle, ce concept d'émergence a repris de la vigueur, bien que souvent méprisé par les réductionnistes et les positivistes.

La trame de fond de ces deux concepts, c'est la théorie de la connaissance : comment l'homme voit le monde qui lui fait face et tente d'en expliquer le fonctionnement. Une attitude intellectuelle, fruit d'une lente sélection naturelle et qui a permis, jusqu'ici, la survie d'un animal social, dont les autres attributs naturels n'auraient sans doute pas permis une si longue descendance. Mais cet outil intellectuel, lié à l'excroissance *monstrueuse* du

¹⁹² *Ibid.*

néocortex¹⁹³, est profondément autocentré et anthropologique. Il repose, en particulier, sur un certain nombre de présupposés lui permettant de manipuler plus rapidement les informations sensibles provenant de son corps et de se faire ainsi des représentations du monde environnant et des objets qui s'en détachent.

L'existence et la substance sont deux parmi les présupposés les plus courants en science et il faut beaucoup d'effort et d'énergie pour en questionner le sens afin de développer des savoirs. Ce désir de connaissance est attaché au plus profond de la nature humaine : c'est une pulsion, au même titre que la pulsion sexuelle. Une pulsion que la psychanalyste Mélanie Klein qualifiait de « pulsions épistémiques », extrêmement puissante chez le jeune enfant. Existence et substance sont aussi les attributs des deux concepts de causalité et d'émergence, mais que recouvrent-ils vraiment ?

Ce qui *existe* semble être cette chose *jetée* devant moi, cet objet du monde, dont je ne perçois que le phénomène et dont je me fais une représentation. Il ne peut pas exister simplement parce que je m'en saisi physiquement car, dans ce cas, ni l'eau ni l'air ni le feu ne sont saisissables et pourtant il me semble bien qu'ils existent. Existe-t-il uniquement parce que je peux le mesurer, c'est-à-dire lui appliquer une norme partagée avec d'autres ? Or, si je sais mesurer un volume d'eau ou d'air, je ne mesure ni la liquidité de l'eau ni la nature éthérée de l'air et si je sais mesurer la température d'un feu, je ne sais mesurer sa brûlure. Je sais mesurer les qualités premières, mais pas les qualités secondes. Or il me semble bien que l'objet de mon observation possède les deux, et que par conséquent les deux co-existent.

Quant à la substance, qu'elle est-elle ? Si je dis que c'est la matière, n'est-ce pas là une façon de déplacer le problème. Qu'est-ce que la matière : une chose-en-soi possédant des propriétés, c'est-à-dire des caractéristiques qui lui sont propres ? Mais si je n'ai pas accès à la chose-en-soi, seulement à son *apparition*, alors comment puis-je m'assurer qu'il s'agit bien d'une propriété, d'une caractéristique *en propre* de l'objet ? Qu'est-ce qui me garantit que cette caractéristique que je mesure n'est pas un artéfact de cette mesure et du dispositif que j'ai mis en œuvre ? Un artéfact bien sûr reproductible et que je peux partager avec d'autres pourvu nous adoptions les mêmes normes et le même dispositif instrumental.

¹⁹³ Alain Prochiantz – *Qu'est-ce que le vivant* – Ed. Seuil, coll. Les livres du nouveau monde, Paris, 2012

Après tout, n'est-il pas suffisant que l'artéfact acquiert cette qualité d'être *universel* à la communauté des savants avec qui je le partage ?

Toutes ces questions sont devenues cruciales avec la physique quantique dont nous avons exploré le formalisme ainsi que la nature de son objet, dans la deuxième partie de ce mémoire. Il est apparu que l'objet de la physique quantique est très différent de l'objet classique : nous sommes passés d'un objet substantiel à un objet formel mathématique ; de sa constitution phénoménale à sa constitution mathématisable. L'autre curiosité de la théorie quantique est qu'elle implique un raisonnement en deux temps : 1) celui de la préparation expérimentale gouvernée par le formalisme ondulatoire de l'équation de Schrödinger et de son vecteur d'état et 2) celui de la mesure et de son dispositif instrumental gouverné par le formalisme quantique probabiliste de Heisenberg, Jordan et Born.

CONSTITUTION ET INTERVENTION

Plus que tout autre science, et probablement parce qu'elle se focalise sur des objets microscopiques inaccessibles à la sensibilité directe et qui nécessitent des dispositifs expérimentaux macroscopiques, la physique quantique a obligé la communauté des savants et des philosophes à faire un *pas de côté*, à se défaire des préjugés classiques sur la matière, son observation et sa mesure. Elle a mis en évidence que toute observation nécessitait une phase préparatoire et que celle-ci était déjà *constitutive* de l'objet à observer. De ce seul point de vue, il n'y a rien de vraiment nouveau à cela. Que l'on songe à Galilée, à la source de la science moderne, qui lorsqu'il veut étudier la chute des corps, imagine un dispositif qui va à la fois ralentir le temps et mesurer des intervalles de temps : un plan incliné avec un système de clochettes espacées de manière réglable le long de ce plan incliné. La constitution du dispositif instrumental, lors de la phase préparatoire à la mesure, a permis d'*incarner* la pensée de son inventeur lors de la construction et de la réalisation de son dispositif, spécialement développé à cette fin. Elle lui a permis de vérifier l'intuition qu'il avait de l'accélération constante d'une masse en chute libre.

Ce qui est plus particulier à la physique quantique tient à la mesure elle-même. Une mesure comme nous l'avons vu qui nécessite des instruments par nature macroscopiques en regards des objets observés et qui interfèrent avec le résultat de deux manières : a) d'abord parce que le dispositif instrumental est à la fois adapté et, en même temps, détermine le niveau de la mesure : mesure au niveau de base de particules quantiques ou mesure au niveau d'un système quantique, ensuite b) lorsqu'elle est appliquée au niveau

d'un système quantique, cette mesure interfère avec le niveau de base en changeant l'état de particules au niveau de base.

Le premier point a) reflète l'aspect *constitutif* au sens kantien. C'est cette adaptation du dispositif instrumental qui va participer à *constituer* et non pas à *révéler* le résultat. Pour le dire autrement, le résultat ne se révèle pas devant un appareillage passif et neutre – un peu comme le mouvement d'un objet face à une caméra –, ici l'appareillage joue un rôle actif dans la constitution du résultat. En réalité cet aspect-là est présent aussi dans les mesures en physique classique, mais dans la plupart des cas, son effet est considéré comme négligeable devant la mesure et il est simplement *intégré* à l'erreur de mesure. Dans ce cas, c'est cette erreur de mesure qui *neutralise* l'effet de l'appareillage de mesure. Mais il y a des cas où, même en physique classique, la mesure est du même ordre de grandeur que l'erreur introduite lors de la mesure, c'est-à-dire qu'elle est du même ordre de grandeur que la *sensibilité* de l'appareil (sa précision). On dit alors que la mesure est dans le *bruit* de l'appareil. Pour réaliser ce type de mesure, on fait intervenir la théorie de l'*information* en réalisant un grand nombre de mesures pour ensuite *filtrer* le résultat, c'est-à-dire l'extraire du bruit. On peut remarquer que pour analyser ce genre de résultats on a fait intervenir i) la notion de sensibilité qui renvoie à la notion d'*intuition* kantienne dans le sens de transmission des données brutes par les sens, ii) la notion de *bruit* qui réintroduit de l'indéterminé dans la mesure et renvoie à la composante probabiliste de la nature et enfin iii) la notion d'*information* qui renvoie à la théorie de la connaissance et à l'interprétation par une intelligence humaine, c'est-à-dire par une *constitution* au sens transcendantal.

Le point b) reflète, lui, l'aspect *interventionniste* de la mesure. Lorsque le dispositif instrumental est appliqué sur le niveau de base, il participe comme cause de type interventionniste sur le phénomène observé. C'est le cas par exemple lorsqu'en psychologie, on prépare un sujet en lui faisant absorber des psychotropes qui vont altérer son état mental.

C'est aussi le cas, de manière parfaitement symétrique, lorsque, toujours sur l'exemple en psychologie, on intervient cette fois-ci en conditionnant mentalement le sujet et que l'on observe le comportement ou les modifications chimiques cellulaires de son corps. La cause des changements, que ce soit sur le niveau supérieur ou inférieur, est d'ordre interventionniste.

REALISME VERSUS IDEALISME ?

La conclusion à laquelle arrive Michel Bitbol au terme de son article est que cette interprétation interventionniste-constitutive donne un sens au concept de causalité descendante de l'émergentisme sans tomber dans la critique de circularité dénoncée par Jaegwon Kim : « Cette approche néo-kantienne permet de désamorcer plusieurs paradoxes associés à la causalité descendante et permet à chacun d'en faire bon sens, quel que soit son préjugé sur l'existence (ou l'inexistence) d'une hiérarchie des niveaux d'être ».

Pour cela il a fallu au préalable se débarrasser de la vision classique de la substance comme matière, de même que d'une vision de la nature purement déterministe. Il a fallu aussi se débarrasser de l'approche dualiste proposée par l'émergentisme fort. Le cheminement à travers la théorie quantique, souvent jugée trop exotique pour essayer de le décrypter, permet de bien saisir les deux versants de l'approche. Or, l'approche interventionniste-constitutive permet de dépasser largement le cadre de la physique quantique et trouve des prolongements aujourd'hui dans les sciences économiques et sociales, en psychologie de la perception ou encore en théorie du choix rationnel.

L'autre reproche, souvent adressé à la conception néokantienne, est qu'elle est un idéalisme et qu'elle refuse, de ce fait, d'envisager la réalité du monde. La première remarque que l'on peut faire à ce reproche est qu'opposer de manière si stricte réalisme et idéalisme a peu de sens aujourd'hui lorsqu'on se penche sur le détail des arguments des deux écoles de pensée. Très peu de réalistes contemporains nieront que l'esprit humain travaille à partir de représentations du réel de même très peu d'idéalistes nieront qu'il existe un monde réel qui nous fait face.

La deuxième remarque est que le néokantisme est trop souvent assimilé à un idéalisme ordinaire en oubliant que Kant a développé sa théorie transcendantale, précisément en opposition contre l'idéalisme absolu de Leibniz et Wolf, qu'il qualifie d'*idéalisme effectif*. Ce qui est premier pour Kant, ce ne sont pas les idées, ce sont les données des sens : l'intuition au sens kantien. L'idéalisme transcendantal n'a pour idéalisme que les conditions de possibilité *a priori* – la *grille de lecture* que l'entendement humain (et non pas la raison) plaque sur le monde extérieur. Le sujet kantien ne constitue pas *le* monde, mais *son* monde. Ce monde singulier peut s'universaliser et devenir *le* monde si cette représentation est partagée avec d'autres par intersubjectivité et surtout si elle est vérifiée par l'expérience.

Reste enfin la question métaphysique qui porte sur la nature de la réalité : est-elle faite strictement de qualités intrinsèques, de qualités premières au sens de Locke ou est-elle seulement constituée de qualités secondes ? Michel Bitbol avec son approche interventionniste, et qui cite Menzies et Price, semble de leur avis : « Il n'y a pas de cause qu'on puisse considérer comme une « qualité primaire » de la matière ; toute cause se présente comme une « qualité secondaire » dans la mesure où elle est relative à une certaine procédure d'intervention¹⁹⁴ ». Mais un *réaliste* comme Quentin Meillassoux veut opposer sa thèse de l'archi-fossile comme preuve que les qualités premières intrinsèques existent bien et pense pouvoir s'opposer ainsi à ceux qu'il nomme les *corrélationalistes*. Il ne s'agit pas ici d'ouvrir ce débat mais plutôt d'indiquer une piste intéressante de recherche – d'autant plus intéressante qu'elle nourrit le débat contemporain avec l'essai que vient de publier Michel Bibol – *Aujourd'hui la finitude* – en réponse à celui de Quentin Meillassoux – *Après la finitude*.

¹⁹⁴ Menzies, P. & Price, H. (1993). *Causation as a secondary quality*. British Journal for the Philosophy of Science, 44, 187-204

Bibliographie

Émergence

- Ablowitz, Reuben - The theory of Emergence, *Philosophy of Science*, vol. 6, January 1939, p.14
- Bedau, Mark A. – *Weak Emergence* - Philosophical Perspectives: Mind, Causation, and World, Vol. 11 (Malden, MA: Blackwell, 1997).
- Bitbol, Michel - *Ontology, Matter and Emergence*. - *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 6, Issue 3, 293-307, 2007.
- Chalmers, David J. - *Strong and weak emergence* - In P. Davies & P. Clayton (eds.), *The Re-Emergence of Emergence: The Emergentist Hypothesis From Science to Religion*. Oxford University Press (2006)
- Juignet, Patrick – *Le concept d'émergence* – Philosophie, Science et Société ;
<https://philosciences.com/philosophie-generale/complexite-systeme-organisation-emergence/38-le-concept-d-emergence>
- Lewes, G. H. - *Problems of life and mind* – Boston: Houghton, Osgood and Company, The Riverside Press Cambridge, 1879
- Luisi, Pier Luigi, “The Emergence of Life : From Chemical Origins to Synthetic Biology” - Cambridge University Press, 2006, Second edition 2016
- Mill, John Stuart - *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive*, Harpers & Brothers publisher, New York, 1882
- Sartenaer, Olivier– « Émergence » - In *La philosophie de A à Z* (<http://encyclo-philo.fr/?s=%C3%A9mergence>)
- Zeigler, Bernard P. and Muzy, Alexandre - Some Modeling & Simulation Perspectives on Emergence in System-of-Systems - Spring Simulation Multi-conference (SpringSim'16), Apr 2016, Pasadena, CA, United States.

Causalité

- Aristote - *Sur la Nature (Physique II)* – trad. Lambros Couloubaritsis, Éd. Vrin, Paris (1991)
- Besnier, Jean-Michel – *La causalité entre métaphysique et science* - Causalité et finalité, Septième rencontre « Physique et interrogations fondamentales » 22 mai 2002, p. 15 ; Édité par Gilles Cohen-Tannoudji et Émile Noël.
- Comte, Auguste - *Cours de philosophie positive*, 1^{ère} Leçon, t. IV-VI, Paris, 1908. Édition identique à la première, parue au commencement de juillet 1830.
- Kant, Emmanuel - *Critique la raison Pure* - trad. A. Renault – GF, 2006
- Kant, Emmanuel - *Fondement de la métaphysique des mœurs* – trad. A. Renaut, éd. GF, 1994
- Kant, Emmanuel - *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*, trad. Léon Brunschvicg, Louis Chambert, Jean Cresson, Fernand Gazin, Henri Havard et Paul Landormy, Ed. Hachette, Paris, 1891.
- Kistler, Max – *La causalité dans la physique contemporaine* – Intellectica, 2004/1
- Mill, John Stuart – *A system of logic, ratiocinative and inductive* – Book III, Chapter VI On the composition of causes, p. 460; Harpers and Brothers Publisher, Franklin Square, 1882.
- Russell, Bertrand– On the Notion of Cause - *Proceedings of the Aristotelian Society*, New Series, Vol. 13 (1912 - 1913)
- Stuart, John - (Costech, Université de Technologie de Compiègne) – *La physique, la biologie et la clôture sous causalité efficiente* – in science - Causalité et finalité, Septième rencontre « Physique et interrogations fondamentales » 22 mai 2002, p. 71 ; Édité par Gilles Cohen-Tannoudji et Émile Noël
- von Wright, Georg Henrik - *Explanation and Understanding* - Londres, Routledge and Kegan Paul, 1971.
- Woodward, James - *Explanation, Invariance, and Intervention*, *Philosophy of Science*, Vol. 64, Supplement. *Proceedings of the 1996 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association*. Part II: Symposia Papers (Dec., 1997), pp. S26-S41
- Woodward, James - *Making Things Happen*, Oxford University Press, 2003.

Philosophie de la Physique

- Bell, John Stewart – *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox* - *Physics* Vol. 1, No. 3, pp. 195-290, 1964.
- Bitbol M. - – *Mécanique Quantique, une introduction philosophique* – Flammarion, 1999

Émergence et Intrication quantique
Mémoire de master de philosophie - Bibliographie

p. 2/2

- Bohr, Niels - Can Quantum-Mechanical Description of Physical Description Be Considered Complete? – Physical Review Vol. 48, July 13, 1935.
- Cohen-Tannoudji Claude, Diu Bernard, Laloë Franck – *Mécanique Quantique I*- Hermann, Coll. Enseignement des Sciences, Tome 1
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N. - Can Quantum-Mechanical Description of Physical Description Be Considered Complete? – Physical Review Vol. 47, May 15, 1935.
- Einstein, Albert - « Comment je vois le monde », Paris, Flammarion, 1979
- Feynman, Richard - *The Feynman lectures on physics – Volume I* – the Millennium Edition, published by Basic Books, a member of the Perseus Books Group 2010.
- Grinbaum, Alexeï – *Mécanique des étreintes* – Ed. Les belles lettres, coll. Encre Marine, Paris, 2014.
- Heisenberg, Werner - *Physics and philosophy: the revolution in modern science*, Harpers & Brothers publishers, New-York, 1958
- Klein, Etienne - *L'unité de la Physique* – PUF, Paris, 2000.
- Laloë, Franck - Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ? - CNRS Éditions, coll. Savoirs actuels, 2017.
- Laloë, Franck « L'argument de Einstein, Podolsky et Rosen », Bibnum [<http://bibnum.revues.org/826>], Physique.
- Masson, Thierry - *La physique du XIXe siècle face au concept de paradigme*. À paraître dans un ouvrage collectif aux Presses Universitaires d'Aix-Marseille, collection Inter., 2017. <hal-01632657>
- Paty, Michel - *Interprétations et significations en physique quantique*. Revue Internationale de Philosophie, Presses Universitaires de France, 2000, pp.199-242. halshs-00170473
- Prigogine, Illya & Stengers Isabelle – *La nouvelle alliance* – Ed. Gallimard, Coll. folio essais, 1979

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Annexe I : traduction de l'article de M. Bitbol

"Downward causation without foundations"

Michel Bitbol 2010

Traduction proposée J.C. Ronnet – 2018-2019

Résumé : L'émergence est ici interprétée dans un cadre de pensée non dualiste. On ne suppose aucune distinction métaphysique entre les niveaux haut et bas d'organisation, seulement une dualité des modes d'accès à ces niveaux. De plus, ces modes d'accès ne sont pas interprétés comme des façons de révéler le niveau intrinsèque d'organisation, ils sont plutôt supposés les *constituer* au sens kantien. Les niveaux émergents d'organisation, de même que les causalités inter-niveaux sont, de ce fait, ni illusoire ni n'ont de réalité ontologique. Ils sont « objectifs » au sens de l'épistémologie transcendantale. Cette approche néo-kantienne permet de désamorcer plusieurs paradoxes associés à la causalité descendante et permet à chacun d'en faire bon sens, quel que soit son préjugé sur l'existence (ou l'inexistence) d'une hiérarchie des niveaux d'être.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

1. Introduction

La causalité descendante semble impossible comme concept, mais elle est bien établie en tant que fait. Un flux descendant de causalité allant d'un niveau émergent de processus (disons biologique ou mental) vers un niveau de base de processus (disons, physique), censé le *soutenir*, pose un problème de l'ordre du paradoxe. Pourtant, c'est un paradoxe auquel nous sommes confrontés dès que nous voulons donner sens à de nombreux phénomènes allant des phénomènes d'ordre psychosomatique à des interactions mutuelles entre les organismes et la vie cellulaire ; par exemple lorsque nous voulons exprimer certains faits d'expérience dans lesquels une modification de notre état mental a un impact immédiat sur notre état physiologique. Ma conviction est que ce qui est paradoxal ici n'est pas tant l'expérience, ni même sa description verbale en termes de causalité descendante, que l'*interprétation métaphysique* standard que l'on leur superpose.

La conception métaphysique qu'il faut dissiper, lorsqu'il s'agit de causalité descendante, est cette image *dualiste et fondationnaliste*¹⁹⁵. Une image selon laquelle la causalité descendante n'a de sens que s'il y a au moins *deux* niveaux ontologiquement distincts du processus, avec leurs propres entités et leurs propriétés spécifiques, capables de s'influencer l'une l'autre au moyen d'une causalité efficiente. C'est aussi d'une image selon laquelle il n'existe qu'un seul niveau fondamental d'être et de processus, ce qui rend, en retour, toute causalité entre-niveaux inutile. Pour contrebalancer cette image populaire, je vais défendre, dans cet article, l'idée que les termes « causalité descendante » et « causalité montante », sont des façons approximatives de décrire deux modalités d'*action* exercée sur un procès, ce qui n'empêche en rien d'en avoir une interprétation non dualiste. Agir au niveau global (ou au niveau macro, à grande échelle) entraîne des conséquences détectables sur des expériences portant sur les niveaux locaux. À l'inverse, intervenir aux échelles les plus petites qui sont accessibles produit des conséquences détectables par des expériences portant sur des échelles plus grandes. C'est sur cette base que je vais conclure que :

- i) Les causalités descendante et ascendante ne sont *ni* des illusions, *ni* n'existent intrinsèquement, mais sont plutôt *indexées* par un certain niveau d'intervention. En conséquence de quoi, les causalités descendante et ascendante ne sont pas des concepts de substance, mais des concepts de relations, de part en part.
- ii) Les relations appropriées ne prennent pas place entre des entités, qui sans quoi seraient subsistantes en elles-mêmes, mais contribuent à la *définition* même de leurs termes. Ces relations de définition sont premièrement, des relations entre les agents et les cibles de leurs actions et, deuxièmement, des relations entre les différents domaines d'action et d'expérimentation.

Le point (i) revient à remplacer le dualisme ontologique par une dualité fonctionnelle de domaine d'intervention. Quant au point (ii), il permet de dissiper, d'entrée de jeu, tout fondationnalisme. Au lieu du schéma habituel d'existence intrinsèque d'un niveau de base et d'un niveau émergent (ou niveau d'organisation), nous avons alors à faire à des niveaux flexibles d'accès (expérimental et résultant de l'expérience) : niveaux d'action, niveaux d'analyse et niveaux de théorisation.

Cette approche fortement anti-fondationnaliste ne cadre pas très bien avec l'approche dominante réaliste actuelle des programmes de recherche en philosophie des sciences mais elle a toute sa légitimité dans un programme de recherche basé sur l'« idéalisme transcendantal » de Kant, la phénoménologie d'Husserl et sur le pragmatisme. Après tout, dans un tel cadre conceptuel, « l'accès à l'objet participe à l'être de cet objet » (Levinas 2001, 161).

2. Paradoxes et difficultés de la causalité descendante

La difficulté majeure, telle que l'a exprimée Jaegwon Kim (1999) est la menace d'un raisonnement circulaire vicieux. Est-il cohérent, demande Kim, de faire l'hypothèse que la présence d'un certain niveau inférieur soit « responsable » de l'émergence d'un niveau supérieur de processus et dans le même temps, faire l'hypothèse que ce niveau supérieur exerce en retour une certaine influence sur le processus du

¹⁹⁵ N.d.T. : dans le cadre de cet article, Michel Bitbol désigne comme 'fondationnalisme' toute conception qui part du principe qu'il existe un niveau à partir duquel s'appuient des relations de type causal. Le « dualisme » fait, lui, référence à l'existence (au sens ontologique) d'un niveau inférieur et d'un niveau supérieur.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

niveau inférieur ? Puisque le niveau supérieur est supposé émerger complètement du niveau inférieur, l'idée d'une causalité descendante semble soit contradictoire, soit redondante. Elle contredit le reste de la science si elle fait vraiment une différence, en violant les micro-lois qui régissent le niveau bas. Et elle est redondante si elle consiste à seulement reformuler dans un langage différent, un langage d'une granularité plus élevée, ce qui pourrait, du moins en principe, être formulé dans le langage à granularité plus fine des micro-processus détaillés.

Regardons de manière un peu plus approfondie ces deux dernières propositions tranchées. La première proposition vise à écarter l'idée d'émergence forte, selon laquelle les processus de niveau haut sont dotés de pouvoirs causaux autonomes et avec la capacité de modifier les processus intervenants au niveau bas. Elle le fait en faisant l'hypothèse que pour que les processus de niveau haut puissent avoir un pouvoir causal, au sens plein, et pouvoir changer quoi que ce soit de significatif au niveau inférieur, ils doivent nécessairement induire une modification dans les *lois* des microprocessus. Mais si c'était le cas, deux présupposés courants de l'image scientifique du monde seraient contredits : a) la présupposition d'une clôture nomologique du niveau inférieur *microphysique* et b) l'hypothèse de *causalité fondationnaliste* selon laquelle « les puissances causales au niveau macroscopique surviennent¹⁹⁶ et sont déterminée par les puissances causales du niveau microscopique » (Bedeau 2002, 10). L'émergence forte semble alors dépendre d'une variété indéfendable de dualisme ontologique.

Que penser maintenant de la deuxième affirmation qui explore l'autre extrémité du spectre des prises de position au sujet de l'émergence ? Elle affirme que si le niveau haut ne fait aucune différence réelle, à savoir (dans ce cadre de pensée) si ce niveau haut n'impose aucune modification des lois au niveau microscopique, alors le concept même de niveau haut et de sa puissance causale n'a pas d'autre signification que purement *verbale*. Au lieu d'une émergence forte, nous avons à faire à une émergence *nominale* et au lieu du dualisme, nous avons à faire à la version la plus plate du monisme : le réductionnisme.

Les arguments avancés par Kim nous conduisent donc à une alternative inacceptable : soit un dualisme ontologique, soit un monisme ontologique avec un épiphénoménalisme¹⁹⁷.

Avant de m'attaquer à ces difficultés cruciales, je voudrais approfondir cette crise de la causalité descendante par quelques remarques supplémentaires :

- 1) Puisque la causalité *efficiente* semble être en jeu, cela nous amène à examiner les conséquences d'une des conceptions les plus populaires de la relation de cause-à-effet. Cette conception stipule qu'une relation causale ne peut apparaître que dans la mesure où il y a *transfert* d'une certaine quantité conservée (disons l'*énergie*) depuis la cause, jusqu'à son effet (Salmon 1984). Ici, le mot « transfert » doit être pris au sens littéral à savoir : (a) perte d'énergie d'un côté et, (b) gain d'énergie de l'autre côté. Mais cela nous apparaît immédiatement comme problématique lorsqu'il s'agit de causalité descendante et ascendante, si on les inscrit dans le cadre d'une physique élémentaire avec des présupposés substantialistes. En effet, si on maintient sans compromis ce cadre, on ne peut pas dire qu'un modèle organisationnel transporte de l'énergie *en tant que tel* mais seulement en tant qu'il est fait de constituants matériels en interaction.¹⁹⁸ Ceci étant acquis, l'énergie peut être transférée d'un objet à un autre (via des médiateurs), mais en aucun cas d'un ensemble de constituants matériels élémentaires vers leur propre organisation globale, en faisant abstraction de ce qu'elle organise.
- 2) Selon la même conception, les relations causales impliquent nécessairement une succession temporelle. On a démontré que les cas de causalités simultanée ne sont qu'*apparents*, puisqu'au vu

¹⁹⁶ **N.d.T.** : la traduction française du verbe 'to supervene' par 'survenir', traduit mal l'idée sous-jacente du concept de survenance (supervenience), c'est-à-dire l'idée selon laquelle toutes les caractéristiques et fonctionnalités du niveau supérieur peuvent être causalement rattachées à celles du niveau inférieur.

¹⁹⁷ **N.d.T.** : Dans ce contexte, l'épiphénoménalisme est la thèse selon laquelle les phénomènes observés au niveau supérieur n'ont aucun pouvoir causal et ne produisent donc aucun effet, que ce soit dans le niveau supérieur ou sur le niveau inférieur.

¹⁹⁸ **N.d.T.** : Le concept aristotélien de causalité efficiente n'a de sens que dans une perspective 'substantialiste' de la matière. Pour qu'un tel concept soit applicable au niveau supérieur, de type organisationnel, il faudrait que celui-ci soit lui-même constitué de matière, sans laquelle aucun transfert d'énergie ne serait possible.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

d'un postulat de base de la relativité restreinte, ils impliquent un transfert d'information et d'énergie rapide, mais pas instantané (Kistler 1999¹⁹⁹). Maintenant, il est assez clair qu'entre un niveau émergent d'organisation et sa base physique supposée, il n'y a pas de décalage temporel (sauf si on considère l'émergence progressive du niveau supérieur dans l'histoire ou bien la possibilité de le prévoir [Stephan 1998]). Affirmer qu'un ensemble de molécules en interaction est la cause, *dans un premier temps*, de l'apparition d'un organisme biologique (causalité ascendante), et que cet organisme biologique est *ensuite* cause de son propre modèle de réactions chimiques pour adopter telle ou telle configuration (causalité descendante), est un pur artifice de notre langage discursif et séquentiel. Il serait plus approprié de dire que les éléments de base *constituent* le niveau supérieur d'organisation *en même temps* que ce niveau supérieur *définit* les limites des interactions entre les éléments de base²⁰⁰ (Emmeche et al. 2000). Contrairement à ce qui se passe dans les relations causales, la « fabrication » et la « définition des limites » sont des événements simultanés.

- 3) L'idée standard de l'émergence est qu'il y a survenance d'une certaine *forme*, d'un certain *modèle*, d'une certaine « topologie » ou d'une certaine « configuration » (Deacon 2003), sur la base des propriétés intrinsèques des éléments. C'est un modèle emprunté à la physique classique. Par exemple en électrodynamique classique, l'interaction entre N particules (ainsi que la configuration qui en découle) est un effet de survenance dû à leurs propriétés de charge et de position. Une image dualiste des différents niveaux surgit automatiquement d'une telle interprétation organisationnelle. Le niveau inférieur étant constitué de substances et de propriétés, tandis que le niveau supérieur n'est constitué que de purs modèles. Une telle dualité génère une série de question quant à l'influence possible d'un niveau sur l'autre tout en empêchant toute réponse. En effet, ici, la causalité ascendante a uniquement le sens trivial d'un ensemble de propriétés définissant leurs réseaux d'interaction²⁰¹. En même temps, la causalité descendante est rendue tout à fait improbable de par la différence ontologique de chacun des deux niveaux. Essayer de comprendre comment une configuration organisationnelle peut interagir, *en tant que telle*, avec la couche des propriétés de base devient problématique. Il serait plus acceptable, dans l'esprit d'une interprétation substantialiste du niveau de base, de dire que les propriétés des constituants coopèrent pour circonscrire leur propre domaine de variations possibles plutôt que d'affirmer que c'est leur configuration globale qui est la *cause* de leur modification. Mais dans ce cas, il ne reste plus aucun motif de supposer une dualité de niveaux ; parler en termes de causalité mutuelle entre ces niveaux devient inutile.

À ce point de l'exposé, on s'aperçoit que parler de causalité ascendante et descendante, dans un cadre de pensée qui allie une conception substantialiste du niveau de base à une conception configurationnelle du niveau haut émergent, est à la fois *intenable* et se réduit au statut d'une *pure machinerie verbale*.

3. Des solutions partielles : l'héritage d'Aristote et de Kant

Plusieurs idées ont été proposées pour résoudre les difficultés liées (de manière implicite ou explicite) à la conception substantialiste du niveau bas. Mais, comme nous allons le voir, elles ne sont pas suffisantes pour rendre compte des différents types d'expériences et d'expérimentations qui soutiennent le concept de causalité descendante.

¹⁹⁹ N.d.T. : La vitesse de la lumière n'étant pas instantanée, il y a nécessairement un ordre séquentiel entre deux événements interdépendants. Sur la causalité en général, on peut lire l'article de Max Kistler dans - *Précis de philosophie des sciences*, sous la direction d'Anouk Barberousse, Denis Bonnay et Mikaël Cozic, Paris, Vuibert, 2011.

²⁰⁰ N.d.T. : Il s'agit de l'idée qu'en matière d'émergence, les éléments matériels du niveau bas constituent, en quelque sorte, les conditions initiales à l'émergence (notion de causalité faible), tandis que la structure organisationnelle du niveau haut limite le champ d'action de ces conditions initiales. On pourrait parler alors d'une dialectique permanente (et donc pas au sens hégélien, mais au sens bachelardien) entre les niveaux haut et bas.

²⁰¹ N.d.T. : Lorsque Michel Bitbol parle d'un 'ensemble de propriétés', il fait référence au niveau de base et aux particules élémentaires qui le composent. En effet, elles seules, dans ce contexte, ont cette caractéristique d'avoir des 'propriétés' intrinsèques.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Le point commun à toutes ces idées, consiste à utiliser un concept alternatif de causalité, emprunté à la célèbre tétrade d'Aristote²⁰². La motivation principale d'une telle tentative vient du fait que difficultés que nous avons rencontrées préalablement ont affaire avec certaines propriétés typiques de la causalité efficiente. Alors pourquoi ne pas utiliser les concepts de cause formelle, matérielle et même, finale ?

Il est bien naturel, dans le cadre de pensée standard, de considérer que les éléments du niveau bas sont les *causes matérielles* de l'émergence du niveau haut d'organisation, alors, qu'à l'inverse, ces niveaux hauts agissent comme les *causes formelles* qui délimitent le domaine de variations des constituants du niveau bas. La causalité ascendante devient alors l'instanciation de la *causalité matérielle* tandis que la causalité descendante devient celle de la *causalité formelle*. Les concepts de « constitution » et de « définition des limites » que nous avons vus précédemment sont alors inclus dans la classe plus large des connections causales (Varela 1976) en dépit du fait qu'ils restent étrangers à la causalité efficiente.

Le concept de causalité formelle peut-être développé en empruntant les concepts de la physique dynamique : le concept de *conditions aux limites* et le concept d'*attracteur*. Le niveau supérieur d'organisation d'un processus peut être décrit comme celui d'une *condition aux limites* auto-imposée. Parmi toutes les solutions possibles des équations différentielles décrivant le comportement dynamique des parties, une telle condition aux limites va permettre de sélectionner une gamme de solutions accessibles. Ceci corrobore l'idée que le niveau supérieur va *contraindre* l'évolution des éléments du niveau inférieur, tout en étant lui-même *constitué* par eux. Par ailleurs, le niveau supérieur d'organisation peut être caractérisé comme un *attracteur* global pour les trajectoires des éléments constitutifs dans l'espace des phases²⁰³. Cet attracteur *façonne* l'évolution des éléments tout en étant lui-même déterminé par leurs états et leurs interactions (Emmeche 2000).

Le quatrième et dernier type de causalité entre en compte à ce point de l'exposé. Un processus bidirectionnel de composition et de contrainte, à l'intérieur d'une unité intégrée appelée « organisme », va donner naissance à ce que Kant appelle une *apparence* de « fin naturelle » dans sa *Critique de la Faculté de Juger*²⁰⁴ (§64 à 66). Selon Kant, pour que quelque chose puisse être interprété comme une fin naturelle, une des conditions absolument nécessaires est que « les parties de cette chose se lient dans l'unité d'un tout, en étant réciproquement les unes par rapport aux autres cause et effet de leur forme.²⁰⁵ ». Un tel processus intégré peut en effet commodément être compris comme produit par une cause finale, dans le sens où tout ce qui se produit à l'intérieur de l'organisme arrive *comme si*²⁰⁶ le concept-même d'organisme comme un tout était la cause de la distribution de ses parties.

Dans un autre paragraphe, Kant caractérise la réciprocité d'action entre le tout et ses parties en utilisant un vocabulaire d'une proximité surprenante avec celui employé aujourd'hui, quoique cependant virtuellement inversé (Kant 1987, 251)²⁰⁷. Selon la terminologie de Kant, une « série descendante » est une chaîne de détermination des effets par des causes efficientes. Et une « série ascendante » traduit une influence qui va de la « finalité » de tout le processus (telle que la conçoit la *raison*), vers les « choses »

²⁰² N.d.T. : M. Bitbol fait ici référence aux quatre causes détaillées dans Physique d'Aristote : cause matérielle, cause formelle, cause efficiente et cause finale.

²⁰³ N.d.T. : l'attracteur global joue ainsi le rôle de cause formelle, tandis que les éléments constitutifs de niveau inférieur jouent le rôle de causes matérielles.

²⁰⁴ N.d.T. : Kant, dans *Critique de la Faculté de Juger*, §65, p295, fait la distinction entre cause efficiente et cause finale de la manière suivante : « On pourrait peut-être appeler plus justement la première liaison la liaison des *causes réelles* et la seconde la liaison des *causes idéales*, puisqu'en les appelant ainsi on fait en même temps comprendre qu'il ne peut pas y avoir d'autres formes de causalité que ces deux-là. »

²⁰⁵ N.d.T. : Kant – *Critique de la Faculté de Juger* – Trad. Philonenko, Ed. Vrin, pp 295-296

²⁰⁶ N.d.T. : M. Bitbol met en italique « comme si », en référence à la formule célèbre de Kant « als ob », pour signifier qu'il s'agit ici de « conditions de possibilité ».

²⁰⁷ N.d.T. : Kant – *Critique de la Faculté de Juger* – Trad. Philonenko, Ed. Vrin, § 65, p. 295 : « Toutefois on peut aussi concevoir une liaison causale d'après un concept rationnel (des fins) qui, considérée comme série, présenterait une relation de dépendance aussi bien en un sens descendant qu'ascendant ; et dans cette liaison la chose qui est désignée comme *effet* mérite cependant, en remontant, le nom de *cause* de la chose, dont elle est l'effet. ».

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

constituantes (telles que l'*entendement* les objective). L'illustration la plus immédiate de cette circulation bidirectionnelle des causes se trouve dans les actions humaines orientées vers un but déterminé. Un outil, par exemple, est une cause efficiente (série « descendante ») de transformation de notre environnement, tandis que notre représentation de la forme de l'effet désiré est la cause finale (série « ascendante ») qui a motivée la fabrication et de la réalisation de cet outil. Par un prolongement de la raison, un système naturel qui *ne* résulte *pas* de l'intention d'un agent concret peut néanmoins être pensé à travers l'idée de finalité. C'est particulièrement vrai des êtres vivants (ou être « organisés »), car « *l'être organisé possède en soi une force formatrice <bildende Kraft>, qu'il communique aux matériaux, qui ne la possèdent pas (il les organise)* » (Kant 1987²⁰⁸). Les êtres organisés peuvent être considérés comme conférant²⁰⁹ une influence « ascendante » (ou plutôt « descendante » en suivant le vocabulaire d'aujourd'hui) sur leurs constituants matériels. Leur organisation peut être vue comme imposant une boucle de rétroaction [*a feedback*] sur ce qui est organisé. Elle peut, par conséquent être interprétée *comme si* elle était une cause finale de l'ensemble du procès. A. Weber et F. Varela ont synthétisé cette leçon de Kant par le concept d'*autopoïèse* (concept qui implique un circuit complet de causalités réciproques allant des parties au tout et du tout à ses parties), un cas de « finalité incarnée » (Weber et Varela – 2002²¹⁰)

Ces conceptions qui combinent des causes matérielle, formelles et finales fournissent un schéma d'ordonnement élégant à notre conception du tout et des parties. Mais elles ne doivent pas être interprétées comme étant plus que cela : une satisfaction à notre désir profond d'une harmonie conceptuelle. Kant lui-même a pointé ce désir avec force : la cause finale, a-t-il écrit, ne fournit à notre puissance réflexive de jugement, qu'un *principe régulateur* (un puissant fil directeur). Par contraste, la causalité efficiente opère comme un *principe constitutif* (une condition de possibilité de la connaissance objective). Alors, contrairement à la catégorie de causalité efficiente, qui est imposée d'avance par notre *entendement* pour constituer une connaissance objective, les causes finales sont conçues par notre *raison* pour satisfaire notre besoin subjectif d'unité systématique de connaissance (de même qu'elles sont imposées à notre raison par le fait empirique de toute vie organique).

Mais les difficultés que nous avons énumérées dans la section deux ne sont en aucun cas résolues par une combinaison de causalité formelle, matérielle et finale. Il paraît encore douteux de savoir si le fait de statuer *séparément* sur des conditions aux limites auto-imposées et l'auto-imposition de leurs éléments, ou bien sur un attracteur global et l'auto organisation de ses constituants, n'est pas autre chose qu'un simple artifice verbal (ou heuristique). Et, de plus, nous devons toujours accorder l'importance qu'il mérite au fait que des changements à des niveaux supérieurs d'organisation puissent *déclencher* des changements à des niveaux inférieurs.

La persistance de cette liste de problèmes reste un défi que l'on peut difficilement résoudre si l'on n'accepte pas une conception déflationniste et minimaliste telle que celle de l'« émergence faible ». Rappelons-nous que défendre une conception de l'émergence faible c'est affirmer que « le comportement global du système ne découle que des opérations des processus au niveau microscopique, mais que les interactions du niveau microscopique sont imbriquées dans un réseau si complexe que le comportement global n'a pas une explication simple ». (Mark Bedau 2002, 10). À l'origine, la motivation en faveur d'une émergence faible, était de proposer une voie médiane entre une émergence forte, avec sa connotation dualiste, et une émergence purement nominale pour laquelle, le niveau haut n'est rien d'autre qu'un artifice de langage. Mais, au bout du compte et d'après ses meilleurs défenseurs, il semble bien que « l'émergence faible ne soit rien d'autre qu'un sous ensemble de l'émergence nominale » (Mark

²⁰⁸ N.d.T. : Kant – *Critique de la Faculté de Juger* – Trad. Philonenko, Ed. Vrin, p. 297 : « car la machine possède uniquement une force motrice ; mais l'être organisé possède en soi une **force formatrice** <bildende Kraft>, qu'il communique aux matériaux, qui ne la possèdent pas (il les organise) ». La référence de M. Bitbol pour cet extrait est à la page 253 de : Kant, I. *Critique of Judgment*, Indianapolis, Hackett Publishing Company, 1987: "For a machine has only motive force. But an organized being has within its formative force, and a formative force that this being imparts to the kinds of matter that lack it (thereby organizing them)"

²⁰⁹ N.d.T. : Nous avons choisi "conférant" plutôt qu'"exerçant" pour traduire 'imparting'. L'utilisation du verbe 'to impart' par M Bitbol, n'est pas neutre : elle fait référence à l'extrait de Kant cité plus haut : "a formative force that this being imparts to the kinds of matter"

²¹⁰ N.d.T. : Andreas Weber and Francisco Varela - [Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality](#) - 2002

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Bedau 2002, 11 ; voir Bedau 2008a pour une qualification). L'émergence faible est un sous-ensemble particulier de l'émergence nominale qui correspond au cas où l'extrême complexité empêche, en pratique, toute explication microscopique du comportement au niveau macroscopique²¹¹. Si l'on retient ce dernier critère, il apparaît que dans la plupart des cas, « une propriété d'émergence faible n'est qu'une *limitation de l'observateur* et non pas du système » (David Batten 2008). Par conséquent, continuer à faire la différence entre émergence faible et simple émergence nominale dépend de la façon de montrer comment cette limitation de l'observateur peut parfois être à ce point extrême, qu'elle se révèle être une limite infranchissable. Cela peut arriver chaque fois que la limitation pratique de notre aptitude à expliquer le niveau macroscopique est à ce point difficile qu'elle puisse acquérir un statut de « principe ». (Bedau 2008b). Cela peut aussi arriver lorsque la multitude de détails des micro-explications devient telle qu'elle n'est plus pertinente pour rendre compte du niveau macroscopique et si, en conséquence, une explication donnée du niveau macroscopique peut être soutenue par plusieurs explications différentes au niveau microscopique. (Bedau 2002).

Il n'y a pas de véritable causalité (ascendante ou descendante) et, d'un point de vue ontologique, rien d'autre qu'une émergence nominale. Tel est le résultat décevant de cette recherche développée à partir d'une interprétation substantialiste des éléments de base. Ne reste-t-il donc aucune alternative ? Je pense que oui, à condition d'abandonner le présupposé substantialiste à tous les niveaux de description.

Pour développer cette voie de sortie, je voudrais procéder avec prudence. Permettez-moi d'abord de faire un pas en arrière dans la section suivante, en laissant de côté les grandes questions métaphysiques sur la *causalité* au profit des aspects pratiques de ce qui compte véritablement comme *cause* dans un laboratoire et dans la vie de tous les jours. (Bitbol 2007a).

4. Une conception interventionniste de la cause descendante

Dans des circonstances ordinaires, nous sommes submergés par le nombre d'antécédents qui sont susceptibles d'avoir causé un certain événement. Parmi tous ces antécédents, celui que nous considérons d'habitude comme étant la cause de cet événement est soit celui qui paraît avoir *changé* récemment, soit, de manière plus convaincante, celui sur lequel nous pouvons exercer un certain *contrôle* (John Stuart Mill²¹² ; Howard Pattee 2000²¹³). Contrôle, intervention et action sont au cœur du problème quand il s'agit de cause. Ce critère élémentaire d'isolation des causes donne alors naissance à une conception généralisée de la causalité, appelée théorie « interventionniste »²¹⁴. D'après cette théorie (Von Wright 1974; Price 1992; Woodward 2003; Gillies 2005), une configuration A est appelée « cause » d'une configuration B si : i) chaque fois que A est activé par moyen quelconque, B apparaît (avec une probabilité p) ; ii) chaque fois que A a été désactivé, B n'a pas lieu (ou se produit avec une probabilité $p' < p$). D'une manière assez intéressante, c'est cette définition qui avait été choisie par le père fondateur

²¹¹ **N.d.T.** : La différence essentielle entre émergence nominale et émergence faible est que cette dernière reconnaît qu'il n'est pas possible de remonter causalement au niveau de base, mais uniquement dû au fait de la complexité des interactions au niveau microscopique. C'est la raison pour laquelle David Batten dit, qu'en fin de compte, dans la plupart des cas, cette émergence faible est en réalité due à une limitation de l'observateur et non pas du système. En dehors de cette différence, la conception d'émergence faible est tout aussi moniste et matérialiste que celle de l'émergence nominale.

²¹² **N.d.T.** : John Stuart Mill – A system of Logic – “The invariable antecedent is termed the cause ; the invariable consequent, the effect. And the universality of the law of causation consists in this, that every consequent is connected in this manner with some particular antecedent, or set of antecedents.” (p. 237) – « In such cases it is very common to single out one only of the antecedents under the denomination of Cause, calling the others merely Conditions. » (p. 237) En ce qui concerne Mill, le contrôle s'effectue au moyen de la loi qui régit l'effet et sa cause.

²¹³ **N.d.T.** : Howard Pattee - Causation, Control, and the Evolution of Complexity – 1997 - « I believe the common, everyday meaning of the concept of causation is entirely pragmatic. In other words, we use the word cause for events that might be controllable. In the philosophical literature controllable is the equivalent of the idea of power. Bishop Berkeley thought it obvious that cause cannot be thought of apart from the idea of power (e.g., Taylor, 1972). In other words, the value of the concept of causation lies in its identification of where our power and control can be effective. » Chez les penseurs anglo-saxons, très imprégnés d'empirisme humien, ce qui définit la cause, c'est la possibilité de répétition de l'événement qui semble lui être lié, au moyen de l'expérimentation

²¹⁴ **N.d.T.** : À propos de la théorie interventionniste de la cause, voir tout d'abord l'article de J. Woodward « [Mental Causation](#) », puis l'article d'Alexandre Marcellesi, publié dans la revue Esprit (Vol. 2, n° 1, p. 1-11) du 27 novembre 2016 « [L'interventionnisme permet-il la causalité descendante ?](#) ». Voir enfin la [lettre du Collège de France de juin 2014](#) : « Stephen Mumford (University of Nottingham) et Claudine Tiercelin défendaient deux conceptions d'une approche dispositionnaliste des causes, James Woodward (University of Pittsburgh), le fondateur de la théorie interventionniste de la causalité, »

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

de la physique moderne, Galileo Galilée (1612, 425) : « *la cause est ce qui, lorsqu'elle est appliquée, est suivie d'un effet et lorsqu'elle est enlevée, fait disparaître l'effet* ».

On peut alors parler de causalité descendante dans les circonstances suivantes : (i) chaque fois qu'un antécédent de niveau supérieur a été activement préparé au moyen d'un instrument à granularité élevée capable de modifier le niveau macroscopique, on observe certains phénomènes élémentaires au moyen de dispositifs expérimentaux adaptés à l'analyse microscopique ; (ii) chaque fois que cet antécédent du niveau supérieur a été éliminé au moyen d'un instrument à « granularité élevée », on n'observe plus ces phénomènes élémentaires. On pourrait, tout aussi bien définir la « causalité ascendante » en intervertissant simplement l'ordre des interventions et des observations décrites plus haut.

Cette théorie de la causalité permet de résoudre formellement plusieurs difficultés liées aux concepts de causalité descendante et montante.

Une de ces solutions concerne le statut non-causal (ou en tout cas, au sens d'une causalité non *efficiente*) de la fixation des conditions aux limites [*boundary conditions*]. Même si un système de contrainte mutuelle ou de fixation de conditions aux limites [*boundary conditions*] ne peut pas être assimilé à un système de causes en tant que telles, l'*altération* des contraintes sur un des niveaux, peut amener à déclencher des événements dans l'autre niveau. On ne peut pas, par exemple, considérer que le changement d'état mental d'un individu soit la *cause* d'événements neurologiques ou moléculaires dans le corps de cet individu. Il est plus raisonnable, dans la perspective d'une conception dynamique, de considérer ces deux événements comme coextensifs. Mais, le fait de *déclencher activement* le changement d'un état mental d'un individu par des moyens psychologiques peut altérer son équilibre sympathique-parasympathique, conduisant ainsi à des changements du métabolisme cellulaire, à une susceptibilité élevée de mutations génétiques ou encore, à une activation de la coagulation sanguine (Geiser et Halbrecht 2008). Si l'on accepte qu'*être la cause*, signifie « *altérer* une certaine configuration » plutôt qu'*être* la configuration elle-même, on peut alors comprendre facilement un tel phénomène psychosomatique.

Cela continue à être vrai dans le cas où les niveaux concernés sont à ce point intriqués, qu'il devient tout à fait artificiel de se les représenter d'une manière dualiste. En effet, chaque *type d'intervention* peut être préparé de telle sorte qu'il (i) concerne spécifiquement et (ii) contribue à *définir* un niveau d'organisation, en étant d'une granularité plus ou moins élevée et en étant plus ou moins adapté à certaines configurations. On peut alors instituer une dualité de cible d'action, en dépit du fait qu'il n'existe aucune raison d'assumer une dualité ontologique des niveaux eux-mêmes, et même aucune raison de penser qu'il y aurait un sens à croire que ces niveaux existent « en soi », indépendamment de toute méthode d'investigation. On résout ainsi la difficulté liée à la tension qui surgit entre une conception moniste des processus naturels et le vocabulaire dualiste ou pluraliste associé aux niveaux.

La conception interventionniste de la causalité permet aussi de résoudre une autre difficulté : celle de la succession temporelle des causes et des effets. Même si le changement d'organisation du niveau haut peut être considéré comme étant simultané avec celui des processus du niveau bas, l'*intervention* elle-même est antérieure à toute modification de la structure du niveau haut visé. Certes, une intervention au niveau macroscopique n'altère pas, *retroactivement*, les conditions microscopiques dont on considérerait qu'elles étaient les conditions d'émergence (ce qui aurait prêté flanc à la critique de circularité vicieuse telle que l'a exprimé Kim) ; mais cette intervention peut altérer les micro-conditions qui conditionnent l'évolution *future* du niveau macroscopique. Avec ce raisonnement on fait disparaître la difficulté de l'apparente simultanéité des causes descendantes et de leurs effets. On peut noter que cette solution au problème du décalage temporel ressemble beaucoup à une thèse relevant du paradigme de l'émergence faible. « ... une causalité faible au niveau macroscopique ne peut pas altérer les *conditions* à partir desquelles elle émerge. Tout au plus, peut-elle modifier les *conditions* de sa survie future ... » (Bedau 2002, 22). Cependant, il existe une différence majeure. Selon la conception interventionniste de la causalité, le verbe « altérer » réfère concrètement à une perturbation introduite de l'extérieur, une perturbation qui contribue à définir sa propre cible à travers l'échelle et la granularité de l'instrument qui est utilisé pour la déclencher. Alors que, selon la conception de l'émergence faible, le verbe « altérer » n'est utilisé que pour connecter verbalement deux niveaux contingents d'analyse conceptuelle ou computationnelle de ce qui, autrement, n'est qu'un processus dynamique unique

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

d'interactions d'éléments de base. Aucune influence *réelle* n'est supposée intervenir entre les niveaux de l'analyse conceptuelle ou computationnelle. On peut *dire* d'un embouteillage en cours qu'il modifie les conditions futures de circulation des automobiles qui le provoquent. Mais il est généralement admis, dans le cas d'émergence faible, qu'il ne s'agit que d'une façon de parler afin masquer le manque de compréhension détaillée, mais incapable de masquer le fait que, *par hypothèse, tout ce qui existe* n'est qu'un ensemble de voitures qui bougent à chaque instant en fonction de la distance avec sa voisine immédiate.

5. Interprétation interventionniste de la causalité descendante : premières objections et réponses.

Cependant, tant que l'on s'en tient à une interprétation substantialiste des éléments de base, la tentative de solution développée au paragraphe précédent apparaîtra anthropocentrique ou prêchant pour sa propre paroisse. En effet, selon ce modèle de pensée, l'action, l'intervention, aussi bien que l'organisation des niveaux supérieurs, sont toutes supposées seconde par rapport aux constituants de base. C'est pourquoi la théorie de la causalité de von Wright est généralement considérée comme seulement épistémologique et non pas ontologique ; elle est supposée clarifier la façon dont nous *avons connaissances* des causes et non pas ce que les causes elles-mêmes *sont*.

Quant à l'idée qu'une intervention à un niveau haut d'organisation peut être la cause véritable de changements à un niveau inférieur, elle amène au moins deux objections. Premièrement, on pourrait rétorquer que dire qu'on a imposé des altérations à un niveau supérieur donné n'est qu'une manière d'exprimer son ignorance des changements microscopiques fins qui se sont opérés *en réalité*. Deuxièmement, on pourrait objecter que la soi-disant cause de niveau haut d'un changement ultérieur au niveau inférieur est tout au plus une cause *libératoire* de cette modification, mais non pas sa cause physique *intégrale*, qui implique très probablement tout un réseau d'interactions entre les constituants de base.

On rencontre ce même type d'objections avec dans un autre cadre de pensée que je voudrais caractériser comme *conceptuellement symétrique*.

La conception standard de l'émergence est caractérisée par une double asymétrie :

- (i) L'image courante d'émergence est asymétrique parce qu'elle suppose que le niveau bas est constitué d'entités individuelles, tandis que le niveau haut est constitué de structures ou de modèles.
- (ii) Mais l'image courante d'émergence est aussi asymétrique parce qu'elle suppose que les déterminations du niveau de base seraient des « propriétés », au le sens de « propres aux », ou « inhérentes aux » éléments de base, tandis que les déterminations du niveau haut seraient *relatives à certaines limitation* (contingentes ou nécessaires) des instruments de connaissance qui sont utilisés pour en rendre compte.

Mais aux vues des développements récents de la physique moderne, ces deux asymétries ne semblent plus, en principe, justifiées.

D'un côté, en physique quantique, on peut difficilement faire l'hypothèse de l'existence d'un niveau bas ultime qui serait constitué de petites choses capables d'interagir entre elles (Bitbol 1996, 2007b). Mis à part toute astuce conceptuelle telle que les variables cachées²¹⁵, les particules dites élémentaires doivent être considérées comme des entités individuelles, comme de simples unités d'un certain ensemble de « type », et donc comme des entités formelles plutôt que substantielles²¹⁶. Cela devient encore plus clair dans la théorie des champs quantiques, où les cardinaux des sous-ensembles de

²¹⁵ **N.d.T.** : Michel Bitbol fait référence au concept de « variables cachées » utilisé par Einstein, Podolsky et Rosen dans le célèbre article de 1935 (le paradoxe EPR) essentiellement pour réfuter l'intrication quantique. Aujourd'hui, on admet que le paradoxe EPR a été testé par l'expérience d'Alain Aspect (1980-82), qui a montré que les inégalités de Bell étaient violées en physique quantique et qu'il n'y a donc pas de variables cachées locales : l'espace quantique est non-local.

²¹⁶ **N.d.T.** : Ce qu'on appelle particule, par exemple un électron, un quark ou un boson, n'a rien à voir avec des particules de matières. La meilleure caractérisation que l'on puisse en donner est celle d'entité mathématique, de 'densité de probabilité de présence', de champ vectoriel ou scalaire. C'est pourquoi Michel Bitbol parle d'« entités formelles plutôt que substantielles »

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

particules sont en correspondance biunivoque avec les quanta des modes d'excitation des champs (Teller 1995). Dans ce cas, les particules sont *de facto* traitées comme des structures ou des configurations, plutôt que comme des entités substantielles (Bickhard and Campbell 2000). L'analyse d'un niveau d'organisation, en termes de structures, modèles et configurations topologiques s'impose d'elle-même à tous les niveaux, *y compris au niveau le plus bas accessible* (Campbell and Bickhard 2009). Ainsi disparaît la première symétrie évoquée.

D'un autre côté, en physique quantique, on ne peut plus ignorer le fait que les déterminations sont exclusivement relationnelles et contextuelles. Ici, la relation cognitive ne peut plus être prise dans le sens d'une révélation, mais d'une *constitution*. Cette considération conduit à situer ladite « base » d'émergence, à un niveau étonnamment proche de ceux des niveaux supérieurs d'organisation. Les déterminations des entités du niveau inférieur sont tout autant *relatives* à certaines *limitations* des instruments de connaissances appropriés que celles des entités des niveaux supérieurs. La seule différence est qu'il n'est pas possible de dépasser les limitations des instruments de mesure au niveau microscopique alors qu'en principe, on peut le faire (sans tenir compte de la complexité) à des niveaux supérieurs d'organisation. Cette dernière différence explique peut-être pourquoi il est tentant de privilégier la microphysique, mais cela ne justifie aucunement d'oublier l'universalité du mode de définition des attributs relatifs à un mode d'accès expérimental. Une fois cette universalité reconnue, disparaît alors la seconde asymétrie.

Sans aucune asymétrie ontologique, sans une interprétation substantialiste obstinée dudit niveau de base, la dignité de la conception interventionniste de la causalité s'en trouve considérablement accrue. Avec notre interprétation, la distinction entre conception épistémologique et ontologique²¹⁷ de causalité devient sans objet, puisque personne ne peut plus pointer nulle part vers quelque chose qui ressemblerait à une propriété inhérente ultime qui établirait la norme d'ontologie. Les relations de connaissance et les interventions expérimentales sont constitutives, à tous les niveaux, à la fois de leur objet (de connaissance) et de leur cible (d'expérience). Par conséquent, il est incorrect de prétendre que ce qui est décrit comme une intervention au niveau supérieur d'organisation est en *réalité* une intervention sur ses parties élémentaires. Car ces supposés éléments n'ont pas plus de réalité intrinsèque que les formes d'organisation du niveau haut. Au mieux, on pourrait déclarer qu'intervenir à un niveau haut d'organisation signifie agir sur un domaine de connaissance qui *pourrait* être analysé en ses différentes parties si on avait utilisé, au contraire, un mode d'intervention microscopique. Mais une telle déclaration contrefactuelle²¹⁸ ne doit pas être confondue avec une déclaration ontologique portant sur des parties élémentaires. Car l'activité analytique par rapport à laquelle les parties sont définies a toutes les chances d'être *exclusive* d'une autre activité ayant lieu au niveau de l'organisme ou au niveau global (voir la section suivante pour un exemple d'exclusion mutuelle).

Il devient, pareillement, sans intérêt de faire la distinction entre la cause libératoire d'une certaine altération et la cause « physique ». Car avec notre conception symétrique de pensée, la cause libératoire n'est plus simplement déclenchée, mais elle est aussi *constitutive* d'une intervention appropriée. Et la cause physique (microscopique) n'est plus évoquée que par une référence contrefactuelle à un réseau de facteurs qui *auraient pu* être constitués par un autre type d'intervention (potentiellement incompatible).

6. Un modèle quantique de causalité descendante

Nous allons maintenant donner une illustration de cette conception symétrique et interventionniste de causalité descendante, en examinant un modèle de mécanique quantique familier. La raison pour examiner ce type de modèle est qu'en mécanique quantique standard, les idées que les observables soient définies opérationnellement et que les interventions expérimentales soient *co-constitutive*, plutôt qu'elles ne révèlent les propriétés, sont incluses dans la théorie.

²¹⁷ N.d.T. : par *conception épistémologique des causes*, il faut entendre une conception à travers laquelle on ne s'intéresse plus à la nature de la cause, mais à la façon dont on en a connaissance ; tandis que la conception ontologique s'intéresse, elle, à la nature de la cause.

²¹⁸ N.d.T. : Une 'déclaration contrafactuelle' est un discours sur une réalité potentielle non réalisée (contra-factuelle), c'est-à-dire qui aurait pu se produire si certaines conditions avaient été présentes : « tu aurais pu avoir un accident s'il ne t'avait pas retenu ». En physique quantique, la contrafactualité fait référence aux probabilités conditionnelles d'obtenir un événement parmi plusieurs superposés.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Concentrons-nous le vecteur d'état d'un système à deux particules, dans lequel chaque particule (chaque sous-système) peut être soumise à une expérience élémentaire à deux valeurs (telle que la mesure des composante S_z de spin $\frac{1}{2}$). Les résultats possibles de la mesure sont étiquetés + et -, et les états-propres correspondants à l'observable S_z sont notés $|+\rangle$ et $|-\rangle$.

Le vecteur d'état générique d'un système à deux particules prend alors la forme d'une superposition linéaire des produits tensoriels des états-propres :

$$|\Psi_T\rangle = \sum_{ij} c_{ij} |ij\rangle = c_{++} |++\rangle + c_{+-} |+-\rangle + c_{-+} |-+\rangle + c_{--} |--\rangle$$

Le vecteur d'état $|\Psi_T\rangle$ n'est généralement pas factorisable. On ne peut pas mettre la contribution des deux sous-systèmes de manière séparée : ils sont dits « intriqués ». D'après Schrödinger, qui a formulé le premier ce concept d'intrication, cela signifie que « La meilleure connaissance possible d'un ensemble n'inclut pas nécessairement la meilleure connaissance possible de chacune de ses parties [...] Le tout est dans un état défini tandis que les parties prises séparément ne le sont pas ».

Un moyen précis, en mécanique quantique, de montrer ce type de relation entre les parties et les tous consiste à comparer les différents états d'un système à deux particules, considéré comme un tout, et de démontrer que ces différences n'ont aucune contrepartie d'aucune sorte dans les états individuels des sous-systèmes.

Pour montrer cela, regardons d'abord quatre états mutuellement orthogonaux (intriqués) :

$$\begin{aligned} |\Psi^+\rangle &= 2^{-1/2} (|+-\rangle + |-+\rangle) \\ |\Psi^-\rangle &= 2^{-1/2} (|+-\rangle - |-+\rangle) \\ |\Phi^+\rangle &= 2^{-1/2} (|++\rangle + |--\rangle) \\ |\Phi^-\rangle &= 2^{-1/2} (|++\rangle - |--\rangle) \end{aligned} \tag{1}$$

Ce sont les états globaux d'un système à deux particules. Mais qu'en est-il des états individuels des sous-systèmes ? Ces états individuels ne peuvent pas être décrits par un vecteur d'état. Tout au plus, peut-on associer à chaque sous-système un *opérateur densité* ρ obtenu en prenant la *trace partielle* de la matrice représentant l'opérateur densité d'un système à deux particules. Le problème c'est que ces opérateurs de densité individuels sont *exactement identiques* l'un à l'autre, indépendamment du fait que le système global soit dans l'un des quatre états précédents. Il s'écrira *toujours* :

$$\rho = \frac{1}{2} (|+\rangle\langle+| + |-\rangle\langle-|) \tag{2}$$

Par conséquent, il n'existe aucune différence dans les états des parties que l'on pourrait rattacher à une différence du tout (Maudlin, 1998). *Les différences dans l'état du tout ne superviennent pas des différences correspondantes des parties*. C'est l'une des caractéristiques holistiques les plus remarquables de la mécanique quantique parmi celles utilisées par P. Humphreys (1997) pour développer sa conception d'émergence forte basée sur ce qu'il a appelé « fusion » des micropropriétés (Seevinck 2003).

Une autre conséquence, moins documentée, de l'intrication est que toute tentative de *séparer complètement* les états des parties de l'état du tout, est vouée à l'échec. Cela peut paraître étrange puisque nous avons accepté (au moins provisoirement) que l'état de chaque particule (ou sous-système), composant d'un système à deux particules, peut être décrit séparément par un opérateur densité. Mais cet opérateur densité est assez particulier : en utilisant la terminologie de B. d'Espagnat (1989), il correspond à un mélange *impropre*, et non pas *propre*. Toutes les informations pertinentes sur le sous-système ne sont pas contenues dans son opérateur densité (obtenu à partir de la trace partielle). Une partie de l'information est manquante et elle est contenue seulement dans le vecteur d'état du système global. Toute description séparée des parties, et par la suite toute description duelle des parties et de tout, semble alors artificielle.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

La conséquence, c'est que le concept de causalité inter-niveau apparaît dépourvu de sens dans le domaine extrêmement holistique de la mécanique quantique. Comme il n'y a aucun moyen de séparer les états des parties de l'état du tout, cela semble absurde d'appeler l'un la cause et l'autre l'effet, comme s'ils étaient deux choses différentes.

Maintenant, même si on ne peut pas séparer la contribution des parties de celle du tout dans un état intriqué, il y a un sens dans lequel on peut *intervenir* sélectivement, soit sur les parties, soit sur le tout. Car on peut *intervenir* soit analytiquement, soit globalement. Mesurer des observables individuelles (ou préparer les sous-systèmes dans les états propres de ces observables), revient à intervenir sur les parties ; tandis que mesurer des observables globales (ou préparer le système dans un état propre de cette observable), revient à intervenir sur le tout. Ainsi en mesurant la composante s_z du spin de chaque particule d'un système à deux particules, cela revient à intervenir sur ses parties. Mais si l'on prépare un système à deux particules dans l'un des états propres d'une observable globale (dans un espace de Hilbert à quatre dimensions) cela revient à intervenir sur le tout. De façon à montrer les conséquences d'une telle distinction, laissez-moi vous montrer une liste d'états propres correspondant à une observable globale intéressante. C'est une liste faite à partir des états d'un singulet et de trois états d'un triplet (Cohen-Tannoudji et al. 2006) :

$$\begin{array}{ll}
 \text{(Singulet)} & \left| \Psi^- \right\rangle = 2^{-1/2} (|+ - \rangle - |- + \rangle) \\
 \\
 \text{(Triplet)} & \left\{ \begin{array}{l} \left| \Phi^0 \right\rangle = |+ + \rangle \\ \left| \Psi^+ \right\rangle = 2^{-1/2} (|+ - \rangle + |- + \rangle) \\ \left| \Phi^1 \right\rangle = |- - \rangle \end{array} \right. \quad (3)
 \end{array}$$

Si on prépare un système à deux particules, qui était initialement dans un état $|\Psi^T\rangle$, dans un état $|\Psi^-\rangle$ ou $|\Psi^+\rangle$, nous pouvons être sûrs que les mesures locales de l'observable individuelle s_z effectuées sur les deux sous-systèmes, donneront un + et un -. Et si un système à deux particules, initialement dans un état $|\Psi^T\rangle$ est préparé dans l'état $|\Phi^0\rangle$ (respectivement, $|\Phi^1\rangle$), nous pouvons être sûrs que les mesures locales de l'observable individuelle s_z effectuées sur les deux sous-systèmes, donneront deux + (respectivement deux -).

Cela signifie qu'*intervenir sur le tout a des effets sur les valeurs des observables qui portent sur les parties*.

En d'autres termes, préparer un système à deux particules dans un certain état d'une observable globale, équivaut à une variété de *causalité descendante*, car cela détermine la distribution des valeurs que l'on aurait pu obtenir ultérieurement si les observables locales (telle que s_z) avaient été mesurées séparément sur les sous-systèmes. Une préparation au niveau global *cause, de manière descendante*, une distribution des valeurs des observables locales. L'inverse est vrai aussi, bien entendu. Si nous mesurons d'abord les valeurs des observables locales s_z des sous-systèmes, et obtenons les valeurs i et j , alors en mesurant l'observable globale « spin total », on ne peut trouver le système que dans l'état factorisable $|ij\rangle$. Ici, les mesures à l'échelle locale *causent, de manière ascendante*, un état global. En effet :

- (i) En mécanique quantique standard, les relations avec les dispositifs expérimentaux sont *constitutives* au sens le plus fort : elles déterminent génériquement quelle observable (globale ou locale) est concernée et, de manière individuelle, quelle valeur de cette observable va être réalisée.
- (ii) Généralement, les observables globales et locales *ne permutent pas* entre elles. L'observable globale associée à la liste des états propres (3) ne commute donc pas avec les observables locales s_z . Par conséquent, l'acte constitutif correspondant à la mesure d'une observable globale est en général *incompatible* avec l'(les)acte(s) constitutif(s) correspondant(s) à(aux) la(les) mesure(s) d'observables locales.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

- (iii) En conséquence des points (i) et (ii), on ne peut généralement même pas être attribuer une *définition contrefactuelle* aux valeurs des observables locales, lorsque la valeur d'une certaine observable globale est définie et obtenue par des mesures appropriées.

D'après le point (iii), les conditions qui permettent l'attribution d'une propriété globale à un système quantique *excluent* généralement les conditions permettant l'attribution de propriétés locales. Si une propriété globale est définie et attribuée, *il est alors faux de dire qu'il existe des propriétés locales sous-jacentes sur lesquelles on agit « en réalité »*.

Les caractéristiques non-dualistes et anti-fondationalistes de ce modèle quantique sont évidentes à ce stade. Récapitulons-les :

- (b) Le caractère holistique de la représentation d'état des systèmes quantiques rend artificielle toute description à deux niveaux de ces systèmes.
- (c) Dans cette représentation, on ne peut même pas utiliser le concept habituel de survenance pour réconcilier les idées de dépendance (du niveau global sur le niveau local) et d'autonomie (du niveau global par rapport au niveau local). En effet, il peut exister des différences entre les états globaux sans qu'il n'y ait aucune différence correspondante entre les états locaux desquels ils sont supposés émerger.
- (d) Les propriétés et les états ne peuvent pas être traités comme des caractéristiques intrinsèques préexistantes. Ils doivent être interprétés comme relationnels. Les propriétés sont ainsi remplacées par des « valeurs d'observables », dans le sens où elles sont relatives à des instanciations particulières d'actes de mesure.
- (e) Les interventions expérimentales isolent et *définissent* simultanément un type de propriété : les propriétés globales sont définies par rapport à la mesure des observables à grande échelle, et les propriétés locales sont définies par rapport à la mesure des observables à petite échelle. Les conditions relatives à la définition des observables globales généralement *excluent* les conditions relatives à la définition des observables locales.
- (f) Les causalités ascendante et descendante prennent tout leur sens dès lors que l'on ne prête pas trop d'attention aux représentations d'état et que l'on se concentre sur l'effet des *interventions* expérimentales (locales ou globales). La mesure ou la préparation d'observables globales peut influencer les résultats des mesures ultérieures d'observables locales, et inversement mesurer ou préparer des observables locales peut influencer les résultats de mesures ultérieures d'observables globales.

Les points (a) et (b) permettent de dissiper le dualisme de niveaux, et les points (c) et (d) présentent une alternative au fondationnalisme. Quant au point (e), il développe le statut de causalité descendante et ascendante dans un cadre non dualiste et anti-fondationaliste.

7. À propos de quelques malentendus possibles

La conception de la causalité descendante développée dans les sections précédentes, que nous pouvons maintenant appeler la « vision constitutive-interventionniste », est suffisamment peu familière pour entraîner des malentendus. Le but de cette section est de dissiper certains d'entre eux.

La première interprétation erronée concerne le rôle des concepts de la mécanique quantique dans ma défense de la vision constitutive-interventionniste de la causalité descendante. L'argument central avancé pour défendre la théorie interventionniste de la causalité contre l'accusation d'anthropocentrisme dans la section 5 a été emprunté à la philosophie de la mécanique quantique, et même à la théorie des champs quantiques ; mais est-il vraiment indispensable de s'appuyer sur des domaines de physique aussi spécifiques et prétendument exotiques ? Le modèle quantique présenté à la section 6 comporte des caractéristiques qui rendent plausible la causalité entre niveaux ; mais est-il représentatif de cas plus classiques de causalité descendante et ascendante ? Voici quelques réponses provisoires.

Dans l'argumentation de la section 5, s'appuyer sur la philosophie de la mécanique quantique semble être une stratégie artificielle uniquement parce qu'on oublie qu'on a affaire à des questions de *principe*. La question ici est de savoir s'il existe *par principe* une différence entre les causes « ontologiques » et une définition « purement épistémologique ou anthropologique » de la causalité. Affirmer qu'il existe effectivement une telle différence présuppose une distinction entre : (i) des niveaux inférieurs de

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

constituants individuels de base où la procédure d'intervention expérimentale nous aide à révéler les véritables causes identifiées avec des micro-propriétés des constituants individuels, et (ii) des niveaux supérieurs d'*organisation* où l'intervention expérimentale ne peut déclencher une réaction en chaîne de micro-causes réelles que par une altération macroscopique de leur structure organisationnelle²¹⁹. Alors, qu'en est-il de la validité de cette distinction postulée par cette vision que je critique ?

La prise en compte des niveaux intermédiaires est de peu d'utilité pour aborder une telle question. En effet, toute entité intermédiaire (telle qu'une molécule, une cellule, un organisme, etc.) peut être considérée indifféremment, soit comme un constituant individuel élémentaire du niveau supérieur d'organisation, soit comme une structure émergente du niveau inférieur d'organisation. En conséquence, une entité intermédiaire peut être interprétée soit comme un élément constitutif élémentaire incontesté (et donc *de facto* absolu) pour les niveaux supérieurs d'organisation, soit comme un élément relatif au mode d'accès macroscopique²²⁰ qui révèle son propre niveau d'organisation. Une entité intermédiaire peut également être considérée soit comme la cause élémentaire réelle d'un certain processus se déroulant à un niveau supérieur de l'organisation, soit comme la cible macroscopique²²¹ d'interventions destinées à déclencher des événements sur son propre niveau d'organisation (ou à des niveaux inférieurs). En d'autres termes, la prise en compte des niveaux intermédiaires ne peut présenter qu'une asymétrie *fonctionnelle* ou *instrumentale* entre les éléments de base et les structures émergentes. Les niveaux intermédiaires ne nous donnent aucune raison pour déclarer qu'il existe une différence *fondamentale* et *irréductible* entre : (i) des causes absolues, ontologiques, efficientes, et (ii) des causes relatives, épistémologiques, libératoires à des niveaux supérieurs définis (et non pas *constitués*) par une échelle d'intervention expérimentale. En réalité, chaque niveau intermédiaire relève de la deuxième catégorie (relative, épistémologique, libératoire) des causes, et c'est seulement par référence aux niveaux supérieurs que l'on peut classiquement (et provisoirement) lui attribuer le rôle de référentiel d'entités de base et de causes réelles.

La seule raison inébranlable de prendre au sérieux la distinction entre les deux types de causes, et d'admettre qu'il y a une différence de *principe* entre une conception ontologique et une conception purement épistémologique-anthropologique des causes, serait alors d'avoir l'assurance qu'il existe un niveau de base *ultime* des entités individuelles dotées de propriétés intrinsèques. Car, alors, ces micro-propriétés seraient intrinsèquement considérées comme des causes réelles, et tout autre processus de niveau supérieur circonscrit comme cible d'une action macroscopique ne pourrait donner *seulement* lieu qu'à des causes « épistémologiques » ou « relatives ». Malheureusement (pour cette façon de penser) la microphysique a d'autres arguments forts en réserve contre un tel concept de niveau de base ultime, parce que (a) comme je l'ai mentionné dans la section 5, les particules dites « élémentaires » sont remplacées par des structures de champs quantiques mais aussi parce que (b) *même* les champs quantiques *ne peuvent pas* être considérés comme des entités de base, puisqu'ils apparaissent tous (en vue d'une *renormalisation*) comme n'étant rien de plus que des « champs effectifs » pour des niveaux de plus en plus profonds d'entités de la théorie des champs (Hartmann 2001, Castellani 2002). Par conséquent, à *aucun* niveau, même le niveau plus profond et (vraisemblablement) le plus élémentaire de la microphysique, y a-t-il quelque chose comme des propriétés absolues et des causes absolues à opposer à des causes (dites) anthropologiques, épistémologiques, ou relatives qui peuvent être définies en faisant varier l'échelle d'intervention sur les antécédents putatifs. Il *n'y a pas* de cause qu'on puisse considérer comme une « qualité première » de la matière ; toute cause se présente comme une « qualité seconde » dans la mesure où elle est relative à une certaine procédure d'intervention (Menzies et Price, 1993). En l'absence de tout contraste de ce genre, *même dans le domaine supposé ultime de la micro-physique*, la définition interventionniste de causes ne manquera pas de devenir paradigmatique *par principe*, pas seulement *en pratique*.

²¹⁹ N.d.T. : Difficile de traduire « global pattern » par « schéma global » qui rendrait la compréhension de la phrase confuse. Dans le contexte de cette phrase, nous proposons de la traduire par « structure organisationnelle »

²²⁰ N.d.T. : même problème de traduction pour « coarse mode of access » par « mode d'accès grossier » ne serait pas compréhensible en français. Dans ce contexte « coarse » est le pendant de « fine » et cela fait référence à une qualité de mesure, souvent définie par sa « granularité fine ou grossière ». Nous avons préféré prendre ici le terme de « mode d'accès macroscopique »

²²¹ N.d.T. : même choix de traduction de « coarse » par « macroscopique »

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Un deuxième malentendu possible est de penser que l'exemple développé dans la section 6 est un cas exceptionnel de causalité descendante, qui ne fonctionne que dans la configuration épistémologique unique de la mécanique quantique. Cet exemple est en fait moins isolé et moins exceptionnel qu'il n'y paraît. En effet : (i) les caractéristiques épistémologiques de la mécanique quantique ne représentent qu'une version renforcée d'une situation universelle, et (ii) il y a certains cas non quantiques qui mettent pleinement en œuvre ces caractéristiques épistémologiques dans leur version renforcée.

En ce qui concerne le point (i), même la physique classique peut être considérée comme l'instanciation d'un type de science qui ne traite qu'avec des sortes de « qualités secondes » et *jamais* de « qualités premières ». C'était l'interprétation de Kant. Dans ses *Prolégomènes*, il a insisté sur le fait que même les prédicats spatiaux et cinématiques peuvent (et devraient) être considérés comme « seconds » au sens de Locke (Kant 1955, §13²²²). Ils devraient être considérés comme seconds parce qu'ils sont relatifs à la forme pure de notre *sensibilité*. Par extension, Kant aurait pu dire qu'attribuer à quelque chose un statut de « substance » ou un statut de « cause » doit aussi être considéré comme « second », parce que les deux attributions sont relatives à la forme pure de notre *entendement*. La stratégie d'universalisation des prédicats relationnels/contextuels dans tous les domaines et à tous les niveaux peut donc déjà être défendue dans la science classique, contre les conceptions substantialistes et fondamentalistes qui sous-tendent les approches réductionnistes des relations inter-niveaux. Cette stratégie est encore utilisée de nos jours, dans le cadre des théories de la cognition autopoïétique (Maturana et Varela 1980) et « écologique » (Gibson 1979), en biosémiotique inspirée de la théorie d'Umwelt de Von Uexküll (Hoffmeyer 1997), etc.

Concernant le point (ii), il est de plus en plus reconnu (Lambert et al 2006, La Mura 2005, Atmanspacher et al 2004) que certains domaines des sciences humaines (économie, psychologie de la perception, théorie du choix rationnel, etc.) partagent *exactement les mêmes* (et pas seulement de manière analogue) caractéristiques et structure de base que la mécanique quantique. La raison de cette forte similitude est simple à comprendre : dans tous ces cas, comme en microphysique et contrairement à la macrophysique, on ne peut pas désenchevêtrer les prédicats des méthodes d'accès ou des agents (Bitbol 2009b). Les structures mathématiques les plus fondamentales de la théorie quantique peuvent ensuite être transposées à ces domaines, y compris ceux impliqués dans la non-factorisabilité des vecteurs d'état²²³. Des formalismes quantiques généralisés pouvant s'appliquer au-delà du domaine de la physique ont été formulés et appliqués avec succès à plusieurs situations dans les sciences humaines (Atmanspacher et al., 2002).

Pour toutes ces raisons, le cas quantique de la conception constitutive-interventionniste de la causalité descendante, discuté à la section 6, est susceptible d'avoir un degré de généralité et de pertinence beaucoup plus élevé que prévu.

Un troisième malentendu peut survenir au sujet des pouvoirs causaux *intra-niveau*. On les a ignorés dans cet article jusqu'à présent, en faveur d'une étude systématique de la causalité inter-niveaux. La conception constitutive-interventionniste de la causalité a-t-elle quelque chose à dire sur les influences intra-niveau ? En outre, si (comme la conception constitutive-interventionniste l'exige) on accorde un statut égal aux causes *intra-niveau* de niveau haut et aux causes *intra-niveau* de niveau bas, n'y a-t-il pas redondance des causes ? Comment concilier cette égalité de statut entre causes de haut niveau et de bas niveau avec l'idée d'une *clôture causale* du domaine de la physique ?

On peut répondre par l'affirmative à la première question sans ambiguïté. La conception constitutive-interventionniste de la causalité est en effet applicable au cas de la causalité intra-niveau.

²²² N.d.T. : Dans ses *Prolégomènes*, au paragraphe 13, 2^{ème} Remarque, Kant, après avoir posé que « l'intuition ne se produit qu'au moyen des sens », que l'« entendement n'a pas d'intuition, il n'a que la réflexion », veut montrer dans cette 2^{ème} Remarque que toutes les qualités perçues ne le sont que des « phénomènes » et en aucun cas des choses en soi. C'est à ce titre qu'il parle de « qualités secondes » : « Que sans compromettre l'existence réelle des choses extérieures on puisse dire d'une foule de leurs prédicats qu'ils n'appartiennent pas à ces choses en soi, mais seulement à leurs phénomènes, et qu'ils n'ont aucune existence propre en dehors de notre représentation, c'est une chose généralement admise et reconnue longtemps avant Locke, mais surtout depuis ce philosophe. »

²²³ N.d.T. : la « non factorisabilité » du vecteur d'état en physique quantique signifie qu'il n'est pas possible de rendre la probabilité d'occurrence d'un état global du système, indépendante de la probabilité d'occurrence de ses composantes : on se retrouve avec des termes croisés. C'est ce qui est désigné sous le nom d'« intrication ».

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Pour cela, il suffit de considérer que l'instrument d'intervention et l'instrument d'observation sont tous deux conçus pour cibler (et donc co-définir) le même niveau. Les deux clauses définissant une cause intra-niveau selon la conception interventionniste sont alors les suivantes : (i) à chaque fois qu'un antécédent a été activement mis en place au moyen d'un instrument spécifique I_{N+} , de niveau N^{224} , certains phénomènes du niveau N sont observés ; (ii) chaque fois que cet antécédent a été activement éliminé par un autre instrument I_N spécifique du niveau N , les phénomènes précédents de niveau N ne sont plus observés.

Maintenant, pour répondre à la deuxième question, il faut prendre au sérieux le mot « constitutif » dans l'expression « conception constitutive-interventionniste de la causalité » ; en fait, tout aussi sérieusement que dans la théorie de la connaissance de Kant. Là, les principes de compréhension sont constitutifs des objets dans la mesure où ils sont des conditions de possibilité (ou des présupposés nécessaires) pour organiser des « rhapsodies de sensations²²⁵ » en connaissance objective. Dans notre cas, l'utilisation du mot « constitutif » vise à exprimer : (i) la relativité de tout schéma causal à la méthode de substitution active de l'antécédent au moyen de divers instruments adaptés aux différentes échelles ou niveaux, (ii) la thèse selon laquelle, par conséquent, tout schéma causal a ces méthodes et instruments comme présupposé nécessaire, et (iii) la conviction qu'il n'y a pas de « *d'évidence de fait* » quant à savoir lequel parmi les nombreux schémas causaux relatifs aux instruments est plus « réel » qu'un autre. Aucun niveau d'organisation ne peut revendiquer aucun privilège pour lui-même, car chaque niveau est défini (ou « constitué ») par une certaine échelle d'intervention et d'observation. De plus, aucun méta-observateur absolu, aucune « vue de nulle part » n'est disponible pour sélectionner une structure de causes à un certain niveau relatif à l'agent comme étant celle « véritablement efficiente ». Cela ne menace pas la thèse de la clôture causale du domaine de la physique, mais lui refuse seulement toute signification ontologique. La clôture causale signifie ici seulement qu'il est possible d'établir un réseau systématique et autosuffisant de connexions causales par rapport à une échelle unique d'intervention et d'accès expérimental, sans avoir recours à aucune autre échelle d'intervention et d'accès. Ceci étant admis, la clôture causale d'un niveau bas d'organisation (disons le niveau de microphysique) est parfaitement compatible avec la thèse selon laquelle il existe aussi des causes efficaces à un niveau supérieur d'organisation. La clôture causale à un certain niveau montre seulement l'efficacité et une exhaustivité raisonnable des procédures d'intervention et d'accès qui définissent ce niveau, en donnant une image cohérente *par rapport à ces procédures*. Rien n'empêche alors d'obtenir une autre image cohérente, éventuellement avec une clôture causale, à un autre niveau et avec d'autres procédures d'intervention et d'accès. Ces deux images de cohérences internes et de clôtures causales peuvent toutes deux être valides, chacune à son niveau, et relativement à son propre ensemble de procédures d'intervention et d'accès. Loin d'être mutuellement exclusives (comme le voudrait une conception ontologique de la causalité), elles peuvent être mutuellement compatibles. Bien sûr, la cohérence réciproque ne signifie pas qu'elles sont en quelque sorte identiques, mais seulement qu'elles sont *inter-traduisibles*, comme s'il s'agissait de deux langues différentes (disons un micro et un macro-langage).

Par exemple, suivant un vieux dogme de la biologie moléculaire, on peut dire que :

- a) Un gène *cause* une caractéristique phénotypique de la cellule.
- b) L'ouverture d'un brin d'ADN offre des régions d'affinités sélectives pour la base nucléotidique, l'ARN polymérase se déplaçant le long de l'ADN, puis *cause* l'appariement successif de la base nucléotidique de l'ARNm avec la base nucléotidique de l'ADN (appelée « transcription »), et finalement l'ARNm, avec les ribosomes et l'ARN de transfert, *causent* un appariement

²²⁴ N.d.T. : Dans le texte en anglais la lettre « L » est retenue pour désigner le niveau (Level) ; notre choix a donc été de traduire par « N », pour Niveau. Pas de problème pour « Instrument » qui est le même mot dans les deux langues.

²²⁵ N.d.T. : En fait, dans *Critique la raison Pure*, Kant parle d'une « rhapsodie de perception » dans la *Deuxième section du système des principes de l'entendement pur* [AK, IV, 110] – trad. A. Renault – GF p. 235 : « la *possibilité de l'expérience* est donc ce qui donne de la réalité objective à toutes nos connaissances *a priori*. Or, l'expérience repose sur l'unité synthétique des phénomènes, c'est-à-dire sur une synthèse, opérée d'après des concepts de l'objet, des phénomènes en général, sans laquelle elle ne serait jamais une connaissance, mais une rhapsodie de perceptions qui ne s'intégreraient pas toutes ensemble en une texture structurée d'après les règles d'une conscience (possible) universellement liée, et par conséquent ne s'intégreraient pas non plus dans l'unité transcendante et nécessaire de l'aperception. »

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

systématique avec les acides aminés, ce qui entraîne une certaine structure primaire des protéines (c'est ce qu'on appelle la « traduction »).

Dans ce cadre standard, le schéma causal de la biologique-génétique (a) n'exclut pas le schéma causal de la chimie-moléculaire (b), ni inversement ; il est compatible avec lui selon certaines règles d'inter-traduction (complète ou incomplète). Ces schémas causalement fermés, interchangeableables, ne sont même pas redondants. En effet, chacun d'eux est indispensable par rapport à la procédure d'intervention et d'accès correspondante. Dans le cadre posé par cette *procédure*, il ne pourrait pas être remplacé par un autre schéma de causalité fermée sans perte de pouvoir explicatif.

8. La causalité descendante au-delà d'interventions actuelles

Un autre défi à la conception interventionniste doit être abordé à ce stade. Y a-t-il un sens dans lequel un événement à un certain niveau N peut être considéré comme provoquant un événement de niveau inférieur « n »²²⁶, *même en l'absence d'une intervention actuelle au niveau N* ? Comme nous allons le voir maintenant, on peut répondre à cette question sans faire référence aux « causes en soi », en étudiant le mode d'interconnectivité *entre les domaines de connaissance définis par rapport aux différents modes d'accès et de concepts*.

L. Bich (2009) a récemment formulé cette stratégie, en s'inspirant des concepts de R. Rosen (1991) de modèles scientifiques et de biologie relationnelle. Tout d'abord, on remarque qu'il semble absurde de supposer une réalité d'interaction entre des entités de deux modèles (disons un modèle de niveau haut et un modèle de niveau bas) d'un processus donné, puisque chaque modèle est relatif à une classe complètement distincte de modes d'accès et de modes de conceptualisation. Déterminer des interactions entre de telles entités ressemble à une « erreur de catégorie » de Ryle. Cependant, il existe des opérations de types spécifiques qui peuvent établir les conditions d'une comparaison indirecte entre les domaines régis par les deux types de modèles. Ces opérations visent à définir des entités de la *même catégorie*, mais en partant soit du niveau haut, soit du niveau bas. Ces opérations sont respectivement *l'analyse* et *la synthèse*. L'analyse est une procédure descendante partant du système de niveau supérieur S et essayant de déterminer ses parties (ou ses « composants »). La synthèse est une procédure ascendante qui part des « éléments matériels » (dont le concept est dérivé d'un modèle physique de niveau de base) et tente d'élaborer un modèle de quelque chose ressemblant au²²⁷ système S comme résultat final. Dans les systèmes linéaires simples, les « composants » obtenus comme sous-produits de l'analyse et les « éléments » matériels pris comme points de départ de la synthèse coïncident. Mais dans de nombreux autres cas, ce n'est pas vrai. Le modèle du tout impose, pour ainsi dire, sa²²⁸ marque à ses composants, les rendant différents des prétendus éléments matériels de base. La causalité descendante est alors définie comme la *non-coïncidence* entre les modèles qui s'appliquent aux composants d'un système et les modèles de ses éléments matériels ; ou comme la *non-coïncidence du produit final de l'opération d'analyse avec le point de départ de l'opération de synthèse*²²⁹.

Laissez-moi de donner un exemple, emprunté à la chimie quantique (Hladik 1971, Vemulapalli 2003 ; Bensaude-Vincent 2005). Si l'on part d'un modèle quantique d'un atome isolé de carbone, on ne peut prédire ni sa valence, ni la géométrie de ses éventuelles liaisons chimiques. Le modèle de distribution électronique de l'atome de carbone pris isolément est en effet : $[1s^2, 2s^2, 2p^1, 2p^1, 2p^0]$ (deux électrons sur la couche 1s, deux électrons sur la couche 2s, un électron sur chacune des couches $2p_x$ et $2p_y$, et aucun électron sur la couche $2p_z$). Cette distribution d'électrons entraîne la *di-valence* du carbone (car seuls deux électrons sont dissociés : ceux des couches $2p_x$ et $2p_y$), et un angle entre les deux liaisons prédites égal à 90° . Mais c'est presque toujours faux. Le méthane et d'autres molécules, y

²²⁶ N.d.T. : Nous avons fait le choix de mettre des guillemets pour encadrer la variable n pour appuyer le fait que la minuscule est utilisée pour le niveau inférieur alors que la majuscule est utilisée pour le niveau supérieur.

²²⁷ N.d.T. : Nous avons préféré rendre « like » par « ressemblant à » plutôt que par « comme » qui est trop polysémique en français.

²²⁸ N.d.T. : Le texte anglais dit « The model of the whole so to speak imposes a mark on its components » ; la traduction que nous proposons est : « Le modèle du tout impose, pour ainsi dire, sa marque », afin de souligner que c'est bien le fait de choisir ce modèle qui impose une marque sur ses composants.

²²⁹ N.d.T. : Cette 'coïncidence' entre les parties obtenues par l'analyse du tout avec les parties du niveau de base est aussi appelée « recouvrement ». Il y a réductionnisme lorsque le recouvrement est total, émergence lorsque le Tout dépasse les parties.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

compris le carbone, présentent une *tétra*-valence de atomes de carbone, et une géométrie tétraédrique avec un angle entre les liaisons proches de 109° . Au vu de cette énorme divergence, les chimistes quantiques ont ensuite introduit l'astuce *ad hoc* d'« hybridation des orbitales atomiques²³⁰ ». Les états des deux électrons sur la couche 2s ont été linéairement combinés avec les états des électrons sur $2p_x$ et $2p_y$, et on a obtenu ainsi quatre électrons non appariés dans états hybrides appelés sp^3 . C'est ce qu'on a finalement adopté pour les structures moléculaires observées. Il est clair à ce stade que le modèle physique de l'atome de carbone isolé pris comme point de départ de la synthèse ascendante ne coïncide pas avec le modèle chimique des composants carbonés des molécules qui est le produit final de l'analyse descendante. Les *éléments* ascendants ($2s^2 2p_x^1 2p_y^1$ - carbones isolés) ne coïncident pas avec les *composants* descendants (sp^3 - les carbones hybridés). Cette non-coïncidence entre les procédures ascendantes et descendantes et les modèles associés peut être comprise comme ce que nous pourrions appeler un cas de « causalité descendante », *au-delà de la situation d'une intervention immédiate*.

Là encore, il est tentant d'oublier toute la procédure cognitive et de sauter à l'affirmation selon laquelle les molécules interprétées ontologiquement ont une influence sur les atomes interprétés ontologiquement. On pourrait dire, par exemple, que les molécules de méthane influencent de façon descendante les atomes de carbone en modifiant leur distribution d'électrons, en le faisant passer de la configuration $2s^2 2p_x^1 2p_y^1$ à la configuration sp^3 . Mais ce raccourci soulève immédiatement toutes les objections énumérées dans la Section 2. En revanche, la simple non-coïncidence des *procédures* expérimentales ascendantes et descendantes et des deux *modèles* correspondants du niveau inférieur, est à l'abri de ces objections formulées dans un cadre ontologique.

En résumé, selon la vision constitutive-interventionniste, il y a un sens dans lequel on peut dire qu'un événement à un certain niveau L provoque un événement au niveau inférieur I, même en l'absence d'une intervention *actuelle* au niveau L. Cela nécessite seulement de comprendre comment les modèles d'interventions expérimentales sont utilisés pour formuler des déclarations permanentes de type loi et relier les divers modèles relatifs à l'accès.

9. Auto-causalité descendante

Il reste encore une question cruciale en suspens à ce stade. Nous avons vu que la causalité descendante fait parfaitement sens lorsqu'une intervention *externe* à un niveau d'organisation donné, qui est à la fois ciblée et définie par elle, induit des altérations observées à un niveau inférieur. Maintenant, qu'en est-il de l'*auto*-intervention et de l'*auto*-altération ? Cette notion semble absurde. L'*auto*-altération ressemble à un artifice verbal pour exprimer une simple évolution non obstruée d'un processus. Cependant, tout le monde connaît des cas d'*auto*-interventions (apparentes ou réelles) dans lesquelles un changement volontaire d'état d'esprit a une influence sur sa propre physiologie (Petitmengin et al., 2006).

Le principal point d'achoppement concerne le mot « volontaire » dans l'expression « changement volontaire de son propre état d'esprit ». Sommes-nous *réellement* libres de changer d'état d'esprit ? Plus généralement, sommes-nous *réellement* libres de choisir l'une de nos actions (Libet et al., 1999) ? Avant même d'examiner cette question, nous devons exposer sa présupposition sous-jacente. Le fait même que le débat porte sur la *réalité* ou l'*irréalité* du libre arbitre est un autre symptôme de la domination d'un cadre fondamentaliste. Ceux qui plaident en faveur de la réalité du libre arbitre tendent à l'ancrer dans une conception réifiée de l'esprit. Et ceux qui s'*opposent* à la réalité du libre arbitre ont tendance à réifier les descriptions objectives de la physiologie et du comportement (Bitbol 2008a, b). Ces derniers auteurs sont enclins à accepter que notre expérience (en particulier notre expérience du libre arbitre) puisse être une illusion, tandis que la description objective légaliste du fonctionnement de notre corps expose son fonctionnement *réel*. Cependant, si la « révolution copernicienne » de Kant est poussée dans ses conséquences ultimes, cette sorte de coupure entre l'illusion expérimentale et la *réalité intrinsèque*, telle

²³⁰ N.d.T. : référence [Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hybridation_des_orbitales_atomiques) : La théorie des orbitales hybrides a été développée par Linus Pauling pour expliquer la géométrie de molécules comme le méthane (CH₄). En particulier cette théorie permet de concilier la **théorie** qui voudrait que l'atome de carbone isolé ait une structure avec 2 électrons périphériques (liaison di-valente) avec l'**expérience** dans laquelle on observe une structure spatiale tétraédrique stable de l'atome de carbone. Pauling propose une théorie de mélange des orbitales (hybridation) qui permet de concilier théorie et expérience. La création de ces nouvelles orbitales hybrides se fait selon le principe d'addition des fonctions d'onde de la théorie quantique.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

que révélée par l'enquête, apparaît comme une illusion encore plus profonde, engendrée par la raison confondant ses propres horizons de recherche avec des entités métaphysiquement réelles. (Kant 1996).

Une analyse alternative, pluraliste et sensible au libre accès du libre arbitre est alors nécessaire. Elle se développe en deux étapes. Premièrement, on évite soigneusement toute vision dualiste classique qui serait associée par inadvertance à l'expression « libre arbitre » ; à savoir l'idée que le libre arbitre signifierait une action, non régulée, d'un esprit substantiel *sur* un autre objet substantiel. Deuxièmement, on formule une alternative non-dualiste à cette image métaphysique trompeuse. Un compte rendu intéressant de ce genre, adapté de la *Critique de la raison pratique* de Kant avec une touche de spinozisme, s'appuie sur la dialectique de l'acteur et du spectateur (Beck 1963). La croyance spontanée au libre arbitre provient ici du point de vue d'un *acteur* immergé dans la nature, alors que refuser le libre arbitre devient inévitable avec le point de vue d'un *spectateur* qui s'engage à poser une partie de cette nature comme objet de description. Selon Kant (2002), même s'il ne peut y avoir de preuve « théorique » de liberté (c'est-à-dire sans preuve du point de vue du spectateur), les choses sont différentes du point de vue de l'acteur. En effet, quelqu'un « (...) ne peut *agir* que sous l'idée de la liberté » (247)²³¹ ; et ceci implique qu'en un sens on est « *réellement* libre ». À ce point, on doit insister sur le raisonnement inhabituel mais sensé de Kant :

- (i) Pour que le processus même de *délibération* se développe et ait un sens, les acteurs doivent travailler sous la *présupposition* incontestée du libre arbitre. Comme contre-exemple, imaginons une actrice qui décide de faire quelque chose, mais réalise soudain que, quoi qu'elle fasse, ce qu'elle fera par la suite est déjà prédéterminé. Cela implique une *contradiction performative* vécue (Apel 1984) qui, si elle est (trop) systématiquement prise en compte, peut entraîner une inhibition de la décision et une simple passivité.
- (ii) Ce présupposé nécessaire du libre arbitre suffit à déclarer que les acteurs sont « *réellement* » libres d'un point de vue *pratique*.

Le fait que, du point de vue d'un *spectateur* scientifique extérieur (ou même du point de vue du même être humain qui a adopté rétrospectivement une attitude de spectateur envers ses propres actions et expériences passées), le comportement de l'agent puisse sembler être gouverné par des lois déterministes objectives, n'affaiblit nullement la réalité *pratique* de la liberté présupposée. Car ici, utiliser l'adverbe « *réellement* » n'a pas besoin de faire référence à autre chose que le présupposé spontanément ressenti, et indispensable en pratique, de l'action délibérative. Ce sens du mot « *réalité* » ne peut être considéré comme « *faible* » que si l'on oublie que, dans une vision délibérément non métaphysique, aucun sens *an sich* « *plus fort* » n'est disponible. En particulier, le sens théorique du mot « *réalité* » ne peut guère être considéré comme plus fort, car il se réfère uniquement aux invariants phénoménaux utilisés comme guides pratiques pour une recherche intersubjective coordonnée.

On peut rendre compte du libre arbitre comme d'un statut à « deux positions²³² », par opposition à un « deux substances » : position de l'acteur/position du spectateur, au lieu de la substance spirituelle/substance matérielle. Sur la base de ce point de vue, on pourrait dire (en accord avec ma formulation initiale du statut de causalité descendante) que le libre arbitre n'est ni illusoire ni intrinsèquement existant, mais simplement indexé ou situationnel. C'est le cas de la situation d'un acteur, *en tant* qu'il est indexé par cette situation.

En particulier, il y a en effet un sens dans lequel : (i) on peut volontairement modifier son propre état d'esprit, et (ii) on observe les « effets » physiologiques objectifs de cette altération « descendante » volontaire. Aucune « perturbation des lois de la nature par une substance spirituelle » n'est nécessaire pour cela. Il faut seulement admettre que l'étape (i) exprime ce qui est présupposé par soi-même en tant

²³¹ N.d.T. : I. Kant – *Fondement de la métaphysique des Mœurs* – trad. A. Renaut, éd. GF, 1994 p.133 [448] : « je dis donc : tout être qui ne peut agir autrement que *sous l'idée de liberté* est *ipso facto*, du point de vue pratique, *réellement libre* ; ce qui revient à dire que toutes les lois qui sont liées indissolublement à la liberté valent pour lui exactement comme si sa volonté était proclamée aussi libre en elle-même, et cela d'une manière qui puisse valoir aux yeux de la philosophie théorique. » L'explication par Michel Bitbol de ce passage est éclairante : Kant a compris qu'on ne pouvait rationnellement pas prouver l'existence du « libre arbitre » comme fondement théorique de la volonté, mais qu'il suffisait à l'« acteur » de croire à cette possibilité du libre arbitre (comme si sa volonté était proclamée aussi libre en elle-même) pour agir librement, et ainsi être *réellement libre*.

²³² N.d.T. : il n'est pas possible de rendre en Français le jeu de mot qui existe en Anglais entre « two-stances » et « sub-stance »

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

qu'acteur (et qui est alors « réel en pratique »), alors que l'étape (ii) exprime le résultat d'une science objective développée en adoptant la position des spectateurs (et qui est alors « réel en théorie »).

Enfin, on peut penser à un autre cas qui est rarement discuté : « l'auto-influence indirecte », au-delà de « l'auto-causalité directe ». Comme le souligne J. Elster, quand nous souhaitons modifier notre propre état (psycho-physiologique), il est souvent préférable d'agir indirectement en choisissant de nous influencer latéralement, plutôt que d'agir directement en essayant de provoquer l'état recherché. Par exemple, quand nous souhaitons dormir, mieux vaut ne pas chercher à atteindre ce but, mais plutôt nous influencer en promouvant d'autres processus (apparemment sans rapport), tels que la concentration sur une tâche mentale répétitive ou le renoncement à quelque but que ce soit. L'état altéré apparaît ainsi comme quelque chose qui est « essentiellement » un sous-produit indirect du processus promu, plutôt que comme un effet direct de notre désir de l'atteindre.

Il va sans dire que, tout comme la cause, influencer en auto-intervenant à un certain niveau contribue à *définir* ce niveau d'organisation. En conséquence, l'influence descendante est exactement dans le même sens que la causalité descendante par intervention extérieure ou par auto-altération volontaire : cela tient *en tant* qu'elle est indexée par un mode d'accès et un mode d'action (latérale).

10. Conclusion et résumé

- (1) Donner un sens à la causalité ascendante et descendante n'exige pas l'acceptation d'une sorte de distinction métaphysique entre le niveau supérieur et le niveau de base d'organisation, ni d'une distinction de substance comme dans le véritable dualisme, ou d'une distinction entre propriétés et structures comme dans l'image populaire contemporaine. Il suffit d'assumer une dualité de modes d'accès, ou modes d'intervention.
- (2) Si l'on intervient à un niveau supérieur d'organisation, certains effets de cette action peuvent alors être détectés par un mode d'accès spécifiquement destiné à un niveau inférieur. C'est la causalité descendante. Inversement, si l'on intervient à un niveau microscopique, certains effets de cette action peuvent alors être détectés par un mode d'accès spécifiquement destiné à un niveau supérieur d'organisation. C'est la causalité ascendante.
- (3) Les modes d'accès et les modes d'intervention ne sont pas seulement révélateurs, ils sont *constitutifs* de part en part. En conséquence, les niveaux d'organisation sont non seulement dévoilés mais également *définis* par des modes d'intervention correspondants.
- (4) Par conséquent, dire qu'une intervention à un niveau supérieur cause, de manière *descendante*, des altérations détectées à un niveau inférieur (ou, inversement, qu'une intervention à un niveau inférieur cause, de manière *ascendante*, des altérations détectées à un niveau plus élevé) est une expression appropriée à un double mode de *définition opérationnelle* des niveaux.
- (5) Le double mode de définition opérationnelle des niveaux peut être étendu au-delà du moment même de l'intervention, et au-delà du simple cas des interventions externes, donnant ainsi également sens aux cas d'influence inter-niveaux permanente ou d'auto-transformation.
- (6) Les niveaux émergents d'organisation et les causalités inter-niveaux ne sont ni illusoirs ni ontologiquement réels. Ils sont *objectifs* dans un sens transcendantal et constitutif.
- (7) Alternativement, on peut dire que la dichotomie habituelle entre épistémologie et ontologie s'effondre, car on ne peut attribuer aucun autre sens d'« être » des niveaux d'organisation et des causes, que celui qui a été constitué et objectivé par une méthode d'accès épistémique.

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

Références

- Apel K. O. (1984). *Understanding and explanation: A transcendental-pragmatic perspective*. (Cambridge, MA: MIT Press)
- Atmanspacher, H., Filk, T. & Römer, H. (2004). Quantum Zeno features of bistable perception. *Biological Cybernetics*, 90, 33-40
- Batten, D. (2008). Demystifying emergence. Presentation at the conference *Emergence in the physical and biological world: A notion in search of clarification*, Erice (Italy), April 12-16, 2008
- Beck, L. W. (1963). *A commentary on Kant's Critique of Practical Reason*. (Chicago: The University of Chicago Press)
- Bedau, M. (2002). Downward causation and the autonomy of weak emergence. *Principia*, 6, 5-50
- Bedau, M. (2008a). Is weak emergence just in the mind? *Minds and Machines*, 18 (4), 443-459
- Bedau, M. (2008b). Pluralism about emergence. Presentation at the conference *Emergence in the physical and biological world: A notion in search of clarification*, Erice (Italy), April 12-16, 2008
- Bensaude-Vincent, B. (2005). *Faut-il avoir peur de la chimie ?* (Paris: Les Empêcheurs de Penser en Rond)
- Bich, L. (2009). Downward causation and relatedness in emergent systems: Epistemological remarks. (In G. Minati, E. Pessa & M. Abram (Eds.), *Processes of emergence of systems and systemic properties: Towards a general theory of emergence* (pp. 591-602), Singapore: World Scientific.)
- Bickhard, M. & Campbell, D. T. (2000). Emergence. (In P. B. Andersen, C. Emmeche, N. O. Finnemann & P. V. Christiansen (Eds.), *Downward causation* (pp. 322- 348). Aarhus: Aarhus University Press.)
- Bitbol, M. (1996). *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*. (Dordrecht: Kluwer)
- Bitbol, M. (1997). *Mécanique quantique, une introduction philosophique*. (Paris: Flammarion)
- Bitbol, M. (1998). Some steps towards a transcendental deduction of quantum mechanics. *Philosophia naturalis*, 35, 253-280
- Bitbol, M. (2000). Physique quantique et cognition. *Revue Internationale de Philosophie*, 54, 299-328
- Bitbol, M. (2001). Non-representationalist theories of cognition and quantum mechanics. *SATS (Nordic journal of philosophy)*, 2, 37-61
- Bitbol, M. (2007a). Ontology, matter and emergence. *Phenomenology and the Cognitive Science*, 6, 293-307
- Bitbol, M. (2007b). Materialism, stances, and open-mindedness. (In B. Monton (Ed.), *Images of empiricism: Essays on science and stances, with a reply from Bas C. van Fraassen* (pp. 229XX-271XX). Oxford: Oxford University Press.)
- Bitbol, M. (2008a). Is consciousness primary? *NeuroQuantology*, 6, 53-71
- Bitbol, M. (2008b). Consciousness, situations, and the measurement problem of quantum mechanics. *NeuroQuantology*, 6, 203-213
- Bitbol, M. (2009a). *De l'intérieur du monde, Pour une philosophie des relations*. (Paris: Flammarion (in press))
- Bitbol, M. (Ed.) (2009b). *Théorie quantique et sciences humaines*. (CNRS éditions)
- Campbell, R. J. & Bickhard, M. H. (2009). Physicalism, emergence, and downward causation. *Synthese*, in press
- Castellani, E. (2002). Reductionism, emergence, and effective field theories. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 33, 251-267
- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B. & Laloe, F. (2006). *Quantum mechanics*. (New York: Wiley Interscience)
- Deacon, T. W. (2003). The hierarchic logic of emergence: Untangling the interdependence of evolution and self-organization. (In B. Weber & D. Depew (Eds.), *Evolution and learning: The Baldwin effect reconsidered* (pp. 273- 308). Cambridge, MA: MIT Press.)
- D'Espagnat, B. (1989). *Conceptual foundations of quantum mechanics*. (New York: Addison-Wesley)
- Ducheyne, S. (2006). Galileo's interventionist notion of 'cause'. *The Journal of the History of Ideas*, 67, 443-464
- Elster, J. (1983). *Sour grapes*. (Cambridge, UK: Cambridge University Press)
- Emmeche, Claus, Köppe, Simo & Stjernfelt, Frederik (2000). Levels, Emergence, and Three Versions of Downward Causation. (In P. B. Andersen, C. Emmeche, N. O. Finnemann & P. V. Christiansen (Eds.), *Downward causation, minds, bodies, and matter* (pp. 13-34) Aarhus: Aarhus University Press.)
- Galilei, G. (1612). *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'aqua o che in quella si muovono*. In *Opere I*. (Torino: U.T.E.T.)

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

- Gibson, J. J. (1979). The ecological approach to visual perception. (Boston: Houghton Mifflin)
- Gillies, D. (2005). An action-related theory of causality. *British Journal for the Philosophy of Science*, 56, 823-842
- Geiser, F. & Halbrecht, U. (2008). Fear that freezes blood in your veins. Retrieved 20 August 2009 from [http://www.uni-bonn.de/ Press-releases/110_2008/](http://www.uni-bonn.de/Press-releases/110_2008/)
- Hartmann, S. (2001). Effective field theories: Reductionism and scientific explanation. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 32, 267-304
- Hladik, J. (1971). *Elements de chimie quantique*. (Paris: Dunod)
- Hoffmeyer, J. (1997). Biosemiotics: Towards a new synthesis in biology? *European Journal for Semiotic Studies*, 9, 355-376
- Humphreys, P. (1997). How properties emerge. *Philosophy of Science*, 64, 1-17
- Kant, I. (1955). *Prolegomena to any future metaphysics*. (Chicago: Open Court)
- Kant, I. (1987). *Critique of judgment*. (Indianapolis: Hackett Publishing Company)
- Kant, I. (1992). Concerning the ultimate ground of the differentiation of directions in space. (In D. Walford & R. Meerbote (Eds.), *The Cambridge edition of the works of Immanuel Kant. Theoretical philosophy, 1755–1770* (pp. 361-372). Cambridge, UK: Cambridge University Press)
- Kant, I. (1996). *Critique of pure reason*. (Indianapolis: Hackett Publishing Company)
- Kim, J. (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95, 3-36
- Kant, I. (2002). *Groundwork for the metaphysics of morals*. (Oxford: Oxford University Press)
- Kim, J. (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95, 3-36
- Kistler, M. (1999). *Causalité et lois de la nature*. (Paris: Vrin)
- Lambert, A., Zamir, S. & Zwirn, H. (2006). *Type indeterminacy: A model of the KT(Kahneman–Tversky)-Man*. (New York: Cornell University Library)
- La Mura, P. (2005). Correlated equilibrium of classical strategic game with quantum signals. *International Journal of Quantum Information*, 3, 183-188
- Levinas, E. (2001). *En découvrant l'existence avec Husserl et Heidegger*. (Paris: Vrin)
- Libet, B., Freeman, A. & Sutherland, J. K. B. (Eds.) (1999). *The volitional brain: Towards a neuroscience of free will*. (Exeter: Imprint Academic)
- Maturana, H. R. & Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and cognition*. (Dordrecht: Reidel)
- Maudlin, T. (1998). Part and whole in quantum mechanics. (In: E. Castellani (Ed.), *Interpreting bodies* (pp. 46-60). Princeton: Princeton University Press)
- Menzies, P. & Price, H. (1993). Causation as a secondary quality. *British Journal for the Philosophy of Science*, 44, 187-204
- Mill, J. S. (1851). *System of logic*, Vol. 1. (London: John W. Parker)
- Pattee, H. H. (2000). Causation, control, and the evolution of complexity. (In P. B. Andersen, C. Emmeche, N. O. Finneman & P. V. Christiansen (Eds.), *Downward causation, minds, bodies, and matter* (pp. 63-77). Aarhus: Aarhus University Press)
- Petitmengin, C., Navarro, V. & Baulac, M. (2006). Seizure anticipation: Are neuro- phenomenological approaches able to detect preictal symptoms? *Epilepsy and Behavior*, 9, 298-306
- Price, H. (1992). Agency and causal asymmetry. *Mind*, 101, 501-520
- Rosen, R. (1991). *Life itself: A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. (New York: Columbia University Press)
- Salmon, W. (1984). *Scientific explanation and the causal structure of the world*. (Princeton: Princeton University Press)
- Schrödinger, E. (1935/1983). The present situation of quantum mechanics. (In J. A. Wheeler & W. H. Zurek (Eds.), *Quantum theory and measurement* (pp. 152-167). Princeton: Princeton University Press.)
- Seevinck, M. P. (2003). Holism, physical theories and quantum mechanics. *International workshop on Holism in the philosophy of physics*, Bonn, 4-5 July 2003. Retrieved 12 August, 2009 from <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00002191/>
- Stephan, A. (1998). Varieties of emergence in artificial and natural systems. *Zeitschrift für Naturforschung*, 53c, 639-656

Annexe I : Causalité descendante sans fondationnalisme

- Teller, P. (1995). An interpretive introduction to quantum field theory. (Princeton: Princeton University Press)
- Varela, F. (1976). Not one, not two. The coevolution quarterly, Fall 1976, 62-67
- Van Fraassen, B. & Peschard I. (2008). Identity over time: Objective, subjective. Philosophical Quarterly, 58 (230), 15-35
- Vemulapalli, G. K. (2003). Property reduction in chemistry. Annals of the New-York Academy of Sciences, 988, 90-98
- Von Wright, G. H. (1974). Causality and determinism. (New York: Columbia University Press)
- Weber, A. & Varela, F. J. (2002). [Life after Kant. Phenomenology and the Cognitive Sciences](#), 1, 97-125
- Woodward, J. (2003). Making things happen: A theory of causal explanation. (Oxford: Oxford University Press)