



HAL
open science

Il n'y a pas de point de vue de nulle part : surplus structurel, naturalisme et internalisme théorique

Marie Gueguen

► **To cite this version:**

Marie Gueguen. Il n'y a pas de point de vue de nulle part : surplus structurel, naturalisme et internalisme théorique. *Métaphysique et Sciences*, 2022, 9791037013415. hal-04109598

HAL Id: hal-04109598

<https://hal.science/hal-04109598v1>

Submitted on 30 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IL N'Y A PAS DE POINT DE VUE
DE NULLE PART :
SURPLUS STRUCTUREL, NATURALISME
ET INTERNALISME THÉORIQUE

Marie Gueguen

I. INTRODUCTION

Le positivisme logique du Cercle de Vienne est notamment fameux pour son rejet de la métaphysique, enraciné dans l'adoption d'un strict vérificationnisme selon lequel seules les propositions qui peuvent être "vérifiées", c'est-à-dire confrontées à l'expérience, ont un sens. Conséquence directe de ce principe, les thèses métaphysiques sont considérées comme n'ayant aucune signification, puisqu'elles ne peuvent passer ce test du vérificationnisme¹. Cet éliminativisme à l'égard de la métaphysique a pris, chez certains positivistes, une tournure extrême, réduisant considérablement les limites d'une pratique légitime de la philosophie des sciences : non seulement la métaphysique devait être éliminée de la science, mais toute considération philosophique s'approchant de près ou de loin d'une « philosophie première », prescrivant à la science son agenda et les limites d'une ontologie acceptable, privant par conséquent la science de son autonomie, devait être prohibée. Philipp Frank, l'un des fameux

1. Voir par exemple A. J. Ayer (1934), « Demonstration of the Impossibility of Metaphysics », *Mind*, 43 (171), 335-345.

représentants du Cercle de Vienne, fait écho à ce radicalisme lorsqu'il rappelle la philosophie des sciences à l'ordre :

«Lorsqu'il est question d'expressions telles qu'espace, temps, causalité et ce genre de choses dans les écrits scientifiques, on peut souvent lire que la compétence de la physique, et même celle de la science naturelle, s'arrête là et que les problèmes qui incluent de telles expressions ne peuvent être résolus que sur un plan "supérieur", le plan "philosophique". L'ascension vers ce plan supérieur consiste principalement à se libérer des entraves de la pensée strictement scientifique à laquelle sont assujetties les "sciences spéciales", et à se lancer dans une sorte de délibération qui résulte dans ce que l'on pourrait appeler, en hommage à une expression bien connue, l'"opium de la science". Ce livre vise à traiter toutes les questions qui y sont abordées sans cet opium souvent appelé "philosophie", par mésusage de ce nom honorable» (Frank, 1932, 11, ma traduction)².

La même année, il soutient d'ailleurs que le rôle (pour le moins étroit!) de la philosophie des « sciences naturelles » se cantonne à déduire l'ensemble des conséquences observationnelles d'une théorie à partir des symboles scientifiques qu'elle admet³. Ce rejet de la métaphysique au nom du vérificationnisme a été depuis largement discuté et décrié, notamment parce que le principe vérificationniste semble se réfuter lui-même – un tel principe n'est en effet pas susceptible lui-même d'être vérifié empiriquement. Toutefois, les conséquences de l'attitude naturaliste des positivistes, voulant débarrasser la science des prétentions illégitimes de la métaphysique et de la philosophie en général à lui ordonner son ordre du jour, n'ont pas été analysées

2. Frank P. (2012), *The law of causality and its limits* (vol. 22), Dordrecht, Springer Science et Business Media, 11 : «When one comes to expressions like space, time, causality and the like in scientific writings, one can often read that here the competence of physics, even of natural science, came to an end and that problems in which such expressions occur could only be solved on a "higher", the "philosophical" plane. The ascent to that higher plane consists mainly in discarding the fetters of the strict scientific thinking to which one is subjected in the "special sciences", and starting a kind of deliberation with results that one could call, recalling a well-known saying, "opium for science". This book aims to treat all questions put in it without this opium that is often called "philosophy", by misuse of an honourable name».

3. Frank P. (1932), «Naturwissenschaft», in R. Dittler, G. Joos, *et al.* (eds.), *Handwörterbuch der Naturwissenschaften*, Zweite Auflage, Band 7. Jena : Gustav Fischer, p. 156.

aussi rigoureusement. Cette volonté de purger la science de toutes considérations philosophiques a laissé une empreinte durable sur la philosophie des sciences, notamment *via* le biais de postulats implicites plus suffisamment remis en cause ou interrogés, voire celui des outils forgés par les positivistes pour répondre aux défis qui leur étaient suggérés.

Prenons l'exemple de la structure des théories scientifiques telle qu'analysée par les positivistes logiques. Face au problème de la sous-détermination empirique des théories, c'est-à-dire à l'idée selon laquelle deux théories peuvent être incompatibles logiquement, dans la mesure où elles proposent des descriptions du monde qui se contredisent, mais équivalentes empiriquement, soutenues par les mêmes données empiriques, la stratégie positiviste est simple : puisque le contenu d'une théorie scientifique est entièrement épuisé par ses conséquences observationnelles, les différences entre ces théories ne peuvent être que des désaccords de surface, une mésentente purement verbale. En d'autres termes, il ne s'agit pas en réalité de deux théories, mais d'une seule, sous diverses formes, cachées sous des oripeaux différents – c'est ce qu'on appelle la stratégie de l'équivalence théorique. Cette stratégie repose de manière cruciale sur la possibilité de nier que les divergences portant sur les termes théoriques ou l'interprétation ontologique de ces théories aient la moindre importance. Si la description du monde qui émerge de ces théories se voit accorder la moindre pertinence théorique, alors ces rivales ne peuvent plus être considérées comme une seule et même théorie.

Comme l'a souligné Sklar en 1982⁴, sortir la stratégie de l'équivalence théorique de son contexte positiviste est un numéro d'équilibriste : le réaliste scientifique⁵ qui voudrait recourir à cette stratégie devrait

4. Sklar L. (1982), « Saving the noumena », *Philosophical Topics*, 13 (1), 89-110.

5. Le réalisme scientifique est la doctrine selon laquelle le but d'une théorie scientifique est de fournir une description vraie du monde tel qu'il existe indépendamment de nous. Elle s'oppose à l'instrumentalisme, d'après lequel une théorie scientifique n'est que des instruments commodes, qui nous permettent d'ordonner les phénomènes et de les prédire. Le réaliste souscrit généralement aux quatre thèses suivantes : 1) les termes théoriques (c'est-à-dire non-observationnels) apparaissant dans les théories scientifiques doivent être interprétés littéralement, comme faisant référence à des entités ou des processus dans ce monde ; 2) les théories scientifiques, interprétées de manière réaliste, peuvent être confirmées and sont en effet souvent confirmées comme approximativement vraies par les données empiriques disponibles ;

fournir une notion d'équivalence théorique plus riche que celles des positivistes, incluant davantage que les simples conséquences observationnelles admises par la théorie, et préservant en même temps le pouvoir explicatif des termes théoriques, tout en soutenant que deux théories offrant des images du monde divergentes ne sont que des variantes notationnelles. Pourtant ce contexte dans lequel s'est forgé le concept d'équivalence théorique tend à être oublié, et avec lui la question même de la cohérence de ce concept hors d'une épistémologie positiviste – un oubli qui à nos yeux a grandement contribué à rendre le débat sur une définition appropriée de l'équivalence théorique tout à fait inaudible⁶.

Le cas de l'équivalence théorique est loin d'être isolé, et c'est sur cette influence positiviste oubliée et qui sous-tend pourtant beaucoup des stratégies suggérées pour échapper au problème de la sous-détermination des théories que nous voudrions insister dans ce chapitre. La plupart de ces stratégies, en effet, repose sur la thèse selon laquelle le contenu d'une théorie scientifique peut être tout simplement lu à partir de sa structure, sans qu'aucune considération philosophique ne vienne se mêler à ou soutenir ce processus d'interprétation. Il en est ainsi du recours aux vertus non-empiriques des théories en compétition, par exemple, afin de privilégier l'une des rivales empiriquement équivalentes : la plus grande simplicité d'une théorie, c'est-à-dire le fait qu'elle contienne moins d'éléments dispensables et soit par conséquent plus directement reliée aux phénomènes qu'elle décrit, ou son plus grand pouvoir explicatif, permet de choisir une théorie plutôt que l'autre. À première vue, le recours à des vertus non-empiriques, donc sans conséquences observables, se trouve bien éloigné du programme positiviste. Un tel argument présuppose toutefois qu'il existe un point de vue neutre à partir duquel

3) le progrès historique de sciences parvenu à maturité revient à agréger les approximations de plus en plus précises qui se succèdent à propos à la fois des phénomènes observables et non-observables ; enfin 4) la réalité que les théories scientifiques décrivent est indépendante de nos pensées ou de nos engagements théoriques. Voir notamment Boyd, R. N. (1984). 3. *The Current Status of Scientific Realism*, in *Scientific realism* (p. 41-82). University of California Press et Psillos, S. (2005). *Scientific realism: How science tracks truth*, New-York, Routledge.

6. Pour un résumé édifiant de la complexité de ce débat, voir notamment Coffey K., 2014, Theoretical equivalence as interpretative equivalence, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 65 (4), 821-844.

la structure de ces théories peut être analysée, le contenu physique séparé du superflu, et qu'une comparaison pertinente puisse être établie entre leurs contenus théoriques et leurs vertus – en d'autres termes, que le contenu d'une théorie émerge tout simplement et de manière autonome de sa structure, sans qu'il n'y ait besoin de sortir des limites légitimes de la pratique scientifique pour que ce contenu puisse être défini.

Le but de ce chapitre est de montrer que l'interprétation d'une théorie scientifique ne peut jamais être effectuée en dehors de prises de positions philosophiques, voire métaphysiques, sur ce qui constitue l'objet et la structure d'une théorie scientifique. Nous illustrerons plus précisément cette thèse en montrant que le principe méthodologique qui sous-tend les stratégies permettant d'échapper aux cas de sous-détermination empirique se trouve enraciné dans un naturalisme hérité des positivistes logiques : en effet, l'idée selon laquelle une théorie ne contenant aucune structure superflue devrait être préférée à sa rivale, toutes choses étant égales par ailleurs, n'est pas applicable d'un point de vue pratique, car ce qui constitue une structure pertinente par opposition à un contenu superflu est déterminé par des considérations épistémologiques sur le but des théories scientifiques qui vont bien au-delà de ce que la seule méthode scientifique permet de déduire. Dans la première partie de ce chapitre, nous soulignerons les difficultés liées à la définition d'un critère de signification physique, c'est-à-dire d'un critère permettant de différencier le contenu physique d'une théorie de ses éléments superflus, qui se voudrait neutre. Nous définirons ensuite, dans la deuxième section, les trois types de structure généralement subsumés sous le nom de surplus structurel ou de structure superflue, identifiant dans chacun de ces trois cas en quoi l'injonction méthodologique selon laquelle une théorie ne contenant aucune structure dispensable est préférable devient problématique et insistant sur les présuppositions implicites, aux forts accents positivistes, sur lesquelles se fonde l'idée qu'une théorie plus simple doit être préférée à sa rivale. Nous concluons enfin sur l'ébauche d'une position que nous nommons l'internalisme théorique, qui s'oppose à l'idée que la structure des théories puisse être analysée depuis un point de vue neutre, qui ne privilégierait aucune des deux théories – un point de vue de nulle part.

II. SÉPARER L'ESSENTIEL DU SUPERFLU

Dans ces cases méthodiques où gisent, côte à côte, les outils qui ont un même objet, dont les cloisons séparent rigoureusement les instruments qui ne s'accommodent pas à la même besogne, la main de l'ouvrier saisit rapidement, sans tâtonnements, sans méprise, l'outil qu'il faut. Grâce à la théorie, le physicien trouve avec certitude, sans rien omettre d'utile, sans rien employer de superflu, les lois qui lui peuvent servir à résoudre un problème donné. (Duhem, 1906, I, 6)⁷.

Ces mots de Duhem décrivent la théorie physique idéale, et la manière dont cette théorie sert le physicien en lui fournissant l'ensemble des outils dont il a besoin pour agir sur le monde. De même que le plateau chirurgical fournit au chirurgien tous les instruments, et seulement ces instruments, dont il a besoin pour opérer, la théorie physique garantit que le physicien dispose de l'ensemble bien ordonné d'outils dont il a besoin pour “découper la nature suivant ses arêtes naturelles”. Afin que la théorie atteigne son but, rien de superflu ne doit y être inclus, pour que le physicien puisse saisir les ustensiles requis aussi rapidement que possible.

Comment distinguer cependant le superflu de ce qui pourrait s'avérer utile, sur ce plateau de principes, de lois et de quantités physiques que la théorie met à disposition du physicien ? La composition d'un plateau chirurgical est déterminée par la nature de la chirurgie pratiquée- nul besoin d'une scie sternale ou d'une fraise dentaire pour une appendicectomie ; au contraire, le chirurgien pourrait être distrait par la présence de ces outils, perdre un temps précieux de ce fait, ou pire, attraper l'un des deux par erreur. Un raisonnement similaire pourrait s'appliquer aux théories physiques : elles doivent inclure tout ce qui est nécessaire à l'accomplissement de leur but et exclure tout ce qui n'y contribue pas. Le fameux livre de Duhem, *La théorie physique : son objet, sa structure*, dont la citation ci-dessus est extraite, développe une ligne de raisonnement similaire. Ainsi que le titre l'indique, selon Duhem, l'objet et la structure d'une théorie doivent être pensés ensemble, et la structure des théories physiques définie par le but qui lui est assigné. À ses yeux, le rôle principal d'une théorie physique est de transformer un chaos de lois empiriques en

7. Duhem P., *La théorie physique. Son objet, sa structure*, Lyon, ENS éditions, 2016.

une classification parfaitement ordonnée de ces faits, qui permet au physicien d'accéder aisément à la connaissance accumulée à propos d'un domaine particulier. En d'autres termes, une théorie physique doit organiser efficacement cet amoncellement de connaissance qui, sinon, risquerait de se retrouver la prisonnière oubliée d'une multitude de lois empiriques réunies sans aucun ordre, comme peut se perdre la connaissance contenue dans des archives mal ou pas du tout classées. D'après Duhem, une théorie est avant tout un système de classement et ne doit pas viser à fournir une explication métaphysique du monde, c'est-à-dire à nous « mettre en contact avec la réalité cachée sous les apparences sensibles » (1906, 7). Puisqu'une théorie cherche à classer, c'est-à-dire à fournir une représentation économique d'un ensemble de lois empiriques, elle ne devrait rien inclure qui ne serve pas ce but. Par conséquent, elle ne devrait inclure aucune tentative de subsumer la physique sous la métaphysique ; non seulement parce que les assertions métaphysiques ne l'aident en rien à achever sa tâche et sont donc superflues, « attaché[e]s à la théorie comme un parasite », mais aussi parce que la partie explicative d'une théorie est trompeuse, contraignante, et contient « tout ce qui est faux dans la théorie et contredit par les faits » (33).

Qu'arrive-t-il cependant si l'on est en désaccord avec le but assigné aux théories physiques par Duhem ? Cela signifie-t-il que nos jugements divergeront également sur ce qui constitue une partie pertinente, utile de la théorie et ce qui est superflu ? La fonction d'une machine à coudre⁸ n'est pas sujette à controverse : elle sert à coudre, et chacune des propriétés ou éléments qui peuvent lui être retirés sans pour autant menacer cette capacité sont indéniablement superflus. Mais il n'y a aucun consensus sur ce qu'une théorie doit accomplir, et encore moins sur ce qui constitue une *bonne* théorie. Au contraire, durant la seconde moitié du xx^e siècle, les interprétations rivales de la mécanique quantique se sont multipliées précisément du fait du caractère polémique de ces deux questions. Si la question du but et de la structure d'une théorie sont aussi intimement reliées que l'affirmait Duhem, est-il possible que deux physiciens en désaccord sur ce qu'est une (bonne) théorie physique délimitent de la même

8. Cet exemple est tiré d'Ismaël J. et Van Fraassen B. C., « Symmetry as a guide to superfluous theoretical structure », *Symmetries in physics: Philosophical reflections*, 2003, 371-392.

manière le contenu physique d'une théorie et ce qui au sein de cette théorie n'est que superflu ?

Considérons par exemple ce qui a motivé le développement de multiples interprétations de la mécanique quantique. Les postulats de la mécanique quantique incluent l'équation de Schrödinger, qui décrit l'évolution dynamique de la fonction d'onde représentant l'état quantique d'un système. Lorsque cette loi est appliquée à un système typiquement quantique, c'est-à-dire préparé dans une superposition d'états et interagissant avec un instrument de mesure, l'équation linéaire de Schrödinger ne donne pas de solution unique, mais plutôt une superposition de différents états. Cette équation semble entrer en contradiction avec le fait que lorsqu'une mesure est effectuée, le système se trouve dans un état bien défini, et non pas dans une superposition d'états quantiques. Comment expliquer alors que l'état du système lors de la mesure ? Il y a trois principales façons de traiter ce problème, souvent appelé le problème de la mesure⁹ : l'une d'elles consiste à nier que la fonction d'onde qui décrit ce système en fournisse vraiment une description complète. La mécanique bohémienne, par exemple, ajoute à la fonction d'onde des variables cachées qui spécifient la position des particules à chaque moment, et la fonction d'onde détermine la vitesse de ces particules à l'aide d'une « équation-guide », ce qui explique l'état bien défini du système à tout moment. Une autre stratégie possible consiste à modifier la dynamique de la théorie. Les théories dites du « collapsus dynamique », par exemple, propose un mécanisme d'effondrement de la fonction d'onde qui met un terme à la linéarité de l'équation de Schrödinger. Au moment de la mesure, l'interaction entre le système et l'appareil de mesure fait que la fonction d'onde s'effondre (« collapse »), ou en d'autres termes, passe d'une superposition d'états à un état défini. Enfin, une autre possibilité est de considérer que la mécanique quantique fournit déjà une description complète et que la superposition d'états doit être prise au sérieux, tellement au sérieux à vrai dire que notre ontologie doit être révisée sur cette base. Selon l'interprétation des mondes multiples par exemple, la superposition de deux états ($\text{spin} \uparrow$ et $\text{spin} \downarrow$ pour une mesure du spin de deux électrons dans une expérience de Stern-Gerlach, par

9. Myrvold W., *Philosophical issues in quantum theory*, section 4, Stanford Encyclopaedia of Philosophy, 2016.

exemple) est en fait la description d'un univers contenant deux mondes, l'un de ces mondes mesurant \uparrow et l'autre \downarrow . Cela signifie que le processus de mesure a causé la division de l'univers en deux mondes ou deux branches, une pour chacun des éléments de la superposition. Considérons maintenant la structure de ces différentes interprétations, chacune d'elles adoptant une position épistémologique distincte en ce qui concerne la définition de ce que devrait être et ce que devrait accomplir une théorie scientifique. Du point de vue de l'interprétation de Copenhague ou du collapsus dynamique, les variables cachées ajoutées par les bohmiens sont dispensables. Après tout, les deux théories sont observationnellement équivalentes, ce qui suffit à montrer que l'on peut obtenir de la mécanique quantique toutes les conséquences observationnelles désirées sans pour autant avoir besoin de recourir à ces variables additionnelles :

La théorie de Bohm ajoute une position cachée bien définie que la particule possède à chaque moment, et notre ignorance de sa vraie valeur est exprimée dans une distribution de probabilités. Un bohmien peut insister sur le fait que cette variable est une véritable addition physique à son ontologie, afin de souligner que la théorie bohmiennne est physiquement distincte de la mécanique quantique traditionnelle. Un traditionaliste peut répondre, cependant, que la position des particules ne devient manifeste qu'au moment de la mesure, de telle sorte que la mécanique quantique standard peut affirmer que la position et sa distribution de probabilités ne se sont concrétisées qu'au moment de la mesure. Tout ce qu'un bohmien a fait est de projeter la position et la distribution de probabilités associée en arrière dans le temps jusqu'à la configuration initiale – une addition superflue puisque toute l'information théorique requise pour spécifier le résultat réel de la mesure était déjà pleinement encodée dans la fonction d'onde (Norton, 2003, 20, ma traduction)¹⁰.

Pour un bohmien, les variables cachées ne peuvent pourtant pas être considérées comme superflues : sans elles, la mécanique bohmiennne ne serait pas la théorie complète, pleinement déterministe, sans référence nécessaire à un observateur, à laquelle Bohm aspirait. De plus, le fait qu'une théorie telle que la mécanique bohmiennne soit disponible montre que l'indéterminisme de la mécanique standard et son flou

10. Norton John D., *Must Evidence Underdetermine Theory?*, 2003 [Preprint], <<http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/1257>> (accessed 2021-06-01).

lorsqu'il s'agit de préciser quelle règle dynamique s'applique à quels systèmes sont des *choix théoriques*, basés sur une conception spécifique de ce qu'est une bonne théorie et ne nous sont nullement imposés par les faits observés :

Pourquoi la théorie de l'onde pilote est-elle ignorée dans les manuels? Ne devrait-elle pas être enseignée, pas comme la seule interprétation possible, mais comme un antidote à la complaisance qui prédomine? Pour nous montrer que son flou, sa subjectivité, son indéterminisme, ne nous sont pas imposés par les faits expérimentaux, mais par un choix théorique délibéré? (Bell et al., 2001, 990)¹¹.

En d'autres termes, la possibilité même d'une théorie non-locale à variables cachées, ainsi que l'avait déjà souligné Bohm (1952, 66)¹², montre que l'hypothèse selon laquelle la fonction d'onde fournit une description complète du système ne s'impose pas à nous, comme le théorème d'impossibilité de von Neumann¹³ l'avait longtemps laissé penser. Bien au contraire, cette hypothèse repose sur un choix, et ce choix est ultimement fondé sur le fait de privilégier certaines caractéristiques théoriques.

Les différentes approches de la théorie quantique des champs qui ont été développées font l'objet d'un débat similaire, particulièrement entre la théorie « conventionnelle » et l'approche algébrique de Haag et Kaastler. D'une manière générale, le développement des méthodes axiomatiques en théorie quantique des champs étaient motivées par le problème des infinis, c'est-à-dire des calculs faisant apparaître des

11. Bell M., Gottfried K. et Veltman M. J. (eds.), *John S Bell on the Foundations of Quantum Mechanics*, World Scientific, 2001.

12. Bohm D. (1952), « A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables ». I. *Physical review*, 85 (2), 166.

13. Le théorème d'impossibilité de von Neumann (« no-go » theorem) montre qu'aucune théorie quantique à variables cachées ne peut être à la fois complète, au sens où tous les éléments de la réalité physique, c'est-à-dire tous les éléments dont la valeur peut être calculée avec certitude sans pour autant perturber le système, doivent avoir une contrepartie physique, et équivalente d'un point de vue de ses prédictions à la mécanique quantique. En d'autres termes, aucune théorie assignant une valeur précise à toutes les quantités observables d'un système ne peut faire les mêmes prédictions en ce qui concerne les résultats d'une expérience effectuée sur ce système que la mécanique quantique. Voir par exemple Stöltzner M., « What John von Neumann thought of the Bohm interpretation », in *Epistemological and experimental perspectives on quantum physics*, Dordrecht, Springer, 1999, p. 257-262.

intégrales divergeant à l'infini et menant à des résultats absurdes. Pour beaucoup, il ne peut exister de théories scientifiques qui soit mathématiquement incohérentes et se contredise elle-même, d'où la volonté de développer une interprétation de la théorie quantique des champs fondée sur des bases plus rigoureuses¹⁴. Mais l'approche algébrique est basée sur d'autres motivations, qui ont un impact direct sur la manière dont est analysée la structure de la théorie. Le principe de localité, l'un des principes centraux de la version algébrique de la théorie quantique des champs (AQFT), est l'idée que la totalité du contenu physique de la théorie se trouve dans le réseau (le « net ») d'observables, c'est-à-dire dans l'ensemble des algèbres d'observables associés à chaque région de l'espace-temps de Minkowski. En des termes plus simples, l'idée qui sous-tend ce principe est que, puisque toute expérience est forcément effectuée dans une région finie de l'espace-temps, les quantités physiques pertinentes devraient être celles qui sont accessibles à de telles mesures- les quantités locales définies dans ces régions finies-, et non les quantités globales telles que charge, énergie ou masse totales, définies sur la base de régions de l'espace-temps infiniment étendues. Les quantités non-observables devraient être considérées comme physiquement anodines, dans la mesure où elles ne peuvent être réduites aux notions physiques considérées comme significatives par Haag et Kaastler : celle d'un état physique, qui réfère à un ensemble de systèmes physiques ; et celle d'une opération, d'un appareil physique agissant sur l'ensemble (1964, 850). Ainsi, la théorie doit être locale dans un sens très précis : non seulement les observations doivent être des observations locales, mais elles doivent être locales au sens de détections localisées de particules par des appareils de détection. De même, Haag et Kaastler nient toute signification physique aux quantités définies dans une représentation concrète de l'espace de Hilbert, et ne donnent de signification qu'à la collection d'opérateurs définie par l'algèbre d'observables : « [de telles représentations ne] diffèrent [que] dans l'aspect global de leurs états mais cette différence n'est pas pertinente tant que nous ne nous

14. Voir le texte. Canonique d'Halvorson H. et Müger M. « Algebraic quantum field theory. *arXiv preprint math-ph/0602036*. Pour une introduction plus pédagogique», 2006; voir Wallace D., « Taking particle physics seriously: A critique of the algebraic approach to quantum field theory », *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 42 (2), 2011, 116-125.

intéressons qu'à des expériences effectuées dans des régions finies» (1964, 853, ma traduction). Si l'on admet qu'on ne peut mesurer que les valeurs moyennes d'un nombre fini d'observables à un degré de précision lui aussi fini, et puisque les représentations de Hilbert ne diffèrent qu'en ce sens inaccessible à nos instruments de mesure, alors le choix de la représentation ne fait aucune différence mesurable, et la structure de la théorie devrait se réduire entièrement à celle du réseau d'observables plutôt qu'à sa représentation concrète dans un espace de Hilbert¹⁵.

Les motivations qui sous-tendent le développement de la version algébrique de la théorie quantique des champs trouvent leurs racines dans l'opérationnalisme de Haag et Kastler, qui considèrent la théorie quantique des champs comme une théorie statistique à propos d'évènements de détection locaux. Cet opérationnalisme, en retour, contribue à modéliser les ressources dont leur version algébrique dispose. Cependant, si l'on pense que l'objet d'une théorie physique est de décrire le monde tel qu'il est, et non pas seulement tel qu'il apparaît à nos opérations de mesure, alors le statut des propriétés globales devient plus polémique. De la même façon, si l'on considère que restreindre le sens d'«observable» à celui de «détectable» revient à appauvrir le concept, ou si l'on attribue à «local» un sens autre que celui de «détection localisée par un appareil de détection», alors la structure de la théorie ne sera pas analysée de la même manière en termes de ce qu'elle contient de non pertinent physiquement. De nouveau, les différentes versions de la théorie quantique des champs nous offrent un cas où les désaccords sur le rôle d'une théorie physique se voient reflétés dans le débat sur la structure minimale qu'elle devrait adopter.

15. Ce paragraphe, plus technique que le reste du chapitre, peut être ignoré sans mettre en péril la compréhension générale du point à démontrer. Nous espérons toutefois qu'il pourra intriguer le lecteur curieux et le pousser à s'intéresser aux motivations qui ont conduit à une multiplicité d'interprétations différentes à la fois de la mécanique quantique et de la théorie quantique des champs, une question philosophique qui mérite clairement plus d'attention. Pour le lecteur qui voudrait en savoir davantage, voici quelques ressources pour comprendre les fondamentaux de l'AQFT : Ruetsche L., «Interpreting quantum field theory», *Philosophy of Science* 69, 2002, 348-378 ; Fraser D., «The fate of "particles" in quantum field theories with inter-actions», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, 2008, 841-859, Lupher T., «The limits of physical equivalence in algebraic quantum field theory», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 69 (2), 2018, 553-576.

Sklar, en 2000, critiquait cette attitude naturaliste qui consiste à soutenir qu'il n'y a nul besoin de considérer les théories scientifiques depuis une perspective philosophique, puisque les théories peuvent être comprises indépendamment de toutes considérations épistémologiques :

D'après cette suggestion, les théories scientifiques sont complètes et suffisantes en elles-mêmes, et elles nous révèlent d'elles-mêmes tout ce que nous avons besoin de savoir à propos de leur « signification » ou « interprétation ». Depuis ce point de vue, le désir philosophique pérenne d'analyser la signification d'une théorie et de la reformuler ou de la reconstruire sur la base de considérations philosophiques germant dans la critique philosophique est aussi vain que la poursuite de feux follets. Cependant, comme nous l'avons vu, il y a quelque chose de malavisé dans cette suggestion de traiter les théories physiques indépendamment de ces arguments critiques, basés sur des considérations épistémiques, qui sont si familières à la philosophie empiriste. Car la construction, la justification, la reconstruction de théories effectuées au fur et à mesure des progrès de la science sont elles-mêmes portées par ce type de raisonnement que nous considérons de manière paradigmatique comme philosophique. (2000, 32, ma traduction)¹⁶.

Sklar se concentre sur les cas où une théorie est reconstruite à travers l'élimination ontologique d'une structure estimée inutile dans la précédente formulation de la théorie. De tels projets de reconstruction se trouvent à chaque tournant de l'histoire des sciences, motivés par une variété de raisons – parmi elles, le désir de reformuler rétroactivement et de réhabiliter de vieilles théories abandonnées (telle que la théorie newtonienne reconstruite par Cartan sur la base de la géométrie différentielle moderne) ; le désir de retirer les artefacts qui pourraient générer des difficultés conceptuelles ou mathématiques, ou bien encore celui de fournir une interprétation métaphysique claire d'une théorie dont la signification physique est problématique. Dans tous ces cas, la reconstruction d'une théorie repose sur l'élimination de toute structure superflue, basée sur des considérations typiquement philosophiques et non physiques : la question de savoir si les termes théoriques correspondants à des entités non-observables devraient être excisés des théories scientifiques, celle de savoir si une théorie devrait se restreindre à ne décrire que les aspects observables et locaux

16. Sklar L., « Theory and truth: Philosophical critique within foundational science », Oxford, Oxford University Press, 2000.

de l'espace-temps plutôt que ses aspects globaux et non-observables, pour n'en citer que deux. Ainsi, la (re)construction de théories repose toujours finalement sur des postulats épistémiques qui doivent être rendus explicites, reconnus et pris en compte lorsque nous analysons une théorie afin de déterminer ce qui relève d'une structure physiquement signifiante et ce qui ne l'est pas.

Pourquoi l'absence d'un point de vue neutre pour diagnostiquer la présence de surplus structurel devrait-elle nous inquiéter? Parce que la question de déterminer ce qui constitue une structure additionnelle, dispensable, un surplus structurel purement mathématique, sans contrepartie physique, n'est pas seulement importante pour la reconstruction de théories, mais joue également un rôle absolument central dans le choix entre théories empiriquement équivalentes. En effet, les stratégies les plus fréquemment utilisées pour sortir de ces cas d'indétermination entre deux théories dont les prédictions sont les mêmes, bien qu'offrant différentes images du monde, présupposent chacune au moins implicitement qu'il est possible de départager sans difficultés l'essentiel du superflu au sein d'une théorie scientifique. Le problème de la sous-détermination des théories par les données empiriques, c'est-à-dire le problème du choix entre théories faisant les mêmes prédictions observables mais offrant des descriptions de ce monde différentes, est particulièrement pressant aujourd'hui. Considérez l'exemple du fameux accélérateur de particules Large Hadron Collider (LHC). Du fait qu'aucune physique nouvelle n'a été découverte dans les plus récents cycles du LHC, il n'y a pas d'indice permettant de guider la physique vers une possible théorie future, surpassant nos théories actuelles. Les données qui pourraient révéler de nouveaux phénomènes à expliquer sont soit absentes, soit extrêmement difficiles à collecter. Par conséquent, les théories ou modèles rivaux qui ont été développés sont également supportés par les données connues, sans que la possibilité de découvrir de nouvelles données empiriques permettant de les départager soit encore très claire. Beaucoup de physiciens se tournent de ce fait vers des stratégies précédemment façonnées par les philosophes, parmi elles le recours aux vertus non-empiriques des théories ou la stratégie de l'équivalence théorique. Cependant, beaucoup ces stratégies reposent sur la présupposition implicite selon laquelle il existe une perspective purement scientifique, indépendante de toutes prises de position philosophiques, à partir de laquelle la structure de théories rivales puisse être analysée, interprétée et comparée. La stratégie de

l'équivalence théorique, comme nous l'avons dit, consiste à affirmer que deux théories supposées rivales ne sont distinctes qu'en apparence, et ne constituent en fait qu'une seule et même théorie, dans la mesure où leurs différences n'ont aucune conséquence sur le contenu physique de la théorie. Une telle stratégie présuppose qu'il existe un point de vue neutre à partir duquel un critère de pertinence physique – un critère permettant de déterminer ce qui réfère à une propriété, relation ou entité physique dans le monde, et donc de délimiter le contenu physique de la théorie et de le distinguer de ce qui n'est que purement mathématique, purement notationnel – peut être formulé qui s'appliquerait indifféremment aux deux théories; et qu'un tel critère serait en mesure de capturer tout et seulement ce qui revêt une importance physique, permettant ainsi de comparer ces deux structures théoriques du point de vue de leur contenu physique. De la même façon, privilégier l'une de ces théories sur la base de ses vertus théoriques présuppose qu'une comparaison neutre peut être faite entre leur simplicité ou leur pouvoir explicatif. Toutefois, même en mettant de côté le vague d'une notion telle que celle de simplicité, toutes les interprétations de la mécanique quantique que nous avons déjà mentionnées pourrait se targuer d'être plus simple que les autres, sans pourtant n'avoir aucune chance de convaincre ses rivales. La mécanique bohémienne est plus simple au sens de plus intelligible, dans la mesure où elle est plus directement reliée à nos concepts physiques classiques; l'interprétation des mondes multiples n'a besoin que d'une seule loi dynamique et peut se dispenser de la règle de la réduction de la fonction d'onde; l'interprétation standard est plus simple d'un point de vue ontologique, puisqu'elle n'a aucun besoin d'introduire une infinité de mondes inobservables ou des variables cachées associant une position à chaque particule¹⁷.

Moins souvent débattue, la stratégie consistant à privilégier une théorie du fait de son plus grand pouvoir explicatif présuppose également que la structure des théories rivales peut être élucidée d'une manière qui satisfasse les deux parties concernées. Supposons l'existence d'un ensemble de données empiriques $e_i (i = 1, 2, \dots, n)$ et de deux théories T et T' . Supposons à présent que l'ensemble e_i peut être entièrement déduit des axiomes et lois dérivées de ces axiomes postulés

17. Parmi ces exemples, seuls les deux derniers font usage du concept de simplicité d'une manière qui nécessite de déterminer ce qui est superflu d'un point de vue physique et ce qui ne l'est pas.

par T, alors que dans le cas de T' un sous-ensemble (e_3, e_4) nécessite l'addition d'un postulat supplémentaire. Ce postulat additionnel est introduit de manière *ad hoc*, dans le simple but de recouvrer (e_3, e_4). Bien que T et T' rendent compte des mêmes faits, T semble être en meilleure position : alors que T prédit e_3 , T' ne fait que les recouvrer *a posteriori*, par l'ajout d'un postulat qui n'a aucune autre justification théorique que de recouvrer ces données empiriques. Les défenseurs du modèle de matière noire froide, par exemple, insistent souvent sur son plus grand pouvoir explicatif que son rival MOND (MODified Newtonian Dynamics, ou dynamique newtonienne modifiée). Grâce à l'ajout de matière noire, n'interagissant que gravitationnellement, le modèle de matière noire fournit une explication unique pour une multitude d'anomalies observées à différentes échelles – l'abondance de deutérium, les anisotropies du fonds diffus cosmologique, les résultats de Zwicky pour le Coma Cluster (1933, 1937), le Bullet Cluster, la vitesse rotationnelle anormale des galaxies constituent des anomalies qui disparaissent tous avec l'hypothèse de la présence de matière noire¹⁸. Le pouvoir explicatif du modèle de matière noire est réellement impressionnant, au vu de la diversité des échelles et du nombre d'anomalies que cette seule hypothèse permet de résoudre. Ce pouvoir explicatif a-t-il pour autant la moindre chance de convaincre la partie opposée, alors que les défenseurs de MOND considèrent la matière noire comme un simple artefact, résultant de l'application de la dynamique newtonienne à des échelles à laquelle elle n'a jamais été testée, ou comme une addition superflue, comme un « éther moderne¹⁹ » qui non seulement n'est pas requis pour recouvrer la phénoménologie des galaxies telle qu'observée mais en plus masque le fait qu'une révision de nos lois gravitationnelles est nécessaire ? Le recours au pouvoir explicatif du modèle de matière noire peut-il réellement apporter une réponse au débat opposant ces deux théories, lorsqu'un des postulats permettant de

18. Pour une présentation détaillée et très accessible des données empiriques qui justifient le postulat de la matière noire, voir Sanders R. H., « The dark matter problem: a historical perspective », Cambridge, Cambridge University Press, 2010 ; et De Swart J. G., Bertone G. et van Dongen J., « How dark matter came to matter », *Nature Astronomy*, 1 (3), 2017, 1-9.

19. Voir par exemple McGaugh, S. S. (2015), « A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND », *Canadian Journal of Physics*, 93 (2), 250-259.

sauver autant sinon davantage de phénomènes d'un côté est considéré comme n'ayant aucune signification physique de l'autre ?

III. TROIS TYPES DE STRUCTURES NON-PHYSIQUES

Ainsi que nous pouvons le constater au vu des exemples étudiés jusqu'ici, l'une des principales difficultés du débat lié à la définition d'un critère de signification physique est la généralité du concept de surplus structurel, ou plus exactement, la diversité de concepts subsumés sous cette seule idée. Au moins trois concepts distincts sont réunis sous cette appellation : le concept de structure explicitement postulée mais superflue au sens où elle échoue à capturer quelque chose dans le monde (en d'autres termes, elle postule quelque chose qui n'existe pas pour commencer ; comme Vulcain, ou l'éther lorentzien selon Einstein) ; celui de structure qui constitue un surplus mathématique au sens où trop a été importé, involontairement, depuis le modèle mathématique vers la théorie physique ; enfin les artefacts mathématiques qui résultent de ce surplus structurel, ou d'idéalisations et de simplifications parfois nécessaires pour la représentation mathématique d'un système. Dans ce qui suit, nous revenons sur ces trois types de structure non-physique et nous évaluons l'efficacité des outils philosophiques qui ont été suggérés jusqu'ici afin de les éliminer.

1. *Structure Additionnelle*

L'idée de structure additionnelle et dispensable est surtout présente dans deux contextes : d'une part lorsque deux théories se proposent de résoudre le même problème, l'une par l'ajout de propriétés ou d'entités à leur contenu initial, l'autre par la révision d'(au moins) une de ses lois ; d'autre part, dans l'histoire de la structure de l'espace-temps qui a été considérée nécessaire pour expliquer le comportement dynamique des objets. Le second scénario a été discuté par de nombreux auteurs, notamment par Ismaël (à paraître, 6-10)²⁰, avec une clarté avec laquelle je ne prétendrai pas rivaliser. L'histoire de la physique est pleine

20. Ismael J., « Symmetry and Superfluous Structure: Lessons from history and tempered enthusiasm », in *The Routledge Companion to the Philosophy of Physics*, Knox Eleanor and Wilson Alastair (eds), New York, Routledge, 2021.

d'exemples du premier type, de cas où l'approche alternative, consistant à réviser une loi, s'avère fructueuse et se trouve ainsi en position de blâmer son adversaire pour avoir postulé une structure finalement superflue. Considérez par exemple, la théorie de la relativité d'Einstein et celle de Lorentz. Toutes deux acceptent des notions telles que dilatation du temps ou contraction de la longueur. Dans la théorie de Lorentz, la lumière est transportée par un medium, l'éther, qui définit ce qu'est le repos; la contraction des longueurs et la dilatation du temps sont des effets réels par rapport à l'éther. Dans celle d'Einstein, la contraction des longueurs et la dilatation du temps ne sont pas réelles, mais de simples apparences qui dépendent du référentiel choisi. Nier que la distinction entre repos et mouvement inertiel ait le moindre fondement, et postuler que la lumière se propage à vitesse constante, sont des conditions jointes suffisantes pour produire une théorie empiriquement adéquate de l'électrodynamique des corps en mouvements, ce qui fait par conséquent de l'éther une notion superflue :

Ces deux postulats suffisent entièrement pour former une théorie simple et cohérente de l'électrodynamique des corps en mouvement à partir de la théorie maxwellienne des corps au repos. Il sera démontré que l'introduction d'un « éther luminifère » est superflu, puisque selon les conceptions que nous développerons, nous n'introduirons ni un « espace absolument au repos » muni de propriétés spéciales et ni n'associerons un vecteur vitesse à un point où des phénomènes électromagnétiques se déroulent (1905, 9, ma traduction)²¹.

Ainsi, la théorie d'Einstein pourrait être préférée pour sa simplicité ontologique. Cependant, du point de vue lorentzien, l'éther a un rôle physique à jouer. Les ondes sonores sont des vibrations de l'air; les ondes lumineuses des vibrations de l'éther-le comportement ondulatoire de la lumière n'a pas de sens sans un medium matériel qui la transporte. Ce type d'argument basé sur la simplicité de la théorie d'Einstein pourrait-il alors convaincre un défenseur de la théorie de Lorentz? Ou seulement conforter un défenseur de celle d'Einstein dans son choix? De plus, serait-il possible d'établir l'équivalence théorique de ces deux théories sans nier la pertinence physique de l'éther? Dans ce cas précis, l'entité ou la propriété superflue n'est considérée comme telle

21. Einstein A., « On the electrodynamics of moving bodies », *Annalen der physik*, 17 (10), 1905, 891-921.

que parce qu'une alternative a été développée, et que cette alternative est considérée fructueuse. Mais il n'y a pas de critère qui permettrait de le diagnostiquer autre qu'un jugement rétroactif, informé par le succès de l'alternative.

Les cas d'entités additionnelles *contra* lois révisées sont encore plus difficiles à manier quand l'entité supplémentaire est par principe, au moins dans le contexte de son introduction, inobservable. Ce fut par exemple le cas en ce qui concerne la rivalité entre les quarks et les paraquarks dans les années 1960. En 1964, une particule a été observée dans le laboratoire national de Brookhaven qui violait le principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux fermions ne peuvent pas occuper le même état. Cette particule, nommée Ω^- , est un baryon, fait de trois quarks. Les quarks, puisqu'ils ont un spin demi-entier, sont supposés se comporter comme des fermions et satisfaire le principe de Pauli. Pourtant, les trois quarks paraissaient occuper le même état quantique. Deux réponses ont été suggérées pour résoudre ce qui était désormais convenu d'appeler le « problème statistique ». L'une d'entre elles consistait à abandonner le principe de Pauli et le remplacer par une nouvelle version plus générale, incluant un nouveau type de particules, les paraparticules, n'obéissant pas la symétrie parfaite des bosons et des fermions, mais une symétrie partielle. Dans le cas des parafermions d'ordre 3 par exemple, la fonction d'onde peut être symétrique jusqu'à 3 fermions. L'autre réponse consistait à ajouter un degré de liberté caché aux quarks, dans le but d'antisymétriser la fonction d'onde par rapport à ce nouveau degré de liberté, la charge de couleur. Que les para-quarks ou les quarks avec charge de couleur eussent été la bonne réponse face à cette violation du principe de Pauli, les mêmes phénomènes s'en seraient suivis : le spectre baryonique aurait été le même, de même que le taux de désintégration du pion neutre, ou le rapport entre la section efficace d'annihilation des paires électrons-positrons et celle des paires de muons (Greenberg *et al.*, 1993, 11-12²²). D'une certaine façon donc, aucune observation ne soutenait l'idée que le monde est fait de parabosons et de parafermions et non de simples bosons et fermions. D'un autre côté, depuis la perspective des quarks avec charge de couleur, les parastatistiques étaient tout à fait superflues : les mêmes phénomènes pouvaient être expliqués sans avoir besoin de recourir à

22. Greenberg O. W., « Color, from baryon spectroscopy to qcd. *arXiv preprint hep-ph/9301207* », 1993.

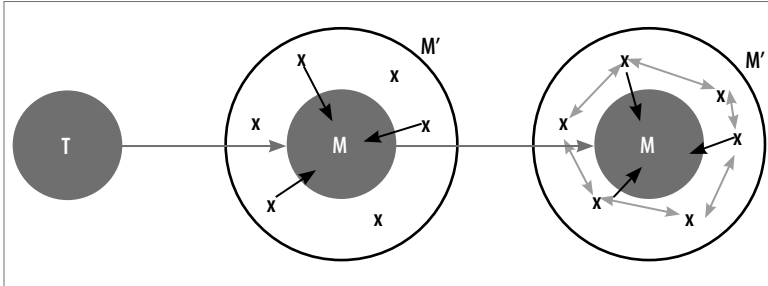
une nouvelle sorte de particules. Pourtant, la charge de couleur, ce degré de liberté caché, est par principe inobservable, du fait que les systèmes de quarks une fois liés deviennent « incolores » et qu'aucun quark libre ne peut par principe être observé. Dans un tel contexte, comment départager ces deux modèles ? Quelle raison avancer pour privilégier un modèle plutôt que l'autre ? Historiquement, les paraquarks ont été abandonnés parce que jugés « obscurs » et comportant des propriétés « désagréables ». Plus tard pourtant, ce fut la stratégie de l'équivalence théorique qui fut choisie afin de justifier cet abandon. D'après cette ligne de raisonnement, les parastatistiques sont superflues au sens où elles ne sont qu'une variante notationalle du modèle des quarks avec charge de couleur, et que par conséquent, les deux descriptions sont interchangeables- une thèse surprenante si l'on se souvient que ce dernier a pu éventuellement être unifié avec la force forte et l'autre non. Comme nous pouvons le constater au vu de la discussion précédente cependant, une telle preuve ne pouvait être établie qu'à la condition de n'accorder aux parastatistiques aucune signification physique. Ainsi, de nouveau, l'idée que les paraparticules sont superflues et dispensables est formulée du point de vue du « gagnant », du modèle de quarks avec charge de couleur. Existe-t-il une manière de diagnostiquer la présence de structure superflue depuis un point de vue neutre, qui évite de réécrire l'histoire depuis la perspective du vainqueur ? Autrement dit, peut-on déterminer ce qui est dans une théorie physique est superflu depuis un point de vue externe, neutre, libre de toute prise de position philosophique, et de formuler un critère de pertinence physique qui ne soit pas formulé dans un vocabulaire favorisant l'une des théories au détriment de l'autre, qui n'imposerait pas ses croyances philosophiques à l'autre partie ? Y a-t-il un moyen que MOND par exemple puisse fournir un critère objectif et satisfaisant les deux parties selon lequel la matière noire est réellement une addition superflue ?

2. *Surplus structurel*

Un autre type de structure non-physique est discuté dans la littérature, celui de « surplus structurel » développé par Redhead (1975)²³. Redhead considère la formalisation mathématique d'une théorie

23. Redhead M. L., « Symmetry in intertheory relations », *Synthese*, 1975, p. 77-112.

comme l'opération consistant à intégrer une théorie physique dans un modèle mathématique : une théorie T peut être intégrée dans une structure mathématique M si et seulement s'il existe un isomorphisme (une correspondance biunivoque préservant la structure de ces deux théories) entre T et la sous-structure M de M' . Ainsi, une fois intégrée, la théorie physique hérite d'un surplus, correspondant au complément de M dans M' , qui ouvre la possibilité de relations non-univoques entre les éléments du modèle mathématique et la théorie physique. De ces relations non-univoques a été dérivée l'idée que le surplus structurel se manifeste par l'émergence de multiples représentations, disponibles pour représenter un même état physique. Ce concept de surplus structurel comprend à la fois les relations entre les éléments importés depuis M' et les relations entre éléments appartenant à M' . Autrement dit, la théorie physique non seulement hérite d'états mathématiques superflus, mais ces derniers ouvrent la porte à un ensemble de nouveaux éléments, *via* ces premiers éléments importés. Le schéma ci-dessous montre comment de plus en plus d'éléments peuvent être importés depuis M' vers T .



Ainsi que ce que nous avons appelé «structure additionnelle», ce surplus est dispensable, dans la mesure où les mêmes phénomènes pourraient être décrits sans y avoir recours. En revanche, cette fois, cette structure n'est pas nécessairement initialement interprétée comme ayant un sens physique, mais peut avoir été importée involontairement et interprétée ensuite comme physique par erreur. Bien qu'il n'y ait, à ma connaissance, aucun exemple non polémique de surplus structurel, l'un de ceux qui reviennent le plus souvent est -de nouveau! – celui des paraparticules. Une telle description des paraparticules en tant que cas de surplus structurel au sens de Redhead peut être trouvée

chez des auteurs comme Massimi (2005)²⁴, French et Krause (2006)²⁵, French et Rickles (2003)²⁶, ou bien encore Bueno et French (2018)²⁷. Considérez par exemple le paragraphe suivant :

Ceci est un exemple de «surplus structurel», si l'on s'en réfère à la terminologie de Redhead : il n'y a pas de correspondance univoque entre une structure physique P (par exemple le comportement statistique de particules quantiques indiscernables) et une structure mathématique M (par exemple, les statistiques de Bose-Einstein et de Fermi-Dirac). Au lieu de cela, P est représenté par une structure plus large (par exemple celle d'invariance sous permutation), d'où la présence d'un surplus structurel M-n (ici, les vecteurs multidimensionnels, ou «generalized rays») dans la représentation de P par M. (Massimi, 2005, 178, ma traduction).

Cette analyse de la manière dont un surplus structurel peut apparaître dans une théorie ne fournit pas pour autant de critère permettant de déterminer ce qui constitue un cas de surplus. Pourtant, pour Redhead, ce concept justifie également l'introduction d'un principe méthodologique, selon lequel toute théorie qui n'exhiberait pas de surplus structurel devrait être préférée à ses rivales, *et ceteris paribus*. Ce principe joue d'ailleurs un rôle crucial dans la critique par Redhead et Teller de la thèse selon laquelle les particules quantiques ont une « individualité transcendantale » – en d'autres termes, la thèse selon laquelle les particules quantiques appartenant à la même famille ont une individualité bien qu'elles possèdent exactement les mêmes propriétés (1991)²⁸. D'après Redhead et Teller, l'utilisation de labels pour faire référence aux particules quantiques que pourtant rien ne distingue repose sur une thèse métaphysique implicite, selon laquelle les particules quantiques peuvent être considérées comme des individus. Leur raisonnement procède de la manière suivante : afin de construire un espace de configuration pour un système de deux

24. Massimi M., « Pauli's exclusion principle: The origin and validation of a scientific principle », Cambridge, Cambridge University Press, 2005.

25. French S. et Krause D., « Identity in physics: A historical, philosophical, and formal analysis », Oxford, Oxford University Press, 2006.

26. French, S. et Rickles D., « Understanding permutation symmetry », *Symmetries in physics: Philosophical reflections*, 2003, 212-238.

27. Bueno O. et French S., « Applying mathematics: Immersion, inference, interpretation », Oxford, Oxford University Press, 2018.

28. Redhead M. et Teller P., « Particles, particle labels, and quanta: the toll of unacknowledged metaphysics », *Foundations of Physics*, 21 (1), 1991, 43-62.

particules identiques, nommons les 1 et 2, il faut d'abord construire un espace de Hilbert pour chaque particule, malgré leur indiscernabilité, puis prendre le produit tensoriel de chacun de ces espaces de Hilbert. Dans l'espace de configuration ainsi obtenu, chaque vecteur unidimensionnel correspond à un état quantique et différents vecteurs correspondent à différents états. Il est donc présupposé lorsqu'on mesure l'observable A dont les valeurs propres peuvent être a ou b , qu'un vecteur associant la valeur propre a à 1 et la valeur b à 2, représente un état quantique distinct de celui qui associe a à 2 et b à 1. D'après ces auteurs, la thèse de l'individualité transcendantale fait partie intégrante, bien qu'implicite, de ce formalisme. Mais cette thèse métaphysique a des conséquences fâcheuses, car l'espace de Hilbert obtenu par produit tensoriel est trop large et contient des vecteurs non-symétriques et d'autres partiellement symétriques qui ne correspondent aucun comportement d'aucune particule observée jusqu'ici. Ainsi, du fait de ce postulat métaphysique inavoué, la mécanique quantique hérite d'un surplus structurel qui doit être excisé si possible. D'où l'argument de Redhead et Teller, qui défendent un formalisme alternatif – le formalisme de l'espace de Fock – qui selon eux ne présente pas un tel surplus et doit par conséquent être privilégié.

Mais de nouveau, comment pouvons-nous déterminer ce qui constitue un surplus en ce sens ? La multiplicité des représentations mathématiques disponibles pour représenter un seul et même état physique ne peut pas être une condition suffisante pour détecter un surplus structurel, car cette condition s'applique à beaucoup de situations qui ne correspondent pas du tout à ce à quoi il est fait référence par «surplus structure». Un même système peut être décrit via des coordonnées polaires ou cartésiennes, en fonction du système de coordonnées qui offre la représentation la plus commode pour le calcul à effectuer. L'état physique décrit dans les deux cas est clairement le même, bien que deux représentations mathématiques distinctes puissent être utilisées. De même, une quantité peut être mesurée à l'aide de différentes unités de mesure. La «rayabilité» d'un minéral peut être mesurée sur une échelle de 1 à 10, mais aussi de 2 à 11, ou de 21 à 30 (Redhead, 2003)²⁹. Le critère suggéré pour diagnostiquer la présence de surplus structurel inclurait ces cas qui ne reviennent pourtant qu'à utiliser différents standards de mesure. Serions-nous pour autant enclins à considérer ces différents standards de la même façon que

29. Redhead M., «The interpretation of gauge symmetry», in *Ontological aspects of quantum field theory*, 2002, p. 281-301).

les parastatistiques? Serions-nous vraiment enclins à affirmer que, de même que les parastatistiques n'ont pas de contrepartie physique dans le monde réel, différents systèmes de coordonnées ne capturent rien de réel? Plus important encore, cette tentative de définition du surplus structurel n'explique pas ce qui constitue un seul et même état physique. À l'époque de la rivalité entre quarks et paraquarks, beaucoup pensaient que ces deux modèles étaient interchangeable. Néanmoins, ceux parmi les physiciens qui ont pris la possibilité de l'existence de paraparticules au sérieux et ont par conséquent développé ce modèle sont parvenus à montrer que les parafermions pourraient violer le principe de Pauli d'une façon qui puisse être détectée, par exemple en observant les lignes spectrales d'atomes dans lesquels des électrons cascaded vers un état déjà occupé. Dans ce scénario particulier, les fermions et les parafermions ne décrivent clairement pas la même situation physique. Comment savoir alors ce qui constitue un surplus structurel à moins d'avoir déjà décidé que l'une des deux représentations est superflue? Comment utiliser ce principe méthodologique de Redhead et Teller afin de fonder notre choix entre deux théories?

3. *Artefacts et Robustesse*

Le troisième concept de structure non-physique que nous souhaitons analyser est celui d'artefacts. De même que le surplus structurel, les artefacts ne sont pas explicitement, volontairement postulés en réponse à une anomalie mais importés au sein de la théorie *via* un choix spécifique de modélisation dont les conséquences ne sont ni parfaitement entrevues ni comprises. Les artefacts sont habituellement le résultat d'idéalisations ou de simplifications faites dans le but de construire un modèle ou une théorie et sont, de manière surprenante, rarement discutés dans le contexte de la physique théorique, malgré de récents exemples d'artefacts en Relativité Générale et l'usage qui en a été fait afin de contraindre le choix entre modèles rivaux. Un tel exemple peut être trouvé dans le débat sur les singularités qui s'est produit dans le développement de la relativité générale. Comme le résume Earman (1999, 241)³⁰, beaucoup de cosmologistes dans les années 1930 considéraient les singularités de l'espace-temps comme pathologiques, résultant

30. Earman J., « The Penrose-Hawking singularity theorems: History and implications », *The expanding worlds of general relativity*, 7, 1999, 235-270.

des symétries irréalistes sur lesquelles les modèles cosmologiques de type Friedman-Lemaitre-Roberts-Walker sont basés. Les théorèmes sur les singularités de Penrose-Hawking ont cependant montré que l'incomplétude³¹ géodésique n'est pas typique des modèles FLRW, mais vaut pour une classe d'espace-temps bien plus générale, basée sur de plus faibles présuppositions³². Pourtant, une théorie de la gravité quantique débarrassée de ces singularités est toujours considérée comme préférable à ses rivales, toutes choses étant égales par ailleurs.

Pourtant, les théorèmes de Penrose-Hawking peuvent être interprétés comme une preuve de la robustesse de ces singularités, puisque l'incomplétude géodésique est observée pour une classe d'espace-temps plus générale qu'initialement pensé, ce qui signifie qu'il ne dépend pas des symétries spécifiques des modèles FLRW et ne constitue donc pas un artefact de ces symétries. Il est d'usage, dans différentes disciplines scientifiques, d'utiliser l'analyse de robustesse pour déterminer si les prédictions extraites d'un modèle sont d'authentiques prédictions ou des artefacts résultant des idéalizations dont le modèle dépend. Brièvement résumée, l'analyse de robustesse consiste à examiner une variété de modèles, reposant sur différentes présuppositions ou idéalizations, à la recherche de propriétés robustes, c'est-à-dire de propriétés qui valent pour tous ces modèles malgré leurs différences et ne dépendent donc pas de ces simplifications. Cette méthodologie est pourtant problématique pour au moins deux raisons. Premièrement, elle n'est d'aucune aide lorsque les idéalizations responsables de l'introduction d'artefacts sont inévitables. Ce cas arrive bien plus souvent, pourtant, qu'il n'y paraît. Considérez par exemple le cas d'ambiguïté référentielle créé par l'indiscernabilité des particules en mécanique quantique. Le fait qu'il

31. Une singularité de l'espace-temps peut être conçue comme l'endroit où la courbure de l'espace-temps devient infinie. Cependant, en Relativité Générale, une telle définition est trompeuse, car les équations de champs d'Einstein définissent l'espace-temps et ne s'appliquent plus à une courbure infinie. Il est donc préférable de les considérer comme des points manquants dans cet espace-temps, qui sont révélés par les trajectoires de particules qui se terminent avec ces singularités- ce qu'on appelle des géodésiques incomplètes ou inachevées.

32. Il suffit de présupposer certaines conditions d'énergie minimale, trivialement vérifiée, et une surface piégée pour qu'une singularité devienne inévitable pour toute solution générique aux équations de champs d'Einstein. Une surface piégée est une surface vers l'intérieur de laquelle toutes les courbes de type lumière sont attirées, ou en d'autres termes toute particule dans le voisinage de cette surface sera attirée.

soit fait référence à ces particules de manière individuelle en y apposant un indice ne pose aucun problème lorsqu'il s'agit de décrire un système de particules appartenant à des familles distinctes. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de particules de la même famille, cette référence individuelle crée une ambiguïté : ces indices créent des distinctions qui ne trouvent de justification dans aucune des ressources que la mécanique quantique standard a à sa disposition, puisque ces particules ont exactement les mêmes propriétés (charge, masse, etc.). L'usage de ces indices a pourtant d'importantes conséquences : étant donné la nature linéaire des lois que les états quantiques satisfont, il est très facile de construire, à partir de deux états même artificiellement distingués, une infinité d'états mathématiques. Parmi ces états artificiellement construits se trouvent ceux décrivant les paraparticules, qui constituent un exemple d'artefacts produit par cette ambiguïté référentielle. Nous pourrions donc affirmer, ainsi que l'ont fait Redhead et Teller (1991), que passer du formalisme de Hilbert au formalisme de Fock est suffisant pour faire disparaître cette difficulté. Cependant, bien que les particules ne soient pas directement labellisées dans la représentation de Fock, l'espace de Fock est obtenu à partir du produit tensoriel des espaces individuels de Hilbert, qui contiennent déjà ces paraparticules. Comment l'analyse de robustesse peut-elle aider à éliminer les artefacts dans de tels cas ? Plus important encore, devrait-on vraiment tenter de s'en débarrasser si leur introduction est due à une simplification indispensable, ou devrait-on plutôt déterminer leur source afin de les neutraliser ensuite dans les cas opportuns ? En somme, l'analyse de robustesse ne constitue pas toujours une réponse possible, ni une réponse appropriée. Les philosophes doivent développer de nouveaux outils pour identifier les artefacts ; particulièrement si, comme tel est le cas aujourd'hui, l'absence d'artefacts est considérée comme une raison de préférer un modèle à un autre.

Au-delà du caractère « non-physique » de ces trois types de structure, les caractéristiques qu'elles ont en commun sont les suivantes : 1) le fait qu'elles soient toutes accompagnées d'une injonction méthodologique selon laquelle une théorie ne contenant aucune structure dispensable, superflue est préférable ; 2) l'absence d'un critère ou d'une méthode qui permettrait d'identifier de manière univoque ce qui constitue une structure superflue. Le lecteur ne sera pas surpris de lire qu'au vu de ce qui précède, je doute qu'un critère universel puisse être trouvé, au moins dans les deux premiers cas. Si la position épistémologique que

L'un adopte à propos de ce qui définit une bonne théorie physique est le juge ultime de ce qui constitue une structure pertinente d'un point de vue physique et de ce qui ne l'est pas, alors il n'y a pas de critère unique et neutre qui puisse être formulé. Pourtant, comme nous l'avons vu plus haut, de multiples stratégies supposées permettre de choisir entre théories empiriquement équivalentes présupposent que la structure de théories rivales puisse être comparée en ces termes. Cette présupposition, ainsi que les stratégies qu'elle sous-tend – celle de l'équivalence théorique et des vertus théoriques –, peut avoir des conséquences fâcheuses lorsqu'il n'est pas démontré au préalable qu'un critère de pertinence physique s'appliquant indifféremment aux deux théories puisse être utilisé. Nous n'en concluons pas pour autant que ces stratégies doivent être abandonnées définitivement. Au contraire, elles peuvent s'avérer d'une grande aide pour analyser la structure d'une théorie physique, une fois mise de côté la question d'un choix entre théories. En revanche, nous insistons sur ce que l'usage de ces stratégies met en lumière et que nous appelons l'internalisme théorique, que nous définissons dans la section suivante.

IV. REMARQUES CONCLUSIVES : VERS UN INTERNALISME THÉORIQUE

Cette section a pour but d'esquisser brièvement une position épistémologique que nous appelons l'internalisme théorique, la position selon laquelle ce qui est superflu et ce qui constitue un *explanandum* ne peuvent être définis qu'au sein même d'une théorie, de manière interne, et ne permettent donc pas une comparaison neutre entre théories lorsque le but de cette comparaison est d'en délimiter et d'en comparer le contenu physique. Cela ne signifie pas que les critères de signification physique ou de cible explicative ne puissent jamais être identiques dans différents contextes théoriques. Mais l'existence d'une telle superposition doit être démontrée avant de procéder à une comparaison entre théories. Le recours à l'équivalence théorique ou aux vertus théoriques permettant soit d'apparier deux rivales en tant qu'une et seule et même théorie, soit de privilégier l'une d'elles pour sa simplicité ou son plus grand pouvoir explicatif devrait être basé sur la démonstration qu'il est effectivement possible d'établir une comparaison qui soit non seulement pertinente, mais aussi rende

justice aux deux prétendantes. Nous espérons avoir montré au travers des exemples analysés qu'une telle base commune n'est pas toujours présente, et que dans ce cas la comparaison se fera au détriment de l'une des deux rivales, qui se verra imposer un vocabulaire ainsi qu'un critère de signification physique inappropriés, qui ne pourront donc qu'appauvrir son contenu réel, dans la mesure où les caractéristiques propres à cette théorie et faisant toute sa valeur seront soit déformées soit masquées. Cette doctrine vient clairement s'opposer à la thèse positiviste selon laquelle le contenu d'une théorie scientifique peut être lu depuis sa structure, sans que la philosophie n'ait le moindre rôle à jouer dans l'interprétation de ladite structure. En effet, l'internalisme théorique insiste sur le fait que la structure d'une théorie ne peut être interprétée indépendamment des considérations épistémologiques qui ont présidé à sa construction. Bien qu'une telle thèse ne démente en rien l'autonomie de la science par rapport à la métaphysique et à la philosophie, elle nie la possibilité d'une interprétation neutre, cantonnée aux ressources scientifiques, et détachée de toute philosophie, des théories scientifiques.

Cela signifie-t-il pour autant que nous ne devrions jamais tenter de comparer des théories rivales? Que les théories scientifiques sont incommensurables? Ce n'est en aucun cas ce que nous entendons par "internalisme théorique". Premièrement car les comparaisons que nous jugeons stériles et trompeuses relèvent d'une catégorie particulière, celles des comparaisons effectuées entre théories empiriquement équivalentes dans le but très précis d'échapper à la menace de la sous-détermination des théories par les données empiriques. De telles comparaisons sont établies dans le but de nier qu'il y ait vraiment deux théories, ou bien de révéler l'existence d'une raison de favoriser l'une d'entre elles. Un tel but nécessite 1) d'établir que la totalité du contenu jugé pertinent par les deux parties est incluse dans la notion d'équivalence théorique utilisée et 2) que la demande explicative ou le critère de signification physique sur lesquels se fondent le prétendu plus grand pouvoir explicatif ou la plus grande simplicité de l'une des deux compétitrices rendent justice aux deux parties. Deuxièmement, et comme nous l'avons déjà mentionné, nous n'excluons pas la possibilité que soit trouvée parfois une base commune qui puisse légitimer l'usage de ces stratégies. Une telle base commune, néanmoins, contrairement aux prétentions positivistes, ne peut pas être simplement présupposée, elle doit être démontrée, et seuls l'analyse philosophique et les outils qu'elle

fournit, permettent une telle démonstration. Dans les exemples que nous avons discutés, qu'il s'agisse de structure additionnelle, de surplus structurel ou d'artefacts, il était proposé de choisir entre modèles ou théories rivaux celui ou celle qui ne présenterait aucune de ces trois structures, et pourrait donc se voir accorder une vertu théorique dont les autres ne disposent pas : une plus grande simplicité. Pour autant, la possibilité d'une base épistémologique commune, permettant de formuler un critère de signification physique qui non seulement capture l'intégralité du contenu des parties, mais puisse être exprimé dans un vocabulaire commun, n'a jamais été démontrée, résultant finalement dans un dialogue de sourds entre théories rivales se targuant chacune d'une plus grande simplicité sur des critères qui ne peuvent être partagés, et cela car un tel critère ne peut pas être directement lu depuis la structure de ces théories. Contrairement à ce qu'affirmait P. Frank, l'interprétation d'une théorie scientifique et le choix entre théories rivales, et empiriquement équivalentes, requiert donc bien de faire appel à un plan non pas supérieur, mais certainement hors du cadre des strictes ressources scientifiques et de la compétence de la physique – celui de la métaphysique et de la philosophie.