

MÉLANIE FRAPPIER

**LANGAGE, PHYSIQUE ET PHILOSOPHIE:
UN REGARD SUR LA PENSÉE DE WERNER HEISENBERG**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval

pour l'obtention
du grade de maître ès arts (M.A.)

FACULTÉ DE PHILOSOPHIE
UNIVERSITÉ LAVAL

AOÛT 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-44741-3

Canada

Résumé

Ce mémoire examine, de manière critique, les réflexions apportées par Werner Heisenberg quant au rôle du langage dans la poursuite de la compréhension de la nature par la physique. Après avoir cerné brièvement les influences philosophiques ayant marqué la pensée de Heisenberg, nous examinons comment, selon ce dernier, la compréhension que nous donne du monde la physique se démarque des simples descriptions de la nature ainsi que des autres types de compréhensions humaines. Le rôle du langage dans l'atteinte de cette compréhension est ensuite examiné. Il en ressort que les trois langages utilisés par la physique (le langage ordinaire, le langage scientifique et le langage symbolique des mathématiques) ont chacun une fonction différente à jouer dans le développement de cette science, fonction déterminée par leurs différentes façons de signifier ainsi que le besoin de la physique de faire à la fois appel aux mathématiques et à l'expérience.

Warren Murray
Directeur de recherche

‘ Mélanie Frappier ‘
Étudiante

Avant-propos

Ce mémoire est le résultat d'un long parcours qui m'a mené de l'ingénierie à la philosophie. Ce dernier domaine d'études m'avait certes toujours intéressée, mais ce n'est que dans le cours de philosophie des sciences du professeur Warren Murray que j'ai compris qu'une réflexion philosophique était essentielle à tout scientifique désireux de comprendre la portée de ses actions et de sa discipline. Devenu par la suite mon directeur de recherche, le professeur Murray a su m'apprendre que les grands esprits discutent des idées plutôt que des choses ou des personnes. Il ne s'agit pas là, bien sûr, d'une leçon qui s'enseigne rapidement et je me dois conséquemment de le remercier pour ces nombreuses heures qu'il m'a si généreusement consacrées au cours des dernières années.

Tout au long de ce parcours, de nombreuses autres personnes m'ont apporté leur secours et leurs encouragements et je tiens ici à les remercier tous sincèrement.

J'aimerais tout d'abord exprimer ma gratitude au fonds FCAR, un des rares organismes à croire encore pertinent de soutenir la formation de 2e cycle de jeunes chercheurs oeuvrant dans des domaines n'offrant pas de retombées technologiques directes. Le soutien financier qu'il a apporté à cette recherche au cours des deux dernières années a été précieuse et fort appréciée.

Je désirerais aussi remercier du fond du coeur mes parents, Maurice Frappier et Nicole Pépin, sans l'aide desquels je n'aurai certainement pas pousser aussi loin mes études universitaires. En m'entourant de livres, en m'encourageant à poursuivre mes études et en me libérant des tâches ménagères lors des sessions d'examens, ils ont su m'apprendre toute l'importance d'une bonne éducation. En relisant mes travaux, en discutant avec moi de mes recherches et en me dénichant de nombreuses références se rapportant à mes études, ils ont su me montrer que la curiosité n'était pas un défaut.

Enfin, je tiens à exprimer tout l'amour que j'éprouve pour mon époux, Christian Lacroix, dont l'aide m'a été si précieuse au cours de ces dernières années. Christian, merci pour tes encouragements, ton sourire, tes rêves. Merci aussi pour ces longues conversations qui se sont bien souvent poursuivies tard dans la nuit. Merci pour les chocolats chauds et les journées de cerf-volant...

Bien d'autres personnes, m'ont aussi apporté une aide précieuse, notamment le professeur Michel A. Duguay, du département de génie électrique et informatique de l'Université Laval, qui m'a encouragée à compléter ma formation technique par des études en philosophie, et Mme Andrée Marcil, conseillère à la faculté de philosophie de l'Université Laval qui a facilité mon intégration au département de philosophie. À eux et à toutes les autres personnes m'ayant offert si généreusement leur temps, j'offre mes plus sincères remerciements.

Mélanie Frappier

12 août 1999

Table des matières

Avant-propos	i
Introduction	1
Chapitre 1. Werner Heisenberg: physicien, philosophe	9
Mouvement de jeunesse et esprit allemand	13
Études universitaires et physique quantique	16
La montée du nazisme	25
L'après-guerre	26
Chapitre 2. Qu'est-ce que comprendre en physique théorique?	28
Les buts de la science	28
L'acquisition des données factuelles	29
Une sous-estimation du rôle pratique de la physique?	30
Le rôle de l'homme dans la nature	32
La recherche d'ordre dans la nature	34
Décrire la nature: le rôle des théories phénoménologiques en physique	36
Comprendre en physique théorique	39
Réflexions étymologiques	39
Le chemin vers la compréhension	46
Les deux abstractions de la physique	48
La nécessité des concepts	53
La simplicité comme critère de compréhension	57
Critique de la division de Heisenberg	59

Chapitre 3: Le rôle du langage en physique	67
Le langage dans la vie quotidienne	73
Définitions et qualificatifs	74
Logique	77
Le langage en physique classique	78
Les bouleversements de la physique moderne	83
Le langage dans la théorie de la relativité	84
Le langage dans la physique quantique	90
La logique quantique	97
Tradition et révolutions dans le langage de la physique	101
Les théories closes et la systématisation des domaines de la physique	105
Chapitre 4. Quelques réflexions sur les langages de la science	111
Langage ordinaire et mathématiques: une comparaison.	111
Langage ordinaire et langage scientifique: une distinction manquée	115
Langages et mathématiques dans la compréhension en physique théorique	125
Mathématiques et compréhension	125
Expérience et mathématiques: une tension essentielle	135
Langage ordinaire et langage scientifique en physique	139
Conclusion	147
Bibliographie	151

Introduction

La philosophie des sciences est souvent considérée comme un simple complément des disciplines scientifiques ne possédant aucun impact véritable sur la pratique des sciences. Pourtant, comme le souligne Werner Heisenberg dans "The Philosophical Background of Modern Physics", le bagage philosophique des chercheurs joue un rôle important dans leur travail: "Actually the attention and the intuition of those who try to interpret the phenomena plays a very important rôle in the development [of science], and therefore the philosophical background from which they start - consciously or unconsciously - has a determining influence on the results of their activity."¹

Le rôle du langage dans le développement de la connaissance scientifique a longtemps été négligé et reste encore aujourd'hui ignoré de la plupart des scientifiques. En fait, dans la société actuelle, où scientifiques et "gens de lettres" sont séparés les uns des autres, la seule idée que le langage puisse effectivement jouer un rôle dans le développement d'une science comme la physique peut sembler surprenante. Mais négliger la part du langage dans quelque activité intellectuelle que ce soit reviendrait à négliger le lien étroit qui existe, chez l'humain, entre pensée et langage. Comme l'écrivait Heisenberg dans "The Development of Concepts in Physics of the 20th Century":

The philosophers have correctly stated, that all our thinking hangs in the net of language. If we do not rely on language, our thinking becomes vague and undefined. Language is earlier than science. Therefore they would argue, that we loose the solid ground of thinking, if we try to abandon one of those axioms which in the course of history have become an essential part of language. Language is not simply a prejudice.²

En tant que produit de la pensée humaine, la physique se trouve donc nécessairement liée de façon étroite au langage. Il est, par conséquent, important de saisir le rôle que jouent nos différents modes d'expression dans le développement de la physique si on désire comprendre

¹Werner Heisenberg, "The Philosophical Background of Modern Physics", p. 496.

²Id., "The Development of Concepts in Physics of the 20th Century", p. 163.

le développement de cette science et évaluer la valeur de la compréhension qu'elle nous donne de la nature.

Face à cette problématique, les écrits philosophiques de Werner Heisenberg présentent un début de réflexion fort intéressant. Prix Nobel de physique de 1932, créateur avec Bohr, Born et Jordan de la mécanique quantique, Heisenberg est aussi le découvreur des célèbres *relations d'indétermination*. Sur une question comme celle du rôle du langage en physique, les observations d'un physicien aussi renommé, ayant réfléchi longuement sur la pratique de sa science, sont, comme le souligne Einstein, essentielles à la réflexion du philosophe:

On a souvent dit, et non sans raison, que les chercheurs en sciences de la nature étaient de piètres philosophes. [... Mais], le physicien ne peut tout simplement abandonner à la philosophie l'examen critique des fondements de sa science, car il est mieux placé pour savoir et sentir où le bât blesse: dans sa recherche d'une assise nouvelle, il doit s'efforcer, autant qu'il peut, de prendre conscience de la pertinence, voire de la nécessité, des concepts dont il fait usage.³

Au mérite de Heisenberg, on doit aussi ajouter qu'il est probablement le plus philosophe des grands physiciens du XXe siècle et il est sans aucun doute, avec Bohr, un des scientifiques s'étant le plus intéressé au rôle du langage en physique et à la valeur de la connaissance que nous donne du monde cette science. Ses réflexions philosophiques sont d'ailleurs intimement liées à ses préoccupations scientifiques. Comme il le souligne lui-même dans *Physics and Philosophy*, la question du langage en physique, quoiqu'ayant existé de tout temps, ne s'est posée avec insistance qu'au début du XXe siècle, avec le développement de la relativité et de la physique quantique, auquel Heisenberg a grandement contribué. En nous faisant découvrir des aspects de la nature impossibles à décrire à l'aide des concepts de la physique classique, ces deux théories nous ont forcés à réfléchir sur nos différents modes d'expression. Comment, en effet, parler de l'électron alors que celui-ci semble agir tantôt comme une particule, tantôt comme une onde? Comment parler de futur, de présent et de passé s'il n'existe pas de temps absolu? Peut-on expliquer les phénomènes quantiques sans faire appel à des formules mathématiques compliquées? Ces questions reflètent toutes le problème de l'expression des

³Albert Einstein. *Oeuvres choisies*, tome 5, p.125.

connaissances acquises par la physique. Bien sûr, remarque Heisenberg, le premier langage dans lequel les physiciens expriment leurs découvertes est généralement un langage mathématique. Pourtant, malgré sa clarté et sa précision, ce mode d'expression n'est pas totalement satisfaisant, pour les scientifiques et ce, pour deux raisons. Tout d'abord, les physiciens ne peuvent pas expliquer leurs théories aux non-spécialistes à l'aide des seules mathématiques; ils doivent pour cela, nécessairement utiliser un langage accessible à tous. Dans l'introduction d'*Une brève histoire du temps*, l'astrophysicien Stefan Hawking exprime avec humour cette difficulté, lorsqu'il raconte que son éditeur l'a prévenu qu'il perdrait la moitié de ses lecteurs chaque fois qu'il introduirait une formule mathématique dans son livre. À cette première limitation du langage des mathématiques, Heisenberg ajoute que, même pour les physiciens, une explication en mots demeure le signe que la compréhension d'un phénomène naturel a été atteint.

La capacité d'exprimer les connaissances physiques à l'aide de mots plutôt que par des équations mathématiques est donc un critère permettant de juger à quel point la compréhension d'un phénomène physique a été atteinte, chez les physiciens comme chez les non-spécialistes. Mais dans quelle mesure la description des différents phénomènes physiques dans un langage accessible à tous est-elle possible? S'il semble relativement aisé de décrire avec des mots les phénomènes et les lois de la mécanique classique (que ce soit la chute d'une pomme ou la loi de la gravitation), il est plus difficile d'imaginer comment les concepts que nous utilisons quotidiennement pourraient être utilisés pour décrire les lois de la physique quantique et les différents phénomènes qui se passent à l'échelle atomique. Comment, par exemple, parler de la position occupée à un moment donné par un électron alors que l'on sait que celui-ci ne peut pas être conçu comme une simple particule de matière?⁴ Cette difficulté d'expression, si

⁴Heisenberg exprime parfaitement ce dilemme au début de "Language and Reality in Modern Physics": "The first language that emerges from the process of scientific clarification is in theoretical physics usually a mathematical language, the mathematical scheme, which allows one to predict the results of experiments. The physicist may be satisfied when he has the mathematical scheme and knows how to use it for the interpretation of the experiments. But he has to speak about his results also to nonphysicists who will not be satisfied unless some explanation is given in plain language, understandable to anybody. Even for the physicist the description in plain language will be a criterion of the understanding that has been reached. To what extent is such a description at all possible? Can one speak about the atom itself? This is a problem of language as much as of physics" *Physics and Philosophy*, p. 168.

familière à la physique quantique. est également partagée par d'autres domaines de la physique, tel celui de la relativité. En fait, comme le souligne Heisenberg, dès que nous quittons le domaine de l'expérience commune, nous ne savons plus comment utiliser les concepts et les mots que nous avons forgés pour parler des phénomènes physiques se passant à notre échelle. Dans les nouveaux domaines de la physique, des notions aussi communes que celles de temps, d'espace ou de causalité ne peuvent être utilisées sans ambiguïté. Cette difficulté, étroitement liée à notre condition humaine, soulève de nombreuses questions. Peut-on vraiment parler de ces phénomènes physiques qui sortent du domaine de notre expérience commune? Si oui, dans quel langage pouvons-nous les décrire? Nous est-il possible de comprendre ces phénomènes et, si oui, quelle est la valeur de cette connaissance? Comme le constate Heisenberg: "this uncertainty of the concepts has urged the physicists, to go into philosophical problems."⁵

Ce mémoire a pour but de présenter, de manière critique, quels sont, selon Werner Heisenberg, les différents langages utilisés en physique, d'étudier leurs forces et leurs faiblesses et de voir quel sont leurs apports respectifs au plan de la compréhension en physique théorique. Avant d'aborder cette question, il faudra cependant nous arrêter quelque peu sur la vie et l'oeuvre de Heisenberg afin de vérifier jusqu'où sa pensée philosophique a pu être influencée par les recherches qu'il a menées, les personnes qu'il a rencontrées, l'éducation qu'il a reçue et les divers événements qui ont marqué sa personnalité. Le premier chapitre de ce mémoire se veut donc une brève biographie scientifique et philosophique de Heisenberg. Ce faisant, nous espérons permettre au lecteur de mieux juger de la valeur et de l'originalité des réponses apportées par Heisenberg aux questions abordées dans la suite de ce mémoire.

Afin de saisir le rôle tenu par le langage dans la compréhension des phénomènes physiques pour Heisenberg, il nous faudra préalablement cerner ce que signifie pour lui "comprendre" en physique. Nous étudierons conséquemment au chapitre 2, comment, selon Heisenberg, la physique nous permet de comprendre la nature qui nous entoure et comment cet acte de compréhension se distingue de cette autre fonction de la physique qu'est la description des phénomènes naturels. Nous serons alors en mesure d'examiner, au chapitre 3, quels sont les

⁵Werner Heisenberg, "The Development of Concepts in Physics of the 20th Century", p. 161

rôles joués, selon Heisenberg, par le langage ordinaire, le langage scientifique et les mathématiques dans le développement de la physique. Le chapitre 4 invitera finalement le lecteur à s'interroger davantage sur les distinctions apportées par Heisenberg quant aux caractéristiques de ces divers modes d'expression et tentera de préciser leurs rôles respectifs dans le développement de la compréhension en physique.

Avant d'aborder notre étude, il nous faut mentionner trois difficultés majeures auxquelles fait face toute analyse de la pensée philosophique de Heisenberg: 1) la détermination de la place accordée par Heisenberg à la philosophie par rapport aux autres types de savoir, 2) la longueur de la période pendant laquelle Heisenberg a écrit et, finalement, 3) le fait que plusieurs de ses articles et conférences aient été rédigés et rendus publics sous le régime nazi.

En effet, s'il semble évident, dans les écrits de Heisenberg, que la philosophie a un rôle important à jouer dans le développement de la pensée des scientifiques, il est plus difficile de déterminer exactement quel devrait être ce rôle et quelle devrait être la position occupée par la philosophie par rapport aux autres domaines du savoir. S'il traite en de nombreux endroits des liens existant entre les différentes sciences (paradigmes de la pensée objective et rationnelle), les arts et la religion, Heisenberg ne mentionne cependant jamais les rapports entretenus par la philosophie avec ces autres modes de connaissance⁶. De plus, lorsqu'il fait référence à des philosophes, c'est habituellement lors de comparaisons entre les hypothèses avancées par les physiciens modernes et les théories de philosophie naturelle des penseurs grecs (notamment celles des Présocratiques et de Platon) ou encore les théories de la connaissance avancées par les principaux philosophes modernes (Descartes, Hume et Kant). Autrement dit, les réflexions philosophiques qu'il fait sont tellement axées sur la méthode et la pratique des sciences, que l'on peut se demander si Heisenberg voyait la philosophie comme une discipline possédant une méthode et des questions lui étant propres ou s'il ne la considérait

⁶Étrangement, les différentes sciences humaines (histoire, sociologie, géographie, anthropologie, politique, économie) subissent le même sort que la philosophie. Pourtant, l'intérêt de Heisenberg pour plusieurs de ces sujets est manifeste. Par exemple, comme le souligne Catherine Chevalley dans son introduction au manuscrit de 1942 de Heisenberg, de nombreuses sources démontrent que ce dernier avait une grande admiration pour les *Considérations sur l'histoire universelle* de Jakob Burckhardt.

que comme un savoir simplement *complémentaire* à la physique. Bien sûr, comme le souligne Arthur Eddington, la démarcation entre épistémologie et science est parfois bien floue:

Formally we may still recognise a distinction between science, as treating the *content* of knowledge, and scientific epistemology, as treating the *nature* of knowledge of the physical universe. But it is no longer a practical partition; and to conform to the present situation scientific epistemology should be included in science. We do not dispute that it must also be included in philosophy. It is a field in which philosophy and physics overlap.⁷

Ce que Eddington n'a pas vu, et qui semble aussi absent des écrits de Heisenberg, c'est que l'épistémologue, quoiqu'ayant besoin d'une grande connaissance de la science, n'en demeure pas moins un philosophe, pas un scientifique. C'est ainsi que, vu la promiscuité des questions physiques et philosophiques chez Heisenberg et l'impossibilité de déterminer le rôle qu'il accordait à la philosophie dans le développement de la connaissance, il est ardu de déterminer la portée exacte de la pensée philosophique de ce physicien et de séparer clairement ses idées philosophiques des considérations scientifiques qui leur ont donné naissance.

Un second problème dans la détermination de la pensée philosophique de Heisenberg vient du fait que ses écrits philosophiques s'étendent sur près d'un demi-siècle (de 1927 à 1976). Il va sans dire que, durant cette période, ses convictions philosophiques se sont développées, précisées voir même modifiées. Cette situation est de plus compliquée par le fait que plusieurs de ses écrits importants ont été rédigés sous le régime nazi et sont souvent des réponses aux partisans de la physique aryenne ou "*Deutsche Physik*". Cette idéologie, analogue au lyssenkisme soviétique, prônait que "la science est, comme tout ce qui est produit par les hommes, conditionnée par la race et le sang"⁸ et s'opposait à ce que les nazis surnommaient la physique "juive", c.-à-d. les théories physiques "non intuitives" (*unanschaulich*) comme la relativité et la mécanique quantique. Catherine Chevalley résume ainsi l'opposition imaginée par les nazis entre "physique aryenne" et "physique juive":

⁷Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, p.7

⁸Catherine Chevalley, introduction à *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p. 59

Dans son contenu, la position adoptée par les partisans de la *Deutsche Physik* est particulièrement sommaire, mais elle repose sur un système d'identifications qui décalque (en les caricaturant) les débats philosophiques fondamentaux de la physique relativiste et de la physique quantique: la physique "juive" est la physique théorique et formelle, probabiliste et non "intuitive" (*unanschaulich*), ruinée par sa fascination pour les mathématiques, indifférentes à la nature et à la réalité, et qui se prétend internationale, par contraste avec la physique "aryenne", expérimentale et réaliste, causale et "intuitive", inductiviste, respectueuse de la nature et de la réalité, d'origine fondamentalement nordique.⁹

Convaincu de l'universalité de la science et de la validité de la relativité et de la mécanique quantique, Heisenberg mène, aux côtés de Planck et von Laue, une lutte farouche aux tenants de la physique "allemande" qui marque profondément les textes qu'il écrit durant cette période. Dans ses écrits, il tente, d'une part, de démontrer la nécessité des nouvelles théories physiques d'un point de vue théorique en démontrant les limites inhérentes à la physique classique. D'autre part, il cherche à convaincre les scientifiques allemands que ces nouvelles théories, quoique très "abstraites" et "mathématiques", peuvent avoir des applications technologiques très concrètes. Quoiqu'ayant toujours affirmé son mépris pour la *Deutsche Physik*, il est évident que Heisenberg, lui-même accusé d'être un "juif blanc" (*Weiss Jude*) contaminant la pensée allemande avec une vision dégénérée de la physique, n'a pas toujours été en mesure d'exprimer ouvertement sa pensée durant cette période trouble. C'est pourquoi, afin de saisir la conception philosophique définitive de Heisenberg, nous avons préféré donner préséance aux idées qu'il a développées après la seconde guerre mondiale, notamment celles exposées dans Physics and Philosophy (1955-56) et dans les écrits postérieurs à ce recueil, laissant ainsi volontairement de côté certaines des idées qu'il avait proposées antérieurement.

Un dernier avertissement est peut être de mise. Nous avons tenté, dans ce mémoire, de cerner le plus justement possible, et sans la trahir, la partie de la philosophie de Heisenberg traitant du langage et de la valeur de la connaissance en physique. Il ne s'agit cependant pas d'une pensée philosophique totalement développée et les écrits de Heisenberg ne présentent pas toujours une cohérence parfaite. Ce dernier n'a pas élaboré de système philosophique complet et, contrairement à ce que certains auteurs ont avancé, il n'a pas cherché dans le langage une

⁹Ibid., p. 59

nouvelle base épistémologique à la physique. Dans les thèses qu'il propose, on trouve certaines lacunes et quelques contradictions. Quoique préoccupé par les questions philosophiques, Heisenberg était avant tout un physicien, et non un philosophe, qui réfléchissait après coup sur les forces et les limites de sa discipline. Nous ne tenterons donc pas ici de combler les lacunes pouvant exister dans sa pensée et nous ne proposerons pas de réponses aux questions qu'il a laissées en suspens. Certains trouveront peut-être cette absence de réponses peu satisfaisante. Nous les comprenons. Mais, tout comme Einstein, nous sommes convaincus que le plus important dans la recherche de la connaissance, ce n'est pas tant la résolution des problèmes, que la capacité de poser les bonnes questions. Nous espérons seulement être en mesure de démontrer ici que, même si Heisenberg n'a pas toujours trouvé les réponses aux problèmes qu'il a soulevés, il a su identifier les questions qui méritaient d'être posées.

Chapitre 1. Werner Heisenberg: physicien, philosophe

Werner Heisenberg naquit le 5 décembre 1901 au sein d'une famille très cultivée et ambitieuse. Son père, August, et son grand-père maternel, Nikolaus Wecklein, quoique tous deux issus de milieux modestes, avaient atteint des positions enviées au sein de la bourgeoisie allemande grâce à leur réussite professionnelle dans le monde académique. En effet, après des études en philologie grecque, Wecklein était devenu proviseur du prestigieux Max-Gymnasium et, grâce à sa grande influence dans l'administration scolaire, avait aidé son beau-fils, August Heisenberg, à se hisser au poste de professeur de philologie byzantine à l'université de Munich. Comme l'explique David Cassidy, le poste détenu par le père de Werner Heisenberg était très considéré dans l'Allemagne du début du siècle:

Compared with a modern American university teacher, a German professor of the Wilhelmine era enjoyed much more prestige and power within the stratified world of Bismarckian Germany. [...] German administrators had attempted to build up German national culture as one of the pillars of German national strength. Administrators and scholars regarded scholarship as an essential component of the cultural pillar, and neohumanist studies of Greek works of the heroic age - exemplars for a heroic new Germany - became its crowning achievement. Because of this, a German university professor, especially one in classical Greek philology, ranked in status [...] among the upper-middle-class elite.¹⁰

On comprend alors que les parents de Werner Heisenberg aient tout mis en oeuvre pour que ce dernier reçoive une éducation humaniste qui, croyaient-ils, lui permettrait d'atteindre un rang social élevé. C'est ainsi qu'après ses études primaires, Werner Heisenberg entra au Max-Gymnasium, encore dirigé par son grand-père. L'éducation dispensée à l'époque reflète les préoccupations de la bourgeoisie allemande du début du siècle alors que les lycées étaient appelés à offrir en premier lieu une éducation morale chrétienne en accord avec "l'esprit de la mère patrie" (*Vaterland*). Cet enseignement se voulait aussi, mais en second lieu seulement, une éducation menant à la recherche académique. Cassidy rapporte dans sa biographie de Heisenberg que, sur les 263 crédits couvrant les neuf années d'études du lycée, 63 étaient consacrées au latin, 36 au grec, 31 à l'allemand, 31 aux mathématiques. Les autres matières à

¹⁰David Cassidy, *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*, p.5.

l'étude étaient, dans l'ordre d'importance, l'histoire, la religion, l'athlétisme, le français, la géographie et les sciences naturelles. La physique était, avec le dessin, la matière à laquelle était consacrée le moins de crédits: à peine six! On pourrait croire, à tort, que, sauf pour ce qui est des cours de mathématiques, l'éducation secondaire reçue par Heisenberg eu très peu d'impact sur sa carrière de physicien. Pourtant, dans ses mémoires, ce dernier se rappelle avoir compris très jeune l'importance pour la science des idées contenues dans les écrits des anciens Grecs. Par exemple, il décrit ainsi sa première lecture du *Timée* de Platon à l'âge de 18 ans:

Un jour l'idée me vint d'emporter sur le toit un volume de Platon et le désir de lire autre chose que les textes scolaires me fit tomber, avec ma connaissance relative du grec, sur le dialogue *Timée* où pour la première fois, je pus puiser aux sources mêmes de la philosophie grecque de l'atome. Cette lecture éclaira considérablement pour moi les idées fondamentales de la science de l'atome. [...]c'est déjà à cette époque que la conviction se fit jour en moi qu'il n'était guère possible de s'occuper de physique atomique moderne sans connaître la philosophie grecque de la nature.¹¹

Bien entendu, la philosophie naturelle grecque a un certain intérêt "historique" pour la physique quantique puisqu'on y retrouve l'origine du concept d'atome. Cependant, comme le remarque Heisenberg dans *Physics and Philosophy*, "the modern interpretation of atomic events has very little resemblance to genuine materialistic philosophy"¹² Si, pour Heisenberg, la pensée grecque a une si grande importance en physique, ce n'est pas à cause des différentes philosophies de la nature qui y sont représentées mais plutôt parce qu'au cours de son développement est apparue, pour la première fois, l'idée qu'il était possible d'expliquer un ensemble de phénomènes divers en posant un principe d'explication unique:

Mais ce qui, dès le début, a distingué la pensée grecque de celle des autres peuples, c'est la faculté d'élever une question posée au niveau d'un principe et par conséquent d'aboutir à des points de vue susceptibles d'ordonner le pot pourri des expériences et de les rendre accessibles à la pensée humaine. Cette relation entre la façon de poser le principe et l'action pratique a distingué la Grèce de tous les autres pays; cette même relation, au moment du nouveau départ de l'Occident à l'époque de la Renaissance, a formé, une fois de plus, le pivot de notre histoire et a engendré les sciences de la nature et la technique modernes.¹³

¹¹Werner Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, p.70.

¹²*Id.*, *Physics and Philosophy*, p.59.

¹³*Id.*, *La nature dans la physique contemporaine*, p.62-63.

L'étude des mathématiques fut aussi une étape marquante dans son développement intellectuel. Son père, qui croyait qu'une compétition entre ses deux fils stimulerait leurs performances académiques, avait pris l'habitude de présenter des problèmes mathématiques à Werner et à son frère aîné Erwin afin de voir lequel des deux les résoudre le plus rapidement. Se rappelant de cette compétition, Heisenberg dira, dans une entrevue accordée à T. S. Kuhn¹⁴, que, réalisant qu'il pouvait résoudre ces problèmes rapidement, il développa un intérêt marqué pour ce domaine d'études. Ce n'est cependant que dans le cours de mathématiques de Herr Wolff, alors qu'il n'avait qu'une douzaine d'années, que Heisenberg dit avoir découvert cette "relation entre la façon de poser le principe et l'action pratique" décrite dans les textes des anciens Grecs:

En fait, sans que je m'en rendisse vraiment compte et en toute innocence scolaire, le plaisir que me procurait la description mathématique de la nature m'avait fait rencontrer le trait fondamental de la pensée occidentale, à savoir cette relation entre la façon de poser le principe et l'action pratique. Les mathématiques constituent pour ainsi dire le langage à l'aide duquel une question peut être posée et résolue, mais cette question même vise un processus du monde pratique et matériel: c'est ainsi que la géométrie servait à l'arpentage des terres arables.¹⁵

Le jeune Heisenberg ne tarde pas à mettre lui même en pratique ce principe central de la physique moderne. Alors qu'il est encore au lycée, il tente de comprendre, à l'aide des mathématiques, les jouets mécaniques que plus jeune il a construit avec son frère et son grand-père paternel. Non satisfait de la géométrie et de l'algèbre appris à l'école, il étudie dans ses temps libres le calcul différentiel et intégral qu'il utilise par la suite pour dériver et résoudre les problèmes de son manuel de physique qui n'exige pourtant qu'une simple connaissance de l'algèbre. À son entrée à l'université, Heisenberg a déjà lu la série de textes spécialisés en théorie des nombres de Paul Bachmann, *Zahlentheorie (Théorie des nombres)*, et le livre de Weyl, *Raum-Zeit-Materie (Espace-Temps-Matière)*, proposé par Einstein à ceux désirant une analyse poussée de la théorie de la relativité.

Dans "Les rapports entre la culture humaniste, les sciences de la nature et l'Occident", Heisenberg affirme que déjà à cette époque les questions philosophiques des anciens Grecs

¹⁴Entrevue rapportée par David Cassidy, *op. cit.*, p. 14

¹⁵Werner Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, p.67.

ainsi que l'application des mathématiques aux objets réels se trouvaient, pour lui, à la base de tout son questionnement physique. Il écrit:

Les découvertes des temps modernes de Newton et de ses successeurs m'apparurent alors comme la continuation immédiate de ce que les mathématiciens et philosophes grecs avaient cherché à réaliser, je dirais même qu'elles m'apparurent identiques. L'idée que le monde des sciences de la nature et de la technique modernes puisse se distinguer fondamentalement de la philosophie de Pythagore ou d'Euclide ne m'effleurait même pas.¹⁶

Il est peu probable que la pensée philosophique de Heisenberg ait été aussi clairement définie à cette époque. Pour Cassidy, ce portrait que Heisenberg fait de son adolescence est idéalisé:

Much later in life, when he wrote many of the foregoing recollections, Heisenberg believed that he had found striking similarities between modern elementary particle physics and Platonic idealism - so striking, in fact, that he believed that Platonism provided genuine clues for contemporary physics. However, little corroboration can be found for his retrospective portrait of himself in memoirs as a lifelong Platonist, either in the surviving evidence or in the testimony of Carl Friedrich von Weizsäcker, one of his closest students and colleagues.¹⁷

Il faut toutefois nuancer quelque peu les propos de Cassidy. Il est vrai que, dans sa jeunesse, Heisenberg a démontré, dans sa pratique de la physique, une attitude très pragmatique ne faisant pas appel, dans ses démonstrations scientifiques, à des arguments que l'on pourrait qualifier de "philosophiques". Cela ne signifie pas cependant qu'il n'ait pas apprécié, dès son adolescence, les oeuvres de Platon. Cette admiration pour ce grand philosophe s'inscrit d'ailleurs fort bien dans la personnalité de Heisenberg. Ce dernier, en effet, faisait preuve d'un intérêt très prononcé pour les arts - la musique et la littérature en particulier - intérêt qui était très proche de celui qu'il avait aussi pour les mathématiques et la physique. "La relation étroite qui existe entre les mathématiques et l'art", écrit-il en 1942, "est donnée à travers la beauté immédiate des structures qui sont explicitées au moyen d'une proposition mathématique."¹⁸

¹⁶ *Ibid.*, p.67.

¹⁷ David Cassidy, *op. cit.*, p. 47. S'il est vrai que C.F. von Weizsäcker fut, pendant un certain temps, un étudiant et un collègue de Heisenberg, c'est surtout comme interlocuteur sur les questions philosophiques que Heisenberg se le rappelle.

¹⁸ Werner Heisenberg, *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p.366.

Comprendre. pour lui, équivalait en quelque sorte à trouver la beauté cachée derrière les apparences. À propos des découvertes de Pythagore il écrivait:

Understanding of the colorful multiplicity of the phenomena was thus to come about by recognizing in them unitary principles of form, which can be expressed in the language of mathematics. By this, too, a close connection was established between the intelligible and the beautiful. For if the beautiful is conceived as a conformity of the parts to one another and to the whole, and if, on the other hand, all understanding is first made possible by means of this formal connection, the experience of the beautiful becomes virtually identical with the experience of connections either understood or at least guessed at.¹⁹

Il n'est donc pas étonnant que son intérêt pour la philosophie ait été, lui aussi, essentiellement esthétique. Dans une telle perspective, cette admiration pour Platon, un philosophe nous ayant laissé des mythes et des dialogues semblables à des pièces de théâtre, est tout à fait cohérente et il est fort probable que Heisenberg ait été attiré très jeune par l'esthétisme des oeuvres de ce philosophe grec. De plus, il est évident que les formes géométriques qui faisaient office d'atomes dans le Timée de Platon ont dû intriguer au plus haut point Heisenberg qui déjà faisait preuve d'une capacité d'abstraction hors du commun et rejetait avec véhémence ces images de ses livres de science qui représentaient les atomes comme de petites boules s'attachant les unes aux autres à l'aide d'anneaux et de crochets. C'est pourquoi, les souvenirs que conservent Heisenberg de sa jeunesse, quoique parfois inexacts ou exagérés, demeurent, à notre avis, une description crédible de l'influence énorme qu'eurent les penseurs grecs dans l'évolution de sa pensée philosophique et soulignent la place importante qu'occupèrent, pour lui, les mathématiques dans la pratique de la physique.

Mouvement de jeunesse et esprit allemand

Plus que ses études au gymnasium, c'est sans aucun doute sa participation, après la première guerre mondiale, au *Neupfadfinderschaft*, le mouvement scout allemand, qui forgea le plus la pensée et le système de valeurs de Heisenberg. La défaite de l'Allemagne, le chaos politique qui en découla, la perte de parents et d'amis sur les champs de bataille, ainsi que les problèmes

¹⁹Id., *Across the Frontiers*, p.170.

liés à l'urbanisation rapide de l'Allemagne amenèrent la jeunesse allemande à remettre sérieusement en question le système de valeurs bourgeois professé par les adultes. Comme le rappelle Heisenberg au début de ses mémoires: "L'issue de la première grande guerre avait semé le trouble et la confusion parmi les jeunes de notre pays. La vieille génération, profondément déçue par la défaite, avait laissé glisser les rênes de ses mains; et les jeunes se rassemblaient en groupes, en communautés petites ou grandes, pour rechercher une voie nouvelle, ou du moins pour trouver une boussole neuve leur permettant de s'orienter, car l'ancienne avait été brisée."²⁰ C'est pourquoi, à la fin de la guerre, Heisenberg accepta, à la demande de quelques garçons plus jeunes que lui, de prendre la tête d'une petite troupe. le "Grappe Heisenberg". et de tenter, avec eux, de retrouver et mettre en pratique les valeurs fondamentales propres à l'esprit allemand.

Déjà avant la guerre, de tels groupes de jeunes s'étaient ainsi formés dans l'espoir d'atteindre un certain "idéal allemand" à travers la musique, la littérature, les danses traditionnelles et, surtout, les longues excursions à travers les montagnes qui permettaient aux jeunes, non seulement d'entrer en communion avec la nature, mais aussi de découvrir entre eux une certaine "harmonie des âmes". David Cassidy décrit ainsi les objectifs visés par ces groupes des jeunes:

For them [...]this meant an embracing of values derived from a revival of German romanticism: escape from the dead city to the living, genuine, fundamental virtues of pristine nature. There a complete renewal of the total man, a mystical revival of each human soul in unison with other souls, would occur through sustained contact with nature, with the cycle of seasons, and especially with each other - "not just an idea or a thought, but rather something internal, something fundamental, a harmony of souls." Transformed and revitalized by immersion in the genuineness of nature, the young men believed they could eventually reclaim decadent German society and establish themselves as the new and incorruptible elite.²¹

Cette description des idéaux romantiques du *Neupfadfinderschaft* du début du siècle reflète certains traits caractéristiques de la mentalité allemande ayant occupé une position centrale dans la vision du monde de Heisenberg. Premièrement, cet extrait décrit bien cette croyance des Allemands dans un certain panthéisme, c'est-à-dire dans une certaine union de Dieu et de

²⁰*Id.*, *La partie et le tout*, p. 11.

²¹ David Cassidy, *op. cit.*, p.68.

la nature, et qui explique cette conviction qu'avait Heisenberg, comme de nombreux Allemands d'ailleurs, que l'homme se développe plus complètement lorsqu'il est régulièrement en communion avec la nature. Chez Heisenberg, cette certitude se traduit aussi par la croyance en un ordre central. À la question de Wolfgang Pauli lui demandant s'il croyait en un Dieu personnel, Heisenberg se rappelle avoir répondu:

Puis-je formuler différemment la question que tu viens de me poser? Elle serait alors posée comme ceci: Peux-tu, ou peut-on, communiquer aussi directement avec l'ordre central des choses ou des phénomènes - ordre dont l'existence n'est pas douteuse - que l'on communique, éventuellement, avec l'âme d'une autre être humain? J'emploie ici à dessein le mot âme, difficile à interpréter, pour ne pas être mal compris. Si ta question est formulée ainsi, je réponds: oui.²²

Cette foi en un ordre central régissant l'univers, cette certitude de l'existence d'un lien entre les différentes composantes du cosmos n'est pas entièrement rationnelle. En fait, elle a même un certain caractère "viscéral" si on se fie à cet extrait des mémoires de Heisenberg dans lequel il se rappelle les doutes qui l'assaillirent lors d'un rassemblement tenu au château de Prunn par des jeunes cherchant à déterminer l'attitude à adopter face au reste de la société après la défaite allemande de 1918:

Mes réflexions portaient sur la notion d'ordre. La confusion qui se manifestait dans les discours me semblait démontrer qu'il pouvait exister des ordres véritables, mais différents, pouvant entrer en conflit entre eux; et que cette lutte entre des ordres différents entraînait le désordre. Mais ceci n'était possible, me semblait-il, que parce qu'il s'agissait d'ordre partiels, de fragments qui s'étaient détachés de l'assemblage formé par l'ordre central: ces fragments n'avaient pas encore perdu leur force créatrice, mais n'avaient pas conservé leur orientation vers le centre. Cette absence de centre actif était un fait qui s'imposait de plus en plus à mon esprit, douloureusement, à mesure que j'écoutais les orateurs: c'était une souffrance presque physique.²³

Cette croyance dans un "ordre central" et des "ordres partiels" a plus tard joué un rôle essentiel dans la vision qu'il eut de la physique. Tout d'abord, il explique la facilité avec laquelle Heisenberg s'est rangé aux arguments de Bohr quant à la notion de complémentarité pourtant

²² Werner Heisenberg, *La partie et le tout*, p.292.

²³ *Ibid.*, p.23-24. Nous soulignons.

ignorée de plusieurs physiciens²⁴. L'idée que des notions puissent à la fois s'exclure mutuellement tout en se complétant était, on le voit, présente depuis longtemps dans sa conception de l'univers. De plus, cette certitude qu'il puisse exister des ordres partiels est aussi, chez lui, à l'origine de cette hiérarchisation de la physique en différents systèmes ou "théories closes" (mécanique classique, électromagnétisme, physique quantique, etc.). Lorsque plus tard, on parlera des fondateurs de la pensée systémique²⁵, on négligera souvent la contribution de Heisenberg à ce courant de la pensée moderne.

Ce panthéisme et cette croyance dans l'existence d'un "ordre central" se reflètent aussi dans cette autre caractéristique de la pensée germanique: l'unité de la race allemande. C'est cette "âme commune" que les jeunes essayaient de retrouver, à petite échelle, au sein de leurs troupes. "Gemeinschaft, Führer et Reich" - "communauté, commandant, empire". La fidélité des jeunes à ces mots de ralliement était indéfectible. Mais convaincus, comme toute l'élite intellectuelle du pays, que tout engagement politique était indigne de leur attention, ils n'allaient pas être en mesure de s'opposer, voir même de comprendre, l'exploitation que feraient bientôt les nazis de leurs mots d'ordre

Études universitaires et physique quantique

Heisenberg entama ses études universitaires en 1920, quelques temps après le début de son implication dans le mouvement de jeunesse. Refusé dans le séminaire avancé du mathématicien Lindemann qui songeait davantage à sa retraite qu'au potentiel des étudiants qui se présentaient à lui, Heisenberg se tourna vers la physique théorique. Impressionné par les connaissances et l'audace du jeune homme qui se présentait à lui, Arnold Sommerfeld, le professeur de physique

²⁴David Cassidy rapporte ainsi l'indifférence dont firent preuve de nombreux physiciens face à la notion de complémentarité de Bohr: "Sommerfeld neglected to include complementarity in his supplement on wave mechanics to his own textbook, *Autombau*. Pauli opened his 1933 handbook account of quantum mechanics with the uncertainty principle and complementarity as the formal basis for constructing the new physics, but Fermi founded his influential Ann Arbor lectures on the uncertainty relations alone. Numerous textbook writers have since agreed with Fermi.", *op. cit.*, p. 265.

²⁵Le développement de la pensée systémique s'est fait, à partir des années 40, dans de nombreux domaines. Pour ne citer que quelques uns des pionniers de ce courant de pensée, on peut citer L.v Bertalanffy, en biologie, Wiener et Kùpfmùller, en robotique, C.F. Shannon, en théorie de l'information, et J. v. Neumann, en théorie des jeux.

théorique attaché à l'université de Munich. admit immédiatement Heisenberg dans son séminaire avancé. Mathématicien de formation, Sommerfeld s'était tourné vers la physique théorique suite à l'influence des écrits de Lord Kelvin et de l'enseignement de Félix Klein. Engagé comme professeur à Munich en 1906. Sommerfeld avait mis sur pied un institut de premier ordre en physique théorique. Étonné par les étudiants formés par Sommerfeld, Einstein lui écrivit: "What especially impresses me about you is that you have produced so much young talent, like stamping them out of the ground. That is something entirely unique. You must be able to activate and to cultivate the minds of your pupils."²⁶

Sommerfeld "cultivait l'esprit de ses étudiants" en les mettant le plus rapidement possible en contact avec les recherches en cours en physique théorique. En 1920, ces recherches étaient essentiellement reliées à la structure de l'atome, aux propriétés de la lumière et, conséquemment, à l'explication des spectres lumineux des différents atomes. Un début de réponse avait été apporté à ces questions dès 1913 par le physicien danois Niels Bohr. Ce dernier avait conçu un modèle atomique présentant l'atome comme une sorte de système solaire miniature dont le centre était occupé par un noyau autour duquel tournaient les électrons le long de certaines orbites, lesquelles pouvaient être déterminées par des "conditions quantiques". Pour expliquer la quantification des spectres lumineux, Bohr supposait que l'espace entre les différentes orbites était absolument interdit aux électrons. Ceux-ci se retrouvaient, par le fait même, avec la mystérieuse capacité de sauter directement d'une orbite à une autre sans traverser pour autant les "zones interdites" qui séparaient ces orbites. Quoique permettant d'expliquer la stabilité de la matière, la structure du tableau périodique des éléments et certaines données spectroscopiques, le modèle de Bohr ne pouvait expliquer d'autres spectres que celui de l'atome d'hydrogène. C'est à ces problèmes que Heisenberg se trouva donc confronté dès son arrivée à l'université alors qu'il reçut de Sommerfeld la tâche d'étudier l'effet Zeeman, une séparation des lignes spectrales n'étant pas expliquée par le modèle de Bohr. Loin d'être découragé par un problème aussi ardu, Heisenberg présenta, l'année suivant son entrée à l'université, un modèle du noyau atomique permettant d'expliquer cette séparation des lignes spectrales. Comme le

²⁶Cité par David Cassidy, *op. cit.*, p.102.

souligne Cassidy, dans cette solution, qui s'éloignait autant de la physique classique que du modèle atomique de Bohr, Heisenberg démontrait déjà l'audace et la perspicacité qui allaient caractériser toute son oeuvre scientifique:

[...] the model succeeded - it managed to "save the phenomena" - only because its youthful creator failed to follow the requirements of an acceptable theory as laid down by Bohr and Sommerfeld. [...] Heisenberg's model demonstrated his scientific attitudes and approach, as nurtured by Sommerfeld - a talent for leaping to solutions of seemingly insoluble problems that came to characterize Heisenberg's physics. In the end, he was often right. The characteristics of Heisenberg's core model found justification in the so-called quantum mechanics that Heisenberg and his colleagues presented nearly four years later.²⁷

Sommerfeld ne se contentait pas de confronter ses meilleurs étudiants aux problèmes contemporains de physique théorique, il leur permettait également de rencontrer les plus grands physiciens de l'époque. C'est ainsi que, durant ses études avec Sommerfeld, Heisenberg fit la connaissance des physiciens Alfred Landé, Max Born et Niels Bohr. C'est aussi durant ses études à Munich que Heisenberg rencontra cet autre étudiant de Sommerfeld, Wolfgang Pauli. Élève brillant (il était arrivé à l'université avec un article sur la relativité générale prêt à être publié), Pauli avait une personnalité diamétralement opposée à celle de Heisenberg. Si ce dernier était perçu comme un homme sympathique, tranquille et réservé quoiqu'audacieux, Pauli était quelqu'un d'expressif, extrêmement critique mais aussi très systématique. Alors que Heisenberg adorait partir à l'aube pour une expédition à travers les montagnes en compagnie des membres de sa troupe, Pauli préférait la vie nocturne. Sortant chaque soir dans les cabarets, il travaillait par la suite à divers problèmes de physique durant une bonne partie de la nuit. Malgré leurs caractères et leurs styles de vie très différents, l'influence de Pauli sur la pensée de Heisenberg allait être déterminante. De Pauli, Heisenberg écrira: "pendant de très nombreuses années, jusqu'à sa mort, cet homme a joué pour moi à la fois le rôle d'un ami, et d'un censeur - parfois très sévère, mais toujours bienvenu - de mon travail scientifique"²⁸. Plus qu'un simple critique du travail scientifique de Heisenberg, Pauli allait aussi être un des premiers instigateurs d'une certaine réflexion philosophique chez son ami qui, lorsqu'il fit sa

²⁷Ibid., p.111.

²⁸Werner Heisenberg, *La partie et le tout*, p. 43.

connaissance, appliquait encore sans remord le vieil adage "la fin justifie les moyens" dans ses recherches. Cette attitude quelque peu pragmatique professée par Heisenberg au début de sa carrière est aussi mise en évidence par Cassidy qui écrit:

Indeed, an examination of Heisenberg's work and of his own statements from that period suggests that Heisenberg was in fact singularly devoid of any systematic personal philosophy relating to physics. Only the stimulus of his colleagues and the needs of his science encouraged a deeper concern with philosophical matters. Responding in 1925 to a "philosophical letter" from his friend and colleague Wolfgang Pauli, Heisenberg, by then notorious for his pragmatic, utilitarian physics, remarked: "Unfortunately my own private philosophy is far and away not so clear, but rather a mishmash of all possible moral and aesthetic calculation rules through which I myself often can not find a way."²⁹

Heisenberg obtint son doctorat en 1923 malgré de sérieuses difficultés lors de son examen final. À cette époque, en effet, les candidats au doctorat de l'université de Munich ne recevaient des notes que pour leur thèse et l'examen final qu'ils devaient subir. Heisenberg présenta comme thèse une étude théorique en hydrodynamique qui fut acceptée sans difficulté (Sommerfeld, conscient de la mauvaise presse qu'avait la physique théorique auprès des autres membres de la faculté préférerait qu'il présente, pour son doctorat, une recherche à caractère plus "pratique"). L'examen oral s'avéra beaucoup plus problématique. Après avoir brillé dans ses réponses aux questions de physique théorique et de mathématiques et après avoir réussi correctement les questions d'astronomie, Heisenberg, qui avait négligé ses travaux de laboratoire au profit de ses recherches en physique quantique, échoua les questions de physique expérimentale. Il fallut tout le poids de Sommerfeld pour convaincre Wien, le professeur de physique expérimentale, que Heisenberg méritait malgré tout le titre de docteur. Heisenberg obtint finalement son diplôme mais dut se contenter d'une note finale de C. Déçu, il quitta bientôt Munich afin de poursuivre ses études à l'université de Göttingen sous la gouverne de Max Born avec qui il resta jusqu'en 1926, à l'exception d'un semestre passé à Munich et d'un semestre de travail sous la direction de Bohr à son institut de physique à Copenhague. Cette période allait s'avérer une des plus productive de sa carrière: marquée par le début d'une

²⁹David Cassidy, *op. cit.*, p. 47.

collaboration fructueuse avec Bohr. ces quelques années allaient s'achever sur l'élaboration de la mécanique quantique.

Heisenberg rencontra Niels Bohr pour la première fois alors qu'il étudiait encore avec Sommerfeld. Ce dernier l'avait invité à une série de conférences données par Bohr à Göttingen durant l'été de 1922. Après la troisième conférence, au cours de laquelle le physicien danois abordait une théorie élaborée par Kramers, un de ses étudiants et collaborateurs, Heisenberg se leva pour faire une critique à laquelle Bohr répondit avec quelques hésitations. Après la discussion, ce dernier vint proposer à Heisenberg de l'accompagner pour une randonnée sur le Hainberg, une montagne surplombant la ville. La discussion qu'eurent alors les deux physiciens fut un point tournant dans le développement de la pensée scientifique et philosophique de Heisenberg. Se rappelant cette randonnée, il écrivit: "Cette promenade a sans aucun doute exercé une influence très puissante sur mon évolution scientifique ultérieure; ou peut-être serait-il plus exacte de dire que mon évolution scientifique proprement dite n'a vraiment commencé qu'avec cette promenade."³⁰

Le premier séjour que fit Heisenberg à l'institut de Bohr à Copenhague, au cours de l'automne de 1924, allait jouer un rôle déterminant dans l'élaboration de la mécanique quantique. Premièrement, Heisenberg allait découvrir ce que Pauli appelait la "pensée philosophique" de Bohr. Comme le rappelle Heisenberg: "For though Bohr was an unusually considerate and obliging person, he was able in such a discussion, which concerned epistemological problems which he considered to be of vital importance, to insist fanatically and with almost terrifying relentlessness on complete clarity in all arguments."³¹ La question des limites de nos moyens d'expression jouait, en particulier, un rôle central dans la pensée de Bohr et ce sujet était régulièrement au coeur des discussions philosophiques qu'il avait avec Heisenberg, comme il le mentionne lui-même dans "The Genesis of Quantum Mechanics":

Our conversations touched upon many problems in physics and philosophy, and the requirement of unambiguous definition of the concepts in question was particularly

³⁰Werner Heisenberg, *La partie et le tout*, p. 62.

³¹*Id.*, "Quantum theory and its interpretation", in *Quantum mechanics and measurement*, p.56.

emphasized. The discussions of problems in atomic physics were concerned above all with the strange character of the quantum of action in relation to the concepts employed in the description of all experimental results, and in this connection we also talked about the possibility that mathematical abstraction here, as in relativity theory, might prove useful.³²

Deuxièmement, Heisenberg allait, durant ce premier passage dans la capitale danoise, entreprendre, avec Bohr et Kramers, des recherches liées à la dualité onde-corpuscule de la lumière. En 1922, Compton avait en effet prouvé expérimentalement que la lumière démontrait non seulement les caractéristiques d'une onde mais aussi celle d'une particule, comme Einstein l'avait proposé en 1905. Dans un article publié conjointement, Kramers et Heisenberg proposèrent un modèle de l'atome dans lequel l'émission et l'absorption de la lumière par les électrons de l'atome étaient décrites comme si elles se produisaient à travers une série d'oscillateurs harmoniques quantifiés dont les fréquences et les amplitudes étaient reliées aux composants des séries de Fourier représentant le mouvement des électrons à l'intérieur de l'atome³³. Ces deux éléments allaient être repris prochainement par Heisenberg au cours l'élaboration de la mécanique quantique.

De retour à Göttingen, Heisenberg fut atteint, au début de juin 1925, d'une sérieuse crise de rhume des foies qui l'obligea à quitter la ville pour l'île d'Heligoland dans la mer du Nord, dont l'air était dépourvu de pollens. L'endroit n'offrant guère de distractions, il se consacra à un problème qu'il avait commencé à traiter quelques temps auparavant: la détermination de l'intensité des raies spectrales de l'hydrogène à l'aide des séries de Fourier. Il reprenait ainsi, dans le traitement du spectre de l'hydrogène, une méthode d'analyse similaire à celle développée dans l'article écrit avec Kramers. Après seulement quelques jours de travail, Heisenberg trouva une solution qui, de par sa nature, s'éloignait autant de la théorie quantique

³²Niels Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, p. 75.

³³ Tout phénomène périodique, qu'il soit mécanique, électrique ou optique, peut en effet être représenté mathématiquement à l'aide d'une série de Fourier qui consiste dans l'addition d'un nombre infini de termes représentant chacun un oscillateur harmonique ayant sa propre amplitude et sa propre fréquence. Une masse oscillant à l'extrémité d'un ressort et le balancier d'une horloge sont des exemples d'oscillateurs harmoniques mécaniques. L'idée de Kramers et Heisenberg était de décrire le mouvement supposé périodique de l'électron autour de l'atome par une telle série de Fourier en supposant que l'amplitude et la fréquence de la lumière émise par l'atome étaient reliées d'une quelconque façon aux orbites décrites par les électrons de l'atome.

élaborée par Bohr que cette dernière s'éloignait de la physique classique. Suivant les principes méthodologiques proposées par Einstein dans l'article sur la relativité restreinte de 1905, Heisenberg n'introduisit dans son schème mathématique que des grandeurs observables (c'est-à-dire mesurables). Dans ce qui allait devenir rapidement la *mécanique quantique*. Heisenberg abandonna complètement l'idée de particules circulant sur des trajectoires définies autour de l'atome (ni ces particules, ni leurs orbites ne pouvaient, en effet, être observées directement). Il ne conserva que des tableaux contenant des variables observables. Born trouva bientôt que les tableaux construits par Heisenberg étaient en fait des matrices. Peu de temps après, Heisenberg, Born et son assistant Pascual Jordan publièrent l'article fondateur de la mécanique quantique: "Zur Quantenmechanik II".

Bien que le pouvoir explicatif de la mécanique quantique se révéla rapidement prometteur, plusieurs physiciens accueillirent avec un réel soulagement l'arrivée, en 1926, d'un nouveau schème mathématique permettant lui aussi de traiter les phénomènes de la physique atomique: la mécanique ondulatoire d'Erwin Schrödinger. La théorie de Schrödinger développait l'idée proposée par Louis de Broglie voulant qu'à chaque particule soit associée une longueur d'onde. La mécanique ondulatoire affirmait, en effet, que les électrons ne sont pas de petits corps tournant autour du noyau atomique mais des "ondes de matière". Cette hypothèse audacieuse permettait notamment de remplacer les sauts discontinus effectués par les électrons dans la mécanique quantique de Heisenberg par des transitions continues entre deux modes de vibrations de "l'onde de matière des électrons". La théorie de Schrödinger avait deux avantages importants sur la mécanique de Heisenberg. Premièrement, elle ne faisait appel qu'aux équations différentielles partielles bien connues des physiciens alors que la mécanique quantique demandait une connaissance de l'algèbre matricielle qui était peu connue en physique au début du siècle. Deuxièmement, la mécanique ondulatoire présentait les transitions entre les différents états de l'atome comme des processus continus alors que la mécanique quantique préconisait des sauts discontinus entre les différents états stables de l'atome, ce qui était contraire aux principes les plus fondamentaux de la physique classique. Ces deux points militaient donc en faveur de la théorie de Schrödinger et peu de physiciens se préoccupèrent du fait que son interprétation ne permettait pas de comprendre les phénomènes régis par la loi

de la radiation de Planck. Leur attitude changea cependant rapidement lorsque Schrödinger publia en mai 1926 la preuve que le formalisme mathématique de la mécanique ondulatoire était en fait équivalent à celui de la mécanique quantique. Il devint alors évident que la physique quantique ne possédait toujours pas d'interprétation totalement acceptable.

Cette lacune allait bientôt être comblée par les célèbres relations d'indétermination de Heisenberg et du principe de complémentarité de Bohr. En effet, dès 1927, alors qu'il étudiait à l'institut de Bohr à Copenhague, Heisenberg publia un article intitulé "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik"³⁴, dans lequel il présentait ses fameuses relations d'indétermination, mieux connues en français sous le nom de *relations d'incertitude*. Pourtant, comme le souligne Catherine Chevalley: "L'indétermination des "relations de Heisenberg" est une indétermination qui n'est en rien une incertitude ou un vague conceptuel"³⁵. Ces relations, que Heisenberg démontra à la fois mathématiquement et à l'aide d'expériences de pensée, affirment qu'il est impossible de mesurer précisément et simultanément la position (p) et l'impulsion (q) d'une particule ou encore son énergie (E) à un temps donné (t). Les indéterminations associées à chacune des ces mesures sont reliées entre elles par les deux relations suivantes:

$$\Delta p \Delta q \geq h/2\pi$$

$$\Delta E \Delta t \geq h/2\pi \quad \text{où } h \text{ est la constante de Planck.}$$

Ces relations impliquent, selon Heisenberg, qu'il nous est impossible de connaître avec une précision parfaite l'état initial d'une particule. Conséquemment, notre notion de causalité doit, selon lui, être remise en question. Le principe de causalité, tel qu'explicité par le mathématicien Laplace, stipule en effet que, si la position et la vitesse d'une particule sont connues parfaitement à un moment donné et si on connaît toutes les forces qu'elle subit, il est possible de déterminer parfaitement son mouvement ultérieur. Or, selon Heisenberg, ce principe se trouve invalidé par le fait qu'il est, en principe, impossible de connaître parfaitement l'état initial d'une particule.

³⁴ En français: "Du contenu intuitif de la cinématique et de la mécanique de la théorie quantique".

³⁵ Catherine Chevalley, dans son introduction à *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p.164.

Plus que l'abandon du principe de causalité, cet article démontre aussi les limites des concepts fondamentaux de la mécanique classique. En physique atomique, rappelle alors Heisenberg, nous n'avons le droit d'utiliser les concepts de position, trajectoire, vitesse et énergie que si nous les redéfinissons à l'aide des expériences réalisées pour mesurer ces quantités. Il est clair que pour lui, la validité d'une théorie physique ne se mesure pas à sa ressemblance aux images du monde proposées par la physique classique. Ce fait est reflété, dans l'article, par l'emploi inhabituel que fait Heisenberg du mot *anschaulich* généralement traduit en français par l'adjectif *intuitif*. "Heisenberg", explique Cassidy, "lui donne la signification de "physique" ou de ce qui a une signification empirique pour l'observateur, plutôt qu'une interprétation en termes "d'images". Ce glissement de sens est destiné à contrecarrer la critique de Schrödinger selon laquelle une théorie physique des particules qui contient des discontinuités est irrationnelle et *unanschaulich* (obscur)"³⁶

L'interprétation de la physique quantique connue sous le nom d'*interprétation de Copenhague* sera finalement complétée en 1927 par l'énonciation du principe de complémentarité par Niels Bohr. Selon ce dernier, les images corpusculaires et ondulatoires des divers phénomènes physiques, quoique s'excluant mutuellement, ne sont pas contradictoires mais *complémentaires*. Lorsqu'un expérimentateur analyse un phénomène, il doit nécessairement choisir l'une ou l'autre de ces représentations mais ne peut utiliser les deux à la fois. Bien entendu, cette restriction entraîne une limitation de ce que l'expérience peut nous apprendre, limitation qui est traduite, selon Bohr, par les relations d'indétermination. Cette interprétation des schémas mathématiques de la physique quantique, quoique rejetée par de nombreux physiciens, notamment Einstein, Schrödinger et Planck, fut soutenue avec vigueur par Heisenberg.

³⁶ David Cassidy, "Werner Heisenberg et le principe d'incertitude", p.90. Dans leur traduction de l'article de Heisenberg, parue dans *Quantum Theory and Measurement*, Wheeler et Zurek vont même jusqu'à traduire le mot *anschaulich* par l'anglais *physical*. Catherine Chevalley préfère, quant à elle, la traduction française habituelle de *anschaulich*, soit *intuitif*. Sa traduction a l'avantage d'illustrer le fait que Heisenberg a jugé préférable de modifier la signification d'un mot (*anschaulich*) plutôt que d'utiliser un autre adjectif (*physikalisch*). Au sujet de cette nouvelle définition de *anschaulich* elle écrit d'ailleurs: "Il s'agit donc bien d'une redéfinition, qui transforme le sens du concept d'*anschaulich* en le détachant de sa référence à la région de notre expérience habituelle. Cette redéfinition est le prolongement direct de la critique de l'intuition et des conditions de réalité d'un objet que Heisenberg avait faite en 1926, dans l'article "Quantenmechanik", et elle se situe dans le contexte de l'opposition violente entre Heisenberg et Schrödinger sur cette question [...]" Catherine Chevalley dans son introduction à *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p.159.

La montée du nazisme

En 1927, Heisenberg accepta la chaire de physique théorique à l'université de Leipzig. À 25 ans, il devint ainsi le plus jeune professeur de toute l'Allemagne. Rapidement, il mit en place un centre de recherche en physique quantique de première envergure. Parmi ses étudiants et collaborateurs, il compta notamment Felix Bloch, Lev Landau et Peter Debye, tous récipiendaires d'un prix Nobel, ainsi que Carl Friedrich von Weizsäcker qui fut, pour Heisenberg, un interlocuteur de premier ordre sur le plan philosophique. À cette époque, Heisenberg orienta ses recherches vers un nouveau modèle du noyau atomique composé, non pas de protons et d'électrons, comme le croyaient encore plusieurs physiciens, mais de protons et de neutrons. Sans être le premier à proposer cette hypothèse, les travaux qu'il mena dans cette direction furent à la base des travaux subséquents en physique nucléaire.

Mais ces recherches allaient rapidement être ralenties par l'arrivée au pouvoir, en 1933, des nazis et leur désir d'une "science aryenne". Si de nombreux physiciens allemands de premier ordre émigrèrent alors vers le reste de l'Europe ou les États-Unis, Heisenberg, suivant les conseils de Max Planck, décida de rester en Allemagne et ce, malgré les invitations répétées de ses collègues étrangers désirant le voir émigrer. Comme le souligne David Cassidy¹⁷, les raisons évoquées par Heisenberg pour demeurer en Allemagne, malgré les menaces pesant sur lui, reflétaient la position d'une grande partie de l'élite intellectuelle allemande opposée au régime nazi. Premièrement, Heisenberg était très nationaliste. Profondément attaché à l'Allemagne il rêvait de la voir redevenir une nation à part entière. Deuxièmement, il était convaincu qu'en demeurant en Allemagne, il pourrait, pendant cette période sombre, servir de conseiller à un petit nombre d'étudiants-chercheurs qu'il regrouperait autour de lui, un peu comme il avait servi de guide aux jeunes garçons de sa troupe dans la confusion ayant suivie la fin de la Première Guerre mondiale. Cette certitude, que la science allemande avait besoin de la présence de chercheurs tels que lui, était certainement renforcée par ces attaques répétées des nazis à l'endroit de la physique théorique que nous avons abordées dans l'introduction.

¹⁷ Dans son article sur Werner Heisenberg paru dans le *Dictionary of Scientific Biography*.

Enfin, comme plusieurs autres, Heisenberg était convaincu que Hitler ne resterait pas longtemps au pouvoir.

Enseignant une physique qualifiée de "juive" par les idéologues nazis et luttant contre les renvois des professeurs juifs et gauchistes des universités allemandes, Heisenberg devint rapidement la cible des nazis qui s'opposèrent énergiquement à sa candidature comme successeur de Sommerfeld à l'université de Munich. Cette opposition fut si violente que la vie de Heisenberg fut même, pendant un certain temps, en danger. Au début de la Seconde Guerre mondiale, le gouvernement du troisième Reich reconnut cependant la valeur qu'un scientifique d'une envergure de celle de Heisenberg pouvait avoir pour l'effort de guerre et appela ce dernier à la tête du groupe de recherche sur la fission de l'uranium chargé de développer un réacteur nucléaire et, si possible, une bombe atomique. Des erreurs techniques et scientifiques, le manque d'argent et de matériel ainsi que le bombardement des installations de recherche par les Alliés empêchèrent à la fois la réalisation du réacteur et de la bombe. À la fin de la guerre, Heisenberg fut capturé par les Américains et emprisonné pendant six mois dans le manoir de Farm Hall près de Cambridge en Angleterre avec quelques autres grands physiciens allemands.

L'après-guerre

À son retour en Allemagne, Heisenberg reprit non seulement ses recherches en physique des particules, en supraconductivité et en hydrodynamique mais s'attela à la reconstruction des structures scientifiques de l'Allemagne. Il rouvrit l'Institut de physique Kaiser Wilhelm sous le nom d'Institut Max Planck et milita en faveur d'une politique scientifique nationale pour la nouvelle République Fédérale d'Allemagne. Grand défenseur de la production d'énergie nucléaire, il s'opposa farouchement à la proposition du chancelier Adenauer de munir la RFA d'ogives nucléaires.

À la fin des années 50, il commença à développer, en collaboration avec Wolfgang Pauli, une théorie unifiée des champs dans l'espoir d'unifier la relativité et la mécanique quantique. Quoique Pauli abandonna rapidement cette voie de recherche, Heisenberg resta convaincu, jusqu'à la fin de sa vie, qu'une vraie compréhension de l'existence et du mouvement de la

matière ne pourrait venir que d'une théorie des champs plutôt que de l'invention continue de nouvelles particules. Pour lui, une théorie des champs, en tentant d'expliquer l'existence de matière à partir des symétries trouvées dans les équations mathématiques, approfondissait l'idée de Platon qui, dans le *Timée*, représentait les différents atomes de matière à l'aide de formes géométriques simples.

Heisenberg mourut d'un cancer du rein et de la vésicule biliaire en 1976. Autant sa vie personnelle que sa pensée philosophique et ses recherches scientifiques furent orientées vers la recherche de cet "ordre central" qu'il pressentait à travers la beauté du monde. Comme le notait von Weizsäcker³⁸, ce qui intéressait le plus Heisenberg dans la philosophie, plus encore que les questions touchant directement son domaine de recherche, c'était la beauté des systèmes philosophiques, beauté qu'il retrouvait aussi bien dans les lois de la physique et les démonstrations mathématiques que dans la musique qu'il aimait profondément. Ce ne fut pas des lectures philosophiques ni le désir de "déplacer les problématiques traditionnelles de la connaissance vers une philosophie du langage"³⁹ qui amenèrent Heisenberg à s'interroger sur le rôle du langage dans le développement de la physique. S'il se questionna, tout comme Einstein, von Weizsäcker et, bien sûr, Bohr, sur nos modes d'expression et leurs rôles dans la science, c'est avant tout parce que le développement de la physique elle-même l'exigeait. Comme il le soulignait lui-même dans *Physics and Philosophy*, la question de la possibilité de la description de l'atome à l'aide du langage en est une autant de langage que de physique.

³⁸David Cassidy, *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*, p. 48.

³⁹Comme le propose Catherine Chevalley, dans son introduction à *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p. 154.

Chapitre 2. Qu'est-ce que comprendre en physique théorique?

Les buts de la science

De même que pour bien comprendre le travail d'un ouvrier il faut connaître les produits fabriqués dans l'usine où il travaille, il est nécessaire, pour saisir le rôle du langage et des mathématiques en physique, de connaître les buts de cette science. Dans ses différents écrits, Heisenberg a assigné trois buts différents à la physique: (1) décrire la nature, (2) la comprendre et (3) saisir la place de l'homme dans l'univers. Heisenberg décrit les deux premières tâches de la science dans *Physics and Philosophy* où il écrit: "[...]physics is a part of science and as such aims at a description and understanding of nature."⁴⁰ Quant à la troisième tâche qu'il attribue à la physique, il l'aborde surtout dans ses premiers écrits, tel *Philosophic Problems of Nuclear Science* où il écrit: "Science has two tasks: to pass on an understanding of nature, thus enabling man to make nature serve his own purpose, and to indicate to man his appropriate position in nature through a real insight into inter-relations."⁴¹

Mais Heisenberg a-t-il bien cerné les buts de la science? C'est ce qu'il nous faut regarder ici à l'aide de réflexions faites à ce sujet par d'autres physiciens. Pour Niels Bohr, "The task of science is both to extend the range of our experience and to reduce it to order [...]"⁴² Albert Einstein abonde dans le même sens en écrivant: "La science n'est pas une collection de lois, un catalogue de faits non reliés entre eux. Elle est une création de l'esprit humain au moyen d'idées et de concepts librement inventés. Les théories physiques essaient de former une image de la réalité et de la rattacher au vaste monde des impressions sensibles."⁴³ Donc, si la science a bien pour but d'accumuler des faits expérimentaux, sa tâche principale demeure la découverte d'un ordre dans ces faits et observations amassés par les scientifiques. C'est à cette recherche d'ordre que fait référence Heisenberg lorsqu'il écrit que la physique doit nous permettre de décrire et de comprendre le monde. Mais que signifie exactement les termes "décrire" et

⁴⁰Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.144.

⁴¹*Id.*, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p.18

⁴²Niels Bohr, *Atomic Theory and the Description of Nature*, p.1

⁴³Albert Einstein et Léopold Infeld, *L'évolution des idées en physique*, p.274.

"comprendre" en physique? Cette question demande qu'on s'y attarde plus longuement. Nous y reviendrons à la fin de ce chapitre. Au préalable, il nous faut dire un mot des autres tâches de la physique.

L'acquisition des données factuelles

Comme le soulignent Bohr et Einstein, avant même la recherche d'un ordre dans les phénomènes naturels, la science a pour objectif l'acquisition de données expérimentales à partir desquelles cet ordre pourra être établi. Pour Heisenberg aussi, l'expérimentation est la base sur laquelle doit reposer toute la physique moderne et même une question aussi abstraite que "Qu'est-ce qu'une particule élémentaire" doit par-dessus tout être répondue par l'expérience⁴⁴. Bien que le physicien recherche les lois fondamentales de la nature, il ne peut atteindre ces lois qu'en "questionnant la nature" à l'aide de diverses expériences dont les résultats lui donneront quelques indices quant aux principes sous-jacents:

it is a characteristic feature of modern science to institute experiments, i.e. to put specific questions to nature, whose answers are then to yield information about its laws. [...] Attention is directed not so much to the fundamental laws as to the regularities among the details. Natural science is developed, so to speak, from the other end, not from the general laws but from individual groups of phenomena, in which nature has answered the questions put by experiment.⁴⁵

Le lien entre expérience et théorie en physique n'est pas seulement très étroit, il est également bidirectionnel. S'il est vrai, nous dit Heisenberg, que l'expérience est la condition nécessaire à toute compréhension physique, la théorie détermine aussi, dans une certaine mesure, la direction des recherches expérimentales. Ainsi écrit-il dans "Recent Changes in the Foundation of Exact Science": "It is of course true that experimental work forms, in all fields, the necessary precondition for theoretical understanding and that advances in principle are achieved only

⁴⁴ Heisenberg écrit en effet: "The question "What is an elementary particle?" must naturally be answered above all by experiment.", Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.71.

⁴⁵Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.111.

under the pressure of experimental results and not by speculation. On the other hand, the direction of experimental work is probably determined by the pointers of theory."⁴⁶

Malgré le rôle central joué par l'expérimentation dans le développement de la physique, Heisenberg ne considère pas cette activité comme un *but* de cette science mais plutôt comme un moyen utilisé par le physicien pour atteindre une certaine compréhension de la nature. La partie expérimentale de la physique, sans être totalement absente de son oeuvre, apparaît conséquemment comme subordonnée à la partie théorique.

Une sous-estimation du rôle pratique de la physique?

Heisenberg semble aussi ignorer cette autre fonction de la science qu'est l'application pratique des connaissances physiques. Il ne s'agit pas là d'un trait qui lui soit particulier. En effet, le champ des applications pratiques de la science, c'est-à-dire la technologie en général, occupe un rôle secondaire non seulement dans l'oeuvre de Heisenberg mais aussi dans les écrits de nombreux autres grands physiciens. Einstein, par exemple, écrivait: "Le chercheur doit servir la science pour elle-même, sans se préoccuper des résultats pratiques. Autrement la science végète en perdant de vue ses enchaînements essentiels."⁴⁷ Comme le notent Merleau-Ponty et Balibar, cette citation montre que "l'image dominante du savant chez Einstein est celle d'un homme passionnément voué à la recherche contemplative de l'ordre naturel, indifférent aux applications pratiques de son savoir."⁴⁸

Il importe cependant de noter que ce n'est qu'un aspect de la technologie qui est laissé pour compte, à savoir le développement des instruments, des outils et autres objets créés en vue d'un usage pratique⁴⁹. Il existe cependant un second aspect à la technologie que le théoricien ne peut

⁴⁶*Id.*, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p.19. Heisenberg rappelle dans *Tradition in Science* que Bohr a aussi souligné l'importance de cette influence mutuelle existant entre théorie et expérience dans le développement de la physique: "Niels Bohr [...] considered the continuous exchange of information between experiment and theory as a central task in the progress of physics." Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.5.

⁴⁷Albert Einstein. *Oeuvres choisies*, tome 5, p.176.

⁴⁸Jacques Merleau-Ponty et Françoise Balibar, *Albert Einstein. Oeuvres choisies*, tome 5, p. 176.

⁴⁹ Ce détachement des théoriciens envers le développement d'instruments met en évidence une caractéristique importante de la science: théorie et pratique demandent des habiletés très diverses et peuvent ne pas soulever le même intérêt chez un scientifique. A preuve l'indifférence démontrée par Heisenberg au cours d'un séminaire de physique appliquée dans lequel il devait effectuer, à l'aide d'un interféromètre Fabry-Perot, des mesures sur l'effet

négliger: le fait que les applications technologiques sont la preuve que les théories développées sont correctes. Le physicien, admet Heisenberg, a besoin de voir ses hypothèses confirmées par la nature: "There is another much stronger motive which fascinates the good scientist in connexion with practical application, namely: to see that it works; to see that one has correctly understood nature."⁵⁰ La technologie offre donc à la physique les instruments dont elle a besoin pour son développement ainsi que la confirmation de ses hypothèses. La physique, à son tour, met en évidence les lois nécessaires au développement de la technologie. L'extrait suivant, tiré de *La nature dans la physique contemporaine*, explique bien comment s'établit cette interaction nécessaire entre science et technologie:

la technique a toujours été la condition et la conséquence des sciences de la nature. Elle en est la condition, parce qu'un élargissement et un approfondissement de la science ne peut souvent se produire que par un perfectionnement des moyens d'observations: que l'on pense à l'invention de la longue-vue et du microscope et à la découverte des rayons de Roentgen. La technique, d'autre part, est la conséquence des sciences de la nature car l'exploitation technique des forces naturelles ne devient généralement possible que grâce à une connaissance approfondie dans le domaine de l'expérience concerné.⁵¹

Heisenberg reconnaît donc bien le rôle essentiel joué par la technologie dans le développement de la science. Cependant, tout comme l'accumulation de résultats expérimentaux par la physique, les applications pratiques de cette science sont passées presque sous silence chez Heisenberg préoccupé, au premier chef, de physique théorique. Pour ce motif, nous nous contenterons d'étudier dans ce mémoire le rôle du langage et des mathématiques en physique théorique selon Heisenberg.

Zeeman anormal dans le mercure. Malgré la pertinence de cette expérience pour ses propres recherches théoriques, Heisenberg ne lui porta aucun intérêt. Comme le rappelle David Cassidy: "[...]the overconfident theorist had little use for laboratory exercises. Nor did he trouble himself to consider the theory of his instruments, despite the obvious relevance to his own work on the Zeeman effect." David C. Cassidy, *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*, p. 152.

⁵⁰Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.7.

⁵¹*Id.*, *La nature dans la physique contemporaine*, p.20-21.

Le rôle de l'homme dans la nature

Revenons maintenant aux buts attribués par Heisenberg à la physique, en commençant par le dernier: la détermination de la place de l'homme dans la nature. Une telle position ne manque pas de surprendre. Chez Heisenberg, elle a sans aucun doute plusieurs sources. D'une part, tout comme Einstein, Heisenberg semble considérer la physique comme la façon la plus satisfaisante de contempler la réalité. De fait, cette science devenait pour lui le moyen idéal pour la recherche de cet "ordre central" dont nous avons parlé plus tôt et qui, une fois atteint, nous permettrait de nous faire une idée plus juste des buts et des capacités de l'homme. D'autre part, cette conviction que la physique permet de comprendre notre place dans la nature a probablement été renforcée chez Heisenberg par le développement de la mécanique quantique dans laquelle la présence de l'observateur ne peut plus être négligée dans la description des phénomènes physiques. Ce fait semble parfois se traduire, chez Heisenberg, par l'idée que la physique traite autant des expériences elles-mêmes que des scientifiques qui les mènent. Par exemple, il écrit dans *La nature dans la physique contemporaine*:

C'est avant tout le réseau des rapports entre l'homme et la nature qui est la visée centrale de cette science [la physique quantique]; grâce à ces rapports, nous sommes, en tant que créatures vivantes physiques, des parties dépendantes de la nature, tandis qu'en tant qu'hommes, nous en faisons en même temps l'objet de notre pensée et de nos actions. La science, cessant d'être le spectateur de la nature, se reconnaît elle-même comme partie des actions réciproques entre la nature et l'homme. La méthode scientifique, qui choisit, explique, ordonne, admet les limites qui lui sont imposées par le fait que l'emploi de la méthode transforme son objet, et que, par conséquent, la méthode ne peut plus se séparer de son objet. Cela signifie que *l'image de l'univers selon les sciences de la nature cesse d'être, à proprement parler, l'image de l'univers selon les sciences de la nature.*⁵²

Que la physique quantique tienne compte de l'observateur dans ses équations n'implique cependant pas qu'elle traite à proprement parler de la place de l'homme dans l'univers. Cette science, en effet, considère l'observateur comme un simple élément d'un système physique très vaste interagissant avec le système physique, plus petit, sous observation. La science étudie certes les relations mesurables existant entre les divers objets contenus dans l'univers. Mais,

⁵²ibid., p.34.

quand elle traite de l'homme. la physique en parle comme d'un corps ayant *telle* masse, *telle* forme, *telle* résistance électrique, *telle* densité, etc. Elle ne traite pas de son milieu social, de ses devoirs moraux ou de ses croyances religieuses. Le scientifique *en tant que scientifique* ne s'intéresse ni à la politique, ni à la morale, ni à la métaphysique. C'est pourquoi Einstein disait à l'archevêque Davidson que la théorie de la relativité n'aurait aucun impact sur la religion tout simplement parce que "Relativity is a purely scientific theory, and has nothing to do with religion."⁵³

La position proposée par Heisenberg dans ses premiers écrits voulant que la physique ait pour but la détermination du rôle de l'homme dans le cosmos est donc quelque peu exagérée. Il ne faudrait cependant pas tomber dans l'excès contraire et suivre Max Weber qui écrit, dans *Le savant et le politique*: "S'il existe des connaissances qui sont capables d'extirper jusqu'à la racine la croyance en l'existence de quoi que ce soit ressemblant à une "signification" du monde, ce sont précisément ces sciences-là"⁵⁴. Bien sûr, comme écrivait Émile Meyerson: "Le progrès de la science a eu naturellement pour conséquence de restreindre de plus en plus le domaine du merveilleux. [...] et là où nos ancêtres ne voyaient que miracles échappant à toute prévision, nous distinguons de plus en plus l'action de lois rigoureuses."⁵⁵ Mais il ne faut pas confondre "merveilleux" et "signification". Que la science réduise le royaume de l'incompréhensible n'implique pas qu'elle ait une influence quant au sens que nous attribuons aux divers événements se produisant dans l'univers.

Une position intermédiaire semble donc indiquée. Même si elles ne nous ont pas permis de découvrir notre place dans le cosmos, les découvertes scientifiques ont grandement modifié l'image que nous en avons. Le système héliocentrique de Copernic, le Big Bang et la théorie de l'évolution de Darwin nous ont forcés à un questionnement sur la place que nous occupons dans l'univers. En ce sens, Arthur Eddington a raison de mettre une sourdine à la remarque faite par Einstein à l'archevêque Davidson: "The compartments into which human thought is divided are not so water-tight that fundamental progress in one is a matter of indifference to

⁵³ Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, p.7.

⁵⁴ Max Weber, *Le savant et le politique*, p.75.

⁵⁵ Émile Meyerson, *Identité et réalité*, p. 6.

the rest. The great change in theoretical physics which began in the early years of the present century is a purely scientific development; but it must affect the general current of human thought"⁵⁶. On ne peut nier que la physique ait un grand impact sur notre pensée et que ses résultats nous obligent à réfléchir sur notre position dans l'univers. Mais cette réflexion n'est, quant à elle, pas du domaine de la physique.

La recherche d'ordre dans la nature

Nous devons maintenant nous pencher sur ce que signifient les verbes "comprendre" et "décrire" en physique théorique, afin de préciser quels sont, selon Heisenberg, les buts premiers de cette science. Cette investigation se révélera d'ailleurs des plus importantes dans la compréhension du rôle du langage et des mathématiques dans le développement de la physique théorique.

Ce qui est considéré comme la tâche principale de la physique par Bohr et Einstein, c'est-à-dire "ordonner les faits", est, chez Heisenberg, séparée en deux actions distinctes, à savoir: décrire et comprendre la nature. On est volontiers d'accord avec l'affirmation voulant que la science décrive la nature, à la condition de la nuancer quelque peu. En effet, tout comme une photographie ne rend compte que des couleurs et des formes d'un feu d'artifice, à un instant précis, sans toutefois donner d'informations sur les bruits et les odeurs qui caractérisent ce spectacle, la science, lorsqu'elle décrit la nature, ne rend compte que de certains aspects du système qu'elle traite, à savoir essentiellement ses aspects *mesurables*. Elle laisse ainsi de côté d'autres aspects du phénomène qui pourraient toutefois se retrouver dans une description littéraire du même phénomène. Comme le remarquait Heisenberg à propos des descriptions de la nature faites par la science: "Le terme "description" de la nature se mit également à perdre de plus en plus de sa signification première de représentation vivante, frappante de la nature; il signifiait de plus en plus une description mathématique de la nature, à savoir la collection la plus précise, la plus condensée, mais aussi la plus complète, d'informations sur les rapports, ou lois, existant dans la nature."⁵⁷

⁵⁶ Arthur Eddington, *op. cit.*, p.8.

⁵⁷ Werner Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, p.14.

D'ailleurs, il est nécessaire d'ajouter que la science ne traite pas des phénomènes naturels tels qu'ils se présentent dans notre expérience quotidienne. Par sa méthode, la physique sélectionne le phénomène et l'isole du reste du monde, afin d'obtenir des réponses précises à ses questions. Prenons par exemple la loi de la chute des corps de Galilée, qui affirme que tous les corps subissent la même accélération lorsqu'ils tombent. Nous considérons habituellement cette loi comme valide. Pourtant, par nos expériences quotidiennes, nous savons tous que, dans les faits, une pierre arrivera au sol plus rapidement qu'une feuille de papier. Comme l'écrit Heisenberg:

[Galileo] succeeded in formulating mathematically the laws of this theoretical movement, though it can be only approximately realized by experiment. In place of a direct concern with the processes of nature as it surrounds us, he is concerned with the mathematical formulation of a limit which can only be checked under extreme conditions. The possibility of formulating laws from natural processes in a precise and simple manner is achieved at the sacrifice of applying these laws immediately and directly to natural events.⁵⁸

Ces remarques faites à propos de la possibilité qu'à la physique de décrire les phénomènes naturels s'appliquent également à sa capacité à nous amener à comprendre ces mêmes phénomènes. Si la plupart des gens croient que la physique peut effectivement décrire la nature, plusieurs refusent l'idée que cette science puisse nous donner une véritable compréhension des phénomènes naturels. Cette conviction, aujourd'hui largement répandue, se reflète même dans le langage. Comme le remarque Heisenberg, nous remplaçons de plus en plus dans notre vocabulaire l'expression "explication de la nature" (*Naturerklärung*) par celle de "description de la nature" (*Naturbeschreibung*)⁵⁹. Pourtant, ajoute-t-il, il est indéniable que la science permet non seulement de décrire précisément les phénomènes naturels, mais aussi de les comprendre.

⁵⁸Id., *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p.35

⁵⁹Heisenberg écrit en effet: "The more new fields are opened up by physics, chemistry and astronomy, the more we are in the habit of replacing the words 'interpretation of nature' (*Naturerklärung*) by the more modest expression 'description of nature' (*Naturbeschreibung*).", Werner Heisenberg, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p. 34.

Décrire la nature: le rôle des théories phénoménologiques en physique

Même s'il croit fermement que la physique nous permet de comprendre la nature, Heisenberg admet qu'il existe aussi des théories physiques qui ne sont que *phénoménologiques*. "Par théorie phénoménologique", écrit-il dans "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der theoretischen Physik". "on entend la formulation de régularités du domaine des phénomènes physiques observés par lesquelles on ne tente pas de ramener la relation à une connexion générale fondamentale qui la rendrait ainsi intelligible".⁶⁰ Ces théories phénoménologiques, ajoute-t-il, sont employées lorsqu'il nous est impossible d'appliquer les lois fondamentales de la nature, c'est-à-dire soit dans les cas où on ne connaît pas ces lois, soit dans les cas où, même si les lois fondamentales sous-jacentes aux phénomènes sont connues, il est difficile de les appliquer (essentiellement en raison de difficultés mathématiques). Par exemple, l'astronomie de Ptolémée et l'électromagnétisme de Faraday sont, selon lui, des illustrations de théories phénoménologiques utilisées pour pallier notre ignorance des lois fondamentales. Dans la mécanique des fluides, par contre, les lois fondamentales du mouvement sont connues mais, comme l'application directe de ces lois aux phénomènes s'avère mathématiquement complexe, il est plus pratique d'utiliser des règles empiriques phénoménologiques pour prédire les phénomènes observés dans ce domaine.

Heisenberg accorde que ces théories phénoménologiques ont un rôle pratique important. Elles permettent, en effet, de décrire des phénomènes, de prédire le résultat d'expériences et de développer les éléments technologiques d'un domaine donné et ce, même si on ne connaît pas les lois de la nature qui s'y rapportent ou qu'on ne sait pas comment appliquer ces dernières. De plus, ajoute-t-il, dans les cas où les lois de la nature ne sont pas connues, les théories phénoménologiques sont aussi appelées à jouer un rôle heuristique important puisque parfois elles peuvent indiquer la voie menant aux lois régissant effectivement les phénomènes

⁶⁰"Unter „phänomenologischer“ Theorie kann man die Formulierung von Gesetzmäßigkeiten im Bereich der beobachteten physikalischen Phänomene verstehen, bei denen nicht versucht wird, den Zusammenhang auf ein zugrunde liegendes allgemeines Naturgesetz zurückzuführen und dadurch verständlich zu machen.", Werner Heisenberg, "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der Theoretischen Physik", p.384.

observés. Selon leur capacité heuristique, on peut donc distinguer, selon Heisenberg, deux sortes de théories phénoménologiques. D'une part, il y a les théories phénoménologiques qui n'expriment que les relations formelles propres à certains phénomènes comme le système géocentrique de Ptolémée⁶¹ ou la formule de Woldemar Voigt décrivant l'effet Zeeman anormal⁶². D'autre part, il y a les théories phénoménologiques qui nous permettent, mais de façon encore imprécise, de saisir un peu la "nature physique" du phénomène. Pour Heisenberg: "Il est évident que la valeur heuristique des théories du premier groupe est proportionnellement peu importante puisque la relation formelle elle-même ne laisse pas connaître la nature. Par contre, les théories phénoménologiques du second groupe sont en général le premier pas vers une compréhension définitive⁶³". Pour illustrer cette affirmation, Heisenberg compare la théorie de Ptolémée avec les lois de Kepler. Le système géocentrique de Ptolémée, bien que permettant une description précise des phénomènes, ne pouvait, selon Heisenberg, nous permettre de saisir un jour les lois régissant le mouvement des astres, alors que les lois de

⁶¹Heisenberg écrit en effet à propos de l'astronomie de Ptolémée: "Un autre exemple qui fut, il y a deux mille ans, d'une très grande importance est l'astronomie de Ptolémée qui a mis à profit la possibilité purement formelle de représenter les mouvements périodiques par des séries de Fourier." ("Ein anderes Beispiel von sehr viel größerem Gewicht ist zwei Jahrtausende früher die Astronomie des Ptolemäus gewesen; sie hat die rein formale Möglichkeit ausgenutzt, periodische Bewegungen durch Fourierreihen darzustellen"), Werner Heisenberg, "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der Theoretischen Physik", p.386.

⁶²Heisenberg explique, dans "Theory, criticism and a philosophy", pourquoi, selon lui, la théorie de Voigt n'est qu'une théorie phénoménologique formelle: "Voigt had given a theory of the anomalous Zeeman effect of the sodium D lines. For doing that he had introduced two coupled linear oscillators arranged as such that the two D lines came out, and he could also assume the coupling in such a way that he got the anomalous Zeeman effect [...] Jordan and I tried to calculate the same levels and intensities from quantum mechanics. We got exactly the same formulae as Voigt [...] So, in one way you see that phenomenological theories can be extremely successful insofar as they can sometimes give the exact results and consequently agree extremely well with experiments. Still, at the same time they do not give any real information about the physical content of the phenomenon, about those things which really happen inside the atoms. Of course, one can finally understand it, one can say: in quantum theory, in order to calculate an anomalous Zeeman effect we have to solve a perturbation problem, represented by a "secular" determinant. Such a "secular" determinant means a set of several linear equations with several unknowns. Now two coupled oscillators are just the same thing, they also mean several equations with several unknowns and therefore finally one can understand that these two theories are identical in their formalism although the physical content is extremely different.", Werner Heisenberg, "Theory, criticism and a philosophy", p.425.

⁶³"Offenbar ist der heuristische Wert der Theorien der ersten Gruppe verhältnismäßig gering, da der formale Zusammenhang eben das Wesentliche oft nicht erkennen läßt. Dagegen sind die phänomenologischen Theorien der zweiten Gruppe in der Regel die Vorstufen zum endgültigen Verständnis.", Werner Heisenberg, "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der Theoretischen Physik", p.386.

Kepler étaient un pas presque nécessaire dans la découverte des lois de la gravitation de Newton.

Il existe donc, pour Heisenberg, une certaine hiérarchisation des théories selon le type de connaissances que celles-ci peuvent nous apporter. Au bas de l'échelle, on retrouve les théories phénoménologiques qui ne donnent qu'une compréhension formelle des phénomènes. Ces théories sont utiles; elles permettent de décrire et prédire certains phénomènes, mais elles ne donnent aucune connaissance des lois de la nature et ne peuvent pas non plus nous aiguiller vers des théories qui nous donneraient une telle connaissance. Viennent ensuite les théories phénoménologiques qui, quoique ne nous donnant pas encore une compréhension claire du phénomène, contiennent déjà des concepts mettant en évidence certains aspects de ces lois de la nature qui nous sont encore inconnues. Finalement, en haut de l'échelle, on retrouve les théories proprement physiques qui, comme la mécanique newtonienne, nous donnent une "véritable compréhension" de phénomènes naturels.

La distinction apportée ici par Heisenberg illustre bien cette conviction des physiciens qu'il existe des théories qui nous donnent une véritable compréhension du monde alors que d'autres ne nous en fournissent qu'une simple description phénoménologique. Pourtant, on ne peut s'empêcher de trouver cette division quelque peu arbitraire. Au mieux, il semble que Heisenberg ait utilisé un critère "historique" pour établir sa classification: une théorie ne contenant aucun des concepts retenus par une théorie présentement en cours semble automatiquement classée comme une théorie phénoménologique purement "formelle", alors qu'une théorie ayant été une étape vers la compréhension du domaine étudié est considérée comme apportant nécessairement une certaine compréhension de la nature. Heisenberg admet d'ailleurs que, tant que l'on n'a pas trouvé une théorie nous donnant une compréhension véritable, il est impossible de déterminer si une théorie phénoménologique est ou non purement formelle. À la fin de "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der Theoretischen Physik", il écrit:

En faisant usage de telles réflexions sur la physique actuelle, en particulier sur le point d'intérêt qu'est maintenant la théorie des particules élémentaires, nous constatons, à partir des exemples précédents, à quel point il est important de considérer si les

théories phénoménologiques naissantes ou déjà créées indiquent le chemin d'une compréhension des relations véritables ou si elles sont davantage de nature formelle. Il n'existe cependant aucun critère utilisable pour cela et, jusqu'à l'éclaircissement complet des relations, les différents physiciens estimeront différemment ces débuts phénoménologiques isolés.⁶⁴

En conséquence, il est nécessaire, pour distinguer une théorie phénoménologique d'une théorie pouvant nous apporter une réelle compréhension du monde, de pouvoir reconnaître les théories qui nous apportent plus qu'une simple description des événements. Mais comment faire pour savoir si les théories que nous utilisons aujourd'hui nous donnent une réelle compréhension de la nature? Comment peut-on savoir si la mécanique newtonienne, par exemple, nous permet de comprendre véritablement ce qu'est le mouvement? Quel critère permet de distinguer les théories formelles des théories nous offrant une compréhension réelle du monde? Pour répondre à cette question, il nous faut tout d'abord examiner ce que signifie "comprendre" en physique théorique.

Comprendre en physique théorique

Réflexions étymologiques

Afin de cerner ce que Heisenberg entend par "comprendre" en physique théorique, il est essentiel de prendre quelque recul afin de bien distinguer les différents sens recouverts par ce verbe. Quoique le mot *comprendre* soit emprunté au latin *comprehendere*, on devine encore aisément, dans le terme français, la signification première de ce mot, à savoir: "*prendre avec*". Cette signification est illustrée avec encore plus de force par ces synonymes de *comprendre* que sont *saisir* ou encore *posséder* (quelque chose par l'esprit). Dans son sens premier, le terme français *comprendre* dénote le fait que l'esprit qui comprend saisit directement, sans intermédiaire, l'objet de son étude, tout comme, lorsqu'on prend un cailloux dans sa main, le

⁶⁴"So lernt man aus den genannten Beispielen, wie wichtig es ist, den entstehenden oder schon entstandenen phänomenologischen Theorien anzusehen, ob sie den Weg zu einem Verständnis der eigentlichen Zusammenhänge weisen, oder ob sie mehr formaler Natur sind. Dafür gibt es allerdings keine allgemein brauchbaren Kriterien, und bis zur endgültigen Klärung der Zusammenhänge werden verschiedene Physiker die einzelnen phänomenologischen Ansätze verschieden beurteilen.". Werner Heisenberg, "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der Theoretischen Physik", p.387

contact entre la pierre et soi-même est *direct*. Cette idée, que l'esprit puisse saisir immédiatement un objet se retrouve aussi dans cet autre synonyme de *comprendre* qu'est le verbe *voir*. En effet, tout comme nous pouvons connaître directement la couleur des choses à l'aide de nos yeux, nous pouvons saisir directement un concept à l'aide de notre esprit. Cette analogie existant entre le premier sens de *voir*, signifiant "percevoir par les yeux" (*Larousse*), et celui signifiant "comprendre" se retrouve d'ailleurs dans bien d'autres langues; en anglais (*Do you see what I mean - Voyez-vous ce que je veux dire?*), en allemand (*Ich sehe meinen Irrtum ein. - Je vois mon erreur*), ou en espagnol (*Por lo que veo - À ce que je vois*).

Le premier sens de *comprendre* peut donc être formulé de la manière suivante: "saisir quelque chose par l'esprit directement, sans aucun intermédiaire." Mais ce premier sens ne recouvre cependant pas tous les aspects englobés par le verbe *comprendre*. On peut d'ailleurs facilement s'en apercevoir en s'arrêtant un instant sur la signification du verbe *expliquer* qui, en fait, n'est rien d'autre que "faire comprendre à quelqu'un d'autre". Comment expliquer ce qui est immédiat? Comment expliquer, par exemple, ce qu'est le rouge? En le montrant, tout simplement. Si une chose ne peut être comprise que directement, si elle ne peut pas être saisie par l'intermédiaire de concepts, on ne peut pas la comprendre tant que notre esprit ne l'a pas "vue" et personne ne peut nous l'expliquer autrement qu'en nous montrant la chose du doigt. Il existe cependant de nombreux cas où il est possible de donner une explication d'un phénomène à l'aide de concepts ou d'images. Si nous voulons, par exemple, expliquer ce qu'est une galaxie, nous ne pouvons nous contenter de montrer du doigt un point lumineux dans le ciel en disant: "Ceci est une galaxie." Dans un tel cas, il est évident qu'une définition ostensive n'est pas suffisante et il nous faut passer par des mots et des concepts pour faire comprendre à notre interlocuteur qu'une galaxie est un "vaste ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaires dont la cohésion est assurée par la gravitation." (*Larousse*).

La compréhension n'est donc pas nécessairement un processus ne requérant aucun intermédiaire. Le plus souvent, elle ne survient qu'après une certaine démarche de l'esprit, après un certain *raisonnement* qui se poursuit jusqu'à ce que la compréhension soit atteinte. Dans ces

cas "comprendre" peut être associé à un "arrêt" effectué par l'esprit après une certaine démarche⁶⁵. Cette autre réalité recouverte par le mot *comprendre* est particulièrement visible dans le mot allemand *verstehen* où la particule *ver-* intensifie la perfection du verbe *stehen*, littéralement "se tenir debout". On retrouve aussi cette idée dans le grec ἐπίσταμαι (se tenir debout *sur*) ou encore le verbe anglais *understand* (*to stand*, "se tenir debout", *under*, "sous"). Si une démarche est nécessaire pour comprendre un phénomène, c'est que ce que l'on cherche n'est pas immédiatement accessible à notre esprit; il est donc nécessaire, afin de comprendre la nature, de découvrir par le raisonnement la structure *sous-jacente* (de sous et du lat. *jacens*, qui est étendu) du phénomène étudié.

Comme nous pourrions le constater tout au long de cette étude, c'est ce second aspect de *comprendre* dont il est surtout question en physique. Il n'est donc pas surprenant que Heisenberg ait habituellement choisi, dans ses écrits allemands, le verbe *verstehen* plutôt que son synonyme *begreifen*, de *greifen*, saisir, qui illustre davantage le premier sens de comprendre. Il n'est pas non plus étonnant que, dans ses textes anglais, il ait préféré le verbe *to understand* aux verbes *to comprehend* ou *to grasp*. Que la compréhension que la physique nous donne du monde soit médiante, cela ne fait aucun doute pour Heisenberg, puisque nous devons, pour développer cette science, faire appel au langage. Or, écrit-il, "all language, indeed, all art and all poetry in some way mediate understanding."⁶⁶ Pour lui, donc, il n'est possible d'atteindre la compréhension en physique théorique qu'après une certaine démarche de l'esprit: "[...] the road to understanding [...]", écrit-il, "leads to its goal after a finite number of steps"⁶⁷. Il ne faut cependant pas croire que cet "arrêt" dans le raisonnement soit arbitraire: la compréhension est, pour l'esprit humain, quelque chose de naturel et c'est pourquoi, comme le souligne Heisenberg, nos raisonnements arrivent généralement à une fin: "the road into abstraction does not continue forever. but has a well defined natural terminus"⁶⁸.

⁶⁵Cette image "d'immobilité de l'esprit" associée à la compréhension se trouve aussi d'une certaine façon dans le premier sens de comprendre, "saisir directement par l'esprit"; dans lequel cas, cependant, aucune démarche, aucun raisonnement, n'est nécessaire pour atteindre la fixité de la compréhension.

⁶⁶Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.111.

⁶⁷*Ibid.*, *Tradition in Science*, p. 134

⁶⁸*Ibid.*, p. 134

Avant de nous pencher sur ce chemin qui, selon Heisenberg, mène à la compréhension en physique théorique, il nous importe de distinguer davantage les diverses significations que recouvre le terme "comprendre" en physique théorique. Pour cela, il nous faut approfondir notre description de cette compréhension acquise à la suite d'un raisonnement car, même considéré sous ce seul aspect, *comprendre* possède plusieurs sens qui, il faut le souligner, ne sont pas toujours distincts les uns des autres.

Ainsi, *comprendre* peut tout d'abord signifier: "Ramener à quelque chose de plus connu", le plus connu variant, bien entendu, d'une personne à une autre. Nous pouvons, par exemple, faire comprendre à un enfant ce que signifie *roitelet* en lui montrant du doigt un tel oiseau et en disant "Voici un roitelet." Dans un tel cas, nous avons fait comprendre à l'enfant le "signe", c'est-à-dire le mot "roitelet", en le ramenant à quelque chose de plus connu pour lui, le "signifié", c'est-à-dire l'oiseau perché devant lui. Dans un cours de sciences naturelles, on aurait pu ramener le même mot à une expression complexe telle: "Le roitelet est un très petit passereau", à condition, cependant, que les élèves sachent déjà ce qu'est un passereau. Pour un anglophone, le plus connu serait tout simplement la traduction anglaise de "roitelet": "*wren*".

La physique nous permet-elle de saisir les phénomènes naturels en les ramenant à quelque chose de plus connu? D'une certaine façon, il est impossible de répondre à cette question par la négative: comment, en effet, pourrait-on comprendre une chose en passant par l'intermédiaire d'une chose que l'on connaît encore moins? Si, par exemple, un francophone nous demandait ce que signifie le mot allemand, "Apfel", il serait ridicule de lui répondre par la traduction chinoise du terme plutôt que par le mot français "pomme". Il faut donc que la physique, quand elle nous propose une explication, passe par quelque chose qui nous est plus connu. Mais quoi? Prenons l'exemple de la chaleur que la physique explique par le mouvement des atomes. Plus le mouvement de ces derniers est important, plus la température est élevée. Mais que connaissons-nous davantage, les atomes ou la chaleur? Il semble bien que ce soit la chaleur puisque, alors que les hommes de toutes les époques ont eu une connaissance plus ou moins vague de ce phénomène, comparativement peu ont eu une connaissance, même vague, de ce que sont les atomes. Pourtant, on ne peut nier que la physique nous donne une certaine

compréhension de ce qu'est la chaleur. Il semble donc qu'il soit possible, du moins dans une certaine mesure, d'expliquer des phénomènes sensibles, comme la chaleur, à partir de choses qui nous sont moins connues, comme les atomes. Ce paradoxe s'explique simplement par le fait que les explications des phénomènes naturels apportées par la physique moderne, quoique s'appuyant sur des concepts qui nous restent toujours quelque peu étrangers (comme ceux d'atome, d'énergie ou de champ) reposent essentiellement sur des constructions de l'esprit (principalement des structures mathématiques) qui, parce que nous les avons élaborées nous-mêmes sont plus connues pour nous que les phénomènes naturels qu'elles expliquent et que nous ne pouvons percevoir qu'à travers nos sens. On peut donc dire, à la suite d'Einstein, que les théories physiques nous permettent de comprendre les phénomènes naturels en les ramenant à quelque chose qui nous est plus connu: "Et pourquoi même imaginons-nous des théories? La réponse à la dernière question est simple: parce que nous avons de la joie à "comprendre", c'est-à-dire à ramener les phénomènes par l'intermédiaire de la logique à quelque chose de déjà plus connu ou (apparemment) évident."⁶⁹

Deuxièmement *comprendre* peut signifier "connaître la cause". Certains scientifiques et épistémologues, notamment Émile Meyerson, affirment qu'il s'agit là du type de compréhension que nous offre la physique⁷⁰. Mais ce n'est pas là une position partagée par Heisenberg. S'il admet que le physicien recherche les *principes* ou les *structures* sous-jacentes, le mot de *cause* (*Ursache*) est presque totalement absent de son vocabulaire. D'ailleurs, comme il le remarque lui-même, le mot "cause" n'a plus en physique moderne, un sens aussi général que celui que lui donnaient les penseurs de l'Antiquité et du Moyen-Âge:

Dans les philosophies anciennes, le terme *causa* avait une signification bien plus générale qu'il ne l'a aujourd'hui. Se référant à Aristote, la *Scolastique* par exemple parlait de quatre formes de "cause". On y trouve la *causa formalis*, qu'aujourd'hui on appellerait la structure ou le contenu conceptuel d'une chose: la *causa materialis*, c'est-

⁶⁹Albert Einstein, *Conceptions scientifiques*, p.127.

⁷⁰Il faut cependant souligner le fait que les définitions, basées sur l'identité, que donne Meyerson de la cause et de la causalité sont, selon ses propres termes fort différentes de celles généralement acceptées: "Pour les termes *cause* et *causalité* en particulier, nous n'ignorons point qu'on peut les définir d'une manière fort différente de la nôtre, et nous nous rendons compte à quel point est choquante tout d'abord la tentative de réduire ces concepts à l'affirmation précise de l'identité dans le temps (et, par extension, dans l'espace).", Émile Meyerson, *Identité et réalité*, p. ix.

à-dire la matière dont est faite une chose: la *causa finalis*, qui est le but d'une chose et, enfin, la *causa efficiens*. Seule la *causa efficiens* correspond à peu près à ce que nous désignons aujourd'hui par le terme de cause.⁷¹

Peut être faudrait-il corriger ici quelque peu les propos de Heisenberg. Comme plusieurs autres penseurs, ce dernier affirme en effet que la seule cause qui ait été conservée en science est la cause efficiente, ou cause agent, c'est-à-dire ce qui entraîne un changement dans une autre chose. Mais est-ce vraiment le cas? Prenons un exemple simple tiré de la mécanique classique: la collision entre deux boules de billard, dont une est initialement au repos. Que dit la physique d'une telle situation? Tout simplement que la somme des quantités de mouvement avant la collision sera égale à celle après la collision. Nulle mention d'une cause efficiente. La physique n'affirme nulle part, en effet, que la boule en mouvement est la cause efficiente ayant entraîné le mouvement de la boule initialement au repos. En fait, un simple changement de référentiel et la boule initialement en mouvement apparaît alors au repos alors que la boule tout d'abord immobile semble maintenant se déplacer rapidement. Si la physique désignait effectivement la cause efficiente, cette dernière devrait demeurer la même quelque soit le système de coordonnées utilisé ce qui n'est évidemment pas le cas. Ce que met en évidence la physique, ce ne sont donc pas les causes efficientes mais des lois, c'est-à-dire des relations permettant de faire le lien entre différents événements. Dans notre exemple, la collision entre boules de billard, est ainsi expliquée à partir de la loi de la conservation de la quantité de mouvement ($\sum m_n v_n = \sum m_n v_n'$). Ces lois de la physique, peuvent être regardées comme une sorte de modèle des structures cachées de la nature déterminant les phénomènes physiques et peuvent ainsi être considérées comme des représentations des causes formelles des phénomènes. Le lecteur nous permettra d'illustrer ici notre propos à l'aide du célèbre exemple de la montre formulé par Einstein. Un physicien désire savoir pourquoi les aiguilles de la montre tourne mais ne peut ouvrir le boîtier de celle-ci. Il peut néanmoins, après avoir effectué certaines expériences, imaginer le mécanisme se trouvant dans le boîtier de la montre. S'il avait effectivement découvert le bon mécanisme, on pourrait lui accorder qu'il a découvert la cause formelle à l'origine du mouvement des aiguilles, c'est-à-dire qu'il a découvert la structure sous-jacente à

⁷¹Werner Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, p.40.

l'origine du fonctionnement de la montre. Mais comme nous ne pouvons ouvrir le boîtier, il nous est impossible de vérifier les dires du physicien autrement qu'en comparant les caractéristiques extérieures de la montre (le mouvement de ses aiguilles, son poids, sa densité, etc.) avec celles prédites par la théorie du scientifique. Cependant, comme il est improbable que ce dernier ait effectivement décrit exactement le mécanisme de l'objet, on peut seulement affirmer qu'il a élaboré un *modèle* ou une *représentation* de la cause formelle du mouvement des aiguilles de la montre. C'est pourquoi, si on désire continuer le parallèle avec les quatre causes aristotéliennes, on peut dire des lois naturelles mises à jour par la physique qu'elles sont en quelque sorte une représentation de la cause formelle des phénomènes. De ce point de vue, comprendre en physique théorique n'est pas "connaître la cause d'un phénomène" mais plutôt "connaître la représentation de la cause formelle d'un phénomène".

Dans le même ordre d'idée, "comprendre" peut signifier "être capable de déduire un concept ou une structure imaginée, à partir d'un concept ou d'une structure plus générale qui n'en est pas nécessairement la cause". C'est certainement dans ce sens que Heisenberg utilise le plus le mot "comprendre" dans ses textes. Il définit d'ailleurs le terme "compréhension" comme suit: "Understanding" then means: adaptation of our conceptual thinking to the totality of the new phenomena; or: discovering in the wealth of phenomena some underlying structures, which correspond to fundamental innate structures in our conceptual equipment and which therefore enable us to form concepts."⁷² Afin de mieux saisir ce que signifie cette définition de Heisenberg, il importe de nous pencher sur les étapes que parcourent, selon lui⁷³, les physiciens, lorsqu'ils explorent un nouveau domaine de la physique

⁷²Id., "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.338. Nous soulignons.

⁷³La possibilité de comprendre la nature à l'aide de physique fut une des préoccupations constantes de Heisenberg et on retrouve des réflexions sur ce sujet dans plusieurs de ses articles. Comme certaines des remarques se trouvant dans les textes publiés par Heisenberg sous le régime nazi semblent contredire la vision qu'il a subséquentement proposée, nous ne traiterons ici que ses textes les plus récents dont l'article intitulé "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics" (1969) qui est entièrement consacré à la question qui nous intéresse ici.

Le chemin vers la compréhension

Le point de départ de toute compréhension, selon Heisenberg, est la recherche de similitudes et de régularités entre les différents phénomènes qui se présentent à nous. Pour reprendre ses mots: "We try, of course, to understand the phenomena, and in so doing we realize that all understanding begins with perceiving similarities and regularities among them."⁷⁴ En effet, avant d'acquérir quelque connaissance que ce soit du monde, nous percevons celui-ci comme un ensemble de sons, de couleurs, de goûts, d'odeurs, de textures qui ne semblent avoir aucun lien les uns avec les autres. Ce n'est que progressivement que nous percevons des similitudes grâce auxquelles nous pouvons rassembler les objets et mettre un certain ordre dans les événements. Cette opération n'équivaut certes pas à une compréhension du phénomène. Mais il s'agit d'une étape essentielle à cette compréhension.

La seule recherche de ressemblances n'est certes pas suffisante pour atteindre une compréhension complète des phénomènes naturels. Il est vrai qu'en physique il faut avant tout trouver les ressemblances existant entre différents phénomènes afin de ramener ces derniers à une même cause (et donc une même explication). Mais il faut aussi être capable d'évaluer si ces ressemblances sont vraiment fondamentales, et révèlent l'existence d'une cause commune, ou si elles ne sont qu'accidentelles. C'est pourquoi Heisenberg écrit qu'à cette étape "The regularities are then apprehended as special consequences of something that is common to the different phenomena. In this way, every attempt to understand the changing multiplicity of the phenomena must become a search for an underlying principle."⁷⁵

Bien entendu, si on veut ordonner les phénomènes naturels, il faut non seulement être capable de voir les similitudes existant entre les phénomènes mais aussi réussir à distinguer les différences existant entre les choses qui, quoique nous paraissant semblables, sont fondamentalement différentes. La distinction par la thermodynamique du concept de *chaleur* de celui de *température*, souvent confondus dans la vie quotidienne, montre la nécessité de cette mise en évidence des différences. Cependant, il faut admettre qu'en physique la

⁷⁴Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.106

⁷⁵Ibid., p. 106. Nous soulignons.

découverte de similitudes occupe une place plus importante que la recherche de différences. À la base de la pratique de la physique, on retrouve en effet ce désir de trouver le principe unificateur reliant les différents phénomènes entre eux. En fait, on recherche plus qu'une simple ressemblance entre les choses: on recherche leur égalité. Comme écrivait Heisenberg dans Physics and Philosophy: "For our senses the world consists of an infinite variety of things and events, colors and sounds. But in order to understand it we have to introduce some kind of order, and order means to recognize what is equal, it means some sort of unity."⁷⁶ Cette recherche de l'unité a pris, dans la physique moderne, une importance énorme, notamment à cause des recherches menées dans l'espoir de développer une "théorie de tout" ("theory of everything") qui unifierait les quatre forces aujourd'hui connues et qui irait même jusqu'à transcender la distinction séculaire entre lois et conditions initiales. Cette recherche de l'identité a été mis de l'avant par de nombreux scientifiques et épistémologues, notamment Meyerson pour qui l'explication scientifique d'un phénomène consiste à montrer que l'effet était identique à sa cause. Cette position est donc à l'opposée de celle de penseurs comme Mach qui ne voient, dans l'identité des choses, qu'une sorte "d'économie de pensée" n'existant pas dans la réalité. Heisenberg tient quant à lui des propos beaucoup plus nuancés que les défenseurs de ces deux courants de pensée. Il existe bien, selon lui, des ressemblances entre les choses qui ne sont pas que le fruit de notre façon de voir le monde. Et si ces similitudes existent, c'est parce qu'elles ont, pour origine, un même principe. Cependant la physique ne cherche pas l'identité entre cause et effet mais les ressemblances existant entre les différentes choses afin de découvrir, à partir de cette similitude, le principe commun sous-jacent à ces événements et à partir duquel nous pouvons déduire, et donc dans une certaine mesure unir, les différents phénomènes. Cette quête de l'unité ne peut cependant pas se faire directement à partir des phénomènes sensibles puisqu'il n'existe pas, dans le monde, deux objets parfaitement identiques: chaque pierre, chaque arbre, chaque personne possède un ensemble de caractéristiques qui nous permettent de le distinguer des autres objets. Les jumeaux identiques n'ont-ils pas des empreintes digitales différentes? Si on veut découvrir certaines régularités

⁷⁶Id., *Physics and Philosophy*, p.62-63. Nous soulignons.

dans les événements naturels, il ne faut donc pas les considérer dans leur totalité mais seulement sous certains aspects: il nous faut procéder par *abstraction*.

Les deux abstractions de la physique

Le terme abstraction, du latin *abstractio*, désigne l'action par laquelle on enlève un chose d'une autre: cueillir une pomme d'un arbre, par exemple. Par analogie, ce terme s'applique maintenant à la connaissance et à la compréhension, comme l'explique clairement Charles De Koninck dans "Abstraction from Matter":

By extension, this term is applied to knowledge. I can taste an apple without seeing it, or see it without tasting. In reality the apple has both colour and flavour. To perceive the one without the other is to abstract. The same term acquires a new meaning again when applied to understanding. For of objects which in reality are together, one may be considered separately, so long as the understanding of one part or aspect of the thing is not essential to an understanding of the other.⁷⁷

Sans ce processus d'abstraction qui nous permet de faire fi de certaines différences afin d'affirmer qu'un objet A est identique à un objet B (du moins sous un certain angle), la science ne pourrait exister. Comme le souligne Heisenberg dans *Abstraction in Modern Science*:

abstraction represents the possibility of considering an object or group of objects under one viewpoint while disregarding all other properties of the object. The essence of abstraction consists in singling out one feature, which, in contrast to all other properties, is considered to be particularly important in this connection. As can easily be seen, all concept formation depends on this process of abstraction, since concept formation presupposes the ability to recognize similarities. But since total sameness never occurs in practice among phenomena, the similarity arises only through the process of abstraction, through the singling out of one feature while neglecting all others.⁷⁸

Toute recherche physique commence donc par l'isolement de certains aspects des phénomènes (la masse de l'objet, sa couleur, sa densité, sa résistance électrique, etc.) afin de considérer ceux-ci séparément. Le développement d'un protocole expérimental approprié est donc essentiel à ce processus d'abstraction: il faut en effet s'assurer de mesurer seulement les aspects

⁷⁷Charles De Koninck, "Abstraction in Matter", p.3.

⁷⁸Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.71.

pertinents à la recherche. Nous trouvons une belle illustration de ce processus d'abstraction dans l'étude de la chute des corps par Galilée. En ne s'intéressant qu'à la chute des corps dans le vide, Galilée a fait abstraction de tous les aspects du phénomène (résistance de l'air, forme des objets, etc) qui pouvaient nuire à la découverte des aspects communs à tous les corps en chute libre. Ce processus d'abstraction permet ainsi d'extraire des phénomènes naturels certains concepts, certaines notions, à partir desquels seront développées les lois et théories scientifiques. Comme écrivait Heisenberg: "the physicist, often by the use of extremely complex apparatus, must first divide up the colorful medley of phenomena, freeing what is important from all unneeded clutter, until the one "simple" process emerges clearly on its own, precisely in order that he may disregard - that is, abstract from - all accessory phenomena. That is the first form of abstraction[...]."⁷⁹

Le premier pas vers la connaissance en physique consiste donc à isoler le phénomène étudié, c'est-à-dire à faire abstraction de tous les éléments qui ne sont pas pertinents à la question à laquelle on tente de répondre. Ce choix des éléments n'est certes pas simple à faire. Cette difficulté est bien illustrée par Alan F. Chalmers lorsqu'il décrit les expériences menées par Hertz afin de vérifier s'il était possible de produire les ondes radio prédites par la théorie électromagnétique de Maxwell:

[...] imaginons Heinrich Hertz, en 1888, effectuant l'expérience électrique qui lui permit d'être le premier à produire et à détecter des ondes radio. S'il avait été parfaitement innocent en effectuant ces observations, il aurait été obligé de noter non seulement les lectures sur différents mètres, la présence ou l'absence d'étincelles à différents lieux critiques, les dimensions du circuits, etc., mais aussi la couleur des mètres, les dimensions du laboratoire, le temps qu'il faisait, la pointure de ses chaussures et un fatras de détails sans aucun rapport avec le type de théorie qui l'intéressait et qu'il était en train de tester. [...] quand Herz mesura la vitesse de ses ondes radio, il trouva à plusieurs reprises qu'elle différait de celle de la lumière. Il ne parvint jamais à résoudre cette énigme, dont la cause ne fut comprise qu'après sa mort. Les ondes radio émises par son appareil se réfléchissaient sur les murs de son laboratoire, revenaient vers son appareil et interféraient avec ses mesures. Les dimensions du laboratoire étaient bel et bien un facteur essentiel.⁸⁰

⁷⁹Ibid., p.126.

⁸⁰Alan F. Chalmers. *Qu'est-ce que la science?*, p.66-68.

Le premier pas vers la compréhension d'un nouveau domaine physique sera donc l'acquisition de données provenant de nouvelles expériences. Cette collecte de données, on le voit, représente déjà un pas vers l'abstraction. Comme le remarque Heisenberg, le physicien ne se contente pas lors de ses expériences d'isoler certains aspects des phénomènes, il tente aussi à cette étape de relier mathématiquement les différents résultats obtenus:

Even at this stage the physicists will try to relate different experiments, to interpolate or extrapolate their results in order to predict the results of further experiments; and they will attempt to get some order into the experimental material by applying the traditional concepts (e.g., by using the laws of Newton's mechanics or nowadays by attaching quantum numbers to the various levels in a spectrum).⁸¹

Cette remarque souligne une partie très importante de toute recherche scientifique. L'étudiant, s'il est consciencieux, notera dans son rapport de laboratoire toutes les corrélations qu'il a observées durant ses expériences. Le chercheur, après une nouvelle expérience, essaiera de trouver les corrélations existant entre les différentes données qu'il a récoltées: il tentera de les réduire à une fonction, il essaiera de voir si ses résultats peuvent être reliés à certaines constantes physiques jouant un rôle important dans son domaine de recherche⁸². C'est ainsi que, face à la fameuse catastrophe ultraviolette⁸³, les physiciens ne se sont pas contentés d'accumuler des données sur la radiation des corps noirs. Certains ont tenté de trouver une relation mathématique permettant de relier les diverses données mesurées entre elles, et c'est ainsi que Planck en est arrivé à sa fameuse formule du rayonnement thermique.

Bien que Heisenberg ne le fasse pas explicitement, on peut identifier cette première étape de la démarche scientifique au développement de théories phénoménologiques purement formelles, c'est-à-dire à l'élaboration de relations mathématiques permettant de décrire les phénomènes sans faire nécessairement appel à une loi fondamentale de la nature. Mais

⁸¹Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.336.

⁸²D'où l'importance du développement des logiciels d'analyse mathématique qui permettent de trouver rapidement une fonction approximant une série de résultats et la pertinence de sites Internet donnant le nom des variables associées à différentes valeur numériques.

⁸³ L'expression "catastrophe ultraviolette" réfère au fait que, selon les lois de la physique classique, un corps noir fortement chauffé devrait émettre une quantité infinie d'énergie sous forme de radiations ultraviolettes ce qui est, bien entendu, impossible.

Heisenberg n'a peut être pas assez mis l'emphase sur l'importance du rôle des mathématiques lors cette première étape. Il est vrai qu'il admet que les physiciens essaient déjà à ce moment d'interpoler et d'extrapoler leurs résultats même s'ils ne possèdent pas encore les concepts nécessaires pour décrire les phénomènes étudiés. Mais on peut se demander s'il serait possible de bâtir une théorie si on ne réussissait pas, du moins dans une certaine mesure, à réaliser cette première corrélation entre les résultats. Un chercheur peut-il élaborer une théorie sur un phénomène donné s'il ne sait pas déjà comment sont reliées entre elles les différentes variables étudiées? Dans son *Autobiographie scientifique*, Planck dit clairement avoir eu l'idée du quantum d'énergie après avoir élaboré sa célèbre loi de la radiation⁸⁴. Aurait-il pu développer ce concept avant le développement de sa formule de la radiation? Cela semble peu probable. Pour expliquer un phénomène de manière précise, il faut déjà savoir comment ses divers aspects sont reliés entre eux et cela est impossible à partir de données brutes, non analysées. Ce point de vue est d'ailleurs partagé par Heisenberg qui écrit: "The other form of abstraction consists in the use of mathematics in order to represent the phenomena. Newtonian mechanics showed for the first time - and this was the reason for its enormous success - that in mathematical description immense tracts of experience can be gathered into unity and thereby be simply understood."⁸⁵

C'est cette possibilité de synthétiser un vaste domaine d'expériences à l'aide des mathématiques qui donne sa force à la physique. Cette première étape dans la compréhension d'un domaine physique, où des aspects précis des phénomènes sont isolés et mis en relations mathématiques les uns avec les autres, est particulièrement importante car les deux opérations, ou plutôt les deux abstractions, qui y sont effectuées, nous permettent de passer des faits particuliers aux descriptions générales. Le cheminement vers une pleine compréhension d'un

⁸⁴Dans "The History of Quantum Theory", Heisenberg décrit la découverte de Planck en ces termes: "Since Planck could, from his earlier work, translate his formula easily into a statement about the radiating atom (the so-called oscillator), he must soon have found that his formula looked as if the oscillator could only contain discrete quanta of energy - a result that was so different from anything known in classical physics that he certainly must have refused to believe it in the beginning.", Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.31. L'idée de quantum d'énergie a été si difficile à accepter et ce, même à la lumière de la formule de Planck décrivant les phénomènes de radiation, qu'on peut se demander comment on aurait pu la développer sans l'appui d'une formule mathématique résumant les résultats expérimentaux obtenus.

⁸⁵Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.126.

phénomène naturel passe ainsi par une plus grande généralisation qui implique nécessairement pour Heisenberg un "niveau d'abstraction plus élevé":

To understand means to recognize connections, to see the individual as a special case of something more general. But the step toward greater generality is always itself a step into abstraction - or more precisely, into the next highest level of abstraction; for the more general unites the wealth of diverse individual things or processes under a unitary point of view, which means at the same time that it disregards other features considered to be unimportant. In other words, it abstracts from them.⁸⁶

L'abstraction, nous dit Heisenberg, mène, en physique, vers une plus grande généralisation. Mais il ne s'agit ici n'y d'une généralisation vers le plus universel, ni d'une généralisation vers la cause. La généralité de l'universel, en effet, nous mène vers le plus confus. Lorsqu'on dit de l'homme qu'il est un animal et, comme tous les animaux, qu'il est une chose, on le confond, à ce dernier niveau de généralisation, avec toutes les choses. Ce type de généralisation menant vers le plus confus ne peut être celui à la base de la physique, une science se voulant claire et précise. L'abstraction dont traite ici Heisenberg ne peut non plus nous mener vers une cause puisque, comme nous l'avons vu, la physique ne recherche pas, à proprement parler, les causes. L'abstraction pratiquée par les physiciens est plutôt une généralisation vers le plus "représentationnel". Un peu comme dans la généralisation vers le plus universel, où on découvre un genre pouvant se dire de plusieurs espèces, la généralisation vers le plus "représentationnel" met à jour les concepts pouvant se dire de plusieurs choses permettant aux lois physiques de rassembler de nombreux phénomènes sous une même représentation. Mais, comme nous l'avons vu, puisque la science n'étudie que certains aspects des phénomènes, les représentations qu'elle nous offre de la nature ne recouvrent que certains aspects de la réalité. C'est pourquoi, il est parfois nécessaire, pour saisir tous les aspects d'un phénomène, de faire appel à plus d'une représentation. C'est ainsi qu'en physique quantique, on doit faire appel à la fois à une image corpusculaire et une image ondulatoire afin de comprendre le comportement des particules élémentaires.

⁸⁶ibid., p.144

En résumé, la physique fait appel, dans son développement à deux types d'abstraction. Dans la premier cas "abstraire" signifie "considérer une des qualités d'un objet ou d'un phénomène, isolément des autres qualités de cette chose". Dans ce second cas, le même verbe veut dire "séparer une quantité de la qualité qui l'accompagne". Le mot "abstraction" est cependant utilisé de manière analogue dans les deux processus décrits par Heisenberg, comme on peut s'en rendre compte à l'aide de ce commentaire de Charles De Koninck:

Just as we can consider animal without man, and man without Socrates, we can also consider quantity without the qualities that attend it. This is seen in the fact that we grasp and define numbers, point, line, surface and volume without the sensible qualities that quantity is subject to in nature. [...] Now, although we may consider quantity apart from sensible quality, we do not mean that it can also be that way, in a state of separation from sensible matter, outside the mind.⁸⁷

La distinction existant entre les deux significations du verbe "abstraire" est cependant fréquemment oubliée en physique où, nous l'avons vu, ces deux formes d'abstraction sont étroitement liées.

La nécessité des concepts

Comme le mentionne Heisenberg, le physicien ne peut se contenter d'une description qualitative; il doit aussi étayer cette dernière par une description quantitative⁸⁸. Cette dernière seulement donnera à ses affirmations, la précision nécessaire à la prédiction des phénomènes et à la vérification des hypothèses. Cependant, l'accumulation de données expérimentales et la première synthèse mathématique des résultats que nous venons de décrire ne peuvent pas suffire à la compréhension d'un nouveau domaine scientifique. En effet, explique Heisenberg, on serait alors forcé d'utiliser des concepts qui, parce que développés pour décrire d'autres types de phénomènes, ne seraient pas nécessairement adaptés aux réalités du nouveau domaine d'études. Le premier modèle atomique de Bohr, par exemple, comparait l'atome à un système

⁸⁷Charles De Koninck, "Abstraction from Matter", p. 4.

⁸⁸Par exemple, Heisenberg écrit, après avoir offert une explication qualitative de ce qu'est une particule élémentaire en physique: "so it seems to me, I have also given a complete qualitative answer to the initial question "What is an elementary particle?" But only a qualitative answer! The theorist is now confronted with the further question, whether he can also underpin this qualitative understanding by means of quantitative calculations.", Werner Heisenberg, Tradition in Science, p. 77.

solaire miniature dans lequel la force gravitationnelle était remplacée par la force électromagnétique. Bohr n'arrivait cependant pas à expliquer pourquoi les électrons ne s'écrasaient pas sur le noyau atomique à l'aide de ce modèle; les concepts de particule et de trajectoire utilisés dans cette description n'étaient tout simplement pas aptes à saisir la complexité du comportement de l'atome et ce, même s'ils permettent de rendre compte, en mécanique classique, du mouvement des projectiles et de l'orbite des planètes. Comme le remarquait Heisenberg: "it will frequently turn out that the traditional concepts or at least some of them don't really work- that one cannot get hold of the phenomena by using this kind of language."⁸⁹ Cette inadéquation des concepts classiques vis-à-vis des nouveaux résultats expérimentaux se fera sentir, remarque-t-il, même lorsqu'on est en possession d'une loi fondamentale de la nature. On n'a qu'à penser à l'exemple de la formulation de la loi de la radiation de Planck: même si ce dernier possédait une formule qui décrivait parfaitement les résultats expérimentaux, il lui manquait un concept fondamental, celui de quantum, afin d'expliquer les phénomènes radiatifs. Il est donc clair que la formulation mathématique des lois naturelles n'est pas, pour Heisenberg, équivalente à la compréhension des phénomènes physiques. Il écrit ainsi, dans "The Philosophical Background of Modern Physics", que la formulation mathématique d'un phénomène ne peut aider à sa compréhension, à moins que les concepts pertinents n'aient été clairement identifiés:

The success of Newton's mechanics was so convincing, that for several centuries science followed the two roads opened up by Galileo: isolation and idealisation of the phenomena by careful definition of the experimental conditions and by very precise measurements; invention of mathematical forms representing the idealised phenomena. The mathematical forms can lead to real understanding only when the right concepts have been found and applied, and this point has sometimes been forgotten.⁹⁰

Selon Heisenberg, la compréhension des phénomènes propres à un nouveau domaine scientifique ne peut donc se faire sans l'élaboration de nouveaux concepts. Mais ce processus est long et il n'existe pas de règle spécifique qui puisse en garantir le succès. Parfois, souligne-

⁸⁹Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p. 336.

⁹⁰*Id.*, "The Philosophical Background of Modern Physics", p. 500. Nous soulignons.

t-il, d'importants progrès peuvent être réalisés par la réalisation d'une expérience décisive permettant de tester les concepts "controversés". Heisenberg en veut pour preuve l'expérience de Bothe and Geiger ayant démontré la conservation de l'énergie et du moment cinétique dans l'effet Compton. Quoique ce type d'expérience fasse souvent grandement progresser notre connaissance d'un phénomène particulier, il n'est habituellement pas suffisant pour nous permettre de développer tous les nouveaux concepts qui permettraient de comprendre tous les événements reliés au domaine d'expérience étudié. En fait, selon Heisenberg, les concepts nécessaires ne peuvent être développés que progressivement alors que la connaissance complète des expériences du nouveau domaine entraîne un changement graduel dans le langage utilisé par les physiciens: "The knowledge of the totality of the experiments in the new field - not only of a few experiments- produces in the mind of the physicists a gradual change of the language and of the thinking applied to the new field. This process may take a number of years or even decades, and finally, out of this new way of thinking, somebody will develop and formulate new concepts."⁹¹

Selon Heisenberg, la partie la plus difficile de cette étape n'est pas tant l'élaboration des nouveaux concepts que l'abandon des anciennes notions: "The greatest effort is required for the severing from the old concepts; it is usually much simpler to find new concepts than to get rid of the old ones."⁹² Si la mécanique quantique a causé autant d'émoi, c'est plus parce qu'elle demandait l'abandon du concept de particule propre à la mécanique classique que parce qu'elle introduisait la notion d'onde de probabilité. De même, si la relativité a rencontré autant de résistance, ce n'est pas tant à cause de la nouvelle notion de simultanéité qu'elle proposait qu'à cause de l'abandon du concept d'éther qu'elle réclamait. Ce changement de concepts est loin d'être quelque chose d'aisé pour le physicien car il ne peut se faire graduellement comme l'explique Heisenberg:

When you get into such a new field [as quantum mechanics], the trouble is, that with phenomenological methods you are bound always to use the old concepts; because you have no other concepts, and making theoretical connections means then applying

⁹¹Id., "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.336

⁹²Ibid., p.336.

old methods to this new situation. Therefore the decisive step is always a rather discontinuous step. You can never hope to go by small steps nearer and nearer to the real theory; at one point you are bound to jump, you must really leave the old concepts and try something new and then see whether you can swim or stand or whatever else, but in any case you can't keep the old concepts.⁹³

L'élaboration de nouveaux concepts ne permet donc d'atteindre la compréhension d'un phénomène que si on se débarrasse tout d'abord de notre ancienne conception du monde. La route menant vers la compréhension d'un phénomène se divise donc en deux parties. Il faut tout d'abord acquérir des données expérimentales sur les phénomènes étudiés et essayer de les relier les unes aux autres à l'aide de formules mathématiques. Mais cela n'est pas suffisant pour une compréhension du domaine de recherche. Il faut aussi abandonner notre ancienne conception du monde et oser développer de nouveaux concepts qui nous permettront de saisir intellectuellement les phénomènes étudiés. Ainsi, comme le remarque Heisenberg dans "The Philosophical Background of Modern Physics", Galilée, pour comprendre la chute des corps n'a pas seulement eu à découvrir les formules décrivant de manière générale leurs mouvements mais également à formuler les concepts permettant de saisir ce phénomène:

Galileo asked: How bodies would fall in empty space, when there is no resistance from the air? So he replaced the actual motion of the falling bodies by an idealised motion, the motion in empty space, and he found that this idealised motion could be represented by simple mathematical forms. In this way Galileo had opened up two new roads into the field of science. On the one hand it was left to the art of the experimenting physicist, to prepare ideal conditions for the observations, to isolate the important part of the phenomena from perturbing influences; on the other hand the theoretician should try to find mathematical forms that can represent the idealised phenomena. These forms are not yet sufficient for a real understanding; they are certainly not identical with understanding. But frequently they will lead the way to those new concepts, which eventually will give the basis for understanding. In case of Galileo the new concepts were inertia and force. Without an outer force a body would move on a straight line with a constant velocity. Therefore one should study the forces in order to understand the motions.⁹⁴

⁹³Id., "Theory, Criticism and a Philosophy", p.431.

⁹⁴Id., "The Philosophical Background of Modern Physics", p.499-500.

La simplicité comme critère de compréhension

À la lumière de ce qui précède, quand pouvons-nous affirmer que nous avons compris un nouveau domaine de recherche? Certains avanceront peut-être que, s'il est possible de prédire les résultats de toute expérience relativement simple menée dans un domaine de recherche spécifique, celui-ci peut être considéré comme compris. Heisenberg semble admettre volontiers dans "Tradition in Science" que les applications pratiques de la physique puissent *confirmer* au physicien qu'il a bien compris une partie de la nature: "This is probably the strongest motive behind the applications of science:" écrit-il. "the scientist needs the confirmation from an impartial judge, from nature herself, that he has understood her structure."⁹⁵ Mais cela n'implique pas, selon lui, que la capacité de prédiction soit un critère irréfutable de la compréhension de la nature, et ce pour deux raisons. D'une part, croit-il, il existe des domaines, comme la chimie quantique, dont les lois fondamentales ont été comprises même s'il est encore impossible de prédire les résultats des expériences qui s'y rattachent. D'autre part, on a, au cours de l'histoire, élaboré de nombreuses théories qui permettaient de faire des prédictions assez précises sans pour autant apporter aucune compréhension des phénomènes ainsi décrits. Ainsi, si le système géocentrique de Ptolémée permettait de prédire précisément la position des planètes, il a fallu, fait remarquer Heisenberg, attendre les lois de Newton pour vraiment comprendre le mouvement des planètes de notre système solaire.

Évidemment, les tenants de cette définition très pragmatique de "comprendre" pourront alléguer que les objections de Heisenberg ne sont pas valables puisqu'elles présupposent l'idée que la compréhension ne peut pas être identifiée à la prédiction. Affirmer, sans aucun autre argument, qu'il existe des domaines de recherches qui ont été compris même si on ne peut toujours pas prédire les résultats des expériences qu'on y mène et affirmer que ce n'est pas parce que l'on prédit que l'on comprend, ce n'est en fait que reformuler l'affirmation: "prédire ce n'est pas comprendre". Argument spécieux à nos yeux même si nous pensons avec Heisenberg que la seule prédiction des phénomènes d'un domaine particulier ne saurait garantir au physicien qu'il a bel et bien compris ce domaine. Nous pensons néanmoins que, dans "The

⁹⁵ Id., *Tradition in Science*, p.7.

Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", Heisenberg n'a pas démontré explicitement que prédire n'équivaut pas à comprendre.

Selon Heisenberg, une meilleure définition de "comprendre" en physique théorique serait: "We have understood a group of phenomena when we have found the right concepts for describing the phenomena."⁹⁶ Mais comment savoir qu'on a effectivement trouvé les bons concepts pour décrire un groupe donné de phénomènes? En jugeant de la simplicité de ces concepts par rapport à la complexité des phénomènes dont ils rendent compte, nous dit Heisenberg⁹⁷. Car si la simplicité est un des critères les plus importants pour évaluer la validité des concepts, c'est qu'elle est un signe de la découverte d'un principe unificateur. En effet, si les phénomènes d'un domaine donné de la physique obéissent tous à un même principe, plus ces phénomènes seront décrits à l'aide d'un groupe restreint de concepts, plus nous serons proches de ce principe directeur. Pour Heisenberg, "comprendre" s'explique de la façon suivante:

If in this way simplicity is taken as one of the most decisive criteria for the correctness of concepts, one refers to the fact that understanding usually occurs when we can say: "Yes, this is the same thing as..." We connect the problem concerned with other related problems, and if a concept has the power of combining very many different phenomena under some aspect, under which they appear to be the "same" or closely related, then the concept will be accepted just on account of this power. "Understanding" then means: adaptation of our conceptual thinking to the totality of the new phenomena; or: discovering in the wealth of phenomena some underlying structures, which correspond to fundamental innate structures in our conceptual equipment and which therefore enable us to form concepts.⁹⁸

Le critère de simplicité fait cependant problème: il n'est pas directement applicable. Comment juger, en effet, de la simplicité d'un groupe de concepts? Dans certaines théories, comme la

⁹⁶ *Id.*, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.337.

⁹⁷ Il écrit: "But ultimately, I would believe, it is always the simplicity of the concepts in comparison with the great wealth of complicated experimental material, which convinces of their correctness.", Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.337.

⁹⁸ Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.338. On constate une nette influence de la pensée de Kant dans cette croyance de Heisenberg que la compréhension est rendue possible parce qu'il existe dans notre esprit des structures innées correspondant aux structures sous-jacentes aux phénomènes de la nature. On retrouve aussi cette influence de la pensée de Kant chez Einstein qui remarquait: "On peut dire que "l'éternel mystère du monde est sa compréhensibilité". C'est une des grandes choses accomplies par Kant d'avoir reconnu qu'il n'y aurait pas de sens de poser un monde extérieur réel sans cette compréhensibilité.", Albert Einstein, *Conceptions scientifiques*, p.23.

relativité, écrit Heisenberg, la formulation mathématique des concepts est tellement simple et claire que nous sommes immédiatement convaincus de leur justesse par la valeur esthétique du schème mathématique. De plus, si la formulation mathématique d'une théorie est simple, il sera aisé de vérifier sa validité en comparant ses résultats avec différentes données expérimentales⁹⁹. Autrement, dans les cas où il n'est pas facile de formuler mathématiquement les nouveaux concepts élaborés, il est parfois possible, pense Heisenberg, de développer un modèle explicatif plus simple des phénomènes étudiés. En démontrant que ce modèle possède les éléments caractéristiques des phénomènes, nous pouvons nous convaincre que nos concepts sont valides¹⁰⁰. Heisenberg donne comme exemple d'une telle théorie, l'explication de la supraconductivité.

Critique de la division de Heisenberg

Pour Heisenberg donc, il existe une certaine hiérarchisation des théories physiques: au bas de l'échelle, on retrouve les théories phénoménologiques purement formelles, lesquelles ne font que décrire et prédire des événements physiques. Viennent ensuite les théories physiques que l'on pourrait qualifier de "naissantes" et qui, quoiqu'encore simplement descriptives, contiennent certains concepts susceptibles de nous mener à une compréhension véritable des événements. Finalement, en haut de l'échelle, on retrouve les théories qui nous offrent une véritable compréhension du monde, c'est-à-dire, qui contiennent un ensemble de concepts reflétant les structures sous-jacentes du domaine étudié. Avec cette division, Heisenberg exprime cette intuition, partagée par plusieurs physiciens, qu'il y a, d'une part, des théories purement "prédictives" et, d'autre part, des théories nous donnant une véritable compréhension de la nature. Il semble ainsi cautionner cette opinion de la plupart des scientifiques actuels

⁹⁹Heisenberg écrit ainsi: "In some cases the mathematical formulation of the concepts may lead to a mathematical scheme of such clarity and fundamental simplicity that it convinces already by its esthetic values. This may be said, for example, for the theory of special relativity. In such cases the results of the mathematical scheme may easily be compared at many points with the experiments and the agreement that demonstrates the correctness of the concepts.", Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.337.

¹⁰⁰Comme l'écrit Heisenberg: "In other cases the mathematical formulation may not be so simple. Still, by constructing simplified models and by demonstrating that these models do show the characteristic features of the phenomena, we convince ourselves that the concepts are correct (e.g., in the theory of superconductivity), that we have "understood" the phenomena", Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.337.

voulant que Ptolémée, contrairement à Kepler ou Newton, n'ait pas compris le mouvement des planètes.

Qu'il y ait des théories qui ne soient que phénoménologiques et ne prétendent aucunement décrire les lois fondamentales de la nature, cela ne fait aucun doute. Comme le rappelle Thomas S. Kuhn, l'histoire de l'astronomie est remplie de modèles cosmologiques dont la seule prétention est de fournir une technique mathématique permettant de prédire la position des astres dans le ciel:

[...] when designing mathematical systems to predict planetary position Hellenistic astronomers seldom worried about the possibility of constructing mechanical counterparts for their geometric constructs. To them the physical reality of the spherical shells and the mechanisms which kept the planets moving within them had become at most secondary problems. In short, Hellenistic scientists acquiesced without apparent discomfort in a partial bifurcation of astronomy and cosmology; a satisfactory mathematical technique for predicting planetary position did not have to conform entirely to the psychological requirement of cosmological reasonableness.¹⁰¹

Il ne faut cependant pas croire que cette dissociation entre le "réalisme physique" d'une théorie et sa capacité prédictive soit propre aux Anciens. Comme l'a remarqué Heisenberg, encore aujourd'hui, lorsque nous n'arrivons pas à saisir les lois fondamentales d'un domaine de la nature ou lorsque nous ne sommes pas en mesure de les appliquer, nous n'hésitons pas à nous contenter d'une théorie purement phénoménologique permettant de décrire facilement les phénomènes physiques désirés. Encore aujourd'hui, par exemple, nous déterminons l'emplacement des planètes et des étoiles par rapport à la Terre, bien que nous sachions pertinemment que cette dernière n'est pas au centre de l'univers.

Bien d'autres théories nous semblent cependant nous donner une connaissance, au moins partielle, des lois de la nature. Mais comment savoir si une théorie permet ou non de comprendre un domaine de la physique? Heisenberg répond que nous avons compris lorsque nous avons trouvé les bons concepts pour décrire un phénomène. Ultimement, ajoute-t-il, nous

¹⁰¹ Thomas S. Kuhn, *The Copernican Revolution*, p.105.

pouvons nous convaincre de la justesse des concepts d'une théorie en comparant leur simplicité avec la complexité des faits expérimentaux qu'ils permettent d'expliquer.

Le critère de simplicité des concepts que propose Heisenberg pour évaluer si une théorie nous permet de comprendre ou non la nature, fait cependant face à deux difficultés. Tout d'abord, il est évident que ce critère ne nous permet pas de diviser l'ensemble des théories physiques en deux catégories clairement distinctes; les théories phénoménologiques et les théories donnant une compréhension de la nature. L'histoire de l'astronomie permet d'illustrer facilement ce point. Si on se fie à nos connaissances actuelles, il est indéniable que, comparativement au modèle géocentrique de Ptolémée, le système héliocentrique de Copernic rendait compte de plus de phénomènes physiques sans pour autant être mathématiquement plus compliqué. La théorie copernicienne a, en effet, non seulement permis de rendre compte de faits jusqu'alors inexplicables (comme le degré d'élévation de Mercure et Vénus) mais a en plus prédit des phénomènes jusqu'alors non observés (comme les phases de Vénus, invisibles à l'oeil nu, qui furent décrites pour la première fois par Galilée). Pourtant, comparativement à Newton, Copernic ne semble pas avoir saisi les lois fondamentales de la nature. Beaucoup plus simples mathématiquement que le système de Copernic, les lois de Newton ont en effet permis, non seulement de calculer l'orbite de toutes les planètes connues, mais ont également mené les astronomes à la découverte de nouvelles planètes, tout en permettant de décrire le mouvement des comètes. Qui plus est, la mécanique de Newton permet d'expliquer, à l'aide des mêmes lois, des phénomènes aussi divers que le mouvement des astres, la chute des corps sur Terre, ainsi que les marées. Il semble donc, si on s'en remet au critère de Heisenberg, que Newton aurait été beaucoup plus proche d'une véritable compréhension des lois de la nature que ne l'a été Copernic puisqu'il a réussi à expliquer beaucoup plus de phénomènes avec une structure mathématique et conceptuelle beaucoup plus simple que celle de l'astronome polonais. Pourtant, si on compare la mécanique de Newton à la théorie de la relativité, on ne peut s'empêcher de penser que Einstein s'est approché davantage des lois fondamentales de la nature que ne l'avait fait le grand physicien anglais. À l'aide de la relativité, Einstein a réussi à expliquer le déplacement du périhélie de Mercure et l'équivalence existant entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle, deux phénomènes incompréhensibles à partir de la

physique newtonienne. Il a de plus prédit des phénomènes aussi étonnants que le ralentissement des horloges selon leur vitesse de déplacement ou encore la courbure de la trajectoire d'un rayon de lumière par une masse importante. La relativité permet donc d'expliquer, un plus grand nombre de phénomènes, à partir d'un ensemble comprenant, somme toute, moins de concepts que la mécanique classique. Est-ce à dire qu'Einstein nous a donné, avec la relativité générale, une compréhension définitive des lois régissant le mouvement des planètes? Probablement pas. Déjà les physiciens sont à la recherche d'une nouvelle théorie qui unifierait relativité et physique quantique, tout en permettant d'expliquer plus de phénomènes physiques à l'aide d'un ensemble plus restreint de concepts. On le constate, il n'y a jamais, en physique, de compréhension définitive. Chaque nouvelle théorie n'est qu'un arrêt temporaire sur le chemin de la compréhension et aucune d'entre elle ne peut prétendre à une "véritable compréhension" de la nature. C'est pourquoi, plutôt que de séparer les théories en deux catégories distinctes (c'est-à-dire les théories purement phénoménologiques et les théories nous donnant une véritable compréhension du monde), il serait peut être plus juste d'affirmer qu'il existe, en physique, une certaine gradation et que certaines théories nous donnent une meilleure compréhension des phénomènes naturels que d'autres, c'est-à-dire qu'elles nous permettent de déduire plus aisément, à partir d'une même structure conceptuelle et mathématique, un plus grand ensemble de faits sans pour autant qu'on puisse les dire totalement "vraies".

Dans cette évaluation de la "validité" des théories, le critère de simplicité des concepts peut être d'une certaine utilité. Comme nous venons de le constater dans notre survol des modèles cosmologiques, il semble effectivement que plus une théorie réussit à saisir les lois sous-jacentes aux phénomènes physiques, plus elle permet d'exprimer un grand nombre de phénomènes à l'aide d'un nombre restreint de concepts. Sur ce point, Einstein semble du même avis que Heisenberg: le but de la science est de comprendre le monde à l'aide de la théorie la plus simple possible:

Le but de la science est, d'une part, la compréhension, aussi *complète* que possible, et la mise en relation des expériences sensibles dans toute leur variété et, d'autre part, le parachèvement de ce but *en employant un minimum de concepts primaires et des*

*relations. (En cherchant, autant que possible, l'unité logique dans l'image du monde, c'est-à-dire la simplicité logique de ses fondements.)*¹⁰²

Toutefois, ce critère de simplicité, du moins tel qu'énoncé par Heisenberg, ne peut servir de base pour déterminer si un ensemble de concepts permet effectivement de comprendre adéquatement ou non une partie de la nature. À preuve: la théorie de la relativité restreinte, malgré sa très grande simplicité mathématique et conceptuelle, n'a pas été facilement acceptée par tous les physiciens du début du siècle. Tel qu'énoncé par Heisenberg, le critère de simplicité mathématique n'est pas assez précis pour être utilisé. Tout d'abord, la simplicité d'un schème mathématique ne s'évalue pas en-soi. Nous considérons généralement que la théorie héliocentrique de Copernic nous a donné une meilleure compréhension de notre système solaire que le modèle géocentrique de Ptolémée. Pourtant, le système copernicien devait, pour rendre compte du mouvement des planètes, faire appel à presque autant de déférents et d'épicycles que le système de Ptolémée¹⁰³. Comme le rappelle T.S. Kuhn dans *The Copernican Revolution*, "Copernicus can give a more economical *qualitative* account of the planetary motion than Ptolemy. [... But] His full system was little if any cumbersome than Ptolemy's had been. Both employed over thirty circles; there was little to choose between them in economy."¹⁰⁴ De même, tous les étudiants en physique le diront, la mécanique quantique est mathématiquement et conceptuellement beaucoup plus compliquée que la relativité restreinte. Cela ne signifie cependant pas que la physique quantique permette de moins bien comprendre l'atome que la relativité restreinte ne permet de comprendre le comportement des corps se déplaçant à grande vitesse: les phénomènes traités par la mécanique quantique sont simplement beaucoup plus nombreux et complexes que ceux traités par la relativité restreinte. On ne peut donc pas juger de la simplicité mathématique et conceptuelle d'une théorie par elle-même; il faut aussi comparer, avec l'expérience, les résultats obtenus grâce au schème mathématique.

¹⁰² Albert Einstein. *Conceptions scientifiques*, p. 26.

¹⁰³ Le système de Copernic, tout comme celui de Ptolémée, décrivait le mouvement des astres du système solaire à l'aide d'un mécanisme mathématique qui dans sa forme la plus simple pourrait être décrit ainsi: l'astre dont le mouvement était décrit était représenté par un point sur un petit cercle, l'*épicycle*, qui tournait uniformément autour d'un point situé sur un plus grand cercle, le *déférent*, qui effectuait à son tour une rotation sur lui-même. Au centre de ce déférent, on retrouvait l'astre situé au centre du système planétaire, c'est-à-dire la Terre dans le système ptoléméen et le Soleil dans le système copernicien.

¹⁰⁴ T.S. Kuhn. *op. cit.*, p. 169.

Pour Heisenberg, l'adéquation des résultats théoriques et des données expérimentales saura alors nous convaincre que nous avons effectivement compris le phénomène: "In such cases the results of the mathematical scheme may easily be compared at many points with the experiments and the agreement then demonstrates the correctness of the concepts"¹⁰⁵ Or, si on ne peut accepter la capacité de prédire les phénomènes comme critère de compréhension d'un domaine quelconque de la physique, il devient difficile de voir comment l'accord entre les résultats théoriques et les données expérimentales (qui n'est finalement pas autre chose que la capacité de prédiction de la théorie) pourrait servir de critère pour décider de la valeurs des concepts et, conséquemment, de la valeur de la théorie étudiée.

Le fait que le critère de simplicité tel qu'énoncé par Heisenberg ne puisse être appliqué de manière objective ne signifie pas que l'évaluation de la simplicité ne joue aucun rôle dans la détermination de la valeur d'une théorie. Comme le rappelle P.A. Heelan dans "Heisenberg and radical theoretic change", il semble bien que ni Heisenberg, ni aucun autre scientifique, n'ait réussi à exprimer ce critère de manière totalement objective et acceptée de tous. Mais, ajoute-t-il avec raison, que personne n'ait encore formulé ce critère n'implique pas nécessairement que celui-ci n'existe pas:

But what is *simplicity*? How do we judge the *beauty* of a scientific theory? To formulate criteria for these is as difficult as it is to say why one art object hits it off and another does not. Einstein intended one thing by these terms; Heisenberg apparently intended something else, and Schrodinger something different again. All we can say with certainty is that each claimed to be able to recognize simplicity and beauty and that nevertheless they disagreed profoundly in their concrete judgements about particular theories; for example, about Heisenberg's Matrix Mechanics. However, the fact of disagreement does not imply that criteria do not exist, only that there are different sensibilities, different "esthetic" styles in science as in art.¹⁰⁶

Bien sûr, comme le remarquait Einstein, rien ne justifie, du moins pour l'instant, l'emploi d'un tel critère; "[...]du point de vue de la physique", écrivait-il, "il n'y a rien qui justifie la supposition qu'une théorie qui est "logiquement simple" doit aussi être "vraie"."¹⁰⁷ Pourtant ce

¹⁰⁵Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.337.

¹⁰⁶ P.A. Heelan, "Heisenberg and radical theoretic change", p. 130.

¹⁰⁷Albert Einstein, *Conceptions scientifiques*, p.139.

fait ne l'empêchait pas, tout comme Heisenberg, d'être profondément convaincu du rôle essentiel de ce critère dans la recherche des lois naturelles. À propos de la relativité générale, par exemple, il écrit: "En faveur de la théorie parlent en ce moment sa simplicité et sa "rigidité".¹⁰⁸

Pour évaluer si une théorie regroupe effectivement les "bons concepts", il semble donc qu'on doive faire appel à d'autres critères. Ceux auxquels Heisenberg fait implicitement appel dans ses différents écrits peuvent, à notre avis, se ramener aux trois critères proposés par Herz dans son introduction à ses *Principes de la Mécanique* que Heisenberg résume ainsi dans *La nature dans la physique contemporaine*:

Les trois critères suivants nous permettent [selon Hertz] de déterminer si les images [données par les sciences de la nature] sont utilisables ou non:

- 1) Elles doivent être *admissibles*, c'est-à-dire correspondre aux lois de notre raisonnement;
- 2) Elles doivent être *exactes*, c'est-à-dire conformes à l'expérience extérieure;
- 3) Elles doivent être *utiles*, c'est-à-dire inclure le plus grand nombre possible de rapports essentiels et le moins possible de rapports superflus ou insignifiants par rapport à l'objet.¹⁰⁹

Mais ces critères restent très pragmatiques. Loin de nous aider à déterminer si une théorie nous permet de comprendre ou non le monde qui nous entoure, ils nous offrent plutôt la possibilité de déterminer quelle théorie, tout en étant aussi cohérente et exacte dans ses prédictions que les autres théories, nous permet la plus grande "économie de pensée".

Cette impossibilité d'évaluer si une théorie est uniquement phénoménologique (et donc uniquement formelle) tient peut-être au fait que, quoique la découverte des formules mathématiques ne soit pas équivalente à la compréhension elle-même, elle en demeure néanmoins le signe le plus probant. Heisenberg écrit, par exemple, à propos du processus menant à la compréhension d'un nouveau domaine de la physique: "The final step will be the

¹⁰⁸ *Ibid.*, p. 141.

¹⁰⁹ Werner Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, p.157.

application or mathematical elaboration of the new concepts and will, if the correct concepts have been found, lead to the conviction that "now one has understood" the phenomena."¹¹⁰ Il ajoute cependant: "This may be so even if a quantitative description cannot be reached on account of mathematical complications"¹¹¹, indiquant ainsi que la formulation mathématique des lois physiques n'équivaut pas nécessairement à leur compréhension. Mais cette question du rôle des mathématiques versus celui des concepts ne se réglera pas aussi facilement. Comment expliquer que Heisenberg, qui pourtant affirme que les mathématiques ne sont pas garantes de la compréhension, écrive que l'analyse mathématique mènera un jour à la compréhension de l'unité de la matière: "One may hope that the combined effort of experiments in the high energy region and of mathematical analysis will someday lead to a complete understanding of the unity of matter. The term "complete understanding" would mean that the forms of matter in the sense of Aristotelian philosophy would appear as results, as solutions of a closed mathematical scheme representing the natural laws for matter."¹¹² Quels rôles jouent les concepts et les mathématiques dans le développement de la physique théorique? Concepts et mathématiques semblent étroitement liés en physique, pourtant leurs rôles dans le développement de cette science doivent être très distincts puisque nous considérons incomplète toute théorie physique ne possédant pas les deux aspects: formel et conceptuel. Les concepts sont-ils la forme essentielle de la compréhension scientifique? Les mathématiques ont-elles plus qu'un rôle secondaire à jouer dans le développement de la physique? Ce sont les questions que nous devons maintenant aborder.

¹¹⁰Id., "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p.336.

¹¹¹Ibid., p.336.

¹¹²Id., *Physics and Philosophy*, p.166.

Chapitre 3: Le rôle du langage en physique

Pendant longtemps, la question du langage a été presque totalement ignorée en physique. En fait, jusqu'au début du XXe siècle, il était possible de croire que, même si les physiciens rencontraient quelques difficultés à expliquer certains phénomènes naturels, ce n'était jamais à cause d'une faiblesse du langage mais seulement parce que l'imprécision des appareils de mesure ou la très grande complexité des phénomènes les empêchaient de saisir les relations existant entre les différents faits naturels. Heisenberg résume bien cette situation dans l'introduction de "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik":

On a longtemps cru que le problème du langage ne jouait qu'un rôle subordonné en sciences naturelles. Il est, en effet, question dans les sciences naturelles, d'observer la nature aussi précisément que possible et, à partir de là, de comprendre ses effets. Les difficultés avec lesquelles, par exemple, le physicien ou le chimiste devait se battre, dépendaient de l'insuffisance de ses sens ou de l'appareillage avec lesquels il devait faire ses observations, ou elles avaient pour cause la grande complexité des relations de la nature dont l'ordre ne nous semble pas, à première vue, compréhensible. Il semblait que l'on pourrait toujours parler aussi aisément des résultats lorsque ceux-ci seraient acquis et que l'on n'avait pas particulièrement besoin de discuter du langage lui-même. Bien sûr, au cours du développement de la connaissance, il est souvent apparu approprié, voire même nécessaire, d'introduire dans le langage un terme technique supplémentaire avec lequel un objet ou une relation précédemment inconnu condescendait à se laisser caractériser. Mais, un langage ainsi complété semblait généralement suffisant pour décrire les relations de la nature qu'on avait découvertes.¹¹³

En fait, cette attitude prévaut encore aujourd'hui chez de nombreux physiciens. Pourtant, comme l'a souligné Heisenberg, le langage joue en physique, comme dans toutes les autres

¹¹³"Es ist lange Zeit angenommen worden, daß das Problem der Sprache in der Naturwissenschaft nur eine untergeordnete Rolle spiele. In den Naturwissenschaften geht es ja darum, die Natur in ihren verschiedenen Bereichen möglichst genau zu beobachten und daraus ihr Wirken zu verstehen. Die Schwierigkeiten, mit denen z. B. der Physiker oder Chemiker zu ringen hat, beruhen etwa auf Unzulänglichkeiten seiner Sinnesorgane oder der Apparaturen, mit denen beobachtet werden soll, oder sie sind durch die große Kompliziertheit der Zusammenhänge in der Natur bedingt, deren Ordnung uns zunächst nicht verständlich erscheint. Es sah aber immer so aus, als könnte man leicht über die Ergebnisse sprechen, wenn sie einmal gewonnen waren, und als brauche man die Sprache selbst nicht besonders zu diskutieren. Zwar hat es sich in der Entwicklung der Wissenschaft oft als zweckmäßig oder sogar als notwendig erwiesen, Kunstwörter zusätzlich in die Sprache einzuführen, mit denen sich früher unbekannte Objekte oder Zusammenhänge bequem bezeichnen ließen. Aber eine in dieser Weise ergänzte Sprache schien im allgemeinen ausreichend, um die gefundenen Zusammenhänge in der Natur zu beschreiben." . Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.271-272.

formes de compréhension humaine, un rôle essentiel. Pourquoi? Tout d'abord parce que la science ne pourrait se développer si les scientifiques n'avaient pas la possibilité d'échanger leurs idées et de partager les résultats de leurs observations: "Any kind of understanding, scientific or not, depends on our language, on the communication of ideas. Every description of phenomena, of experiments and their results, rests upon language as the only means of communication."¹¹⁴ Mais le langage n'est pas qu'un moyen de communication, il est aussi, ajoute Heisenberg un outil nécessaire au développement de la pensée elle-même: "Language was formed during the prehistoric age", écrit-il, "as a means for communication and as a basis for thinking."¹¹⁵.

En effet, nous dit Charles De Koninck, le langage donne à la pensée un moyen sensible l'empêchant de vaguer: "Notre pensée est en effet si confuse à l'origine, elle incline tant à se disperser qu'il lui faut, pour se porter déterminément sur ceci ou cela, des moyens sensibles. C'est ce qu'elle fait quand elle impose aux choses des noms, qu'elle relie entre eux, moyennant les artifices d'une grammaire et suivant une logique rudimentaire."¹¹⁶ Cette nécessité du langage pour la pensée, c'est celle décrite par Shakespeare dans *The Tempest* où Miranda rappelle à Caliban, un esclave trouvé par son père sur l'île déserte où ils vivent, que c'est elle qui lui a appris à parler:

I pitied thee,
Took pains to make thee speak, taught thee each hour
One thing or other: when thou didst not - savage!-
Know thine own meaning, but would'st gabble like
A thing most brutish, I endow'd thy purposes
With words that made them known¹¹⁷

¹¹⁴Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.144-145.

¹¹⁵ *Ibid.*, p.168. Nous soulignons.

¹¹⁶Charles De Koninck, "Le langage philosophique", p.205.

¹¹⁷ *J'eus pitié de toi,
Je pris la peine de t'apprendre à t'exprimer,
De t'enseigner à toute heure une chose ou l'autre.
Alors que toi-même ne savais pas, sauvage,
Ce que tu voulais dire, et que tu jacassais
Comme une brute, j'ai fourni à tes désirs
Des vocables pour les nommer.*

William Shakespeare, *The Tempest*, Acte I, scène 2 (traduction de Pierre Leyris).

Caliban est ainsi l'illustration du fait que, s'il est vrai qu'il est possible à l'être humain de penser sans l'aide de mots, cette pensée sans vocables ne peut en être une très élaborée. Avant que tu n'apprennes à parler, lui rappelle donc Miranda, ta pensée était tellement informe que tu ne savais même pas ce que tu voulais dire (*When thou didst not know thine own meaning*). Comme le remarque Bertrand Russell dans *Human Knowledge*, toute pensée quelque peu élaborée exige des mots: "Language serves not only to express thoughts, but to make possible thoughts which could not exist without it. It is sometimes maintained that there can be no thought without language, but to this view I cannot assent: I hold that there can be thought, and even true and false belief, without language. But however that may be, it cannot be denied that all fairly elaborate thoughts require words."¹¹⁸

Cette possibilité d'une pensée plus élaborée que donne à Caliban son apprentissage du langage illustre aussi l'influence qu'a la communauté sur le développement intellectuel de l'individu. Sans Miranda et son père, jamais Caliban n'aurait appris à parler et sa pensée serait demeurée fort primitive. En permettant la communication entre les différents individus, le langage stimule la formation de la pensée. C'est pourquoi, écrit Einstein, on distingue, dans les communautés de langue, des communautés d'idées:

On pourrait être tenté de reconnaître à la pensée une pleine autonomie par rapport à la langue si l'homme était capable de développer sa pensée sans l'impulsion de ce que d'autres personnes lui auraient communiqué au moyen de la langue. Le développement de la pensée d'un individu qui aurait grandi dans de telles conditions serait certainement très réduit. Nous devons donc en déduire que le développement de la pensée, et en particulier la formation et la manière de lier entre eux les concepts, est, chez l'homme, dans une large mesure lié à la langue. On voit donc à quel point communauté de langue signifie communauté d'idées. C'est dans ce sens que la pensée est liée à la langue.¹¹⁹

Tout comme pour Russell et Einstein, le langage est, pour Heisenberg, étroitement lié à la pensée, mais la nature de cette relation est quelque peu difficile à saisir. Cet état de fait a d'ailleurs donné lieu, chez les commentateurs, à une certaine spéculation. Par exemple, dans son introduction au manuscrit écrit en 1942 par Heisenberg, Catherine Chevalley va jusqu'à

¹¹⁸ Bertrand Russell, *Human Knowledge*, p.74.

¹¹⁹ Albert Einstein, *Oeuvres complètes*, tome 5, p.169-170.

affirmer que, pour Heisenberg, langage et pensée sont une seule et même chose. Elle écrit ainsi: "Il n'existe pas [dans ce texte de Heisenberg] deux fonctions distinctes, la pensée et le langage, la seconde n'étant que l'expression imparfaite de la première. En réalité, pensée et langage ne font qu'un [...]"¹²⁰. Mais une telle affirmation dépasse les propos tenus par Heisenberg. En effet, Catherine Chevalley ne justifie sa position que sur la base du passage suivant, tiré du manuscrit de 1942, dans lequel Heisenberg admet qu'il existe un "élément d'indétermination intrinsèque au langage et à la pensée":

[...] est-il jamais possible d'exprimer au moyen du langage quelque chose d'entièrement déterminé? La question ne doit pas être prise comme voulant dire qu'alors qu'il y aurait des pensées déterminées de façon complètement claire, le langage ne serait pas toujours à même de pouvoir les exprimer. Ce qui est en jeu dans la question est plutôt cet élément inévitable d'indétermination, ce "suspens" ("*Schwebende*") intrinsèque à la pensée et au langage que les philosophes ont décrit avec tant de force.¹²¹

Mais, qu'il existe une indétermination à la fois dans la pensée et dans le langage n'implique pas nécessairement, comme le laisse supposer Mme Chevalley dans son commentaire, que Heisenberg ait cru que langage et pensée soient une seule et même fonction de notre intelligence. D'ailleurs, dans le manuscrit de 1942, Heisenberg, loin de soutenir l'identité de la pensée et du langage, fait plutôt de ce dernier la "forme qui permet d'appréhender et de transmettre les pensées humaines"¹²². Dans son sens le plus usuel, le nom allemand "*Form*" utilisé par Heisenberg, signifie, tout comme le substantif français "forme", "manière d'être extérieure, configuration des corps, des objets" (*Larousse*). Le langage représente donc, pour Heisenberg, une certaine "manière d'être extérieure" de notre pensée permettant de *saisir* et d'*extérioriser* cette dernière. Ainsi, puisque le langage nous sert à transmettre nos idées, il est naturel que toute hésitation présente dans la pensée se reflète dans nos paroles sans qu'il y ait pour autant identité entre langage et pensée.

¹²⁰Catherine Chevalley, Introduction à *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p.164.

¹²¹Werner Heisenberg, *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p.256

¹²²*Ibid.*, p.256.

Les deux extraits suivants, tirés de *Physics and Philosophy*, le principal recueil philosophique de Heisenberg, illustrent autrement ce lien qui existe pour lui entre langage et pensée. Alors que dans le manuscrit de 1942, Heisenberg présentait le langage comme la forme de la pensée, il le montre ici comme ce qui contient les concepts à l'aide desquels nous raisonnons:

language now contains a great number of concepts which are a suitable tool for more or less unambiguous communication about events in daily life.¹²³

The concepts of classical physics are just a refinement of the concepts of daily life and are an essential part of the language which forms the basis of all natural science.¹²⁴

Ces deux extraits indiquent donc eux aussi que, chez Heisenberg, langage et pensée sont deux choses distinctes. Tout comme une boîte contenant des livres n'est pas la même chose que ces livres, le langage, quoiqu'il contienne les concepts de notre intelligence, n'est pas nécessairement la même chose que notre pensée. Cette première présentation du lien existant, chez Heisenberg, entre langage et pensée, est certes vague. Bien sûr, cette relation semble pour lui très étroite et même nécessaire mais la description qu'il donne de ce lien demeure ambiguë. Rien dans ses textes, d'ailleurs, ne laisse croire qu'il ait eu une conception plus claire de la nature du lien unissant pensée et langage. L'utilisation confuse que fait parfois Heisenberg du mot "concept" illustre bien cette difficulté. En effet, en plus d'employer ce mot pour désigner les représentations mentales des objets et des actions que sont effectivement les concepts, il considère aussi comme des "concepts" les constructions de l'esprit qui, bien que ressemblant à des concepts, ne désignent cependant pas à proprement parler des objets présents dans la nature. Par exemple, il n'hésite pas à parler du "concept" d'entropie dans ses textes alors que ce terme désigne un ensemble de variables mathématiques associé au degré d'ordre des systèmes thermodynamiques. En fait, la signification du mot "concept" est parfois tellement vague chez Heisenberg que, dans certains passages, il va jusqu'à confondre concepts et mots, comme l'illustre l'extrait suivant, dans lequel Heisenberg affirme que les concepts peuvent changer de significations alors qu'il traite en réalité du changement de sens des mots:

¹²³Id., *Physics and Philosophy*, p.168. Nous soulignons.

¹²⁴Ibid., p.56. Nous soulignons.

I will try to report about those strange developments, which have resulted in a change of meaning in many of the most fundamental concepts of physics. This change of meaning fortunately is not total. We are allowed to use the old words in the traditional sense whenever we have to do with phenomena which are not too far away from daily life or from classical physics. But Nature has taught us in these last seventy year, by the unexpected phenomena in electrodynamics and atomic physics, that these words or concepts have only a limited range of applicability.¹²⁵

Comme il est impossible ici d'apporter des distinctions plus claires quant à la relation existant entre langage et pensée sans dépasser les réflexions faites par Heisenberg sur le sujet, il nous faudra, dans notre étude, admettre cette ambiguïté si nous voulons saisir le rôle joué, selon lui, par le langage dans la compréhension en physique.

Élaborer et transmettre la pensée: deux opérations essentielles au développement de la physique; deux opérations qui ne peuvent se faire sans l'aide du langage. Ou plutôt devrait-on écrire "sans l'aide de *langages*" puisque, dans sa pratique, la physique fait appel, selon Heisenberg, à trois langages distincts: (1) le langage ordinaire, c'est-à-dire le langage que nous utilisons dans la vie de tous les jours, (2) le langage scientifique, considéré par Heisenberg comme une extension du langage ordinaire, et, finalement, (3) le langage des mathématiques. Pourquoi utiliser des langages différents en physique? Comment employer ces différents langages pour atteindre les objectifs de précision, d'unification et d'objectivité posés par la physique actuelle? Pourquoi le langage scientifique ou les mathématiques ne sont-ils pas suffisants à l'élaboration de cette science? Les forces et les faiblesses de ces différents langages influencent-elles le développement de la physique? Nous examinerons dans les pages qui suivent, les réponses apportées par Heisenberg à ces questions en nous aidant de ses écrits traitant directement de la question du langage soit "Language and Reality in Modern Physics" (1955-56) et "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik" (1960)¹²⁶:

¹²⁵ *Id.*, *The Development of Concepts in Physics of the 20th Century*, p.161. Nous soulignons.

¹²⁶ "Sprache und Wirklichkeit in der Modernen Physik" parut initialement dans *Gestalt und Gedanke, Band 6. Jahrbuch der Bayerischen Akademie der schönen Künste*, Munich, 1960. Il s'agit d'une version modifiée et allongée d'un autre texte de Heisenberg, "Language and Reality in Modern Physics", qui est en fait le chapitre 10 de *Physics and Philosophy*. Les deux textes ayant le même titre (Langage et réalité dans la physique moderne), je référerai au texte paru dans *Gestalt und Gedanke* par le titre allemand et au chapitre de *Physics and Philosophy* par le titre anglais.

Le langage dans la vie quotidienne

Le premier langage utilisé en physique est le langage ordinaire (*die gewöhnliche Sprache*) qui est tout simplement le langage que nous utilisons dans la vie de tous les jours. L'acquisition de ce langage se fait, selon Heisenberg, à travers l'usage que nous en avons: après avoir entendu plusieurs fois un mot et l'avoir nous-mêmes utilisé à quelques reprises, nous croyons savoir ce qu'il signifie, c'est-à-dire que nous croyons savoir quel concept ce mot représente et à quels objets ce concept réfère. C'est ainsi que les très jeunes enfants n'apprennent pas le sens des mots à partir de définitions fournies par un dictionnaire. Ils observent plutôt l'usage que font les adultes de la langue et tentent de les imiter. L'enfant auquel on donne un jouet en prononçant le mot "balle" utilisera peut être initialement ce mot pour désigner toutes les choses qu'il désire obtenir. Mais, ajoute Heisenberg, face aux réactions négatives ou positives des adultes qui l'entourent, il restreindra peu à peu l'usage de ce mot à certains objets et formera en même temps un concept de ce qu'est une balle.¹²⁷

Cette définition ostensive des mots ne permet cependant pas de développer un langage parfaitement défini. Il n'est pas toujours facile de savoir à quel concept un mot donné fait référence ni à quels objets ou actions correspondent les concepts. Ce jouet sphérique, par exemple, est-ce une grosse balle ou un petit ballon? Comme l'écrit Heisenberg: "[...]les limites entre les choses qu'on peut appeler "balles" et celles auxquelles ce nom ne convient pas ne sont en général jamais tracées de manière entièrement nette."¹²⁸ Heisenberg illustre d'ailleurs cette imprécision propre au langage ordinaire à l'aide de nombreux exemples. Ainsi, lorsqu'on se propose d'aller pique-niquer "au bord de l'eau" avec un ami, il est fort possible que ce dernier pense à une expédition au bord de la mer alors que nous avons à l'esprit un dîner sur les rives d'un petit lac. L'utilisation de mots désignant l'aspect qualitatif d'un objet, comme "chaud".

¹²⁷ On retrouve une description semblable de l'apprentissage du langage par l'enfant dans les *Confessions* de saint Augustin : "J'ai compris comment j'avais appris à parler. Rien d'un enseignement où les grandes personnes m'auraient instruit des mots avec ordre et méthode [...]. Je captais par la mémoire les noms que j'entendais donner aux choses [...]. Je retenais que l'objet avait pour nom le mot qu'on proférait quand on voulait le désigner.", saint Augustin, *Confessions*, livre I, chapitre VIII. Russell apporte lui aussi plusieurs réflexions intéressantes à propos de cet apprentissage ostensif du langage dans la section intitulée "Ostensive Definition" de *Human Knowledge*.

¹²⁸ Werner Heisenberg, *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p.256.

"léger" ou "grand", peut aussi porter à confusion. En hiver, par exemple, combien de fois avons-nous dit, en rentrant dans une maison après d'une longue marche à l'extérieur, "Qu'il fait chaud dans cette pièce!", alors qu'une personne n'étant pas sortie de l'appartement affirme qu'il y fait froid! La polysémie des mots entraîne aussi une certaine imprécision dans le langage. Comme le remarque très justement Heisenberg dans le manuscrit de 1942, un mot aussi banal que "couleur" possède de nombreuses significations: il peut désigner la propriété d'un objet (*la couleur de mon gilet*); il peut caractériser, en physique, la longueur et la fréquence de certaines ondes électromagnétiques (*la lumière de couleur violette a une fréquence d'environ $7,9 \times 10^{14}$ Hz*); le mot "couleur" peut même désigner le mot "couleur" lui-même ("*couleur*" compte sept lettres). Cette polysémie est d'ailleurs fréquemment constatée par ceux faisant l'apprentissage d'une langue étrangère. Le verbe allemand "entleihen", par exemple, peut se traduire en français soit par le verbe "emprunter", si on se place dans la perspective de celui qui emprunte une chose, soit par le verbe "prêter", si on considère celui qui fournit l'objet. "Entleihen" recouvre ainsi en allemand deux significations qui sont pourtant clairement séparées l'une de l'autre dans la langue française. Inversement, le verbe français "apprendre" doit être traduit en allemand par le mot "lehren", si on décrit de l'action d'une personne enseignant quelque chose à quelqu'un, et par "lernen", si on parle de la personne recevant un enseignement quelconque.

Définitions et qualificatifs

Cette imprécision intrinsèque au langage est, bien sûr, connue depuis longtemps et il est possible, dans une certaine mesure, de la corriger. On peut, par exemple, tenter de préciser le sens d'un mot en en donnant une définition claire à l'aide d'autres termes; c'est là d'ailleurs l'usage des dictionnaires lexicaux. Mais il est également possible, écrit Heisenberg dans "Sprache und Wirklichkeit", de préciser l'acception d'un mot par ce qu'il appelle un "complément explicatif" (*erklärender Zusatz*). La portée de ce complément est cependant loin d'être définie dans le texte. Pour toute explication, Heisenberg écrit:

On peut aussi préciser l'acception d'un mot par des compléments explicatifs. Par exemple, le concept de condition se divise en "condition suffisante" et "condition nécessaire". Lorsqu'un parti belligérant indique à l'autre, qui a le dessous, que

l'armistice sera négocié seulement lorsque le parti perdant aura évacué un certain territoire. l'évacuation peut être une condition "nécessaire" ou une condition "suffisante" aux pourparlers. Elle est nécessaire quand il n'y aura certainement pas de négociations sans évacuation. Elle est suffisante s'il est certain qu'après l'évacuation, il y aura des pourparlers.¹²⁹

Heisenberg semble vouloir dire ici qu'il est possible de préciser le sens d'un terme en lui adjoignant un complément. Un nom (par exemple "baleine") pourrait donc, selon lui, être précisé par l'ajout d'un adjectif (comme "bleue"), voire même, peut-être, par l'adjonction d'un complément du nom plus élaboré ("des mers polaires"). Mais ce qui est précisé dans de tels cas, ce n'est pas le sens des mots mais les idées exprimées. Le mot, parce qu'il désigne un concept de l'esprit plutôt qu'une chose dans le monde physique, possède un certain degré d'universalité. Le substantif "baleine" désigne ainsi un genre animal. Si nous affirmons que "Les baleines sont énormes". nous affirmons que toutes les espèces de baleines (baleine bleue, baleine à bosse, béluga, etc.) sont énormes. Si nous disons: "Les baleines à bosse sont énormes". le sens du mot "baleine" n'a pas été modifié par le complément, il désigne toujours le même ensemble de mammifères marins. Cependant, le complément utilisé ("à bosse") indique que nous parlons d'une espèce animale appartenant au genre des baleines. L'intérêt d'utiliser le nom du genre dans l'expression désignant l'espèce est évident: il permet à l'auditeur de comprendre de quel type d'animal il est question sans que ce dernier ait pour cela besoin d'une connaissance approfondie du règne animal. Il lui suffit d'avoir une vague idée des espèces regroupées sous le vocable de "baleine" afin de comprendre notre affirmation. Bien entendu, nous pourrions utiliser un nom particulier pour désigner cette espèce. Plutôt que "Les baleines à bosses sont énormes". nous pourrions utiliser un synonyme et dire "Les *mégaptères*" ou encore "Les *jubartes* sont énormes." Mais de tels mots seraient sans signification pour ceux connaissant peu les baleines. Que les compléments ne précisent pas le sens d'un mot, il est aussi possible de le

¹²⁹"Man kann auch durch erklärende Zusätze die Bedeutung eines Wortes verschärfen, also, um ein Beispiel zu geben, etwa den Begriff „Bedingung“ aufgliedern in „hinreichende Bedingung“ und „notwendige Bedingung“. Wenn etwa eine kriegführende Partei der unterliegenden anderen Partei mitteilt, sie werde über den Waffenstillstand nur verhandeln, wenn die unterliegende Partei ein gewisses Gelände geräumt habe, so kann die Räumung eine „notwendige“ oder schon eine „hinreichende“ Bedingung für Verhandlungen sein. Notwendig ist sie, wenn ohne die Räumung sicher nicht verhandelt wird. Hinreichend ist sie, wenn nach der Räumung sicher verhandelt werden soll.“. Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.274.

constater dans des expressions comme "cordon-bleu", où il est évident que le mot "cordon" n'a plus aucun rapport avec son sens original de "petite corde tressée". ou encore dans l'expression "licorne de mer" qui désignait autrefois le narval lequel, bien qu'ayant une longue dent rappelant la corne de l'animal fabuleux, n'a rien d'un cheval.

Si nous désirons exprimer notre pensée plus clairement, nous pouvons le faire en qualifiant les mots que nous employons à l'aide d'adjectifs, de compléments, d'adverbes, etc., ou encore en créant de nouvelles expressions. Si, par contre, nous désirons préciser le sens d'un mot, nous devons le faire en passant pas une définition. Mais nous nous retrouvons alors dans l'obligation d'utiliser d'autres mots, dont les sens doivent obligatoirement nous être plus connus que la signification du mot à définir. Rien ne sert de définir le mot "tortue" par l'expression synonyme "reptile chélonien" beaucoup moins parlante pour la plupart d'entre nous. On voit donc immédiatement la grande faiblesse de ce que Russell nomme la "définition verbale": on ne peut préciser à l'infini le sens des mots à l'aide d'autres mots. Éventuellement, la définition des mots du langage ordinaire doit reposer sur des termes qui sont acceptés sans définition verbale préalable, qui ne sont connus que de manière ostensive. Bien que cette dernière façon de définir nous donne la possibilité, dans une certaine mesure de préciser notre pensée, elle ne permet pas de déterminer exactement les limites de nos concepts. C'est ainsi que, pour Heisenberg, "[...]l'édifice du langage doit finalement toujours s'élever sur une base incertaine[...]"¹³⁰ Mais, si celui-ci a raison et que toute notre connaissance repose effectivement sur des assises instables, nous ne pouvons que nous demander comment alors il nous est possible d'acquérir des savoirs sur le monde qui aient une quelconque valeur et nous devons constater que Heisenberg a laissé sans réponse cette question du point de départ absolu de notre connaissance de la nature.

¹³⁰"[...]daß daher] das Gebäude der Sprache letztlich immer auf unsicherem Grund errichtet werden muß[...]" "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", Werner Heisenberg, p.275.

Logique

Définitions et qualificatifs peuvent donc nous aider à préciser le *contenu* des propositions élaborées grâce au langage. Mais il est également possible, ajoute Heisenberg, de préciser la *forme* de ce dernier à l'aide de la logique classique qui permet, écrit-il, "to analyze the forms of language, the formal structure of conclusions and deductions independent of their content."¹³¹ Avec le développement de sa logique, explique Heisenberg, "Aristotle [...] contributed immensely to the clarification, to the establishment of order in our methods of thought."¹³² La précision et le degré d'abstraction que cette logique permit d'atteindre en font, selon Heisenberg, la base de tout langage scientifique. Mais, ajoute-t-il, cette précision et cette abstraction, propres à l'analyse logique, entraînent aussi un certain danger de simplification. En portant son regard uniquement sur les liens existant entre les prémisses et les conclusions, la logique néglige d'autres structures qui peuvent exister entre les différentes significations des mots et qui sont nécessaires à la compréhension de certains énoncés du langage ordinaire. C'est le cas, écrit Heisenberg, en poésie, où les auteurs jouent souvent sur les différents sens d'un même mot dans l'espoir d'éveiller en nous certaines images.

Deux critiques majeures doivent être faites à Heisenberg quant à sa présentation de la logique aristotélicienne. Premièrement, pour Aristote, la logique avait une portée beaucoup plus grande que la simple analyse des formes des raisonnements (les syllogismes) qu'il présente dans ses Analytiques. La logique aristotélicienne est conçue, en effet, comme un instrument permettant d'arriver à la vérité, ce qui suppose non seulement une façon de juger la forme des arguments, mais aussi un art de définir et une façon de juger des propositions lorsque ces dernières ne sont pas incluses dans un raisonnement. Le logicien péripatéticien ne se contente donc pas d'étudier les arguments syllogistiques. Il s'intéresse aussi, dans la dialectique, à la façon de s'approcher de la vérité à partir d'arguments probables (dans lesquels, il peut tout de même faire appel à des syllogismes). En fait, son champ d'étude s'étend jusqu'aux enthymèmes de la rhétorique et aux métaphores de la poésie. Le nom de "logique" s'applique tout de même moins à ces deux

¹³¹Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.169.

¹³²Ibid., p.169.

dernières disciplines dont les fins premières sont, respectivement, de convaincre et d'exprimer les choses dans un langage qui plaît. On peut néanmoins reprocher à Heisenberg de ne pas avoir saisi l'étendue réelle de la logique aristotélicienne.

Deuxièmement, on peut s'interroger quant au rôle que Heisenberg assigne à la logique en général. Si on admet volontiers la place de cette dernière dans l'analyse du raisonnement, on peut toutefois douter de sa participation dans l'analyse des formes du langage, tâche qui semble plutôt échouer à la linguistique. À première vue, en effet, les différentes langues humaines semblent démontrer des structures différentes les unes des autres. Pourtant, la logique s'applique à tous les raisonnements, et ce, quelque soit la langue dans laquelle ils sont exprimés. À moins d'associer la forme du langage à une sorte de grammaire innée et commune à tous les êtres humains, comme le propose Chomsky, il est difficile de voir comment des gens, de langues différentes, pourraient faire appel à une même logique si celle-ci traitait effectivement du langage. Heisenberg confond indubitablement ici logique et grammaire. Il est vrai que les formes grammaticales peuvent, *jusqu'à un certain point* représenter les formes de la logique, mais cela ne fait pas de la grammaire une logique et vice versa. Cette confusion quant au rôle de la logique nous indique toutefois que, pour Heisenberg, le langage est beaucoup plus qu'un simple ensemble formé de mots et d'une grammaire.

Le langage en physique classique

Malgré les précisions apportées par les définitions et la logique, le langage ordinaire demeure, selon Heisenberg, trop vague pour nous permettre de développer une science exacte comme la physique. En effet, explique-t-il dans "Language and Reality", nous tentons, en physique, d'expliquer les phénomènes particuliers à partir de lois générales ne contenant que quelques concepts simples. Nous pouvons dériver de ces lois l'ensemble des phénomènes naturels possibles, non seulement d'un point de vue qualitatif mais aussi d'un point de vue *quantitatif*. Ainsi, un physicien peut aisément calculer avec précision la force exercée par un corps chargé électriquement en mouvement dans un champ magnétique. Bien entendu, pour qu'il soit possible de dériver avec exactitude des phénomènes particuliers à partir de lois aussi générales que celles de l'électromagnétisme, il est nécessaire que les liens existant entre les différents

concepts contenus dans ces lois (comme les concepts de force, de masse ou de charge) soient définis les uns par rapport aux autres avec une extrême précision, précision qui, selon Heisenberg, ne peut être acquise par le langage ordinaire que par l'abstraction mathématique. Cette précision et cette clarification du langage de la vie de tous les jours trouve donc, d'après lui, son achèvement (*Ergänzung*) dans la mécanique de Newton, laquelle devient ainsi le langage à la base de toute la science naturelle. C'est pourquoi il écrit dans "Sprache und Wirklichkeit": "Depuis qu'il y a trois cents ans, Isaac Newton a écrit son célèbre ouvrage, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, cet achèvement (*Ergänzung*) et cette précision du langage ordinaire à travers un schème mathématique sera toujours perçue comme la base d'une science exacte au sens propre du terme."¹³³

Pour Heisenberg, il est donc absolument nécessaire, si on veut utiliser le langage ordinaire en physique, de préciser à l'aide des mathématiques les relations existant entre ses différents concepts. Pour cela, explique-t-il dans "Language and Reality", on introduit en physique des symboles qui peuvent être corrélés avec les mesures effectuées lors des expériences. Pour ces symboles nous utilisons des noms qui évoquent (*visualize*) leurs corrélations avec les mesures et qui nous permettent ainsi de les lier au langage¹³⁴. Quoique Heisenberg ne le fasse pas lui-même, on peut illustrer cette opération par l'exemple suivant. On peut associer généralement le symbole m aux résultats obtenus lors de la pesée d'objets. C'est pourquoi, comme le mot "masse" est associé à la quantité ainsi mesurée, on attribue ce nom à ce symbole. On aurait cependant apprécié ici que Heisenberg précise comment le physicien sait quel nom associer aux différentes mesures qu'il effectue. Comment, par exemple, le chercheur sait-il qu'il doit corréler le symbole x , qu'il nomme "longueur", non seulement aux résultats qu'il obtient lorsqu'il mesure le côté d'une table à l'aide d'une règle, mais aussi à la distance Terre-Lune mesurée à

¹³³"Seit Isaac Newton vor dreihundert Jahren sein berühmtes Werk, die „Philosophiae naturalis principia mathematica“ geschrieben hat, ist diese Ergänzung und Präzisierung der gewöhnlichen Sprache durch ein mathematisches Schema immer als Grundlage für eine exakte Naturwissenschaft im eigentlichen Sinn angesehen worden.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.278.

¹³⁴ Heisenberg écrit en effet: "In theoretical physics we try to understand groups of phenomena by introducing mathematical symbols that can be correlated with facts, namely, with the results of measurements. For the symbols, we use names that visualize their correlation with the measurement. Thus the symbols are attached to the language.", Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.172.

l'aide d'un laser. ou encore au résultat qu'il obtient à l'aide d'un micromètre? Comment le physicien sait-il que toutes ces opérations consistent en la mesure de longueurs? Heisenberg ne le précise pas. Mais, en admettant que chaque nom réfère à un concept, on peut déduire que la corrélation entre un symbole et une mesure est possible parce que nous avons, via le nom, un *concept* associé à chaque symbole, concepts qui réfèrent aux différents types de mesure. Sans démontrer cette hypothèse, cet extrait de "Sprache und Wirklichkeit" indique que les concepts jouent effectivement, pour Heisenberg, un certain rôle dans l'association des symboles aux différents résultats expérimentaux: "Dans la physique théorique", écrit-il, "nous complétons et précisons le langage naturel lorsque, pour le domaine d'expériences en question, nous conjuguons les concepts fondamentaux aux symboles mathématiques lesquels peuvent être mis en relation avec les faits. c.-à-d. les résultats de mesures."¹³⁵

Pour avoir un langage parfaitement clair, il n'est cependant pas suffisant que les symboles mathématiques soient corrélés sans équivoque avec les mesures effectuées: il est aussi essentiel que ces symboles (et, conséquemment les concepts qui leur sont associés) soient interreliés par un système rigoureux de définitions et d'axiomes. Une fois déterminés les liens entre les différents symboles ainsi que leurs relations avec les mesures, il est possible d'exprimer les lois naturelles sous forme d'équations entre les différents symboles. Le nombre infini de solutions que possèdent ces équations représentent le nombre infini des phénomènes possibles dans le domaine d'expériences qu'elles couvrent. Ainsi, à partir des lois de la physique classique et des conditions initiales appropriées, le physicien peut prédire l'heure exacte de la prochaine éclipse de soleil, la puissance électrique fournie par une éolienne ou le temps de cuisson nécessaire à un rôti.

Heisenberg remarque néanmoins qu'au fil du développement des connaissances scientifiques, le langage de la physique s'est quelque peu modifié. D'une part, au cours du XIXe siècle de nouvelles théories physiques, la thermodynamique et l'électromagnétisme, furent développées

¹³⁵ "In der theoretischen Physik ergänzen und verschärfen wir daher die natürliche Sprache, indem wir den für den betreffenden Erfahrungsbereich grundlegenden Begriffen mathematische Symbole zuordnen, die zu den Tatsachen, d.h. zu den gemessenen Beobachtungsergebnissen, in Beziehung gesetzt werden können." , Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.278.

afin de décrire certains phénomènes qui ne pouvaient être expliqués par la mécanique newtonienne, introduisant du même coup de nouveaux termes dans le langage de la science. C'est ainsi que des expressions comme "chaleur", "champ électrique" ou "résistance électrique" firent leur apparition. S'éloignant quelque peu d'une explication mécanique des phénomènes physiques, ces nouveaux concepts, remarque Heisenberg, ne furent pas toujours facilement acceptés par l'ensemble des physiciens. Mais, ajoute-t-il, ces nouvelles théories formaient un ensemble consistant avec la mécanique de Newton, la *physique classique*, avec laquelle elles partageaient les mêmes présuppositions fondamentales, soit: 1) le fait que les événements aient un ordre temporel indépendant de leurs dispositions spatiales, 2) la certitude que la géométrie euclidienne était valide dans l'espace réel, et, finalement, 3) la conviction que les événements physiques se produisaient dans l'espace et le temps, qu'ils soient ou non soumis à l'observation.

Cette évolution de la physique entraîna, souligne Heisenberg, une modification dans le mode de signifier de certains mots. Si, initialement, les termes de la physique représentaient des concepts analogues aux concepts utilisés dans la vie quotidienne, on vit bientôt apparaître, dans le langage scientifique, des mots désignant des symboles mathématiques. En effet, écrit-il: "Par la suite, il a semblé approprié que des parties de ce langage mathématique soient intégrées dans le langage ordinaire alors qu'on introduisait des noms pour des symboles mathématiques particuliers auxquels on pouvait accorder, dans une certaine mesure, un contenu intuitif au sein des phénomènes."¹³⁶ L'explication de l'entropie donnée par Van Wylen et Sonntag dans *Thermodynamique appliquée* illustre parfaitement, nous semble-t-il, cette affirmation de Heisenberg:

Puisque $\int \partial Q/T$ est la même pour tous les chemins réversibles entre les états 2 et 1, nous pouvons dire que cette quantité est indépendante du parcours suivi, qu'elle est fonction uniquement de l'état initial et de l'état final et que, par conséquent, il s'agit d'une variable thermodynamique. Cette variable s'appelle l'*entropie* et on la désigne

¹³⁶ "In der Folgezeit hat es sich als zweckmäßig erwiesen, Teile dieser mathematischen Kunstsprache wieder in die gewöhnliche Sprache zu übernehmen, indem man etwa Namen für bestimmte mathematische Symbole einführt, denen man auch in gewissem Umfang einen anschaulichen Inhalt in den Erscheinungen geben kann.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.279

par le symbole S . Il s'ensuit donc que l'on peut définir l'entropie comme une variable d'une substance d'après la relation suivante: $\partial S \equiv \int \partial Q/T$ ¹³⁷

Ainsi, un ensemble de variables mathématiques, $\int \partial Q/T$ (où Q est la chaleur totale échangée et T la température), a pris une telle importance dans la pratique de la thermodynamique qu'on lui a attribué un symbole, S , que nous avons nommé *entropie*. En plus de l'introduction de ces nouveaux termes issus des mathématiques, Heisenberg remarque que d'autres mots ont reçu une sphère d'application plus vaste ou encore une signification différente de celle possédée par le mot lorsqu'il est utilisé dans le langage ordinaire. Les termes "force", "énergie" ou "poids" sont des exemples de telles modifications de sens que les étudiants de physique connaissent fort bien. L'exemple du mot "travail" est peut-être encore plus frappant. Si, dans la vie quotidienne, on entend par ce mot quelque chose d'aussi général que "activité de l'homme appliquée à la production, à la création, à l'entretien de quelque chose." (*Larousse*), le travail est défini, en mécanique classique, comme égal au produit scalaire de la force et du déplacement, c'est-à-dire, en termes mathématiques: $W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$ ¹³⁸, où W est le travail, \mathbf{F} , la force, et \mathbf{s} , le déplacement. Selon la physique, donc, le pauvre Sisyphe, malgré tous ses efforts, n'accomplissait aucun travail!¹³⁹ Dans "Sprache und Wirklichkeit", Heisenberg note que ce nouveau langage scientifique suscita de grands espoirs: "Lorsque cet élargissement du langage fut entrepris, le langage ainsi augmenté semblait totalement suffisant pour décrire et comprendre les événements de la nature"¹⁴⁰ Mais, ajoute-t-il, cette confiance dans les possibilités du langage de la physique classique allait bientôt être ébranlée par les avancées de la relativité et de la physique quantique.

¹³⁷Gordon J. Van Wylen et Richard E. Sonntag, *Thermodynamique appliquée*, 2e édition, p.205.

¹³⁸ Les caractères gras indiquent des quantités vectorielles.

¹³⁹ En effet, comme le rocher que Sisyphe était condamné à pousser en haut d'une montagne redescendait toujours avant qu'il n'ait atteint le sommet, il n'y avait, selon la définition de la physique, aucun déplacement du rocher et, conséquemment, aucun travail de la part de Sisyphe!

¹⁴⁰"Wenn diese Erweiterung der Sprache vorgenommen wurde, so schien die so erweiterte Sprache völlig ausreichend, um die Vorgänge in der Natur zu beschreiben und zu verstehen." Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.279.

Les bouleversements de la physique moderne

Que le sens de nos mots puissent être modifiés par les découvertes de la physique est un fait connu depuis longtemps. Par exemple, remarque Heisenberg dans "Sprache und Wirklichkeit", nous savons tous ce que signifient les mots "haut" et "bas" dans le langage de la vie de tous les jours; les objets tombent vers le bas et le ciel se trouve en haut de nos têtes. Mais, en prenant conscience de la sphéricité de la Terre, on se rend compte que ce que nous considérons comme le "bas" est en fait le "haut" des gens se trouvant à notre antipode. On pourrait alors être tenté de définir la direction du "haut" comme la direction s'éloignant du centre de la Terre. Mais, ajoute Heisenberg, les vols spatiaux nous démontrent bien comment une telle tentative serait futile: pour l'équipage d'un vaisseau spatial, les mots de "bas" et de "haut" n'ont plus de sens. Heisenberg exagère quelque peu ici. Même aujourd'hui, alors que les vols spatiaux sont plus fréquents, les mots "bas" et "haut" n'ont pas perdu toute signification: ils ont tout simplement acquis de nouveaux sens, analogues à leur sens initial. Originellement, bien sûr, les mots "bas" et "haut" désignaient, pour les humains convaincus que la Terre était plate, des directions absolues: "bas" désignait la direction allant vers la Terre. "haut" référait à celle allant vers le ciel. Avec la découverte, durant l'Antiquité, de la sphéricité de notre planète, ces mots se sont mis à désigner des relations relatives au centre de la Terre. Aujourd'hui encore, à l'heure de la conquête spatiale, "bas" et "haut" désignent toujours certaines directions pour les astronautes bien que ces directions soient tout simplement relatives à autre chose que la Terre. Sur la Lune, le mot "bas" décrit la direction allant vers le centre de notre satellite. "haut", la direction opposée. Dans la station spatiale internationale, ces mots sont relatifs soit aux objets qui se trouvent dans la station, soit aux astronautes eux-mêmes (en effet, rien n'empêche ces derniers de désigner par "bas" la direction allant vers leurs pieds et "haut" celle allant vers leur tête). Trois points méritent ici notre attention. Premièrement, notre langage s'est de tout temps modifié afin de mieux rendre compte des connaissances que nous possédons sur le monde. Deuxièmement, un mot ne perd pas nécessairement sa (ou ses) signification(s) antérieures lorsqu'il acquiert un nouveau sens. Aujourd'hui encore nous utilisons le mot "bas" pour désigner une direction absolue. Lorsque nous disons "J'ai sauté en bas du lit!", nous ne voulons pas dire que nous avons sauté en direction du centre de la Terre. Dans les situations de la vie

quotidienne, on parle (et on agit!) comme si la Terre était plate. À preuve, on utilise encore des expressions comme "aller tout droit", ce qui, bien évidemment, est impossible lorsqu'on suit une surface courbe. Cette dernière remarque nous amène au troisième point illustré par l'exemple de Heisenberg: les différentes significations d'un mot ne sont valables que pour un domaine d'expérience donné. On peut, lorsqu'on est tout près de la Terre, considérer que le "haut" désigne la direction s'éloignant du centre de notre planète. Mais, dès qu'on quitte l'atmosphère terrestre et qu'on se retrouve en état d'apesanteur, une telle définition du mot "haut" devient inutile.

Nous avons donc, de tout temps, été appelés à modifier notre langage. Mais nous n'étions semble-t-il pas préparés, remarque Heisenberg, à l'abandon de concepts aussi fondamentaux pour nous que ceux de temps et d'espace, abandon pourtant exigé par le développement de la physique moderne:

On peut donc concevoir que l'avance dans de nouveaux domaines de la nature a, éventuellement, comme conséquence des changements dans le langage. Cela a cependant été une importante et troublante surprise d'apprendre, dans les premières décennies de notre siècle, que dans les domaines de la nature approfondies par les hommes grâce aux ressources de la technique moderne, même les concepts simples et fondamentaux de la science d'alors, comme l'espace, le temps, le lieu, la vitesse, étaient problématiques et devaient de nouveaux être attentivement considérés.¹⁴¹

Le langage dans la théorie de la relativité

Ce fut la relativité restreinte qui fut à l'origine de la première "crise" du langage en physique, en obligeant les physiciens à abandonner cet idéal d'un système de référence spatial absolu et d'un temps universel. La relativité restreinte apparue dans le cadre des recherches sur l'électrodynamique des corps en mouvement, un domaine de recherche d'une importance particulière au début du siècle, notamment à cause de la construction des moteurs électriques.

¹⁴¹ "Man kann also begreifen, daß das Vordringen in neue Bereiche der Natur unter Umständen auch Veränderungen in der Sprache zur Folge hat. Aber es war doch in den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts eine große und bestürzende Überraschung zu erkennen, daß in den Bereichen der Natur, in die die Menschen erst durch die Hilfsmittel der modernen Technik eingedrungen sind, selbst die einfachsten und grundlegenden Begriffe der bisherigen Naturwissenschaft, wie Raum, Zeit, Ort, Geschwindigkeit, problematisch werden und neu durchdacht werden müssen.". Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.280-281.

Les physiciens étaient alors aux prises avec de sérieux problèmes quant à la propagation de la lumière. Maxwell avait en effet démontré la nature ondulatoire de celle-ci et demeurait convaincu, comme tous les scientifiques de l'époque, qu'une onde ne pouvait se déplacer que dans un milieu matériel. Or la lumière, malgré sa nature ondulatoire, semblait pouvoir se déplacer dans le "vide" de l'espace. On supposa donc une substance que l'on ne pouvait ni voir ni toucher et qui était présente dans tout l'univers: l'éther.

De nombreuses expériences furent réalisées afin de définir les propriétés de cette substance hypothétique et tenter de comprendre comment la lumière s'y propageait. Michelson et Morley, notamment, tentèrent de mesurer, en vain, la vitesse à laquelle se déplaçait la Terre par rapport à cet éther. En fait, quelles que furent les expériences, il semblait toujours impossible de mesurer la vitesse d'un objet quelconque par rapport à cette substance mystérieuse. Plusieurs physiciens avancèrent des théories afin d'expliquer ces résultats négatifs. Lorentz, entre autre, formula, en 1904, une équation permettant de prédire les résultats de différentes expériences en considérant, d'une part, que les corps en mouvement rapetissaient et, d'autre part, qu'il existait, dans les différents systèmes de référence, des temps "relatifs" remplaçant le temps "absolu". Déjà, les concepts de temps et d'espace montraient des signes de faiblesse. Comme le constate Heisenberg dans "Language and Reality": "The ordinary language was based upon the old concepts of space and time and this language offered the only unambiguous means of communication about the setting up and the results of the measurements. Yet the experiments showed that the old concepts could not be applied everywhere."¹⁴²

Le pas décisif fut fait par Einstein qui proposa, avec la relativité restreinte, l'abandon de la notion d'éther, le rejet de la distinction entre temps "absolu" et temps "relatif", ainsi qu'une utilisation consistante de la transformation de Lorentz. Le point central de cette nouvelle théorie fut la redéfinition du concept de simultanéité. Dans la physique classique, on peut dire de deux événements se produisant en des endroits différents qu'ils sont simultanés si un observateur situé à mi-chemin entre eux les aperçoit au même moment. Prenons l'exemple d'un train dont un des wagons est équipé de la façon suivante: à chacune de ses extrémités se trouve

¹⁴²Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.174.

une porte dont l'ouverture est déclenchée par un photodétecteur lorsque ce dernier capte de la lumière. Au centre de ce wagon se trouve une ampoule, éteinte, et un premier observateur. Notre train entre alors dans une gare sur le quai de laquelle se trouve un second observateur. Exactement au moment où il passe à la hauteur de la personne sur le quai de la gare, le passager du train allume l'ampoule provoquant ainsi l'ouverture des deux portes de son wagon. Selon la physique classique, quelle que soit la vitesse à laquelle arrive le train, les deux observateurs, celui dans le train et celui sur le quai de la gare, affirmeront la même chose: les deux portes se sont ouvertes simultanément.

Si le train entre en gare très lentement par rapport à la vitesse de la lumière, la théorie de la relativité s'accorde avec la physique classique pour dire que, *si on effectuait l'expérience*, les deux observateurs déclareraient tous les deux que les portes du wagon se sont ouvertes en même temps. Pourtant, même pour les situations impliquant de très basses vitesses, il existe toujours *théoriquement* des différences entre les résultats de la mécanique classique et ceux de la relativité restreinte. Mais ces écarts, qui ne sont pas significatifs, voire même non mesurables, peuvent être en pratique négligés dans les situations n'impliquant pas de grandes vitesses¹⁴³. Les prédictions de la relativité restreinte ne s'écartent notablement de ceux de la physique classique que pour de très grandes vitesses. Imaginons donc que notre train repasse devant l'observateur de la gare à une vitesse atteignant près de la moitié de la vitesse de la lumière. De nouveau, le passager du train allume l'ampoule exactement au moment où il passe à la hauteur de l'observateur debout sur le quai de la gare ce qui déclenche l'ouverture des portes. Selon la relativité restreinte, le passager du train affirmera de nouveau que les deux portes se sont ouvertes au même moment. Par contre, l'observateur sur le quai de la gare affirmera que la porte arrière du wagon s'est ouverte avant la porte de devant. Pour ce dernier, donc, les deux événements ne sont pas simultanés! Nous n'entrerons pas davantage dans les

¹⁴³Cette pratique illustre bien le côté pragmatique de la physique. Quoiqu'il puisse exister des différences au niveau mathématique entre les résultats de deux théories (comme c'est le cas, par exemple, entre la mécanique classique et la relativité restreinte), ces écarts peuvent être négligés sur le plan physique, à condition qu'ils ne soient pas mesurables ou qu'ils ne soient pas significatifs. De là nous vient l'idée que les lois physiques sont toujours valables pour un domaine d'application donné: ce domaine étant celui pour lequel l'écart entre les résultats expérimentaux et ceux donnés par la loi peut être négligé.

détails de la théorie car. pour notre réflexion, il suffit de constater que le mot "simultanéité" a pris, en relativité, un sens différent de celui attribué à ce terme dans le langage ordinaire. Comme le fait ressortir Heisenberg dans "Language and Reality", la relativité mit à jour "an ambiguity in the word "simultaneous", which is due to the fact that this term has been formed from the experience of daily life, in which the velocity of light can always be considered as infinitely high"¹⁴⁴. La physique exigea conséquemment un ajustement du langage: il fallait préciser les concepts de simultanéité, de temps et d'espace et adapter le schème mathématique afin de décrire adéquatement les nouvelles réalités physiques. L'ajustement de nos concepts d'espace et de temps au schème mathématique de la relativité n'était pas si simple et soulevait de nombreuses questions: existe-t-il un temps absolu et des temps apparents? Peut-on croire en l'existence d'un système de référence spatial absolu? L'espace et le temps sont-ils totalement indépendants l'un de l'autre? Les réponses à toutes ces questions furent trouvées, d'après Heisenberg, dans la description des phénomènes pour lesquels la vitesse de la lumière peut être considérée comme infinie. Comme nous l'avons noté ci-haut, dans ces conditions, l'écart existant entre les résultats de la mécanique classique et ceux de la relativité restreinte est négligeable. À partir de cette constatation, explique Heisenberg dans "Language and Reality", il est alors possible de trouver une interprétation valable pour la nouvelle théorie:

The obvious starting point for the interpretation of the theory of relativity was therefore the fact that in the limiting case of small velocities (small compared with the velocity of light) the new theory was practically identical with the old one. Therefore, in this part of the theory it was obvious in which way the mathematical symbols had to be correlated with the measurements and with the terms of ordinary language¹⁴⁵

Dans le cas de la relativité restreinte, explique Heisenberg, le langage s'adapta ainsi tout simplement aux descriptions mathématiques puisque, pour les basses vitesses, il était aisé de relier les symboles utilisés dans le schème mathématique de la nouvelle théorie aux mesures effectuées. L'éther, l'espace absolu, ainsi que la distinction entre temps absolu et temps relatif, n'apparaissant ni dans les expériences, ni dans les équations mathématiques, disparurent ainsi de la conception du monde des physiciens.

¹⁴⁴Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.116.

¹⁴⁵*Ibid.*, p.174. Nous soulignons.

Avec la relativité générale, ajoute Heisenberg, Einstein allait transformer encore plus radicalement le concept d'espace qu'il ne l'avait fait avec la relativité restreinte. En effet, alors que, dans la physique classique, l'espace suit les règles de la géométrie euclidienne, il n'en va pas de même dans la relativité générale où la géométrie de l'espace est déterminée par les masses qu'il contient. À première vue, il pourrait sembler extrêmement difficile d'ajuster le langage à une telle réalité: comment, en effet, parler d'un espace non-euclidien dont la géométrie dépend des objets qu'il renferme? Comment faire le lien entre nos concepts traditionnels et le schème mathématique de la nouvelle théorie? Tout comme pour la relativité restreinte, affirme Heisenberg, la solution consistait à effectuer le lien entre concepts et mathématiques pour un domaine d'expérience pour lequel la relativité générale et la physique classique donnaient les mêmes résultats: Or, selon la théorie de la relativité générale, les déviations de l'espace "réel" par rapport à la géométrie euclidienne ne sont perceptibles que sur de très grandes régions de l'espace¹⁴⁶. Sur de petites distances, la géométrie euclidienne reste valable. Ce domaine où se rencontrent physique classique et relativité nous permet alors d'ajuster, nous dit Heisenberg, notre langage aux nouvelles réalités expérimentales:

La validité (*Gültigkeit*) de la géométrie euclidienne pour les petites dimensions suffit en effet, dans la relativité générale, à mettre en évidence les liens entre les concepts de la physique classique et les symboles du langage technique des mathématiques.[...]En définitive, une façon de parler s'est développée à partir de la théorie de la relativité avec laquelle nous pouvons maîtriser les rapports espace-temps dans les grandes dimensions et avec laquelle les difficultés mentionnées au début peuvent, d'une certaine façon, être considérées comme surmontées.¹⁴⁷

¹⁴⁶"Si cette affirmation est vraie pour les longueurs aisément mesurables à notre échelle, il n'en va pas de même pour la très petite région entourant le noyau atomique, au sein de laquelle la force gravitationnelle doit faire ressentir ses effets et dans laquelle, donc, l'espace doit être particulièrement "courbé". Présentement, ni la mécanique quantique, ni la mécanique ondulatoire, ne tient compte de cette influence, ce qui présente un défi de taille pour la physique moderne désireuse d'unifier, en une seule théorie, la physique quantique et la relativité.

¹⁴⁷"Die Gültigkeit der Euklidischen Geometrie im Kleinen genügt auch in der allgemeinen Relativitätstheorie, um die Verbindung zwischen den Begriffen der klassischen Physik und den Symbolen der mathematischen Kunstsprache herzustellen.[...] Im Endergebnis hat sich also auf Grund der Relativitätstheorie eine Redeweise entwickelt, in der wir uns auch über die Raum-Zeit-Verhältnisse im Großen verständigen können, und damit können die am Anfang erwähnten Schwierigkeiten hier in gewisser Weise als überwunden gelten.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.286-287.

Dans la relativité générale, comme dans la relativité restreinte, les problèmes de corrélation entre le schème mathématique et l'expérience se trouvèrent donc résolus, d'après Heisenberg, à partir des situations où le formalisme de la nouvelle théorie s'approche de celui de la physique classique. Dans de telles situations, nous dit-il, un observateur peut en effet faire usage du langage ordinaire et, conséquemment, peut utiliser les concepts ordinaires de temps et d'espace. Niels Bohr, en accord sur ce point avec Heisenberg, résume bien l'importance qu'a, selon eux, le langage ordinaire dans l'interprétation de la théorie de la relativité:

Indeed, the general theory of relativity, by which Einstein in renouncing all ideas of absolute space and time gave our world picture a unity and harmony surpassing any previous dreams, offered an instructive lesson as regards the consistency and scope of plain language. Although the convenient formulation of the theory involves mathematical abstraction as four-dimensional non-Euclidean geometry, its physical interpretation rests fundamentally on every observer's possibility of maintaining a sharp separation between space and time and of surveying how any other observer, in his frame, will describe and coordinate experience by means of the common language.¹⁴⁸

Cette description du développement de la relativité que fait Heisenberg met en évidence trois points. Premièrement, le fait que la précision de la physique repose sur l'élaboration d'un schème mathématique exact. Deuxièmement, la nécessité de développer, en physique, un langage scientifique composé de mots techniques. Si certains termes, comme "atome" sont propre aux théories physiques, d'autres, comme "simultanéité" tirent leur origine du langage ordinaire mais prennent, dans le langage scientifique, une signification plus précise. Cependant, le schème mathématique tout comme le langage scientifique tirent leur légitimité de l'expérience. C'est ainsi que le concept d'éther, qui ne se rapportait à aucun fait physique vérifiable, a finalement été éliminé du langage scientifique. Or, et c'est là le troisième point mis de l'avant par Heisenberg, la description de cette expérience repose, en dernier ressort, sur le langage ordinaire, ce qui nous amène à conclure que ce dernier est un préalable à l'utilisation du langage symbolique des mathématiques et du langage scientifique en physique. Quelques critiques doivent cependant être apportées à cette analyse du rôle du langage en physique que fait ici Heisenberg. On peut notamment lui reprocher de ne pas avoir distingué suffisamment

¹⁴⁸Niels Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, p.10.

le langage ordinaire du langage scientifique. Mais, avant d'aborder ce problème, examinons comment, selon Heisenberg, le langage a influencé le développement de la physique quantique.

Le langage dans la physique quantique

L'arrimage entre les nouveaux schèmes mathématiques et les anciens concepts issus de la physique classique allait s'avérer beaucoup plus compliqué en physique quantique qu'il ne l'avait été dans la relativité. Comme le constate Heisenberg dans "Sprache und Wirklichkeit": "Dans la description des événements du domaine du plus petit (*im kleinsten Bereich*), chaque relation qui est analysée et représentée mathématiquement dans la théorie quantique refuse le langage ordinaire ou le langage de la physique classique dans une telle mesure que même des physiciens de la trempe d'Einstein n'ont pas été disposés, jusqu'à la fin de leur vie, à s'accommoder de cette nouvelle situation."¹⁴⁹

La naissance de la physique quantique remonte au début du siècle, à la découverte du *quantum d'action* par Max Planck. Cette hypothèse d'une *quantification* de la matière permit à ce dernier d'expliquer les résultats obtenus dans l'émission de chaleur par les corps noirs en postulant que la matière ne pouvait pas émettre d'énergie de manière continue. Selon la loi de Planck, tout corps ne peut émettre ou absorber de l'énergie que par petites quantités déterminées: les quanta.

Cette idée voulant que la matière possède un certain élément de discontinuité qui n'est pas représenté par les lois de la physique classique s'imposa peu à peu. Elle fut notamment reprise par Einstein afin d'expliquer comment, dans l'effet photo-électrique, la lumière parvient à faire jaillir des électrons d'une plaque métallique. Einstein postulat alors que la lumière n'est pas faite d'ondes mais de particules, les photons, qui, en frappant les électrons, réussissent à les éjecter du métal. Si ce phénomène ne put être expliqué qu'en supposant que la lumière était

¹⁴⁹"Bei der Beschreibung der Vorgänge im kleinsten Bereich, jener Zusammenhänge, die in der Quantentheorie analysiert und mathematisch dargestellt worden sind, versagt die gewöhnliche Sprache oder die Sprache der klassischen Physik in einem solchen Ausmaß, daß selbst Physiker vom Range Einsteins bis zum Ende ihres Lebens nicht bereit waren, sich mit dieser neuen Situation abzufinden.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.287.

constituée de petits "paquets d'énergie". plusieurs autres expériences, notamment celles produisant des patrons d'interférence, militaient plutôt pour la nature *ondulatoire* de la lumière.

Onde ou particule? Cette question se posait non seulement pour la lumière mais aussi pour les différents composants des atomes (protons, électrons, etc.). Une célèbre expérience, analogue à celle utilisée par Young pour prouver la nature ondulatoire de la lumière, illustre bien la nature paradoxale des particules élémentaires. En effet, si l'on projette, à partir d'une source unique, des électrons vers un écran percé de deux petites fentes, on observera, sur une plaque fluorescente située derrière l'écran, un point de lumière à chaque endroit touché par un électron. Ces scintillements isolés et bien délimités dans l'espace semblent bien démontrer la nature corpusculaire des électrons. Pourtant, après avoir projeté successivement un grand nombre de "particules" à travers les fentes de l'écran, on remarque que la distribution de ces scintillements forme un patron d'interférence. Ce phénomène ne peut être expliqué que si on considère les électrons comme des ondes et qu'on admet qu'après être passé à travers les *deux* fentes de l'écran, chaque électron a *interféré* avec lui-même! Devant de tels résultats expérimentaux, démontrant la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la matière, nous devons admettre, à la suite de Banesh Hoffmann, que l'utilisation de l'expression "particules" est plus qu'inadéquate pour désigner l'ensemble des composants élémentaires de la matière (électrons, protons, neutrons, mésons, etc.):

Parce que le mot "particule" est chargé d'ambiguïté et contaminé par ses associations classiques, nous emploierons de préférence le terme électron, bien que nos propos s'appliquent aussi bien à un photon, à un atome, ou à toute autre "particule". Mais le mot "électron" est lui-même quelque peu contaminé. Nous le considérons habituellement à l'ancienne manière, et c'est une des raisons majeures, soyons-en persuadés, qui rendent ces questions si étranges et si paradoxales à nos yeux.¹⁵⁰

Ces deux attributs des "particules élémentaires", c'est-à-dire leur caractère ondulatoire et corpusculaire, se reflètent dans les deux schèmes mathématiques développés pour expliquer la structure de l'atome, soit la *mécanique quantique* et la *mécanique ondulatoire*. Quoique mathématiquement équivalents, ces deux schèmes sont issus de deux conceptions totalement

¹⁵⁰ Banesh Hoffmann, *L'étrange histoire des quanta*, p.154-155.

différentes de l'atome. D'une part, la mécanique quantique de Heisenberg met en évidence l'élément de discontinuité présent dans la matière qui peut être "compris" en posant l'existence de particules au sein de l'atome. D'autre part, la mécanique ondulatoire, développée par Erwin Schrödinger, considère que les protons, électrons, mésons, etc., qui composent la matière, sont tous, en fait, des "paquets d'ondes".

Comment trancher entre ces deux conceptions du monde atomique? La question ne fut pas aussi aisément réglée dans la physique quantique qu'elle ne le fut dans la théorie de la relativité. Pourtant, à première vue, on pourrait être tenté de réutiliser la stratégie employée par Einstein dans l'interprétation de ses théories. Dans le cas de la physique quantique, cela se traduirait par la comparaison des deux schèmes mathématiques connus avec celui de la physique classique afin de déterminer comment les deux nouvelles théories s'approchent des solutions données par la physique newtonienne pour les dimensions très grandes par rapport à celle d'un atome. Mais, remarque Heisenberg dans "Language and Reality", dans le cas de la physique quantique, l'application de cette méthode rencontra une difficulté de taille, difficulté pouvant être illustrée par l'observation de la trajectoire d'un électron à travers une *chambre à détente*. La chambre à détente, ou *chambre de Wilson*, est formée d'un réservoir fermé, dans le bas, par un piston et rempli d'une substance semblable à de la vapeur d'alcool. Lorsqu'une particule chargée électriquement (un électron ou un proton, par exemple) traverse la chambre, elle enlève des électrons à certains atomes se trouvant sur sa trajectoire. Si on abaisse alors rapidement le piston de l'appareil, la pression diminue subitement dans la chambre à détente et la vapeur d'alcool commence à se condenser autour des atomes ionisés. Il se forme ainsi, le long de la trajectoire empruntée par la particule chargée, une série de bulles de condensation visibles à l'oeil nu. Cette expérience ne permet pas de voir où se trouve l'électron, mais elle permet de voir le chemin qu'il a parcouru dans la chambre de Wilson tout comme une traînée de condensation dans le ciel permet de voir la trajectoire empruntée par un avion à réaction longtemps après que ce dernier ait disparu à l'horizon. Les problèmes soulevés par l'interprétation des observations faites dans les chambres à détente n'étaient pas minces comme le rappelle Heisenberg dans *La partie et le tout*:

[...]nous [Bohr et moi] ne comprenions ni l'un ni l'autre comment un phénomène aussi simple que la trajectoire d'un électron dans une chambre de Wilson pouvait être conciliée avec le formalisme mathématique de la mécanique quantique ou ondulatoire. En mécanique quantique, la notion de trajectoire n'existait même pas; en mécanique ondulatoire, un faisceau de matière étroit et orienté pouvait certes exister, mais il devait progressivement s'étendre et recouvrir des domaines spatiaux beaucoup plus grands que le diamètre d'un électron. La situation expérimentale était certainement différente¹⁵¹.

Les physiciens se trouvaient donc dans une situation quelque peu embarrassante. D'une part, le schème mathématique de la mécanique quantique semblait cohérent et permettait de décrire correctement le comportement des électrons à l'intérieur de l'atome sans jamais faire appel à la notion classique de trajectoire. D'autre part, on observait bel et bien la trajectoire des électrons dans la chambre de Wilson...ou du moins était-ce là ce qu'on croyait. C'est en se rappelant une discussion avec Einstein que Heisenberg commença à douter de ce fait:

Nous avons toujours dit: on peut observer la trajectoire d'un électron dans la chambre de Wilson. Mais peut-être n'était-ce pas tout à fait cela que l'on observait réellement. Peut-être ne pouvait-on apercevoir qu'une suite discontinue de positions imparfaitement précisées de l'électron. Effectivement, ce que l'on voit dans la chambre, ce sont simplement des gouttelettes d'eau dont chacune est beaucoup plus étendue qu'un électron.¹⁵²

Il devint alors évident que le concept classique de trajectoire, tout comme ceux de position et de vitesse, ne permettait plus de décrire les situations expérimentales abordées en physique quantique et qu'il était nécessaire de redéfinir ces concepts. Comme dans le cas de la relativité, il fallait déterminer précisément le contenu et les limites de nos concepts les plus communs et, pour cela, il était nécessaire de revenir directement à l'expérience. En effet, comme le remarque Heisenberg : "Lorsqu'on veut être clair à propos de ce qui doit être compris par les mots "position de l'objet", par exemple de l'électron (relative à un système de référence donné), on doit indiquer les expériences précises [*bestimmte Experimente*] avec l'aide desquelles on pense mesurer la "position de l'électron"; sinon, ce mot n'a aucun sens."¹⁵³

¹⁵¹Werner Heisenberg, *La partie et le tout*, p.112.

¹⁵²*Ibid.*, p 113

¹⁵³"Wenn man sich darüber klar werden will, was unter dem Worte „Ort des Gegenstandes“, z.B. des Elektrons (relativ zu einem gegeben Bezugssystem), zu verstehen sei, so muß man bestimmte Experimente angeben, mit deren Hilfe man den „Ort des Elektrons“ zu messen gedenkt; anders hat dieses Wort keine Sinn.“, Werner

C'est ainsi que, en réfléchissant sur les expériences utilisées pour mesurer, en mécanique quantique, la position, la vitesse, la trajectoire ou l'énergie d'un électron, Heisenberg trouva les limites des ces concepts sous la forme des célèbres relations d'indéterminations. Comme nous avons vu au chapitre 1, celles-ci stipulent qu'il est impossible de connaître simultanément et avec une précision parfaite les valeurs de la position et de l'impulsion ou encore celle de l'énergie et du temps. En d'autres termes, il nous est impossible de connaître avec une précision parfaite l'état (présent, passé ou futur) de n'importe quel système physique¹⁵⁴. En effet, plus nous connaissons, précisément, la position d'un électron, moins sa vitesse nous est connue avec exactitude. De même que les concepts de temps et d'espace, considérés comme indépendants dans la physique classique, se sont vus associés l'un à l'autre dans la théorie de la relativité, les paires de variables conjuguées "position-vitesse" et "énergie-temps" se sont vues reliées dans la physique quantique. Les relations d'indétermination imposent conséquemment une limite importante au principe de causalité stipulant que, "si nous connaissons le présent de manière précise, il est possible de prédire le futur", puisqu'elles impliquent qu'il nous est impossible de connaître le présent de manière précise. Tout au plus pouvons-nous écrire une fonction de probabilité pour représenter la situation expérimentale au moment de la mesure. La forme

Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", p.174. Nous soulignons.

¹⁵⁴Ces relations peuvent être dérivées directement du schéma mathématique de la mécanique quantique mais leurs conséquences peuvent aussi être comprises qualitativement à l'aide d'expériences de pensée comme le démontre Heisenberg dans "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik". Quelle que soit l'expérience réalisée, note Heisenberg, l'erreur sur la mesure de la vitesse sera plus grande si celle sur la position de la particule est plus petite et vice versa. L'origine de ce phénomène, explique-t-il dans son article, peut être compris en étudiant ce qui se passerait si on pouvait observer un électron à l'aide d'un microscope. Quoique Bohr ait prouvé que le raisonnement de Heisenberg ne tenait pas compte de certains points essentiels du montage expérimental, l'explication donnée par Heisenberg permet de comprendre facilement comment une observation peut perturber le système observé. Son raisonnement se résume ainsi: pour observer précisément un électron à l'aide d'un microscope, il faut qu'une lumière ayant une très courte longueur d'onde soit envoyée sur la particule qui devra ensuite la réfléchir vers le système optique de l'appareil. Plus la lumière aura une petite longueur d'onde, plus on pourra connaître avec précision la position de l'électron mais plus aussi la lumière aura une grande énergie. Or, lorsqu'un photon de lumière est réfléchi par un électron (c'est-à-dire lorsque la position de la particule est déterminée exactement), il transmet une partie de son énergie à l'électron dont la vitesse est alors modifiée. Conséquemment, plus le photon de lumière sera énergétique, plus on connaîtra avec précision la position de l'électron mais plus la vitesse de ce dernier sera modifiée. Il est donc impossible, avec cette expérience de déterminer simultanément et avec une précision arbitrairement grande, la position et la vitesse de l'électron (Le lecteur désirant une explication plus juste de la signification physique des relations d'indétermination consultera avec intérêt l'article de David Cassidy: "Heisenberg et le principe d'incertitude" dont la référence est donnée dans la section bibliographique).

statistique des équations de la mécanique quantique est ainsi étroitement liée aux limites de nos méthodes d'observations: les relations d'indétermination apparaissent parce que nous ne pouvons observer un système physique sans interagir avec lui et, conséquemment, sans changer l'état dans lequel il se trouvait antérieurement à l'observation. À la fin de son article présentant les relations d'indétermination, Heisenberg écrit que certaines personnes imagineront certainement qu'il existe, derrière ce "monde statistique" de la physique quantique, un monde "réel" dans lequel la loi de la causalité est toujours valide. "Dieu ne joue pas aux dés!", s'exclamera plus tard Einstein. Mais, aux tenants d'une telle position, Heisenberg répondra: "Mais, nous insistons expressément là-dessus, de telles spéculations nous paraissent infertiles et vides de sens. La physique décrit seulement la corrélation d'observations sensibles [...] ainsi, à travers la mécanique quantique, l'invalidité de la loi de la causalité a-t-elle été établie."¹⁵⁵

Cette limitation de nos concepts classiques de position, vitesse, énergie et temps, qui fut mise en évidence par les relations d'indétermination, est, selon Bohr, une conséquence directe de l'exclusion mutuelle dont font preuve les deux images classiques, celle de particule et celle d'onde que nous devons nécessairement utiliser pour parler des phénomènes atomiques. Léon Rosenfeld explique ainsi cette situation:

[...]the indeterminacy relations appear in a new light. The conjugate variables for which they hold refer, respectively, to the two mutually exclusive classical pictures centered on the idealized concepts of particle and wave: to the former are attached the momentum and energy variables, to the latter the coordinates of space and time. The particle concept is used to describe the exchanges of momentum and energy between atomic systems, and between such systems and radiation [...] The wave concept, or rather the derived density function, describes the localization of atomic systems and the distribution of radiation in space and time [...].¹⁵⁶

Nous nous retrouvons donc en physique quantique, explique Heisenberg à la suite de Bohr, dans une situation quelque peu paradoxale. La science, en effet, n'est possible qu'à condition que nous puissions transmettre sans ambiguïté aux autres chercheurs nos observations. Pour

¹⁵⁵"Aber solche Spekulationen scheinen uns, das betonen wir ausdrücklich, unfruchtbar und sinnlos. Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben. [...] so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.", Werner Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", p.172.

¹⁵⁶ Léon Rosenfeld, "Men and ideas in the history of atomic theory", in *Quantum Theory and Measurement*, p.59.

cela, nous devons nécessairement utiliser le langage de la physique classique qui seul permet la description correcte de nos montages expérimentaux. "Chaque expérience physique", peut-on lire dans "Sprache und Wirklichkeit", "qu'elle couvre indifféremment des phénomènes de la vie quotidienne ou de la physique atomique, doit être décrite à l'aide des concepts de la physique classique. Ces concepts construisent premièrement le langage dans lequel nous indiquons la disposition de nos essais et établissons les résultats. Nous ne pouvons les remplacer par d'autres."¹⁵⁷ Cependant, les différents concepts classiques se trouvent limités au niveau atomique par les relations d'indétermination. Étrangement, ce sont les indéterminations découlant de ces relations qui nous permettent, nous dit Heisenberg, d'utiliser en alternance, mais sans contradiction, les images de particule et d'onde dans notre description des phénomènes atomiques. À propos de cette application du principe de complémentarité, il écrit d'ailleurs dans "Language and Reality": "the concept of complementarity introduced by Bohr into the interpretation of quantum theory has encouraged the physicists to use an ambiguous rather than an unambiguous language, to use the classical concepts in a somewhat vague manner in conformity with the principle of uncertainty, to apply alternatively different classical concepts which would lead to contradictions if used simultaneously."¹⁵⁸ C'est parce que les relations d'indétermination imposent une limite aux concepts classiques que les physiciens se sont mis à utiliser, afin de décrire le plus complètement possible les phénomènes physiques étudiés, aussi bien les concepts reliés aux particules (énergie, impulsion, orbite électronique) que ceux associés aux ondes (densité d'énergie, onde de matière, longueur d'onde) tout en sachant que ces concepts ne saisissent qu'une partie de la réalité. Bien sûr, ce langage ambigu est parfois trop vague pour transmettre exactement nos connaissances physiques. Dans de tels cas, souligne Heisenberg, les physiciens doivent se réfugier dans le schème mathématique et les faits expérimentaux qui peuvent lui être corrélés sans ambiguïté¹⁵⁹.

¹⁵⁷"Jedes physikalische Experiment, gleichgültig, ob es sich auf Erscheinungen des täglichen Lebens oder auf Atomphysik bezieht, muß in den Begriffen der klassischen Physik beschrieben werden. Diese Begriffe bilden fürs erste die Sprache, in der wir die Anordnung unserer Versuche angeben und die Ergebnisse festlegen. Wir können sie nicht durch andere ersetzen.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.289.

¹⁵⁸Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.179.

¹⁵⁹"When this vague and unsystematic use of the language leads into difficulties, the physicist has to withdraw into the mathematical scheme and its unambiguous correlation with experimental facts.", Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.179.

Pour Heisenberg, cet usage alternatif des images d'onde et de particule, demandé par le principe de complémentarité, rappelle en quelque sorte l'usage que nous faisons parfois du langage dans la vie quotidienne. On retrouve une situation similaire, dit-il, quand nous avons le choix soit d'apprécier la beauté d'un morceau de musique, soit d'en étudier la structure. Il s'agit, à chaque fois, de la même pièce de musique, mais vue sous deux angles différents et complémentaires. Mais cette analogie, quoique pouvant nous permettre de comprendre vaguement le principe de complémentarité, ne correspond pas parfaitement à la situation vécue en physique quantique. Les amateurs de Bach vous diront probablement que, pour apprécier pleinement la musique de ce grand compositeur, il faut en analyser la structure. Loin de s'opposer, appréciation et analyse de la musique semblent donc même parfois s'impliquer l'un l'autre. En physique quantique, par contre, les images d'onde et de particule sont mutuellement exclusives bien qu'elles soient toutes deux nécessaires à la compréhension des phénomènes de ce domaine. Et c'est cette obligation d'utiliser deux images diamétralement opposées qui rend la théorie quantique si déroutante pour l'esprit humain et donc si difficile à saisir par le langage.

La logique quantique

Le langage tel que décrit jusqu'ici est celui qui s'est développé dans la communauté scientifique durant les années suivant la mise en place complète de la physique quantique. Cependant, pense Heisenberg, il serait possible, du moins en principe, de remplacer ce langage vague et imprécis par un langage complètement adapté au schème mathématique. Mais, souligne-t-il, un tel langage demanderait l'usage d'une logique non aristotélicienne. Cette logique, que l'on pourrait qualifier de "quantique", a été étudiée dans les années 30 par Birkhoff et von Neumann, mais, remarque Heisenberg, elle demeure tellement étrangère à la pensée humaine que les physiciens auraient probablement de la peine à l'utiliser. C'est pourquoi, conclut-il, le langage utilisé en physique quantique s'est naturellement orienté vers un usage vague des concepts et un maintien de la logique traditionnelle, plutôt qu'un langage précis basé sur la logique quantique.

Les tenants de cette logique quantique justifient son utilisation en arguant que le schème mathématique de la physique quantique, à partir duquel a été élaboré cette logique, peut être

considéré comme une extension de la logique classique. tout comme la mécanique quantique est, selon eux, un prolongement de la mécanique classique. La modification la plus importante apportée à la logique classique par la logique quantique est, d'après Heisenberg, l'abandon de l'idée que, si une phrase a une signification, celle-ci doit nécessairement être soit vraie, soit fausse. Selon lui, en effet, toute affirmation est, dans la logique aristotélicienne, vraie ou fausse; une troisième possibilité ne peut pas exister: "*Tertium non datur*". Bien sûr, ajoute-t-il, la logique classique admet que nous puissions ne pas connaître la valeur de vérité d'un énoncé, mais elle considère que cette affirmation doit être déterminée dans la réalité. Par exemple, la phrase "Il y a neuf planètes dans le système solaire" peut être vraie ou fausse. Si une telle affirmation a longtemps été longtemps considérée fausse (Pluton, n'a été découverte qu'en 1930), on la considère aujourd'hui vraie. Mais, que nous la considérons ou non vraie ne change rien dans le fait qu'en "réalité" il y a ou il n'y a pas neuf planètes tournant autour de notre soleil. Une telle interprétation de la logique classique est certainement réductrice et ne tient pas compte de l'analyse des futurs contingents faite par Aristote. Il est exact que, pour ce dernier, une phrase comme "L'homme est un animal." doit nécessairement être soit vraie, soit fausse (à condition de prendre "homme" dans le même sens et "animal" dans le même sens). Mais, il n'en va pas de même d'une affirmation comme "Les Grecs gagneront la bataille navale de demain." dont la valeur de vérité demeure indéterminée puisque cet énoncé porte sur un événement contingent (la bataille navale) qui ne s'est pas encore produit et qui peut fort bien ne pas avoir lieu dans le futur. Aristote était conscient de cette différence entre la logique et la réalité et, conséquemment, ne considérait pas toute affirmation comme nécessairement vraie ou fausse.

La plus grande différence entre la logique aristotélicienne et la logique quantique tient plutôt au fait que cette dernière n'est pas une logique binaire et demande l'introduction de la notion de "degré de vérité". Le "degré" (ou la "valeur") de vérité s'élève à 1 pour une affirmation vraie et descend à 0 pour un énoncé faux. Il peut toutefois prendre une valeur intermédiaire. Par exemple, un degré de vérité de 0,5 indique qu'une affirmation a autant de chance d'être vraie que d'être fausse. Il existe donc, en physique quantique, des situations que l'on pourrait qualifier "d'intermédiaires" et pour lesquelles on ne peut décider si une phrase est vraie ou

fausse. Dans "Language and Reality", Heisenberg donne comme exemple d'un tel énoncé l'affirmation "L'atome se trouve dans le côté gauche de la boîte". Si on donne à cette affirmation une valeur de vérité située entre 0 et 1, cela signifie tout simplement que nous ne pouvons pas décider si l'atome est ou n'est pas de ce côté de la boîte. Cependant, nous avertit Heisenberg, "the term "not decided" is by no means equivalent to the term "not known." "Not known" would mean that the atom is "really" left or right, only we do not know where it is. But "not decided" indicates a different situation, expressible only by a complementary statement."¹⁶⁰

À ceux qui argumenteraient que, pour développer cette logique quantique nous devons nécessairement utiliser la logique aristotélicienne, il y a une contradiction interne dans la logique quantique, Heisenberg répond qu'il faut distinguer, à la suite de von Weizsäcker, les différents niveaux de langage. Il existe un premier niveau de langage, explique-t-il, qui réfère aux objets, c'est-à-dire aussi bien aux atomes, qu'aux chaises ou aux automobiles. Un second niveau de langage réfère aux affirmations faites sur les objets. Un troisième niveau traite les affirmations portant sur les affirmations faites sur les objets, etc. "Il serait donc en principe possible", écrit Heisenberg dans "Sprache und Wirklichkeit", "d'utiliser différentes logiques dans les différents niveaux de langage. Seulement, on devrait, à la limite du niveau supérieur, revenir à la logique ordinaire."¹⁶¹ Ainsi, pour Heisenberg, la relation entre logique quantique

¹⁶⁰Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.184. On peut voir un certain parallèle entre cette description des situations "non décidées" que donne la logique quantique et l'analyse statistique qu'il est possible de faire des futurs contingents. En effet, bien qu'il ne soit pas possible de prédire avec une certitude parfaite si les Grecs gagneront ou non une bataille future contre les Perses, il est toutefois possible de faire, à ce sujet, des prédictions statistiques. Si, par exemple, les Perses ont, jusqu'à aujourd'hui, remportés leurs batailles contre les Grecs trois fois sur quatre, on peut affirmer qu'il y a une probabilité de 0,75 que les Perses sortent vainqueurs du prochain affrontement. Ainsi, les statistiques semblent offrir un degré de connaissance des futurs contingents semblable au degré de vérité de la logique quantique. Mais, comme le souligne Heisenberg, *si on suit l'interprétation de Copenhague*, il existe une différence majeure entre cette description d'un futur contingent et l'analyse de cas "non décidés" par la logique quantique, puisque les affirmations de cette dernière se veulent, non pas de simples probabilités sur un événement futur (la détection éventuelle de l'atome dans la partie gauche ou la partie droite de la boîte), mais des affirmations sur le monde physique lui-même (l'atome peut être considéré comme étant à la fois à gauche et à droite de la boîte). Mais, faut-il le rappeler, cette prétention de la logique quantique à parler d'états de fait est encore fortement contestée aujourd'hui.

¹⁶¹"Es wäre dann grundsätzlich möglich, in den verschiedenen Stufen der Sprache verschiedene Logiken zu verwenden, nur müßte man im Grenzfall der obersten Stufe wieder auf die gewöhnliche Logik zurückkommen.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.293.

est semblable au lien existant entre physique quantique et physique classique. Tout comme les solutions de la physique quantique se ramènent à celles de la physique classique dans le cas de phénomènes physiques de dimensions beaucoup plus grandes qu'un atome, de même la logique classique est un cas limite de la logique quantique. Heisenberg pousse même l'analogie plus loin en soulignant que, tout comme on a besoin de la physique classique pour développer la physique quantique, "D'une manière semblable, il est essentiel à la compréhension de la logique quantique, que nous puissions parler de sa structure dans un langage se servant de la logique classique."¹⁶² Mais l'analogie entre logique et physique s'arrête là. Car, alors que nous avons besoin de la physique quantique pour décrire les événements atomiques, nous pouvons fort bien nous passer de la logique quantique. En fait, dans la plupart des cas, une telle logique serait même une entrave aux recherches des physiciens. Si un ordinateur peut effectivement manier une telle logique (on le voit aujourd'hui avec la prolifération des programmes basés sur la logique "floue", une logique utilisant, comme la logique quantique, une échelle continue de valeur de vérité allant de 0 à 1), il n'en va pas de même pour un être humain pour la pensée duquel l'infinité des valeurs de vérité que peuvent prendre les affirmations en logique quantique n'est ni naturelle ni aisée à manipuler sans l'aide des mathématiques. On comprend donc pourquoi les physiciens ont préféré conserver, dans leur pratique de la physique quantique, un langage vague et imprécis, lequel est néanmoins supporté par un schème mathématique précis et rigoureux.

Tout comme dans son analyse de la relativité, Heisenberg met en évidence, dans cette description du développement de la physique quantique, des points essentiels quant aux rôles joués par les différents types de langage dans la compréhension en physique moderne. Tout d'abord, il démontre ici encore que les mathématiques sont un outil absolument nécessaire à la représentation exacte des phénomènes physiques et à leur compréhension. En effet, s'il veut décrire précisément le comportement d'un atome, le physicien ne peut pas se contenter du langage parlé: il doit absolument faire appel aux mathématiques ou encore passer par une

¹⁶²"In ähnlicher Weise ist es für das Verständnis der Quantenlogik wesentlich, daß wir über ihre Struktur in einer Sprache reden können, die sich der klassischen Logik bedient.", Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik", p.294.

logique copiant le schème mathématique de la physique quantique. Cependant, bien que nécessaires, les mathématiques ne sont pas suffisantes à la compréhension des phénomènes physiques. Heisenberg le montre bien en rappelant qu'il a fallu attendre plusieurs mois après la publication de l'article de Schrödinger prouvant l'équivalence mathématique de la mécanique quantique et de la mécanique ondulatoire avant de pouvoir affirmer que l'on avait réellement "compris" le domaine atomique. Cette compréhension, précise-t-il ne pouvait venir qu'après que les physiciens aient réussi à relier les équations mathématiques de la nouvelle théorie avec les résultats expérimentaux qui eux, ne peuvent finalement être décrits qu'à l'aide des concepts de la mécanique classique. Ces derniers n'étant en fait que le résultat de la précision du langage de la vie quotidienne, il s'ensuit que, pour se développer, la physique a non seulement besoin des mathématiques, afin des pallier aux faiblesses du langage ordinaire, mais aussi du langage ordinaire, afin de pouvoir rendre compte des résultats expérimentaux de la physique. Comme nous allons le voir maintenant, cette "tension" qui existe entre, d'une part, le langage mathématique et scientifique de la physique et, d'autre part, le langage ordinaire se traduit ultimement, chez Heisenberg, par une systématisation des différents domaines de la physique.

Tradition et révolutions dans le langage de la physique

Cette évolution du langage qui s'effectue parallèlement à l'évolution des connaissances en physique est, selon Heisenberg, vécue difficilement par la plupart des physiciens: "this journey into abstraction has encountered stiff resistance, although clearly no other route to understanding could be proposed."¹⁶³. En fait, l'intégration de nouvelles théories en physique est tellement difficile que, dans "Changes of Thought Pattern in the Progress of Science", une analyse du développement de la physique qui rappelle *La structure des révolutions scientifiques* de T. S. Kuhn, Heisenberg admet que les importants changements connus par la physique au cours du dernier siècle peuvent être considérés, dans une certaine mesure¹⁶⁴,

¹⁶³Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.134.

¹⁶⁴Heisenberg écrit en effet: "I am concerned that the contemporary vogue word "revolution" can lead into all sorts of mistaken courses, which a glance at the history of modern physics might help us to avoid. But, as I have said, I leave it to you to consider how far it is proper to compare revolutions in science with revolution in society. Such an analogy can never be more than half correct, and I have only dwelt upon it here in order to give occasion for thought.", Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.165.

comme des révolutions: "It must be admitted, though, that during the last hundred years there have been such radical changes of thought pattern in the history at least of our own science, physics, that it is perfectly legitimate to speak of one or even several revolutions; and it is in this sense, of "a change in thought pattern," that I shall use the word "revolution" here."¹⁶⁵

Le premier signe d'une telle révolution intellectuelle, remarque Heisenberg, est un changement apparent dans la signification des mots¹⁶⁶ qui sous-entend, bien sûr, l'introduction de nouveaux concepts dans le langage. Associant habituellement la notion de "progrès" à l'esprit scientifique, on pourrait croire que l'apparition de nouvelles notions est un processus relativement aisé pour les physiciens. Mais, souligne Heisenberg, il n'en est rien. L'introduction de nouveaux concepts en physique, explique-t-il, implique beaucoup plus que la simple invention de nouveaux mots ou un changement de signification de certains termes: cela demande en fait une révision de notre conception du monde. L'introduction de la notion de "champ électromagnétique", par exemple, demanda non seulement aux physiciens d'accepter cette nouvelle entité physique, mais exigea aussi l'abandon de l'idée que tout phénomène naturel pouvait s'expliquer à partir de la physique newtonienne. Comme l'explique Heisenberg:

During the past century a number of new concepts have been introduced in physics, and in some cases it has taken considerable time before the scientists have really grown accustomed to their use. The term "electromagnetic field," for instance, which was to some extent already present in Faraday's work and which later formed the basis of Maxwell's theory, was not easily accepted by the physicists, who directed their attention to the mechanical motion of matter. The introduction of the concept really involved a change in scientific ideas as well, and such changes are not easily accomplished.¹⁶⁷

La difficulté la plus importante à laquelle font face les physiciens lors de ce processus, rappelle Heisenberg, demeure l'abandon des anciens concepts qui, quoique nous étant familiers, n'arrivent plus à rendre compte des résultats expérimentaux auxquels nous sommes confrontés: "The most difficult part in this stage of development is abandoning some of the important old

¹⁶⁵Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.154.

¹⁶⁶Comme Heisenberg le souligne: "Quite generally we may say that a change of thought pattern becomes apparent when words acquire meanings different from those they had before and when new questions are asked.", Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.156.

¹⁶⁷Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.173.

concepts. Any good physicists are sometimes quite unwilling to acquire new concepts but even the best physicists are sometimes quite unwilling to leave some of the old and apparently safe concepts."¹⁶⁸ L'histoire de la physique est remplie d'exemples permettant d'étayer cette hypothèse. Une des controverses les plus importantes autour de la conservation ou l'abandon d'un concept est probablement celle ayant eu lieu au début du siècle à propos de l'éther. Proposé comme une substance remplissant l'univers et servant de médium de propagation pour les ondes électromagnétiques, le concept d'éther s'est retrouvé inutile avec le développement de la relativité restreinte qui postulait que les ondes électromagnétiques se propageaient tout simplement dans le vide. Les efforts déployés pour sauver ce concept, pourtant bien incohérent¹⁶⁹, furent cependant nombreux.

Le concept d'éther n'est d'ailleurs pas un cas isolé. Nous pouvons rappeler le cas du terme "particule" que nous avons étudié auparavant. On trouve aussi, dans la physique des particules, de nombreux exemples de mots de la vie courante ayant perdu toute signification dans ce domaine d'expériences. Heisenberg donne ainsi l'exemple des verbes "diviser" et "consister". Ces expressions, pourtant, possèdent une signification relativement claire dans les énoncés du langage ordinaire dans lesquels elles sont utilisées. Des phrases comme: "Le repas *a consisté* en un steak et une salade" ou "Sa fortune *fut divisé* entre ses héritiers." n'ont pas besoin d'explication. Mais, en physique des particules, l'usage de ses mots se complique énormément. Par exemple, à partir d'un neutron, il est possible d'obtenir soit un proton et un pi méson soit un proton, un électron et un antineutrino. Comme le neutron semble pouvoir être "divisé" en d'autres particules, il semble impossible de le considérer comme une particule *élémentaire*. Dans ce cas, en quoi consiste-t-il? D'un proton et d'un pi méson ou d'un proton, d'un électron et d'un antineutrino? Et puis, comment expliquer que lorsqu'on "divise" un proton, il soit possible d'obtenir un neutron? Le proton n'est-il pas un constituant du neutron? On le constate rapidement, les verbes "consister" et "diviser" ne s'appliquent pas facilement aux particules élémentaires. On comprend que Heisenberg écrive dans "Tradition in Science":

¹⁶⁸*Id.*, "Theory, criticism and a philosophy", p.432.

¹⁶⁹Pour expliquer ne serait-ce qu'une partie des phénomènes électrodynamiques, l'éther devait à la fois avoir une rigidité infinie et se laisser traverser sans aucune difficulté par les corps en mouvement comme la Terre.

We see that we do not get a sensible answer to those questions, which we have asked and do ask according to the tradition, and this tradition goes back 2500 years, to the time of Democritus. But we cannot help asking these questions, since our language is bound up with this tradition. We must use words like *divide* or *consist of* or *number of particles*, and at the same time we learn from the observations, that these words have only a very limited applicability. Again it is extremely difficult to get away from the tradition.¹⁷⁰

Mais cette résistance au changement dans le langage de la physique est, pour Heisenberg, non seulement compréhensible mais aussi inévitable. Lorsque nous commençons à explorer un nouveau domaine de recherche, les mots que nous employons sont nécessairement liés aux concepts développés antérieurement en physique. Les premières questions que nous posons sur les nouveaux phénomènes qui s'offrent à nous et les premières explications que nous tentons d'y apporter ne peuvent être formulées qu'à l'aide du langage que nous avons acquis précédemment et qui est, en quelque sorte, l'héritage que nous avons reçu de la tradition scientifique qui nous a précédée:

When we speak about our investigations, about the phenomena we are going to study, we need a language, we need words, and the words are the verbal expression of concepts. In the beginning of our investigations, there can be no avoiding the fact, that the words are connected with the old concepts, since the new ones don't yet exist. Therefore these so-called prejudices are a necessary part of our language, and cannot simply be eliminated. We learn language by tradition, the traditional concepts form our way of thinking about the problems and determine our questions.¹⁷¹

Pour Heisenberg, le langage, développé antérieurement par la physique, et qui doit nécessairement être utilisé par les physiciens lorsqu'ils abordent un nouveau domaine de recherche, n'est pas à proprement parler un *préjugé* puisque même s'il est, d'une certaine façon, une entrave à la compréhension des nouveaux phénomènes, il demeure néanmoins la condition nécessaire à leur étude.¹⁷² Si la mécanique classique et l'électromagnétisme n'ont pas disparu avec le développement de la relativité et de la physique quantique, c'est parce que ces systèmes

¹⁷⁰Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.16. Souligné dans le texte.

¹⁷¹*Ibid.*, p. 15.

¹⁷²"To realize that such questions have no meaning is a very difficult and painful process. It should not be belittled by the word *prejudice*. Therefore one may say that in a state of science where fundamental concepts have to be changed, tradition is both the condition for progress and a hindrance. Hence it usually takes a long time before the new concepts are generally accepted.", Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.15.

de concepts, ces "langages". demeurent nécessaires pour la description et la compréhension de certains phénomènes. Si le développement de nouveaux systèmes de concepts est aussi difficile, c'est parce qu'il implique à la fois le développement d'une nouvelle vision du monde et la découverte des liens qu'elle entretient avec les anciens systèmes de pensée qui resteront, selon Heisenberg, éternellement valides dans leurs domaines d'application respectifs. En effet, il écrit: "After all, the discovery of a new system of concepts means nothing more than a new method of thought which can never be annulled as such."¹⁷³

Les théories closes et la systématisation des domaines de la physique

Cette obligation de conserver éternellement les grands systèmes théoriques que sont la mécanique classique, l'électromagnétisme, etc., a conduit Heisenberg à une systématisation de la physique, systématisation effectuée à l'aide du concept de "théories closes" ou "théories fermées" (*abgeschlossene Theorien*). Cette notion peut fort bien être illustrée à l'aide de la mécanique classique. Comme nous l'avons mentionné, quoique les résultats de cette mécanique newtonienne aient été infirmés au cours du dernier siècle par ceux de la relativité et de la physique quantique, il demeure impossible, selon Heisenberg, d'abandonner complètement la mécanique classique au profit des théories physiques développées récemment car, d'après lui, toute description expérimentale repose ultimement sur le langage de celle-ci. Ainsi, bien que les physiciens du XXe siècle aient limité la portée des concepts de la mécanique classique, nous ne pouvons dire, selon Heisenberg, que cette dernière soit fausse:

The result is that we no longer say, "Newtonian mechanics is false and must be replaced by quantum mechanics, which is correct." Instead, we now adopt the formula "Classical mechanics is a consistent self-enclosed scientific theory. It is a strictly 'correct' description of nature wherever its concepts can be applied." Thus even today we still concede truth, and even strict and general validity, to Newtonian mechanics, except that by adding "wherever the concepts can be applied," we indicate that we consider the field of application of the Newtonian theory to be restricted.¹⁷⁴

¹⁷³Werner Heisenberg, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p.48.

¹⁷⁴*Id.*, *Across the Frontiers*, p.43.

Heisenberg considère plutôt la mécanique newtonienne comme une "théorie fermée", c'est-à-dire une théorie nous permettant de comprendre un domaine donné d'expériences à l'aide d'un système de concepts, d'axiomes, et de lois si étroitement liés les uns aux autres qu'un changement dans un seul de ces éléments détruirait complètement la théorie. Heisenberg définit ainsi ce qu'il entend par "théorie close":

By a closed theory we mean a system of axioms, definitions and laws, whereby a large field of phenomenon can be described, that is, mathematically represented, in a correct and non-contradictory fashion. The term *non-contradictory* refers here to the mathematical consistency and closedness of the formalism to be constructed from the basic assumptions; the term *correct*, to the empirical; it means that experiment must confirm the predictions derived from the formalism.¹⁷⁵

On retrouve, dans cette description des "théories closes", ces deux conditions nécessaires, selon Heisenberg, à toute compréhension physique: la présence d'un schème mathématique cohérent et la nécessité de l'expérience pour confirmer toute théorie physique. En fait, comme le remarque Heisenberg dans "Relation of Quantum Theory to Natural Science", la cohérence de la mécanique newtonienne a longtemps permis aux physiciens de croire que la seule tâche de la science serait d'étendre la mécanique classique à de nouveaux champs d'expériences. Cependant, les résultats expérimentaux montrèrent finalement les limites d'application des concepts de la théorie de Newton, mettant ainsi un terme à l'idée que la physique puisse un jour nous permettre de comprendre tous les phénomènes physiques à l'aide des seules lois de la mécanique, obligeant par le fait même les physiciens à élaborer de nouvelles théories.

La physique actuelle compte, selon Heisenberg, quatre théories closes. *Primo*, la mécanique classique, que nous avons déjà mentionnée et qui joue, d'après lui, un rôle central dans le développement général de la physique, puisque nous exprimons les résultats de toutes nos expériences à l'aide de ses concepts. *Secundo*, la théorie de la chaleur, développée au cours du XIXe siècle et qui, quoique pouvant être reliée à la mécanique classique à l'aide de la mécanique statistique, est considérée par Heisenberg comme une théorie à part entière puisqu'elle contient des concepts qui demeurent quelque peu étrangers aux autres domaines de

¹⁷⁵Id., *Tradition in Science*, p.123-124.

la physique comme ceux de chaleur, chaleur spécifique, entropie, énergie libre, etc. *Tertio*, l'ensemble formé par les théories traitant des phénomènes électriques et magnétiques. Ce dernier est essentiellement composé de la théorie électromagnétique classique, telle que développée par Maxwell, de la relativité restreinte de Einstein et de la théorie des ondes de matière de de Broglie. *Ultimo*, la physique quantique qui englobe la mécanique quantique de Heisenberg, la mécanique ondulatoire de Schrödinger, la chimie et les théories élaborées pour expliquer les propriétés de la matière comme la conductivité électrique, le ferromagnétisme, etc.

Les différentes théories closes, quoique valides et suffisantes pour expliquer leurs domaines d'application respectifs sont reliées entre elles, d'après Heisenberg, de la manière suivante: la mécanique classique peut être considérée comme un cas limite de la relativité restreinte (dans les cas où la vitesse de la lumière peut-être supposée comme infiniment grande) et de la mécanique quantique (dans les situations où la quantification de la matière peut être négligée). La théorie de la chaleur, quant à elle, peut être reliée aux trois autres systèmes fermés. Finalement, la mécanique classique et l'électromagnétisme classique peuvent être considérés comme des conditions *a priori* pour la description des expériences de la physique quantique. En étudiant ces relations, souligne Heisenberg, il semble également possible qu'une cinquième théorie close puisse être développée de manière à inclure la relativité et la physique quantique comme des cas limites. De plus, la théorie de la relativité générale, qui a été omise de cette énumération parce que n'ayant toujours pas atteint sa forme finale, pourrait éventuellement former une sixième théorie close de la physique moderne.

Les théories fermées se distinguent avant tout des théories encore en évolution par leur cohérence interne. Les concepts qu'elles renferment, et qui proviennent originellement de notre expérience du monde, sont reliés de façon complètement déterminée et non équivoque par un ensemble de définitions, de lois et d'axiomes dont la cohérence est assurée par le schème mathématique de la théorie¹⁷⁶. Ainsi, des concepts comme ceux de "position", "vitesse".

¹⁷⁶Heisenberg écrit ainsi: "The first criterion of a "closed theory" is its internal freedom from contradiction. It must be possible for the concepts initially stemming from experience to be so specified and fixed in their relations by definitions and axioms that mathematical symbols can be annexed to these concepts, among which symbols

"temps" qui sont vaguement définis dans le langage ordinaire. et dont la signification évolue avec notre expérience de la réalité, ont trouvé, dans la mécanique newtonienne, une définition précise et valable éternellement, du moins dans leur domaine d'application. Comme le souligne Heisenberg:

For so long as concepts stem directly from experience, like those of everyday life, say, they remain firmly linked to the phenomena and change along with them; they are compliant, as it were, toward nature. As soon as they are axiomatized, they become rigid and detach themselves from experience. To be sure, the system of concepts rendered precise by axioms is still very well adapted to a wide range of experiences; but we can never know in advance how far a concept established through definitions and relations will take us in our dealings with nature. Thus the axiomatization of concepts simultaneously sets a decisive limit to their field of application.¹⁷⁷

C'est cette limite d'application inhérente aux concepts d'un tel système qui fait qu'une "théorie close ne contient aucune affirmation parfaitement certaine à propos du monde des expériences."¹⁷⁸. Le domaine d'application d'une théorie est donc déterminé par la portée des concepts qu'elle contient. La mécanique newtonienne englobe ainsi les phénomènes pour lesquels la vitesse de la lumière peut être considérée comme infinie et pour lesquels la quantification de la matière peut être négligée. Mais, au-delà de cette limite, on ne peut plus s'appuyer sur les concepts de la mécanique classique pour décrire et comprendre les phénomènes. Comme le souligne Heisenberg: "Each of these theories possesses a limited field of application, which is essentially established by the very concepts employed in the theory. Outside this field the theory cannot reproduce the phenomena, since it is precisely there that its concepts no longer encompass the course of events in nature."¹⁷⁹

La clarté mathématique n'est donc pas suffisante pour affirmer la valeur d'une théorie close; ses concepts doivent en effet non seulement être reliés de manière univoque les uns aux autres, mais ils doivent aussi être rattachés à l'expérience: "At the same time the theory must, in a

a consistent system of equations evolves." Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.43.

¹⁷⁷Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.44.

¹⁷⁸Comme le note Heisenberg: "The closed-off theory contains no perfectly certain statement about the world of experiences. For how far one may be able to grasp phenomena by means of the concepts of this theory remains in the strict sense uncertain, and can be seen only by success.", Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.45.

¹⁷⁹Werner Heisenberg, *Tradition in Science*, p.124.

certain fashion. "depict" experiences. i.e., the concepts of the theory must, as already said, be directly anchored in experience, must "mean" something in the world of phenomena. "¹⁸⁰ Il semble ainsi exister, du moins si on se fie à la description de la physique faite par Heisenberg, une certaine "tension essentielle" entre le développement mathématique d'une théorie et l'augmentation de nos connaissances empiriques. D'une part, on ne peut se contenter en physique d'un langage vague et imprécis si on veut pouvoir transmettre les connaissances acquises de manière non ambiguë. Il est donc nécessaire de définir nos mots et nos concepts à l'aide de relations mathématiques. La fameuse loi de Newton, $F=ma$, met ainsi la force (F), la masse (m) et l'accélération (a) dans une relation telle que nous pouvons calculer précisément comment le changement d'une de ces variables affectera l'ensemble du système. D'autre part, si on veut que la physique soit plus qu'une simple invention de notre imagination, il faut que les concepts qu'elle utilise soient liés, d'une manière ou d'une autre, aux phénomènes. Il faut bien admettre avec Heisenberg que, si nous sommes capables de définir précisément les relations unissant nos concepts entre eux, nous n'arrivons pas à préciser avec autant d'exactitude les liens qu'ils entretiennent avec la nature: "The concepts are not sharply defined in their relation to nature, in spite of the sharp definition of their possible connections. The limitations will therefore be found from experience, from the fact that the concepts do not allow a complete description of the observed phenomena."¹⁸¹ La cohérence interne des théories closes n'implique donc pas que la description qu'elles font des phénomènes naturels est universellement valable : "The closed theory is never, indeed, an exact replica of nature in the field in question; it is, however, an idealization of experiences which are successfully dealt with by means of the theory's conceptual foundations."¹⁸² Les concepts définis à l'intérieur de tels systèmes ne peuvent être valables que pour un certain domaine du monde phénoménal. De nouvelles expériences doivent nous mener à des domaines du monde physique qui ne peuvent pas être compris à l'aide des anciens concepts. Il nous faut alors préciser nos anciens concepts ou encore en développer de nouveaux qui seront eux-mêmes valides pour un domaine d'application donné.

¹⁸⁰ *Id.*, *Across the Frontiers*, p.43-44.

¹⁸¹ *Id.*, *Physics and Philosophy*, p.100-101.

¹⁸² *Id.*, *Tradition in Science*, p.125.

Malgré cette limitation dans l'application de leurs concepts, les théories closes demeurent toujours, selon Heisenberg, une part essentielle de notre langage scientifique et ce, malgré le développement de nouvelles théories. Essentielles, les théories closes le sont puisque, même lorsque nous dépassons leurs limites d'application, elles demeurent le seul langage dans lequel nous pouvons parler de nos résultats expérimentaux :

Even when the boundary of the "closed theory" have been overstepped and new areas of experience are thus ordered by means of new concepts, the conceptual scheme of the closed theory still forms and indispensable part of the language in which we speak of nature. The closed theory is among the presuppositions of the wider inquiry; we can express the result of an experiment only in the concepts of earlier closed theories.¹⁸³

Chaque théorie physique est donc pour Heisenberg un système conceptuel et mathématique nous permettant de saisir une région du monde physique. Mais ces systèmes répondent aussi, selon lui, à une certaine hiérarchisation, puisque les nouvelles théories s'appuient, au cours de leur développement, sur les connaissances des plus anciennes. Bien entendu, Heisenberg admet que cette obligation de faire appel à nos anciens concepts pour décrire les connaissances acquises dans un nouveau domaine de recherche entraîne une certaine incertitude dans le développement d'une nouvelle théorie. Mais cette ambiguïté est inévitable. Comment pourrions-nous parler autrement des résultats expérimentaux obtenus dans les nouveaux domaines de recherches, puisque les théories fermées développées antérieurement sont les seuls langages que nous possédions nous permettant d'élaborer et de transmettre nos connaissances en physique? C'est pourquoi les théories closes doivent toujours, selon Heisenberg, demeurer une partie intégrante de notre langage scientifique: "In spite of this uncertainty, the closed theory remains a part of our scientific language, and therefore forms and integrating constituent of our current understanding of the world."¹⁸⁴ Afin de poursuivre sa constante évolution, le langage de la physique doit donc ultimement reposer sur les connaissances que nous avons acquises précédemment.

¹⁸³*Ibid.*, *Across the Frontiers*, p.44.

¹⁸⁴*Ibid.*, p.45.

Chapitre 4. Quelques réflexions sur les langages de la science

Pour Heisenberg, nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la physique fait usage de trois langages: le langage ordinaire qui, avec l'établissement de la mécanique newtonienne, a atteint la stabilité et la précision nécessaire au développement de la physique moderne, le langage scientifique, et enfin les mathématiques, dont certains ont prétendu qu'elles n'étaient qu'un perfectionnement du langage ordinaire. Niels Bohr, par exemple, écrivait dans *Atomic Physics and Human Knowledge*: "Mathematics is therefore not to be regarded as a special branch of knowledge based on the accumulation of experience but rather as a refinement of general language, supplementing it with appropriate tools to represent relations for which ordinary verbal expression is imprecise or too cumbersome."¹⁸⁵ Quoique Heisenberg ne soit pas allé aussi loin que Bohr dans sa comparaison entre mathématiques et langage ordinaire, il demeure néanmoins qu'il n'a pas toujours su voir les différences existant entre les différents modes d'expression utilisés par la physique moderne. C'est pourquoi, si on désire comprendre le rôle spécifique joué par chacun de ces langages en physique, il nous faut tout d'abord saisir comment ces moyens d'expression se différencient les uns des autres.

Langage ordinaire et mathématiques: une comparaison.

Si Bohr avait effectivement raison d'affirmer que les mathématiques ne sont qu'un perfectionnement du langage général, nous serions en droit de nous demander, d'une part, pourquoi nous ne nous contentons pas de ce seul langage, précis et rigoureux, dans le développement de la physique et, d'autre part, pourquoi il a préféré énoncer ses propos à l'aide de mots plutôt que de formules mathématiques. Le fait est que, jamais Bohr n'aurait pu faire une telle déclaration à l'aide des seuls symboles mathématiques.¹⁸⁶ Force nous est d'admettre

¹⁸⁵Niels Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, p.9.

¹⁸⁶La logique symbolique elle-même n'aurait pu être d'aucun secours dans ce cas. Attribuer une lettre, disons *P*, à l'affirmation de Bohr afin d'exprimer symboliquement cette dernière ne ferait que déplacer le problème puisque, pour définir *P*, il faudrait nécessairement utiliser des mots. Bohr se retrouve ainsi dans une situation semblable à celle d'Eddington qui maintenait que toute définition scientifique devait être réduite à un "nombre-mesure". Bien entendu, ce dernier devait exprimer cette idée à l'aide de mots, ce qui fit dire à Charles De Koninck: "When Sir Arthur Eddington shows so convincingly that the 'exact science of nature' can get nowhere until it has reduced definitions to measure-numbers, and that these are expressed in terms of mathematical symbols rather than words,

que mathématiques et langage ordinaire sont appelés à jouer des rôles différents dans l'expression de notre pensée et que, conséquemment, les mathématiques ne peuvent être, comme le prétendait Bohr, un simple prolongement du langage.¹⁸⁷ Inversement, le langage ordinaire ne peut pas, lui non plus, remplacer complètement les équations de la physique. Ces dernières ne sont pas qu'une sténographie résumant des idées qui pourraient aussi bien être exprimées à l'aide de mots: les symboles mathématiques permettent de résoudre les équations avec une facilité et une efficacité impossible au langage ordinaire. Comme le remarquait Charles De Koninck:

We are sometimes led to believe that the use of symbols is merely a way of economizing words. This is not the whole truth. It is essential to realize that the mathematical physicist, as well as the mathematician, does not use symbols instead of names merely for the sake of abbreviating his equations, but because, if expressed in names, the equations could not be solved in the proficient and mechanical way which these require.¹⁸⁸

Bien sûr, il est possible de nommer les symboles et de traduire des équations comme " $F = ma$ " par des phrases telles "La force est égale à la masse multipliée par l'accélération". Dans de tels cas, cependant, les mots ne font qu'imiter maladroitement les symboles, alors que les phrases, quoique répétant l'enchaînement de symboles se trouvant dans l'équation, demeurent beaucoup plus lourdes et obscures que les formules mathématiques. Cette spécificité de l'usage du langage ordinaire et des mathématiques nous confirme donc que mots et symboles possèdent

he uses words to explain this. Even the terms 'exact,' 'science,' 'symbol' and 'nature,' he must employ as words, intended to mean something in the way that words do. Indeed, without words he cannot explain how the physicist obtains his measure-numbers and why his concern is only with them." Charles De Koninck, "Random Reflections on Science and Calculation", p. 85.

¹⁸⁷Un peu dans le même ordre d'idées, le fait que les mathématiques n'aient pas toujours occupé une place aussi importante que celles qu'elles tiennent aujourd'hui en physique est un autre indice nous poussant à croire que cette science ne peut pas être uniquement définie à l'aide d'équations. Comme le remarquait Émile Meyerson dans la préface de *Identité et réalité*: "La science du moyen âge -c'est là précisément ce qui la distingue surtout de la nôtre - n'est pas dominée par la *quantité*; les mathématiques n'y peuvent donc pas jouer le rôle prépondérant qui est le leur à présent, de même qu'elles n'ont évidemment pas joué ce rôle dans les théories atomiques des anciens. Et il s'ensuit que, dans la théorie générale du savoir et dans la genèse de la science en particulier, les mathématiques ne doivent pas non plus pouvoir tout expliquer à elles seules. Le rôle des mathématiques dans la science moderne, il est aisé de s'en apercevoir, est immense. Un grand nombre de traits de cette science s'expliquent clairement par leur intervention. Mais en dehors et au-dessus de ces traits - puisque véritablement caractéristique de *toute* science physique - il doit y en avoir d'autres.", Émile Meyerson, *Identité et réalité*, p. xi-xii.

¹⁸⁸Charles De Koninck, "Random Reflections on Science and Calculation", p.87.

chacun une façon de signifier qui leur est propre et qui leur donne la possibilité d'exprimer différents aspects de la réalité. Nous devons admettre, à la suite de De Koninck, que l'emploi de mots ou de symboles n'est pas une question de choix¹⁸⁹. Il est donc important, pour nous qui désirons comprendre le rôle joué en physique par les différents langages, de comparer ces derniers afin de mettre en évidence leurs caractéristiques respectives.

Quant à leur usage, la différence la plus importante existant entre le langage ordinaire et les mathématiques réside dans le fait que, si pour utiliser les mots nous devons savoir ce qu'ils signifient avant de les utiliser, il est par contre possible d'effectuer des opérations sur un ensemble de symboles mathématiques dont on ne connaît pas le sens. Comme écrivait De Koninck: "What words stand for is something which we have got to know before we can use them as words. But the operation upon symbols does not require knowledge of what they stand for, and this is why mathematics can be called a game with 'meaningless symbols', played according to arbitrary rules."¹⁹⁰ Bien sûr, le linguiste peut s'amuser à construire des phrases en ne se servant que des règles syntaxiques. Mais, ce faisant, il court le risque d'énoncer des phrases qui, quoique répondant à toutes les règles grammaticales, sont tout à fait incompréhensibles. "*Le dialecte orange et spacieux saute modérément devant l'univers.*" est un exemple d'une telle absurdité. Par contre, le mathématicien peut fort bien travailler sur une équation comme $\Delta\varphi = 0$ sans pour autant savoir ce que représente φ (ou même 0) à condition qu'il connaisse la signification des opérateurs, Δ et $=$. Seul importe pour lui la signification de ces deux derniers signes donnant les règles selon lesquelles les autres symboles peuvent être manipulés. En effet, que Δ désigne, comme c'était l'usage dans les textes allemands, le laplacien plutôt que l'erreur sur φ modifiera les calculs du mathématicien. Mais que φ désigne l'espace, le champ de vitesse ou un ensemble de nombres quelconques n'influencera en rien son traitement du problème. Comme le remarquait C.F. von Weizsäcker: "When does a formula like $\Delta\varphi = 0$ express something meaningful to us? The definitions just mentioned do not fully determine its sense. As we saw, definitions can vary from instance to instance. How do we

¹⁸⁹Ce dernier remarquait avec beaucoup de justesse: "[...]to employ either words or symbols is not a matter of choice.". Charles De Koninck. "Random Reflection on Science and Calculation". p.87.

¹⁹⁰Charles De Koninck, *The Hollow Universe*, p.31.

decide among this variety of definitions? [...]If I merely write down the formula abstractly, then I have forgotten what it means."¹⁹¹

S'il en est ainsi, c'est avant tout parce que mots et symboles n'ont pas la même façon de signifier. D'une part, nous l'avons déjà souligné, les mots sont des signes utilisés pour désigner des concepts ou des constructions de l'esprit qui, à leur tour, réfèrent à des objets. Comme ils désignent les choses par l'intermédiaire des concepts, les mots ne peuvent pas être utilisés si on ne connaît pas leur signification, c'est-à-dire si nous ne possédons pas, dans notre esprit, les concepts auxquels ils réfèrent. Par suite, comme ils ne signifient que par l'intermédiaire de concepts, les mots du langage ordinaire sont limités par notre compréhension des choses. Comme l'expliquait Charles De Koninck:

[...] if words are first signs of what we have in mind regarding certain things, so that they refer to these things only through the mind's conception of them, then, the way in which words signify will not depend immediately on the way in which things are in themselves, but on the way they become known to us and are present in the mind. And hence it is that we can name a thing only as we know it and that, in naming things, we follow the progress of knowledge.¹⁹²

C'est ainsi que, puisque notre langage suit la progression de notre savoir, la première signification que nous attribuons aux mots est, comme notre première connaissance du monde, vague et confuse. Cependant, au fur et à mesure du développement de notre connaissance, notre vocabulaire s'élargit et les mots que nous possédons déjà se précisent ou acquièrent petit à petit de nouvelles significations. Ainsi, après avoir appris que le mot "ballon" ne désigne que certains jouets, l'enfant n'aura aucun problème à comprendre qu'il peut cependant aussi utiliser ce mot de manière analogue pour parler des montgolfières. Il y a, bien sûr, des cas où les différentes significations d'un mot n'ont aucun lien entre elles. Le mot "avocat", par exemple, en désignant soit un fruit, soit un homme de loi, illustre bien cette situation. Mais il ne s'agit là que d'une homonymie accidentelle¹⁹³. Il arrive cependant très fréquemment que les

¹⁹¹Carl Friedrich von Weizsäcker, *The Unity of Nature*, p.53.

¹⁹²Charles De Koninck, "Metaphysics and the Interpretation of Words", p.25.

¹⁹³Ces deux termes ont en effet des origines tout à fait différentes. Le mot "avocat" désignant le juriste est dérivé du terme latin *advocatus* alors que le mot qui réfère au fruit provient du nom espagnol de ce dernier: *avocado*.

différentes significations d'un même mot soient analogues. On reconnaît dans ce fait le lien étroit qui existe entre langage et pensée: pour comprendre ce qui nous est moins connu, il nous faut faire des liens, trouver des ressemblances, bref, établir des analogies avec ce qui nous est plus familier. L'utilisation d'un même mot pour désigner des choses qui, quoique différentes, démontrent certaines ressemblances, n'est donc que la transposition naturelle dans le langage de la démarche vers la connaissance effectuée par notre esprit. Cette polysémie propre au langage ordinaire peut, bien sûr, porter à confusion. Mais, sans cette capacité à trouver des ressemblances entre des choses qui sont, à première vue, différentes, la pensée abstraite ne pourrait tout simplement pas exister.

Les symboles, quant à eux, représentent les choses elles-mêmes plutôt que de renvoyer, comme les mots du langage ordinaire, à des concepts de l'esprit. Ce mode de signifier est d'ailleurs à l'origine de la grande force du langage symbolique puisque, en ne signifiant pas par l'intermédiaire de concepts, le langage des mathématiques nous permet de représenter et manipuler aisément des choses que nous ne pourrions autrement saisir par notre esprit. Comme le soulignait C.F. von Weizsäcker dans *The Unity of Nature*, "What the mathematical formula above all accomplishes is that it puts visually before us something which we could no longer, or only with the greatest difficulty, think abstractly, and which now, thanks to a visual representation, is made so transparent that we can again handle it."¹⁹⁴ Les mathématiques nous permettent ainsi d'arriver, à l'aide de démonstrations, à des conclusions qui seraient autrement demeurées cachées à notre esprit, ce qui a poussé Heisenberg à dire des mathématiques qu'elles sont parfois plus sages que nous.

Langage ordinaire et langage scientifique: une distinction manquée

Quoique nécessaire au développement de la physique, le langage ordinaire n'est pas suffisamment précis et clair dans sa forme de tous les jours pour permettre le développement d'une science exacte. Comme le note Heisenberg, pour déduire de manière quantitative les phénomènes naturels d'un ensemble de lois contenant un nombre restreint de concepts, il est

¹⁹⁴Carl Friedrich Weizsäcker, *op. cit.*, p.53.

en effet nécessaire que les relations entre ces concepts soient définies avec une exactitude mathématique et que ceux-ci soient insérés dans une "théorie fermée", c'est-à-dire un système conceptuel libre de toute contradiction interne. Comme on peut lire dans *Physics and Philosophy*: "Each concept can be represented by a mathematical symbol, and the connections between the different concepts are then represented by a mathematical equations expressed by means of the symbols. The mathematical image of the system ensures that contradictions cannot occur in the system."¹⁹⁵

Selon Heisenberg, c'est avec le développement de la mécanique newtonienne que le langage a acquis pour la première fois cette précision mathématique. Permettant de décrire avec exactitude les résultats expérimentaux, la mécanique classique est donc considérée par celui-ci comme le langage scientifique à la base de la physique. À ce langage, viennent s'ajouter les termes et les concepts scientifiques développés au sein des autres domaines de la physique. "In this way", écrit-il, "we develop a scientific language which may be called a natural extension of ordinary language adapted to the added fields of scientific knowledge"¹⁹⁶. Si le langage scientifique est un prolongement du langage ordinaire, ajoute Heisenberg, c'est que la seule vraie différence séparant ces deux modes d'expression réside dans leur précision respective: alors que les liens entre les mots du langage ordinaire sont vagues et confus, ceux existant entre les mots du langage scientifique sont définis avec une précision mathématique. Ainsi, les concepts de la mécanique newtonienne ne sont pour lui que le résultat d'une clarification des concepts du langage ordinaire. Comme dans toutes les autres théories fermées, les concepts de la mécanique classique sont définis les uns par rapport aux autres avec une telle précision que la modification d'un seul de ces concepts détruirait toute la théorie newtonienne. Il en va de même, ajoute-t-il, pour toute théorie fermée, que ce soit la mécanique classique ou la physique quantique: "The connexion between the different concepts in the system is so close that one could generally not change any one of the concepts without destroying the whole system."¹⁹⁷

¹⁹⁵Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p. 93.

¹⁹⁶*Ibid.*, p.173.

¹⁹⁷*Ibid.*, p. 94.

Que les concepts scientifiques soient plus clairement définis que ceux du langage ordinaire, cela ne fait aucun doute. Il est fréquent de distinguer en physique des notions qui sont habituellement confondues dans la vie quotidienne. Les concepts de masse et de poids, par exemple, quoique bien différenciés en physique, sont pour ainsi dire interchangeables dans la vie quotidienne. Ne lit-on pas parfois sur les emballages alimentaires: "Poids net: 1 kg"? Pourtant, croire que la clarté des concepts est la seule différence entre les deux modes d'expressions serait une erreur. Pour s'en convaincre, étudions d'un peu plus près le langage scientifique.

Nous pouvons distinguer, pour notre étude, trois types de mots utilisés par le langage scientifique. Premièrement, les mots qui, comme "longueur", "temps", "masse", "température", sont dérivés de l'expérience ordinaire et qui, tout en conservant leur signification d'origine, acquièrent dans le langage scientifique de nouvelles significations, plus précises. À leur sujet, nous pouvons reprendre cette célèbre réflexion de Russell: "The astronomer's sun, for instance, is very different from what we see, but it must have a definition derived from the ostensive definition of the word "sun" which we learnt in childhood."¹⁹⁸. Deuxièmement, le langage scientifique contient des mots, comme "travail", qui, quoique toujours utilisés dans le langage ordinaire, ont trouvé en science de nouvelles significations n'ayant qu'un lien très ténu avec leurs significations originales. Il serait ainsi absurde d'affirmer, dans la vie de tous les jours, qu'au cours d'une avalanche un certain "travail" a été produit. Mais cette affirmation, aux yeux de la physique, est tout à fait justifiée puisque, dans ce cas, la force gravitationnelle a déplacé un amas de neige sur une certaine distance. Inversement, pour le physicien, la rédaction d'un livre ne présentera aucun "travail" puisqu'aucun déplacement ne sera effectué. Troisièmement, le langage scientifique contient des mots théoriques comme "entropie", "pulsar" ou "méson" qui n'ont de sens qu'au sein de théories scientifiques et qui, dans le langage ordinaire, ne possèdent aucune signification. Il faut noter que le langage ordinaire contient lui aussi de nombreux mots, comme "âme", qui ne trouvent aucun équivalent dans le langage scientifique de la physique moderne.

¹⁹⁸Bertrand Russell, *Human Knowledge*, p. 258.

Remarquer que les mots du langage ordinaire et du langage scientifique ne désignent pas toujours les mêmes choses peut nous aider à mieux comprendre ce qui différencie ces deux modes d'expressions. D'une part, les mots du langage ordinaire, comme "arbre", "marcher", "bleu", désignent des choses, des actions ou des qualités dont nous avons tous, ou pouvons tous avoir, une expérience plus ou moins immédiate (à condition d'être normalement constitués). Par l'intermédiaire des concepts, ces mots tentent de saisir ce que sont les choses. Mais ces concepts demeurent souvent très vagues et, bien que nous croyions savoir ce que sont les choses dont nous parlons, nous sommes pourtant souvent obligés d'avouer que nous sommes incapables d'en donner des définitions claires. La réflexion de saint Augustin sur la notion de "temps" illustre bien ce paradoxe:

Qu'est-ce en effet que le temps? Qui serait capable de l'expliquer facilement et brièvement? Qui peut le concevoir, même en pensée, assez nettement pour exprimer par des mots l'idée qu'il s'en fait? Est-il cependant notion plus familière et plus connue dont nous usions en parlant? Quand nous en parlons, nous comprenons sans doute ce que nous disons; nous comprenons aussi, si nous entendons un autre en parler.

Qu'est-ce donc que le temps? Si personne ne me le demande, je le sais; mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne sais plus.¹⁹⁹

Le langage scientifique n'a certes pas cette prétention du langage ordinaire de saisir l'essence des choses; il se contente d'en désigner les aspects observables et mesurables. C'est ainsi que le mot "temps" en physique ne réfère plus à ce qu'est le temps de manière générale mais à la façon dont on le mesure, on peut le constater dans ce passage de *La relativité* de Albert Einstein:

Par là on arrive à une définition du "temps" en Physique. Qu'on imagine en effet placées aux points A, B, C de la voie ferrée (système de coordonnées) des horloges de même construction et réglées de telle sorte que les positions respectives de leurs aiguilles soient simultanées [...]. On entend par "temps" d'un événement l'indication (position des aiguilles) de l'horloge immédiatement voisine de l'événement.²⁰⁰

Ce court passage illustre deux différences majeures existant entre le langage ordinaire et le

¹⁹⁹Saint Augustin. *Les confessions*, livre XI, chapitre XV.

²⁰⁰Albert Einstein. *La relativité*, p.32-33.

langage scientifique. Tout d'abord, comme nous venons de le mentionner, alors que le langage ordinaire tente de cerner, plus ou moins précisément, l'essence des choses de notre expérience commune, le langage scientifique peut se contenter de les définir opérationnellement, c'est-à-dire de spécifier comment la chose est mesurée. Pour ce faire, et c'est là la seconde différence, le langage scientifique, plutôt que de faire appel à notre expérience commune comme le fait le langage ordinaire, réfère aux résultats d'expériences particulières. La définition du temps que donne Einstein, quoique faisant appel à de simples horloges, des objets nous étant tout à fait familiers, possède des exigences qui sont très éloignées de celles réclamées aux définitions des mots de tous les jours. Elle demande, par exemple, que l'horloge mesurant le moment auquel se produit un événement en soit immédiatement voisine. Cette exigence n'a rien de fantaisiste: utiliser un cadran éloigné d'un phénomène pour mesurer le moment auquel celui-ci se produit peut conduire à de fausses prédictions et cette constatation est à la base de toute la relativité restreinte.

Ces différences quant à la façon de définir sont extrêmement importantes puisque, comme le remarquait Charles De Koninck, elles montrent que, d'un certain point de vue, les mots du langage scientifique sont parfois beaucoup plus semblables aux symboles mathématiques qu'ils ne le sont des mots du langage ordinaire, puisque, comme les symboles, les mots du langage technique sont très souvent définis à partir de *mesures*:

Now, it should be noticed that the crucial term in these definitions is *when*. If the physicist said 'length is...' instead of 'length is when...' he would revert to a mode of definition which seeks to tell 'what' a thing is absolutely and not merely what a name or a symbol is intended to stand for.[...] In mathematical physics definitions are no more than interpretations of the symbols chosen, or descriptions of how measurement numbers are obtained.²⁰¹

Si la mesure a une telle importance, c'est qu'elle permet d'attribuer aux mots du langage scientifique, ainsi qu'aux symboles des mathématiques, un certain contenu physique. Nous reviendrons sur ce point essentiel un peu plus loin. Pour l'instant, il nous faut ajouter quelques mots à propos de ces expressions du langage scientifique, comme "électron", "atome" ou

²⁰¹Charles De Koninck, "Random Reflection on Science and Calculation", p.85.

"champ électrique", qui désignent non pas des opérations techniques ou mathématiques, mais des entités théoriques dont nous ne pouvons avoir aucune expérience directe. Ces termes du langage scientifique sont, eux aussi, situés en quelque sorte entre les mots du langage ordinaire et les symboles mathématiques. En effet, comme les mots ordinaires, ils désignent, sinon un concept, du moins une construction de l'esprit qui ressemble à un concept. Cependant, comme cette construction de l'esprit est hypothétique et ne décrit pas une chose observée dans l'espace et le temps, on ne peut dire de ces termes théoriques qu'ils permettent de saisir l'essence d'un objet. C'est probablement ce qui fait dire à Heisenberg, dans un de ses premiers écrits, que les particules élémentaires peuvent être considérées comme de simples symboles grâce auxquels les lois de la nature peuvent être exprimées sous une forme très simple: "The indivisible elementary particle of modern physics possesses the quality of taking up space in no higher measure than other properties, say colour or strength of material. In its essence, it is not a material particle in space and time but, in a way, only a symbol on whose introduction the laws of nature assume an especially simple form."²⁰²

Cette capacité d'invention propre au langage scientifique a certainement permis à la science de faire d'énormes progrès en permettant l'unification de phénomènes à première vue fort différents les uns des autres. Le concept de champ électrique, tel que le présente Heisenberg, illustre bien cette force du langage scientifique:

[...]the discoveries of Faraday and Maxwell have shown that electric and magnetic phenomena can best be understood by basing them on the idea of electric field. True, the field concept can be made plainer by comparison with the oscillations of elastic bodies but this is obviously a simile for showing mathematical interrelations and has no connection with our immediate sense-impression of electricity. For even when we talked of an ether whose elastic oscillation had an electric effect, this ether was outside the range of our sense impressions. At the same time, however, this science, in becoming more and more abstract, reveals a new power. It can recognize the interconnection between the most diverse phenomena and relate them to a common root.²⁰³

²⁰²Werner Heisenberg, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p. 55.

²⁰³*ibid.*, p.69.

Cependant, comme l'a souligné de nombreuses fois Heisenberg, toutes les notions théoriques n'ont pas le même pouvoir d'unification que le concept de "champ électrique". La notion d'éther, par exemple, s'est finalement révélée, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, vide de tout contenu spécifique. C'est dans l'espoir d'éviter de telles erreurs que les positivistes ont proposé de ne plus utiliser en physique de telles constructions théoriques et de se contenter de mots définis à l'aide d'expériences bien déterminées. Mais pour Heisenberg, cette exigence est utopique: tenter de la remplir nous obligerait non seulement à rejeter des notions centrales de la physique actuelle, comme celles "d'électron" ou de "molécule", mais elle nous obligerait aussi à abandonner des mots décrivant les objets les plus communs. Décrire la trajectoire d'une balle de baseball, par exemple, deviendrait une tâche impossible puisqu'aucune expérience ne permet de tester le concept de "balle". Comme le remarque Heisenberg: "it seems necessary to demand that no concept enter a theory which has not been experimentally verified at least to the same degree of accuracy as the experiments to be explained by the theory. Unfortunately it is quite impossible to fulfil this requirement, since the commonest ideas and words would often be excluded."²⁰⁴ Il n'est donc pas possible d'élaborer une physique à partir des seuls résultats expérimentaux. Les mots théoriques ont, dans le développement de la science, un rôle à jouer différent, mais tout aussi important, que celui des nombres-mesures. C'est pourquoi, d'après Heisenberg, il ne faut pas hésiter à introduire de tels termes dans une théorie en élaboration, laissant à l'expérience le soin de décider lesquels de ces mots possèdent réellement un contenu physique: "To avoid these insurmountable difficulties it is found advisable to introduce a great wealth of concepts into a physical theory, without attempting to justify them rigorously, and then to allow experiment to decide at what points a revision is necessary."²⁰⁵ Il faut cependant rappeler que le rejet de notions théoriques, telles que celles "d'éther" ou de "phlogistique", peut s'avérer, comme nous l'avons vu à la fin du chapitre 3, une tâche extrêmement difficile pour la communauté scientifique.

Quoique plus précis que le langage ordinaire, le langage scientifique demeure toutefois plus vague que les symboles mathématiques. Cette imprécision toute relative permet l'introduction,

²⁰⁴Werner Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, pp.1-2.

²⁰⁵*The Physical Principles of the Quantum Theory*, in C. F. Weizsäcker, *The Unity of Nature*, p.50.

à l'aide d'analogies, de nouvelles notions dans le langage scientifique. Le concept de force, tel que présenté par Warren Murray dans *Thèmes en philosophie des sciences* est un excellent exemple d'un tel processus. Dans la mécanique classique, la notion de force est associée à deux choses semblables mais non identiques: la force inertielle, qui mesure la difficulté à modifier l'état de mouvement d'un corps, et la force gravitationnelle, qui désigne l'attraction entre deux corps au repos selon la formule $F_g = Gm_1m_2/d^2$ (où F_g est la force gravitationnelle, G est la constante de gravitation universelle, m_1 et m_2 des masses séparées l'une de l'autre par une distance d). Par analogie, on a parlé de force *électrostatique* pour désigner l'attraction existant entre deux charges électriques immobiles. Dans ce cas, la force électrostatique, F_e , est définie comme $F_e = kq_1q_2/d^2$ (où k est la constante de Coulomb et q_1 et q_2 sont deux charges séparées par une distance d). Le nom de *force* a ensuite été attribué à des forces plus abstraites, comme les forces nucléaires, et ce même si ces dernières n'ont pas une formulation mathématique analogue à celle de la force gravitationnelle. Cet exemple nous permet de souligner que, bien que le mot *force* soit dans tous les cas utilisé par analogie, il n'en demeure pas moins que chaque type de force est définie de façon opérationnelle, indépendamment des définitions établies pour les autres types de forces. Ce point a aussi été remarqué par Heisenberg qui écrivait: "Tous les concepts utilisés, dans la théorie classique, pour la description d'un système mécanique, peuvent aussi être *définis exactement* pour les processus atomiques par analogie avec les concepts classiques."²⁰⁶ La définition exacte de ces concepts quantiques étant donnée, rappelle-t-il, par les expériences effectuées pour mesurer ces quantités.

Une distinction doit cependant être faite entre l'exemple d'analogie du paragraphe précédent traitant du mot "force" et celui portant sur les mots de la mécanique classique repris par la physique quantique. Dans le premier cas, le terme "force" est emprunté à la mécanique classique par de nouvelles théories afin d'expliquer de nouveaux phénomènes apparaissant dans des domaines d'expérience qui ne sont pas ceux de la mécanique newtonienne. La situation est

²⁰⁶Nous soulignons. Le texte original allemand se lit comme suit: "Alle Begriffe, die in der klassischen Theorie zur Beschreibung eines mechanischen Systems verwendet werden, lassen sich auch für atomare Vorgänge analog den klassischen Begriffen exact definieren.". Werner Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", p.179.

similaire à l'utilisation du mot "siège" dans le langage ordinaire. Désignant en premier lieu un objet sur lequel on peut s'asseoir, ce terme en est venu à signifier aussi bien le lieu où est installé une autorité (*le siège du gouvernement*), que l'endroit d'où est issu un mouvement ou une sensation (*le siège de la révolution; le siège de la douleur*) ou encore une opération militaire (*le siège de la ville*). Dans tous ces cas, certaines ressemblances existent entre le sens premier du mot "siège" et ses nouvelles significations. Mais toutes portent sur des objets différents. De même, dans le langage scientifique, les nouvelles significations du mot "force" viennent s'ajouter au sens original du mot²⁰⁷.

La situation créée par l'apparition de nouvelles significations pour les mots de la mécanique classique avec l'apparition de la physique quantique est toutefois différente, car ici les mots, malgré leur nouveaux sens, englobent les *mêmes* phénomènes que ceux désignés par les termes de la physique newtonienne. Dans l'exemple d'analogie donné par Heisenberg, les nouvelles significations qu'acquièrent, en physique quantique, ces mots de la mécanique classique que sont "position", "trajectoire", "vitesse", etc., ne font pas que s'ajouter à l'ancien sens des mots qui les désignent, elles les remplacent tout simplement. Heisenberg était particulièrement conscient de ce point. Dans son article sur les relations d'indétermination, par exemple, il écrit clairement que la physique quantique est née de l'effort de physiciens désirant se débarrasser de tous les concepts cinématiques ordinaires. Ainsi, note-t-il: "La mécanique quantique est née directement de la tentative de rompre avec les concepts cinématiques ordinaires [...] qu'une révision des concepts cinématiques et mécaniques soit nécessaire semble découler directement des équations de base de la mécanique quantique."²⁰⁸

Un tel remplacement de concepts a aussi eu lieu en relativité, comme le remarque Heisenberg dans cette phrase de "Sprache und Wirklichkeit": "dans le nouveau domaine d'expérience, le

²⁰⁷ L'analogie que nous faisons ici entre le mot "siège" du langage ordinaire et mot "force" du langage scientifique n'est cependant pas parfaite. En effet, un concept commun de "force" sous-tend toutes les définitions opératoires de la force, ce qui n'est pas le cas des différentes significations du mot "siège".

²⁰⁸ "Die Quantenmechanik war ja gerade aus dem Versuch entstanden, mit jenen gewohnten kinematisch Begriffen zu brechen [...] daß eine Revision der kinematischen und mechanischen Begriffe notwendig ist, scheint aus den Grundgleichungen der Quantenmechanik unmittelbar zu folgen", Werner Heisenberg, "Über des anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", pp. 172-173.

mot "simultané" a tout d'abord perdu son sens, tout comme les concepts de "haut" et " bas" dans le vaisseau spatial."²⁰⁹ Heisenberg n'a cependant pas remarqué que, lors de tels remplacements de signification, le langage scientifique s'écarte de manière significative du langage ordinaire. En effet, lorsque les mots du langage ordinaire acquièrent des significations plus précises pour désigner un objet, ils ne perdent pas pour autant leurs significations originales. Nous l'avons déjà mentionné, en acquérant de nouvelles significations, les mots "haut" et "bas" n'ont pas perdu leur signification première, ils en ont simplement acquis de nouvelles. En revanche, en trouvant une relation entre la masse et l'énergie d'un objet, la relativité a invalidé le concept classique de la masse qui, dans la mécanique newtonienne, est considérée comme une caractéristique constante d'un corps. Bien sûr, nous pouvons encore utiliser, dans les cas ne demandant pas une trop grande précision, les concepts de la mécanique classique. Ce faisant, nous savons néanmoins qu'il ne s'agit que d'approximations qui peuvent, dans certaines circonstances bien déterminées, s'avérer fausses. On remarque aussi que, bien que ce processus de remplacement de signification pour des mots scientifiques se soit produit avant le XXe siècle, avec des termes comme "atome" ou "planètes", il ne s'était jamais rencontré pour des mots, comme "vitesse", "temps", etc., désignant des nombres-mesures et appartenant à des théories depuis longtemps établies avant l'élaboration de la relativité et de la physique quantique. Il s'agit certainement là d'une des raisons à la base de l'émoi qu'ont causé ces nouvelles théories.

Contrairement à ce que prétendait Heisenberg, donc, le langage scientifique n'est pas à proprement parler une extension du langage ordinaire. Il possède un mode de signifier qui lui est propre, à mi-chemin entre celui du langage ordinaire et celui des mathématiques. C'est pourquoi la mécanique classique, dont les mots ont des significations pourtant très proches de celles des termes de tous les jours, est beaucoup plus qu'une simple clarification du langage ordinaire et que les mots et concepts qu'elle renferme forment un langage scientifique au même titre que ceux des autres théories fermées.

²⁰⁹"[...]in dem neuen Erfahrungsbereich das Wort „gleichzeitig“ seinen Sinn zunächst verloren hat, ähnlich wie die Begriffe „oben“ und „unten“ im Raumschiff [...]". Werner Heisenberg, "Sprache und Wirklichkeit in der Modernen Physik", p. 282. Nous soulignons.

Langages et mathématiques dans la compréhension en physique théorique

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 2, la physique théorique a pour but principal la compréhension de la nature, c'est-à-dire l'élaboration de structures conceptuelles simples et cohérentes à partir desquelles il est possible de déduire avec une précision mathématique les phénomènes naturels. Dans cette recherche de la compréhension, langage ordinaire, langage scientifique et mathématiques possèdent, comme l'a bien vu Heisenberg, un important rôle à jouer. Mais, ayant des modes de signifier différents, ces trois moyens d'expressions ont, quant au développement de la physique, des fonctions différentes que nous sommes maintenant prêts à examiner plus spécifiquement.

Mathématiques et compréhension

Nous sommes forcés de constater qu'au cours des derniers siècles, les mathématiques ont été appelées, au détriment du langage ordinaire, à occuper une place toujours plus importante au sein de la physique théorique. Comme le note Charles De Koninck, ce rayonnement des mathématiques s'est accompagné, dans les sciences exactes, d'un affranchissement graduel de l'emploi des mots: "Now, it has lately become obvious that the giant strides in the mathematical study of nature are concomitant with a gradual emancipation from the use of words. Until he is allowed to use symbols that are not names, the mathematical physicist is not sure what he is saying."²¹⁰ Ce phénomène est particulièrement évident dans la physique moderne. Ainsi, le physicien voulant traiter précisément des phénomènes atomiques ne peut se contenter de ce langage vague de la physique quantique qui utilise des mots référant à la fois au concept d'onde et de particule. Il doit alors nécessairement se contenter d'équations mathématiques. Comme l'a remarqué Heisenberg: "When this vague and unsystematic use of the language leads into difficulties, the physicist has to withdraw into the mathematical scheme and its unambiguous correlation with the experimental facts."²¹¹

²¹⁰Charles De Koninck, "Random Reflections on Science and Calculation", p.85.

²¹¹Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p. 179.

Pourquoi les mathématiques jouent-elles un rôle toujours plus grand au sein de la physique? Tout d'abord, comme nous l'avons souligné précédemment, afin de déduire avec une précision complète un phénomène particulier à partir de lois générales de la physique, il est nécessaire qu'il n'y ait aucune ambiguïté dans les relations reliant les concepts contenus dans ces différentes lois. Rappelons cette phrase de Heisenberg: "When a chain of conclusions follows from given premises, the number of possible links in the chain depends on the precision of the premises. Therefore, the concepts of the general laws must in natural science be defined with complete precision, and this can be achieved only by means of mathematical abstraction."²¹² Les mathématiques permettent donc de définir avec exactitude les liens entre les différents concepts d'une théorie et assurent ainsi la cohérence du système conceptuel. Qui plus est, les mathématiques permettent de décrire, à l'aide de quelques symboles, de vastes domaines d'expérience. Ainsi, chaque solution d'une équation déduite d'une loi de la physique (valable dans le domaine d'expérience étudié) correspond à un événement possible. La multitude des phénomènes naturels se trouve ainsi reflétée par l'infinité des solutions que possèdent les équations de la physique. Par une simple équation, souvent facilement visualisée par un graphique, les mathématiques permettent de synthétiser de vastes ensembles d'expériences qui ne pourraient être exprimés aussi complètement et aussi précisément à l'aide de mots. C'est pourquoi, comme le souligne Heisenberg: "What understanding of matter we achieved has finally been written down in mathematical equations, for no other language can dispose of such a wealth of expressions."²¹³ Ainsi, parce que les lois synthétisent l'ensemble des phénomènes possibles dans un domaine donné et parce que les relations existant entre les concepts contenus dans ces lois sont définies avec exactitude, il est possible de déduire quantitativement tous les phénomènes reliés à cette région de l'expérience. Cependant, comme le souligne de Broglie, cette grande force des mathématiques est aussi leur faiblesse:

Le langage mathématique est purement déductif, il est construit de façon à faire découler rigoureusement les conclusions des prémisses: cette rigueur, qui est sa force, est aussi sa faiblesse car elle l'enferme dans un cercle dont il ne peut plus sortir. Le raisonnement mathématique fait découvrir des conséquences qui étaient déjà

²¹²*Ibid.*, p. 172.

²¹³*Id.*, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p.104.

contenues dans ses prémisses sans y être apparentes: il ne peut donc donner rien de plus dans ses conclusions que ce qui y avait été mis implicitement au départ dans les hypothèses. S'il en était autrement, c'est qu'on aurait commis quelque faute au cours des calculs! Parce qu'il est rigidement déductif, le langage mathématique permet de faire l'inventaire détaillé des richesses intellectuelles déjà acquises, mais il ne permet pas d'en acquérir de nouvelles.²¹⁴

La formulation utilisée par de Broglie dans ce dernier paragraphe est certes quelque peu exagérée. La dérivation des diverses possibilités contenues au sein des lois à la base des diverses théories physiques nous ont certainement permis d'acquérir de nouvelles connaissances en physique en mettant en évidence des conclusions qui, autrement, nous seraient restées cachées. Néanmoins, de Broglie a raison d'affirmer que toutes ces conclusions étaient déjà contenues implicitement dans les lois générales préalablement établies et utilisées pour obtenir ces déductions.

L'analyse mathématique nous offre donc la cohérence et la précision nécessaires au développement de la physique. Cependant, ces capacités ayant été exigées par la physique moderne dès son commencement, elles ne peuvent, à elles seules, expliquer l'accroissement constant de l'emploi des mathématiques par les scientifiques. D'ailleurs, le fait que les mathématiques nous permettent mieux que les autres langages de synthétiser les divers phénomènes de la nature est un indice important nous poussant à croire que ces dernières ont un rôle majeur à jouer dans la compréhension de la nature en physique. Une compréhension qui, nous l'avons dit, consiste essentiellement dans l'élaboration de structures conceptuelles simples et cohérentes à partir desquelles il est possible de déduire avec une précision mathématique les phénomènes naturels. Pourtant, ce n'est pas la position que semble défendre Heisenberg dans ses derniers écrits, dans lesquels il affirme que les mathématiques n'occupent qu'un rôle secondaire dans le développement de la physique: celui d'assurer la cohérence du système conceptuel imaginé par le physicien tout en permettant la déduction des conséquences qui y sont contenues implicitement. Ainsi, il écrivait, dans "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics":

²¹⁴ Louis de Broglie, *Sur les sentiers de la science*, p.392.

Mathematical analysis can be an important help after the correct concepts have been found. since it may then enable the physicists to draw precise conclusions and to compare them with the facts. Before the correct concepts have been found it is only of little use. Because then it can only establish a precise connection between assumptions, expressed in the old concepts, and their consequences. But the assumptions are probably incorrect and therefore their consequences need not represent the phenomena. Hence mathematical analysis is usually not the direct way toward understanding: mathematical physics and theoretical physics are very different sciences.²¹⁵

Le rôle subordonné attribué dans cet extrait aux mathématiques ne semble pourtant pas correspondre à la place centrale que ces dernières ont jouées dans le développement de la physique quantique. Dans toutes les relations faites par Heisenberg de la découverte de la mécanique quantique lors de son séjour sur l'île d'Heligoland, il est clair que l'élaboration du schème mathématique de la nouvelle théorie ait été élaboré *avant* la définition complète des concepts de temps, de position, etc., qu'elle contenait. Il écrit d'ailleurs lui-même:

This happened in quantum mechanics in the following way: first the mathematical scheme, and then, of course, we had to try to use a reasonable language in connection with it. Finally we could ask: what concepts does this mathematical scheme imply and how do we have to describe nature?²¹⁶

Il écrit encore, dans *Across the Frontiers*:

In our own century, the mathematical formulation of the quantum theory has led to an understanding of the outer shells of chemical atoms, and thus of the chemical properties of matter generally.²¹⁷

Heisenberg n'est d'ailleurs pas le seul physicien à avoir mis de l'avant le rôle primordial joué par les mathématiques dans l'élaboration d'une théorie physique. Récemment, le physicien russe

²¹⁵Werner Heisenberg, "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", p. 338. Nous soulignons.

²¹⁶[d., "Theory, criticism and a philosophy", p.425.

²¹⁷[d., *Across the Frontiers*, p. 113. Nous soulignons.

Andréi Linde affirmait, à propos du développement de sa "théorie de l'inflation"²¹⁸: "Ce n'est pas une invention de ma part. C'est arrivé sans que je le cherche, imposé par le calcul."²¹⁹

Il semble donc que, dans le cheminement intellectuel menant vers la compréhension en physique, les mathématiques aient joué un rôle beaucoup plus important que ne l'a parfois laissé entendre Heisenberg. Le fait que les mathématiques synthétisent l'ensemble de nos connaissances du monde physique mieux que tout autre langage nous permet de croire que leurs rôles en physique ne se limitent pas à assurer la cohérence et la précision des concepts inclus dans les théories: elles doivent avoir elles aussi un certain rôle dans l'élaboration de ces concepts. Comme l'observait le physicien français Bernard d'Espagnat:

[...]le rôle des mathématiques en physique ne se limite pas à celui d'une simple sténographie, autrement dit à un rôle d'écriture abrégée de relations que, si l'on disposait de plus de place et davantage de temps, on pourrait aussi bien écrire dans le langage de tous les jours. Ce rôle là, bien entendu existe. Mais il est mineur. Bien plus fondamental est celui joué par le processus de définition d'entités nouvelles. Que l'on pense seulement à l'apparition du concept d'énergie. [...] Dans bien des cas il se passe ceci que, même sans devenir, comme l'énergie, des concepts de la vie courante, les concepts abstraits forgés par le physicien théoricien en viennent progressivement à supplanter les plus anciens – issus directement de l'expérience ancestrale – dans les descriptions que la physique propose du monde (celui de masse plus que celui de poids, celui d'énergie plus que celui de masse).²²⁰

Ce rôle des mathématiques dans la formation des concepts à pourtant été remarqué par Heisenberg qui écrivait, dans *Across the Frontiers*:

Mathematics, in the course of its history, has repeatedly formed new and more comprehensive concepts, and has thereby ascended to ever higher levels of abstraction.²²¹

²¹⁸Andréi Linde, de l'université Stanford, est considéré comme un des plus grands cosmologistes de l'heure. Sa théorie de l'inflation se veut un substitut à la théorie du Big Bang et propose l'idée que l'Univers a connu, à ses débuts, une phase d'inflation qui l'a amené à dépasser, en une fraction de seconde, la taille qu'il semble posséder aujourd'hui. Selon Linde, ce n'est qu'ensuite que l'univers aurait connu une évolution répondant aux conditions décrites par la théorie du Big Bang.

²¹⁹Ces paroles d'Andréi Linde ont été rapporté par Jean-Paul Dufour, du journal *Le Monde*, dans un article intitulé "L'univers est-il une vache?" paru dans l'édition du 4 août 1999 du journal *Le Devoir* (page A1 et A8).

²²⁰Bernard d'Espagnat, *À la recherche du réel*, p. 11.

²²¹Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.74.

D'ailleurs, Heisenberg semble convaincu, dans ses premiers écrits, que les mathématiques ont bel et bien un rôle important à jouer dans l'atteinte de la compréhension en physique. À preuve ces deux extraits de *Philosophic Problems of Nuclear Science*:

The experiences of science since Galileo and Kepler have taught us that mechanics can be summarized in, and understood by, mathematical laws.²²²

[...]modern science has retained confidence in a simple mathematical basis for all regular interrelations of nature, even of those which we cannot as yet grasp. Mathematical simplicity ranks as the highest heuristic principle in exploring the natural laws in any field opened up as a result of new experiments. In such a case the inner relations seem to be understood only when the determining laws have been formulated in a simple mathematical way.²²³

Comment Heisenberg peut-il affirmer, d'une part, que les mathématiques ont, au cours de l'histoire, formés de nouveaux concepts et mené à la compréhension des phénomènes physiques tout en soutenant, d'autre part, que ces dernières ne sont que de peu d'utilité avant la découverte de ces nouveaux concepts et qu'elles mènent rarement à la compréhension en physique? Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette contradiction apparente. Tout d'abord, cette confiance dans la capacité des mathématiques à nous mener vers une compréhension du monde physique est caractéristique des premiers écrits de Heisenberg, rédigés majoritairement sous le régime nazi. Il n'est pas impossible que Heisenberg ait parfois volontairement exagéré, dans ces textes, l'importance des mathématiques en physique dans l'espoir de défendre les méthodes de la physique théorique contre les attaques des partisans de la physique aryenne. Mais cette hypothèse n'explique pas les extraits plus récents avançant que les mathématiques ont effectivement permis le développement de concepts, menant ainsi à une compréhension de certain phénomènes physiques. Il est donc plus probable que Heisenberg n'ait tout bonnement pas eu de position arrêtée sur la question et qu'il ait simplement exprimé, dans ses nombreux articles et conférences, différents principes qu'il considérait valables sans toujours prendre la peine d'apporter les nuances appropriées, ni de vérifier si les différentes règles épistémologiques qu'il mettait de l'avant formaient un tout cohérent.

²²²*Id.*, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, p. 66. Nous soulignons.

²²³*Ibid.*, p. 59. Nous soulignons.

Compte tenu de la position quelque peu équivoque de Heisenberg sur la tâche des mathématiques en physique théorique, arrêtons-nous quelques instants sur certaines réflexions d'Einstein pour nous aider à clarifier notre pensée sur le sujet. Pour ce dernier, il est indéniable que les mathématiques sont le "principe créateur" nous permettant de découvrir les concepts et les lois de la physique. Mais, ajoute-t-il avec raison, la valeur des diverses constructions mathématiques que nous imaginons dans l'espoir de comprendre les phénomènes physiques ne peut être déterminée qu'à l'aide de l'expérience:

Ma conviction est que nous sommes en mesure, grâce à une construction purement mathématique, de trouver les concepts, ainsi que les lois qui les relient, propres à nous ouvrir les portes de la compréhension des phénomènes naturels. Certes, les concepts mathématiques utilisables peuvent être inspirés par l'expérience, mais ils ne peuvent en aucun cas en être déduits. L'expérience reste naturellement le seul critère pour juger de l'applicabilité d'une construction mathématique à la physique. Mais le principe proprement créateur, lui, se trouve dans les mathématiques.²²⁴

Einstein laisse entrevoir, dans cette dernière citation, la grande faiblesse du mode de signifier des mathématiques. Comme les symboles ne renvoient pas à des concepts de notre esprit, il est possible de les utiliser et de les agencer les uns aux autres sans pour autant que les constructions ainsi réalisées correspondent à quelque chose dans la réalité. Il s'agit d'ailleurs là d'un avis partagé par Heisenberg qui écrivait:

The mathematician and philosopher Bertrand Russell has said, "Mathematics may be defined as the subject in which we never know what we are talking about, nor whether what we are saying is true." (To explain the second part of this statement, we know only that our propositions are formally correct, not whether there are objects in reality to which they could be related.)²²⁵

Or, le physicien, dont l'objectif est de comprendre le monde qui l'entoure, ne peut se contenter de simples structures mathématiques n'ayant aucune prise sur la réalité. Comme le répète Einstein dans plusieurs de ses textes, la physique doit, à travers l'expérience, donner aux concepts mathématiques qu'elle utilise un certain contenu physique:

²²⁴ Albert Einstein, *Sur la méthodologie de la physique théorique* (Herbert Spencer Lectures), *Oeuvres complètes*, tome 5, p.105.

²²⁵ Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.75.

Les mathématiques traitent exclusivement des relations des concepts entre eux, sans considérer leurs relations avec l'expérience. La physique aussi traite de concepts mathématiques: ces concepts acquièrent cependant un contenu physique grâce à la détermination précise de leurs relations avec les objets de l'expérience.²²⁶

Les mathématiques jouent donc, contrairement à ce qu'a parfois laissé entendre Heisenberg, un certain rôle dans le développement de la compréhension en physique, en nous aidant, comme l'ont remarqué Einstein et d'Espagnat, à découvrir de nouveaux concepts. Dans cette recherche, cependant, le rôle des mathématiques ne consiste pas à établir directement le contenu physique de ces nouvelles notions, ce qui ne peut être fait qu'à l'aide d'expériences. Le langage symbolique des mathématiques sert plutôt à mettre en évidence les relations que ces nouvelles entités entretiennent avec les autres concepts. Ainsi, pour reprendre les mots de Heisenberg, les mathématiques font surgir un contenu véritable à travers leur "activité d'agencement":

[Les mathématiques] exigent que leurs symboles admettent entre eux des liaisons nettes et univoquement déterminées. Les symboles mathématiques ne font surgir un contenu véritable qu'à partir de leurs liaisons et cette circonstance conditionne la parenté étroite qu'on a souvent mentionnée entre les mathématiques et la musique. Le contenu à agencer n'apparaît en mathématique qu'à travers l'activité d'agencer.²²⁷

Cette capacité qu'ont les mathématiques d'agencer différentes variables physiques de manière à faire ressortir les régularités existant entre elles explique certainement pourquoi ce mode d'expression est appelé à jouer un rôle toujours plus grand dans une physique de plus en plus abstraite qui s'éloigne sans cesse de notre expérience quotidienne. Sans cette capacité, il est fort à parier que des notions aussi abstraites que celle d'entropie ou de quanta n'auraient jamais été élaborées.

Il semble donc que, pour Heisenberg, les mathématiques soient la "forme dans laquelle nous exprimons notre compréhension de la nature", sans pour autant être le contenu de cette compréhension. Ainsi écrit-il dans "The Tendency to Abstraction in Modern Art and Science":

In all these matters, mathematics, and especially its modern technological form, its execution by electronic computers, played only a subordinate role. Mathematics is the

²²⁶ Albert Einstein, *Conceptions scientifiques*, p. 114.

²²⁷ Werner Heisenberg, *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, p. 366.

form in which we express our understanding of nature: but it is not the content of that understanding. Modern science and, I think, also the modern development of art are misunderstood at a crucial point if we overestimate the significance in them of the formal element.²²⁸

Dans cet extrait, Heisenberg critique ce trait de la pensée occidentale moderne que l'on retrouve non seulement en sciences mais aussi dans les arts et qui consiste à favoriser la forme des moyens d'expression utilisés au détriment du contenu à transmettre. En art, cet aspect se traduit, selon Heisenberg, par la recherche constante de nouvelles formes d'expression, sans pour autant que cette recherche réponde à un besoin réel. Ainsi critique-t-il, dans ses mémoires, la musique moderne:

Dans la musique actuelle, cependant, je trouve que les contenus nouveaux sont trop difficilement reconnaissables ou trop peu plausibles; et l'excès de nouvelles possibilités d'expression m'inquiète plutôt. Le chemin de la musique actuelle me paraît plutôt tracé de manière négative: on doit abandonner l'ancienne tonalité, parce que l'on croit que celle-ci a épuisé ses possibilités, et non pas parce qu'il existerait des contenus nouveaux et puissants que cette tonalité ne permettrait pas d'exprimer.²²⁹

La situation n'est toutefois pas, selon lui, aussi accentuée en physique. Si l'art recherche aujourd'hui la forme pour elle-même sans se soucier du contenu à transmettre, il n'en va pas de même en physique, dans laquelle le contenu à transmettre a toujours été clairement établi.

Ainsi écrit-il:

In science there is never any question about *what* requires explaining, but only about *how* it should be explained: in art, on the other hand, it seems to be a problem nowadays as to *what* should be represented - there are too many rather than too few answers on how it should be done. Thus, in contrast to modern science, it often seems in modern art as if the very content that is to be presented is still contested or cannot be grasped.²³⁰

Mais peut-être cette affirmation est-elle quelque peu exagérée. Si, comme Heisenberg, on fait des mathématiques la forme de nos connaissances physiques, il nous faut en effet admettre que, bien des fois, nous avons obtenu en science des formes sans aucun contenu physique puisque, fréquemment, les outils mathématiques ont été développés avant qu'on ne leur trouve une

²²⁸[id.], *Across the Frontiers*, p. 146.

²²⁹[id.], *La partie et le tout*, p.37.

²³⁰[id.], *Across the Frontiers*, p.148.

quelconque utilité en physique. On n'a qu'à penser aux géométries non euclidiennes qui existaient bien avant l'avènement de la relativité générale. D'une certaine manière, donc, il semble que même en physique la forme ait parfois été développée sans considération pour le contenu qu'elle pourrait exprimer.

Il faut cependant ajouter que le mot "forme" est ambigu et il nous faudrait ici, ne serait-ce que vaguement, définir davantage en quel sens les mathématiques peuvent être considérées comme la "forme des connaissances physiques". Tout d'abord, on peut dire des symboles mathématiques qu'ils représentent formellement certains aspects de la réalité. Mais ce n'est certainement pas de cet aspect des mathématiques dont parle Heisenberg lorsqu'il nous prévient de ne pas surestimer l'élément formel de la physique. Si les mathématiques sont la forme de notre connaissance du monde physique, c'est avant tout parce qu'elles nous permettent de relier entre eux ces différents symboles et ainsi illustrer la structure de nos systèmes théoriques tout en en assurant la cohérence. Or, ce double aspect formel des mathématiques engendre une certaine confusion quant à la fonction de ce langage symbolique dans le développement de la physique. D'une part, en effet, il semble nécessaire que les symboles mathématiques soient reliés au monde physique par l'intermédiaire de l'expérience. D'autre part, en reliant ces symboles les uns aux autres de manière à prédire les événements physiques, les équations semblent représenter, non pas des liens purement imaginaires, mais des relations existant bel et bien entre les éléments quantitatifs présents dans les divers phénomènes physiques. Or, nous l'avons mentionné, il est dans une certaine mesure possible d'élaborer ces relations *a priori*, sans avoir aucune connaissance préalable du monde physique. On peut donc, avec raison, s'interroger à savoir si, dans le développement de la physique, il nous faut nécessairement commencer par l'expérience ou s'il ne serait pas plutôt préférable d'appuyer nos recherches sur des constructions mathématiques. Bien entendu, il ne saurait s'agir, dans ce cas, de "mathématiques pures", ne référant à aucun concept physique. Mais peut-être devrait-on se contenter, à l'approche d'un nouveau domaine de connaissance, d'un contenu physique minimal, afin de laisser libre cours à cette "puissance créatrice" des mathématiques dont parlait Einstein. En fait, l'histoire nous enseigne que, dans la recherche de la compréhension d'un nouveau domaine de la physique, les deux approches sont possibles. Ainsi, comme dans le cas de

l'élaboration de la mécanique quantique par Heisenberg, le physicien peut tenter de résoudre les problèmes qui se posent à lui en faisant appel à une intuition plus "formelle", plus "mathématique" qu'il vérifiera par la suite à l'aide de l'expérience et à laquelle il greffera les concepts nécessaires pour une explication complète des phénomènes étudiés. Inversement, comme lors du développement de la relativité par Einstein, le physicien peut débiter ses recherches par une réflexion sur l'état de la situation dans laquelle se trouve à ce moment la physique, il peut s'interroger sur le choix des concepts à utiliser et sur les principes physiques à conserver ou à mettre de l'avant pour seulement ensuite se pencher sur la formulation mathématique qu'il devra utiliser pour résoudre complètement le problème qui se pose à lui.

Néanmoins, il reste certain que, pour atteindre la compréhension en physique, il est nécessaire de faire appel, finalement, à la fois aux mathématiques *et* à l'expérience. Les mathématiques, comme le rappelle Heisenberg, ne peuvent à elles seules, mener à une compréhension totale des phénomènes physiques: "The mathematical forms can lead to real understanding only when the right concepts have been found and applied, and this point has sometimes been forgotten"²³¹. À l'opposé, une intuition vague des concepts à utiliser pour décrire un domaine de la réalité ne saurait être suffisante pour le physicien désireux prédire avec précision les événements naturels. Il est donc nécessaire de maintenir, en physique, un certain équilibre entre expérience et mathématiques.

Expérience et mathématiques: une tension essentielle

Cette idée que les mathématiques possèdent un certain potentiel explicatif se trouvait déjà chez les penseurs de la Grèce Antique. On la retrouve, par exemple, chez les Pythagoriciens pour qui "tout était nombre", ou encore chez Platon qui, dans le mythe du *Timée*, imagine la matière comme étant composée d'atomes construits à partir de triangles et ayant la forme d'un des cinq solides réguliers. Dans l'utilisation des mathématiques en science, un fossé énorme sépare pourtant les philosophes grecs des physiciens modernes: le désir de vérifier les énoncés

²³¹ Id., "The Philosophical Background of Modern Physics", p.500.

mathématiques à l'aide de l'expérience. Comme l'explique Heisenberg dans *Physics and Philosophy*:

Modern science would finally always asks: How can one decide experimentally that the atoms of fire are tetrahedrons and not perhaps cubes? Therefore, when modern science states that the proton is a certain solution of a fundamental equation of matter it means that we can from this solution deduce mathematically all possible properties of the proton and can check the correctness of the solution by experiments in every detail. This possibility of checking the correctness of a statement experimentally with very high precision and in any number of details gives an enormous weight to the statement that could not be attached to the statements of early Greek philosophy.²³²

Il est cependant important de préciser que ce que l'expérience permet de confirmer ainsi, ce ne sont pas les théories physiques elles-mêmes mais leurs conséquences. En mesurant, le 29 mai 1919, la déviation de rayons de lumière passant près du Soleil, Eddington et ses confrères n'ont pas confirmé la théorie de la relativité générale mais seulement une de ses conséquences les plus importantes. Si donc, dans la physique moderne, la loi naturelle exprimée à l'aide d'une équation mathématique est d'une telle importance, c'est parce que ses solutions peuvent se vérifier directement dans la nature. Et c'est pourquoi, la confiance que nous avons dans la célèbre loi de Newton, $F=ma$ nous vient exclusivement de l'expérience. Celle-ci nous permet, d'une part, d'attacher à chacun des symboles de l'équation (F, m et a) un contenu physique déterminé. D'autre part, l'expérience nous permet, à l'aide de certaines mesures, de vérifier non seulement les solutions obtenues à partir de cette équation mais aussi d'évaluer par le fait même la portée de cette loi, ce qui nous permet de déterminer le domaine d'expériences pour lequel elle est valide. Pour reprendre le mot de Einstein: "[...] toute connaissance de la réalité vient de l'expérience et aboutit à elle."²³³

Le physicien doit donc continuellement maintenir un lien entre les symboles mathématiques qu'il utilise et l'expérience. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, ce lien est établi à travers l'expérience, comme l'explique Charles De Koninck: "The mathematical physicist must define his terms by describing the way in which he reaches them, that is, by a process of

²³²Id., *Physics and Philosophy*, p.74-75.

²³³Albert Einstein. *Comment je vois le monde*, p.148.

mensuration which results in a measure-number: a symbol whose meaning is defined by reference to a certain operation and the incidentals that attend it."²³⁴ Il n'est donc pas surprenant que le premier souci qu'ait eu Heisenberg lors de l'élaboration de la mécanique quantique ait été de s'assurer que ses équations ne contenaient que des symboles désignant des mesures bien précises. Comme il le rappelle d'ailleurs lui-même: "La mécanique quantique est directement née de la tentative de rompre avec les concepts cinématiques ordinaires et de mettre à leur place des relations entre des nombres concrets obtenus expérimentalement."²³⁵

Cette importance de l'expérience dans l'interprétation des formules mathématiques ne doit jamais être perdue de vue et ce, même lorsque la théorie est, comme la mécanique classique, bien établie et fait preuve d'une cohérence parfaite. En effet, tant que nous demeurons dans le domaine des mathématiques, toutes les équations de la physique apparaissent parfaitement précises. Mais cette précision est quelque peu illusoire et il n'est pas rare de constater, en comparant les résultats expérimentaux avec les données obtenues à l'aide de la théorie, que les équations ont souvent un domaine d'action assez restreint. Ainsi, la capacité calorifique d'un solide (C_v) est donnée à partir de la dérivée de l'énergie par rapport à la température. L'énergie (E) étant définie, dans la physique classique, comme $E=3RT$ (ou R est la constante universelle des gaz et T la température du solide), la capacité calorifique est donc, selon la physique classique, une constante ne variant pas avec la température:

$$C_v = d(3RT)/dT = 3R = 6 \text{ cal/mol-K}$$

Si, comme l'ont démontré les expériences de Dulong et Petit, cette loi nous permet effectivement de décrire la situation des solides à la température de la pièce, elle est tout à fait inadéquate pour rendre compte de leur comportement à des températures avoisinant le zéro absolu. Bien entendu, rien dans la loi de Dulong et Petit ne permet de prévoir cette limitation.

²³⁴Charles De Koninck, *The Hollow Universe*, p.52.

²³⁵"Die Quantenmechanik war ja gerade aus dem Versuch entstanden, mit jenen gewohnten kinematisch begriffen zu brechen und an ihre Stelle Beziehungen zwischen konkreten experimentell gegebenen Zahlen zu setzen.", Werner Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", p.172.

Les frontières de la région du monde physique à laquelle la loi s'applique ne pouvaient être définies qu'à partir d'expériences.

Ainsi donc, le rôle de l'expérience vis-à-vis des mathématiques est double. D'une part, elle doit fournir le contenu physique des symboles entrant dans les équations de la physique et, d'autre part, elle doit évaluer la portée de ces formules et déterminer les régions du monde physique pour lesquelles elles s'appliquent. Sans l'expérience, les mathématiques ne seraient d'aucune utilité à la physique. Inversement, une physique qui se contenterait de recueillir des données expérimentales sans tenter de trouver des formules permettant de les relier les unes aux autres ne pourraient nous faire comprendre véritablement la nature. Comme le remarquait Heisenberg, il existe donc en physique une interaction essentielle entre mathématiques et expérience

Pure mathematical speculation becomes unfruitful because from playing with the wealth of possible forms it no longer finds its way back to the small number of forms according to which nature is actually constructed. And pure empiricism becomes unfruitful because it eventually bogs down in endless tabulation without inner connection. Only from the tension, the interplay between the wealth of facts and the mathematical forms that may possibly be appropriate to them, can decisive advances spring.²³⁶

Cette expérience si nécessaire à la pratique scientifique, nous devons cependant pouvoir la décrire de manière à ce que les autres chercheurs comprennent ce que nous avons fait. Pour reprendre le mot de Bohr: "Nous devons être capable de dire à nos amis ce que nous avons fait et ce que nous avons appris". Comme le souligne Rudolf Haag²³⁷, cette phrase, en apparence banale, fait allusions à trois aspects de la pratique de la physique. Premièrement, l'idée que notre connaissance du monde physique découle des observations que nous en faisons. Deuxièmement, le fait que la physique ne déclare valable les résultats expérimentaux que s'ils peuvent être reproduits par les autres physiciens. Pour cela, il faut donc, troisièmement, pouvoir décrire nos expériences dans des termes non équivoques. Comme nous allons le voir

²³⁶Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.172.

²³⁷Haag écrit en effet, citant Bohr: " 'We must be able to tell our friends what we have done and what we have learned'. This key sentence of Bohr alludes to several facts. First, our knowledge about the physical world derives from observation; in physics observations usually involve planned experiments. The description of such experiment must be given in unequivocal terms, the stated conditions and the results must be reproducible by others.", Rudolf Haag, *Local Quantum Physics*, p.295.

dans la section suivante. le langage joue un rôle primordial dans cette description de nos montages expérimentaux.

Langage ordinaire et langage scientifique en physique

Si en effet nous voulons transmettre de façon claire et non ambiguë nos résultats expérimentaux, il est impératif que nous partagions, avec nos interlocuteurs, une base commune à laquelle nous puissions référer l'un et l'autre. Cette référence commune, comme le souligne Weizsäcker, nous est donnée par le langage ordinaire:

A domain exists which is at all times already familiar to us, in which we can understand each other reasonably well, and which, with the help of that understanding, serves as a starting point for opening up new domains. The domain already familiar to us, in which we understand each other, is familiar to us not *only*, but *to a large extent*, by virtue of the language in which we have been communicating all along. That is why "natural" language - i.e. the language we all know (called "ordinary" language by logicians) - is the presupposition of further knowledge and of the heightened acuity of concepts. [...] Ordinary language is therefore the tool which again and again opens up reality for us, and which enables us to in turn improve that tool by means of reality newly perceived. It seems to me that, viewed linguistically, this - if you like - circular process keeps continually recurring in a science such as physics.²³⁸

Heisenberg partage lui aussi cette opinion voulant que le langage ordinaire soit le seul moyen de transmettre sans ambiguïté nos connaissances sur le monde physique. Il écrit ainsi dans *Physics and Philosophy*:

Any kind of understanding, scientific or not, depends on our language, on the communication of ideas. Every description of phenomena, of experiments and their results, rests upon language as the only means of communication. The words of this language represent the concepts of daily life, which in the scientific language of physics may be refined to the concepts of classical physics. These concepts are the only tools for an unambiguous communication about events, about the setting up of experiments and about their results.²³⁹

Si le langage ordinaire peut ainsi servir de base aux descriptions du monde que fait la physique, c'est parce qu'il manifeste une stabilité et une certitude inconnue du langage scientifique ou des

²³⁸ Carl Friedrich von Weizsäcker, *The Unity of Matter*, p.62.

²³⁹ Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, p.144.

mathématiques. Alors que le mot "temps" (ou le symbole "t") peut être défini de différentes façons dans les diverses théories physique, le nom "temps" désigne, à travers les définitions de plus en plus précises qu'il acquière dans le langage ordinaire, une même réalité qui, quoique confuse, nous est toutefois fort bien connue²⁴⁰. Si le langage ordinaire, vague et confus, est si utile dans la description de nos expériences, c'est, comme l'écrit Charles De Koninck, parce qu'il nous permet d'exprimer les choses comme nous les connaissons²⁴¹ et ce, même lorsque ses mots sont utilisés dans un sens métaphorique: "Of all our normal language it is true that, whether its words be used as metaphors, given new meanings, or meanings long worn out and now revived, they still imply reference to something already known, something that may be quite certain, no matter how fuzzy at the edges."²⁴²

Mais la description de nos montages expérimentaux est loin d'être la seule tâche attribuée au langage ordinaire dans le développement de la physique. À preuve, même dans les sciences aussi mathématisées que la physique, il est souvent nécessaire de faire appel au langage ordinaire pour comprendre adéquatement les déductions mathématiques, comme le remarquait d'ailleurs Louis de Broglie:

Mais, même dans les disciplines où son emploi est possible, et à plus forte raison dans les autres, le langage algébrique dans sa sèche précision ne peut pas offrir à la pensée scientifique tous les moyens d'expression qui lui sont nécessaires et c'est pourquoi, même dans les ouvrages les plus hérissés de formules algébriques, le texte en langage ordinaire garde toute son importance et permet seul de suivre dans toutes ses finesses la pensée de l'auteur et d'apercevoir la portée véritable des résultats qu'il expose.²⁴³

Le langage ordinaire est en effet appelé à jouer un rôle important dans la compréhension des théories physiques comme le mentionne d'ailleurs Einstein dans *L'évolution des idées en*

²⁴⁰Comme le remarque Charles De Koninck: "Car de fait les choses premières et plus certaines à notre point de vue ne semblent l'être qu'au dépens de la clarté - tout comme, au niveau des sens, ce qui est le plus sûr, savoir le tangible, est aussi le moins clair. Ces choses sont en réalité les plus confusément connues et les moins aisées à définir ou à décrire.". Charles De Koninck, "Le langage philosophique", p.211.

²⁴¹Ainsi, écrit-il: "Encore une fois, c'est parce qu'ils expriment les choses telles que nous les connaissons d'abord que la signification des mots dans l'usage commun a tant d'importance. Connaissance embrouillée et vague, à coup sûr, mais sans laquelle nous ne saurions pas même poser des questions.", Charles De Koninck, "Le langage philosophique". p.206.

²⁴²Charles De Koninck, *The Hollow Universe*, p. 84.

²⁴³Louis de Broglie, *Sur les sentiers de la science*, p.391.

physique: "Les ouvrages de physique sont remplis de formules mathématiques compliquées. Mais c'est la pensée, ce sont les idées qui sont à l'origine de toute théorie physique."²⁴⁴ Or, remarque-t-il dans le même texte: "La plupart des idées fondamentales de la science sont essentiellement simples et peuvent en général être exprimées dans le langage que tout le monde comprend."²⁴⁵ Si tel est le cas, c'est bien entendu parce que les théories physiques ne sont pas constituées uniquement à partir d'équations mathématiques: elles renferment aussi des concepts (ou des constructions de l'esprit semblables à des concepts) auxquels on ne peut référer qu'à l'aide de mots. Bien sûr, la physique moderne contient aujourd'hui de nombreux concepts abstraits, difficilement exprimables dans le langage de tous les jours. Pourtant, rappelle Einstein, il ne faut pas oublier que toute notre connaissance repose sur des concepts beaucoup plus "primitifs", des concepts auxquels réfèrent les mots du langage ordinaire:

Nous avons vu de nouvelles réalités créées par le progrès de la physique. Mais on peut faire remonter cette chaîne de l'activité créatrice bien au-delà du point de départ de la physique. Un des concepts les plus primitifs est celui d'objet. Les concepts d'arbre, de cheval, ou d'un corps matériel quelconque, sont des créations qui reposent sur la base de l'expérience, bien que les impressions dont ils proviennent soient primitives en comparaison du monde des phénomènes physiques.²⁴⁶

Comment la physique aurait-elle pu se développer sans un concept aussi essentiel que celui de chose? Bien sûr, le langage ordinaire est, comme l'a souligné Heisenberg, trop vague pour permettre à lui seul le développement d'une pensée aussi précise que celle de la physique et il est nécessaire d'inventer, au fil du développement de cette science, un langage scientifique clairement défini, adapté au divers domaines étudiés. Malgré tout, le langage ordinaire demeure toujours, comme le remarque C.S. Lewis dans *The Four Loves*, une source importante d'expérience: "Of course language is not an infallible guide, but it contains, with all its defects, a good deal of stored insight and experience. If you begin by flouting it, it has a way of avenging itself later on. We had better not follow Humpty Dumpty in making words mean whatever we please."²⁴⁷ Le mot "masse" illustre bien cette intuition dont fait parfois preuve le

²⁴⁴ Albert Einstein et Léopold Infeld, *L'évolution des idées en physique*, p.257-258.

²⁴⁵ *Ibid.*, p.31.

²⁴⁶ *Ibid.*, p.274.

²⁴⁷ C.S. Lewis, *The Four Loves*, p.10.

langage ordinaire. Dérivé du mot grec *μάζα (maza)*, signifiant "pâte", le mot "masse" réfère, dans le langage ordinaire, à une certaine mesure de la quantité de matière. La physique classique distingua, par la suite, deux types de masses: la masse inertielle et la masse gravitationnelle. Ce n'est qu'au XXe siècle que la relativité générale démontrera que ces deux variables désigne le même aspect des corps. Il semble donc qu'en se basant sur l'expérience commune, le langage ordinaire ait vu, de façon très confuse il faut l'admettre, une certaine unité qui ne put être expliquée que par la physique moderne. On peut donc dire avec Louis de Broglie que le "langage ordinaire [...] permet d'exprimer des remarques ou des commentaires susceptibles d'élargir les résultats obtenus et d'en faire apercevoir, comme dans une pénombre, les nuances et les prolongements possibles."²⁴⁸

Mais le langage ordinaire, quoiqu'essentiel à la physique, ne saurait lui suffire. Les théories physiques doivent, pour décrire la nature avec exactitude, faire appel à des concepts définis avec précision. Pour comprendre les nouveaux domaines d'expériences que nous offre la physique, il nous faut donc inventer des mots, comme "atome", "pulsar", etc., nous permettant de parler des entités physiques que nous imaginons dans le développement de nos théories, ou encore des termes, comme "accélérateur" ou "endoscope", nous permettant de référer aux instruments que nous inventons pour percer les secrets de la nature. Or, ces mots ne sont plus du domaine du langage ordinaire. En effet, comme le souligne C.F. von Weizsäcker, ils contiennent déjà quelque théorie:

[...] language is something without which physics as we know it would be utterly impossible. I personally think that the fiction of a physics without theory, a physics which merely describes what sort of lines are seen on a photographic plate, is even more unthinkable than Heisenberg implies [...], because the terms "photographic plate" and "lines on it" already contains some theory.²⁴⁹

Il en va d'ailleurs de même pour les mots qui désignent les résultats des mesures. Par exemple, comme l'explique Einstein, même le mot "temps" qui réfère dans le langage quotidien à un certain sentiment subjectif, prend, dans le langage scientifique, une signification toute autre:

²⁴⁸Louis De Broglie, *Sur les sentiers de la science*, p. 392.

²⁴⁹Carl Friedrich von Weizsäcker. *The Unity of Nature*, p. 51.

Le sentiment subjectif du temps nous permet d'ordonner nos impressions, d'établir qu'un événement précède un autre. Mais relier chaque instant du temps à un nombre, en employant une horloge, regarder le temps comme un continuum unidimensionnel, cela est déjà une invention. Il en est de même des concepts de la géométrie euclidienne et non euclidienne et de notre espace considéré comme un continuum tridimensionnel.²⁵⁰

Bien entendu, si nous prenons le cas de la mécanique newtonienne décrivant des situations expérimentales souvent très proches de notre vécu quotidien, on constate que la signification de la plupart des mots du langage scientifique utilisés au sein de cette théorie demeure très proche de celle des termes du langage ordinaire, de telle sorte qu'il est parfois très difficile de les distinguer l'une de l'autre. Il n'est donc pas étonnant que plusieurs physiciens aient crû, comme Heisenberg, que les mots et les concepts de la physique classique n'étaient que des précisions des concepts du langage ordinaire. En effet, la différence entre ces deux modes d'expression ne se fait sentir que lorsque nous sortons du domaine de la physique classique. Force nous est alors fait d'admettre que les concepts du langage ordinaire ne peuvent effectivement plus suffire à expliquer les phénomènes et qu'il est nécessaire de développer un langage scientifique approprié, lequel, remarque Heisenberg, peut difficilement être traduit dans le langage ordinaire:

We are allowed to use the old words in the traditional sense whenever we have to do with phenomena which are not too far away from daily life or from classical physics. But [...] these words or concepts have only a limited range of applicability. And when we have to go beyond this range, we are left with rather abstract concepts, with a mathematical language which can be understood by the experts, but cannot be translated without ambiguity into the simple language of daily life.²⁵¹

L'emploi du langage scientifique repose donc, tout comme l'usage des mathématiques, sur l'existence d'un langage ordinaire pouvant offrir une référence commune à tous et qui permette de décrire sans ambiguïté les montages expérimentaux utilisés pour déterminer le contenu physique des mots inventés par le langage scientifique de la physique. Comme l'écrivait Bertrand Russell:

²⁵⁰Albert Einstein et Léopold Infeld, *op. cit.*, p. 275. Charles De Koninck abonde dans le même sens en écrivant: "Time here becomes a symbolic construction [...] this one has reference to experience, but which is still far from telling us what time is.", Charles De Koninck, *The Hollow Universe*, p.54.

²⁵¹Werner Heisenberg, "The Development of Concepts in Physics of the 20th Century", p.161.

The terms employed in mathematical physics are required to fulfil two kinds of conditions: on the one hand, they must satisfy certain formulae; on the other hand, they must be so interpreted as to yield results that can be confirmed or confuted by observation. Through the latter condition they are linked to date, though somewhat loosely; through the former they become determinate as regards certain structural properties.²⁵²

Comme le remarque Bertrand Russell, les concepts du langage scientifique font preuve d'une certaine imprécision et ce, même s'ils semblent être parfaitement définis à travers les équations de la physique. L'évolution des concepts de masse, de lumière, d'espace et de temps, sont tous autant d'exemples prouvant que, si les concepts du langage scientifique forment entre eux un ensemble cohérent, le lien qu'ils entretiennent avec l'expérience n'est pas toujours parfaitement définis et n'est habituellement valable que pour un domaine donné du monde physique. Comme l'écrivait Weizsäcker: "the language of physics is unambiguous not in an absolute sense, guaranteed forever, but in a sense relative to a particular situation. The physicist expresses the particular situation plainly and, it seems to me, correctly when he stresses that the words carry an unambiguous meaning only to the extent justified by the facts, only to the extent that matters stand the way the words say they do."²⁵³ Les mots du langage scientifique nous apportent donc une connaissance exacte et précise de la nature seulement dans la mesure où ils concordent avec les résultats expérimentaux. Conséquemment, le langage scientifique, tout comme les mathématiques, est relié au langage ordinaire à travers l'expérience.

Ainsi, la physique doit nécessairement faire appel à trois langages différents dans son développement. Elle doit tout d'abord, comme toutes les autres disciplines, faire appel au langage ordinaire qui seul peut lui fournir la référence commune à tous permettant de transmettre notre pensée. Mais les concepts reliés aux mots du langage ordinaire demeurent trop vagues pour permettre à eux seuls le développement d'une connaissance aussi précise que celle de la physique. C'est pourquoi cette science doit aussi développer un langage scientifique permettant de nommer les nouvelles réalités mises à jour par la recherche scientifique. Qui plus est, pour réussir à déduire des faits particuliers de lois générales, pour synthétiser les

²⁵²Bertrand Russell. *Human Knowledge*, p.12.

²⁵³Carl Friedrich von Weizsäcker, *The Unity of Nature*, p.62.

connaissances déjà acquises et pour mettre en évidence les relations existant entre des entités abstraites, la physique a également besoin des mathématiques. L'usage de ces trois langages est essentiel au développement de la physique et l'idée souvent répandue que la physique puisse se contenter des mathématiques est, comme l'a soulignée Heisenberg, utopique:

The tension between the demand for complete clarity and the inevitable inadequacy of existing concepts has been especially marked in modern science. In atomic physics we make use of a highly developed mathematical language that satisfies all the requirements in regard to clarity and precision. At the same time we recognize that we cannot describe atomic phenomena without ambiguity in any ordinary language; we cannot for example, speak unambiguously about the behavior of an electron in the interior of an atom. It would be premature, however, to insist that we should avoid the difficulty by confining ourselves to the use of mathematical language. This is no genuine way out, since we do not know how far the mathematical language can be applied to the phenomena. In the last resort, even science must rely upon ordinary language, since it is the only language in which we can be sure of really grasping the phenomena.²⁵⁴

Le fait de devoir faire usage de langages différents est souvent problématique pour le physicien. Comme le remarquait De Koninck: "scientists are most often bewildering because they use words where there is no need for them, when they should stick to their symbols; and where words in fact turn out to be as meaningless as some of them say they are."²⁵⁵ Quelqu'un, par exemple, qui tenterait d'expliquer les paradoxes de la relativité restreinte en faisant appel aux mots "passé", "présent" et "futur", générerait une très grande confusion chez ses auditeurs. Dans un tel cas, il est beaucoup plus simple de se contenter des mathématiques associées à la théorie que d'essayer d'exprimer nos résultats à l'aide du langage ordinaire. De Koninck avait donc raison d'affirmer que: "There are large areas of science where 'natural language,' as distinguished from symbolic constructions, proves a genuine hindrance, and is even utterly hopeless."²⁵⁶

De même, plusieurs confusions peuvent venir du fait que le langage scientifique utilise fréquemment les mêmes mots que le langage ordinaire. Heisenberg avait d'ailleurs vaguement entrevu cette situation dans "Natural Law and the Structure of Matter" où il décrit la difficulté

²⁵⁴Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p.119-120.

²⁵⁵Charles De Koninck, *The Hollow Universe*, p. 60.

²⁵⁶Charles De Koninck, "Metaphysics and the Interpretation of Words", p.23.

soulevée par l'utilisation du langage ordinaire et du langage scientifique (qu'il confond cependant ici avec le langage symbolique des mathématiques):

This necessity of constantly shuttling between the two languages [the natural language everyone can understand and the abstract mathematical language] is unfortunately a chronic source of misunderstandings, since in many cases the same words are employed in both. The difficulty is unavoidable. But it may yet be of some help always to bear in mind that modern science is obliged to make use of both languages, that the same word may have very different meanings in each of them, that different criteria of truth apply and that one should not therefore talk too hastily of contradictions.²⁵⁷

La sentence est sans appel: le physicien, s'il veut faire progresser sa science doit utiliser avec perspicacité les trois langages qui s'offrent à lui. Chacun d'eux est un instrument ayant une fonction qui lui est propre et se priver de l'un d'eux ne pourrait que nuire au développement de la physique.

²⁵⁷Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, p. 120.

Conclusion

La physique moderne vise trois objectifs différents mais complémentaires dans sa pratique: l'accumulation de données sur le monde physique, la recherche d'un ordre dans ces données menant ultimement au développement de lois et de théories et, finalement, le développement d'applications pratiques à partir de ces lois. Sans aucun doute, c'est la question de la recherche d'ordre dans la nature qui a retenue le plus l'attention de Heisenberg pour qui elle se divisait en deux actions différentes: la description et la compréhension de la nature. La distinction entre ces deux actions n'est cependant pas aussi claire que le croit le physicien allemand puisque la compréhension en physique théorique, tout comme la description, semble consister en la déduction de phénomènes particuliers à partir d'une structure mathématique et conceptuelle. La distinction entre les deux, nous dit Heisenberg, tient au fait que, dans les théories physiques purement déductives, les relations à partir desquelles sont déduits les événements physiques ne font pas appel à des concepts nous permettant de saisir les lois fondamentales de la nature. Comment alors savoir quand sont effectivement découverts les "bons" concepts? Par la simplicité dont ils font preuve comparativement à la complexité des phénomènes qu'ils permettent d'expliquer, nous réponds Heisenberg. Mais nous sommes obligés d'admettre que ce critère, quoiqu'important, n'est pas suffisant pour nous permettre de déterminer de façon impartiale si une théorie nous donne ou non une véritable compréhension de la réalité. D'ailleurs, cette séparation des théories physiques en deux catégories distinctes que propose Heisenberg est quelque peu problématique. En effet, comme il semble toujours possible de trouver une théorie plus simple, décrivant des ensembles de phénomènes plus vastes, on semble devoir conclure qu'aucune théorie n'a encore trouvé les "bons concepts" ou ne fait encore appel aux véritables lois de la nature. La mécanique classique a beau être une théorie cohérente et complète, il n'en demeure pas moins que la théorie de la relativité a infirmé ses principes. Il semble plus raisonnable de penser que les diverses théories de la physique peuvent nous permettre de saisir la nature à différents degrés plutôt que de croire que ces dernières peuvent être séparées en théories phénoménologiques d'une part et théories nous donnant une compréhension de la réalité d'autre part. Cela n'empêche pas la physique de contenir un certain nombre de théories, comme la mécanique classique, l'électromagnétisme et la physique

quantique, qui permettent de synthétiser, à l'aide d'un nombre restreint de lois et de concepts, la connaissance acquise dans de vastes domaines d'expériences, donnant ainsi l'impression d'avoir saisi quelque loi fondamentale de la nature. Mais ces théories, nous semble-t-il, ne sont que des "arrêts" dans notre cheminement vers la compréhension de la nature et sont appelées, dans un futur plus ou moins lointain, à être, sinon remplacées, du moins expliquées, par de nouvelles théories plus générales.

Afin d'exprimer et surtout de formuler les connaissances acquises tout au long de cette poursuite de la compréhension, la physique devra faire appel à trois langages différents: le langage ordinaire, le langage scientifique et, finalement, le langage symbolique des mathématiques. L'usage des mathématiques s'impose en physique si l'on désire déduire les phénomènes non seulement de manière qualitative mais aussi de manière quantitative. Seules ces dernières peuvent en effet fournir la précision et la justesse nécessaires à une telle opération. Cependant, toute théorie physique, si elle veut nous donner une véritable compréhension du monde, doit se baser également sur l'expérience. Or, comme l'a remarqué Heisenberg, si on veut élaborer une science claire et précise, il est absolument nécessaire de pouvoir décrire nos expériences à l'aide de termes non ambigus. La solution consiste, selon lui, dans l'utilisation du langage de la mécanique classique, qu'il considère être une extension et une précision du langage ordinaire, lequel est trop vague pour rendre compte des diverses situations expérimentales avec exactitude. À ce langage scientifique de base viennent par la suite se greffer, selon Heisenberg, d'autres mots, créés au cours du développement de la physique afin de décrire les nouvelles réalités scientifiques.

Comme nous l'avons vu, certaines nuances doivent cependant être apportées à cette première attribution des rôles aux différents langages de la physique. Heisenberg a eu raison d'affirmer que, pour se développer, la physique doit faire appel à un langage stable, commun à tous les scientifiques: le langage ordinaire. Il a cependant confondu ce dernier avec le langage scientifique de la théorie newtonienne. En effet, en examinant les termes propres à cette théorie, on constate qu'il ne peut s'agir de mots appartenant au langage ordinaire. Alors que les mots utilisés quotidiennement sont définis à partir de l'expérience commune et peuvent

acquérir de nouvelles significations tout en conservant leur sens originel, les termes de la mécanique newtonienne sont définis à partir d'expériences particulières et n'acceptent chacun qu'une seule signification, laquelle ne peut être modifiée sans mettre en péril l'ensemble de la théorie mécanique. Le langage ordinaire, quoiqu'à la base de toute connaissance physique, n'est cependant pas assez précis pour permettre à lui seul le développement de cette science exacte. C'est pourquoi les physiciens doivent développer, tout au long de leurs recherches, un langage scientifique dont les mots sont clairement définis et qui nous permettent de parler des mesures, des entités théoriques ou encore des instruments scientifiques qui ne sont pas du domaine du langage ordinaire. Qui plus est, afin de déduire avec précision un fait particulier à partir d'une loi générale, le physicien doit faire appel aux mathématiques. Ces dernières assurent également la cohérence des divers systèmes théoriques de la physique en permettant d'établir, à l'aide d'équations, les relations existant entre les différents concepts scientifiques. Mais plus qu'un simple outil permettant de vérifier la cohérence des théories physiques, les équations mathématiques paraissent décrire des relations existant bel et bien entre les divers objets physiques. À travers ce que Heisenberg appelle leur "activité d'agencer", les mathématiques rendent possible le développement de nouveaux concepts, souvent très abstraits, lesquels nous permettent d'atteindre une certaine compréhension du monde. Ainsi, dans le développement des structures conceptuelles et mathématiques à partir desquels nous parvenons à déduire les phénomènes physiques, les mathématiques ont, tout comme le langage ordinaire et le langage scientifique, une fonction à remplir qui leur est propre et sans laquelle le développement de la physique serait compromis.

Ces différentes notions de concepts, mots, compréhension et description, ainsi que les fonctions des trois langages de la physique demeurent malgré tout vagues dans la pensée de Heisenberg et il serait ardu de tenter de les définir davantage uniquement à l'aide des propos tenus par ce dernier. Cette difficulté est d'ailleurs, selon nous, le signe que la question de la fonction du langage dans l'atteinte de la compréhension en physique est loin d'être simple et que, conséquemment, il nous faut être prudents dans notre approche de ce problème. La plus grande leçon que nous devons tirer de cette étude du rôle du langage en physique en est donc une de prudence, comme l'avait bien compris Heisenberg. "The chief profit we can derive in these

problems from the progress of modern science". écrivait-il dans "Natural Law and the Structure of Matter", "is to learn how cautious we have to be with language and with the meaning of words."²⁵⁸ Une mise en garde qui prend tout son sens dans une science comme la physique actuelle, traitant de choses de plus en plus éloignées de notre expérience quotidienne et usant de concepts de plus en plus abstraits.

²⁵⁸Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*. p.118.

Bibliographie

1. Oeuvres de Werner Heisenberg

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, la pensée philosophique de Heisenberg s'est développée et s'est modifiée au cours des années. Nous avons donc cru pertinent de présenter par ordre chronologique les oeuvres de Heisenberg que nous avons consultées (L'année de parution originale des textes apparaît entre crochets, la référence suivant le titre est celle de la version utilisée). Les textes originaux de Heisenberg peuvent être consultés dans ses oeuvres complètes (*Gesammelte Werke*) dont on trouvera la référence ci-dessous. Ceux-ci sont principalement en allemand, quelques fois en anglais. Lorsque des traductions ont été utilisées, le titre original est indiqué entre parenthèse.

- [1927] "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik*, vol 43, 23 mars 1927, pp. 172-198
- [1930] *The Philosophical Principles of the Quantum Theory*, (*Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*), New York: Dover Publications, 1949.
- [1935] *Philosophic Problems of Nuclear Science* (*Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*), traduction de F. C. Hayes, London: Faber and Faber Ltd, 1952, 126 p.
- [1942] *Ordnung der Wirklichkeit in Gesammelte Werke*, Abt. C. Band I, pp. 217-306. Une traduction française a aussi été réalisée par Catherine Chevalley et publié sous le titre *Philosophie. Le manuscrit de 1942*. Paris: Seuil, 1998, 490 p.
- [1953] *La nature dans la physique contemporaine*, traduction de Ugné Karvelis et A.E. Leroy, Paris: Gallimard, 1962, 192 p.
- [1956] *Physics and Philosophy*, New York: Harper & Brothers Publishers, 1958, 206p.
- [1960] "Sprache und Wirklichkeit in der Modernen Physik", in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band II, pp.271-301
- [1964] "Quantum theory and its interpretations" ("Errinerungen an Niels Bohr aus den Jahren 1922-1927") (extraits), in *Quantum Theory and Measurement* (voir référence ci-dessous).
- [1964] "The Philosophical Background of Modern Physics", in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band III, pp.496-506.

- [1965] "Über den Formenreichtum in der mathematischen Naturwissenschaft". in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band II, pp.379-383.
- [1966] "Die Rolle der phänomenologischen Theorien im System der Theoretischen Physik". in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band II, pp.384-387.
- [1968] "Theory, criticism and a philosophy", in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band II, pp.423-438.
- [1969] *La partie et le tout. (Le monde de la physique atomique. Souvenirs 1920-1965) (Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik)*, traduction de Paul Kessler, Paris: Éditions Albin Michel. 1972, 335p.
- [1969] "The Concept of "Understanding" in Theoretical Physics", in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band III, pp. 335-338
- [1969] "Zur Sprache der Quantentheorie". in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band III, pp 339-340.
- [1971] *Across the Frontiers (Schritte über Grenzen)*, traduction de Peter Heath, Woodbridge, Connecticut: Ox Bow Press, 1990, 229 p.
- [1975] "Bemerkung über die Entstehung der Unbestimmtheitsrelation", in *Gesammelte Werke*, Abt C, Band III, pp. 514-517.
- [1975] "The Development of Concepts in Physics of the 20th Century", in *Gesammelte Werke*, Abt. C, Band III, pp. 447-463.
- [1977] *Tradition in Science*, traduction des textes allemands de Peter Heath, New York: Seabury Press, 1983, 141 p.

Volumes des oeuvres complètes consultés

Gesammelte Werke, éditeurs Walter Blum, Hans-Peter Dürr et Helmut Rechenberg.

Berlin: Springer-Verlag pour les séries A (Wissenschaftliche Originalarbeiten) et B (Wissenschaftliche Übersichtsartikel, Vorträge und Bücher).

Munich: Piper Verlag pour la série C (Allgemeinverständliche Schriften) dont les trois volumes suivant ont été consultés pour cette étude:

Band I: Physik und Erkenntnis 1927-1955

Band II: Physik und Erkenntnis 1956-1968

Band II: Physik und Erkenntnis 1969-1976

2. Éléments bibliographiques

CASSIDY, David C. et BAKER, Martha, *Werner Heisenberg. A Bibliography of his Writings*, Berkeley Papers in History of Science IX, Berkeley: Office for History of Science and Technology, University of California. 1984, 153 p.

3. Biographies de Heisenberg

CASSIDY, David C., "Heisenberg, Werner Karl", *Dictionary of Scientific Biography*, vol 17 supplément II, Frederic L. Holmes éd., New York: Leason Heberling Adams - Fritz H. Laves-Charles Scribner's sons. 1990, pp.394-403

CASSIDY, David C., *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*, New York: W.H. Freeman and Company, 1992, 669 p.

CASSIDY, David C., "Werner Heisenberg et le principe d'incertitude", *Pour la science*, no 177, juillet 1992, pp.86-92

HEELAN, Patrick A., "Heisenberg", *The New Encyclopaedia Britannica*. 15e édition, vol. 20 Macropaedia. Chicago. 1995, pp.498-499

NEWTON, David E., "Werner Karl Heisenberg", *Notable Twentieth-Century Scientists*, vol. 2, Emily J. McMurray éd., New York: Gale Research Inc., 1995, pp.890-893

4. Autres ouvrages consultés

a. Livres

AUGUSTIN. *Les confessions*, traduction, préface et notes par J. Trabucco. Paris: Garnier-Flammarion. 1964. 381p.

BOHR, Niels. *Atomic Theory and the Description of Nature*. Woodbridge, Connecticut: Ox Bow Press, 1987. 199 p.

BROGLIE, Louis de. *Sur les sentiers de la science*. Paris: Éditions Albin Michel. 417 p., 1960.

CHALMERS, Alan F., *Qu'est-ce que la science?*, Paris: Éditions la Découverte, 1987, 285 p.

CHEVALLEY, Catherine. Introduction et traduction d'un manuscrit de Heisenberg paru sous le titre *Philosophie. Le manuscrit de 1942*, Paris: Éditions du Seuil, coll. Sources du Savoir. 1998

DUHEM, Pierre. *La Théorie physique*, 2e édition revue et augmentée, Paris: Vrin. 1981, 524p.

EDDINGTON, Arthur. *The Philosophy of Physical Science*. Ann Arbor Paper Back; The University of Michigan Press, 1958

EINSTEIN, Albert, *Comment je vois le monde*, traduction de Maurice Solovine, Paris: Flammarion. 1958, 218 p.

- EINSTEIN, Albert, *Conceptions scientifiques*. Paris: Flammarion. 1990. 188 p.
- EINSTEIN, Albert et INFELD, Léopold, *L'évolution des idées en physique*. Paris: Flammarion, 1983, 280p.
- EINSTEIN, Alberg, *La relativité*. Paris: Petite bibliothèque Payot. 184 p., 1956.
- EINSTEIN, Albert, *Oeuvres choisies*, Tome 5: Science, éthique, philosophie. Textes choisis et présentés par Jacques Merleau-Ponty et Françoise Balibar. Éditions du Seuil. Éditions du CNRS, janvier 1991
- EISBERG, Robert et RESNICK, Robert, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. 2e édition. New York: John Wiley & Sons, 1985, 713 p.
- ESPAGNAT, Bernard d', *À la recherche du réel. Le regard d'un physicien*. Paris: Gauthier-Villars, 1980, 175 p.
- HAAG, Rudolf, *Local Quantum Physics*, 2nd Revised and Enlarged Edition. Springer, 1992.
- HOFFMAN, Banesh et PATY, Michel, *L'étrange histoire des quanta*. Points Science. Paris: Éditions du Seuil, 1981, 281 p.
- KUHN, Thomas S., *The Copernican Revolution* (7e impression), Cambridge, Massacusetts: Harvard University Press. ©1957. 297 p.
- LEWIS, C.S., *The Four Loves*, p.10, Londres: Geoffrey Bles. 1960.
- MEYERSON, Émile, *Identité et réalité*, Paris: Librairie Félix Alcan. 1926, 571 p.
- MURRAY, Warren, *Thèmes en philosophie des sciences*. Les éditions du Patrimoine - S.E.A., 1995.
- PLANCK, Max. *Scientific Autobiography and Other Papers*. New York: Philosophical Library, 1949, 192p.
- RUSSELL, Bertrand, *Human Knowledge. Its Scope and Limits*. London: George Allen and Unwin Ltd. 1948. 538 p.
- SHAKESPEARE, William. *The Tempest*. Paris:GF-Flammarion. 1991.285p.
- TREFIL, James S., *From Atoms to Quarks*, New York: Charles Scribners's sons. 1980, 225 p.
- VAN WYLEN, Gordon J.et SONNTAG, Richard E., *Thermodynamique appliquée*, 2e édition, traduction de Pierre Desrochers. Montréal: Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 1992, 781 p.
- WEBER, Max. *Le savant et le politique*, traduction de Julien Freund, Paris: Plon. 1959, 186 p.
- WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von, *The Unity of Nature*, traduction de Francis J. Zucker, New York: Farrar, Straus and Giroux, Inc., 1980, 406 p.

Quantum Theory and Measurement. John Archibald Wheeler et Wojciech Hubert Zurek éd., Princeton Series in Physics, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1983, 811 p. (Ce recueil contient notamment une traduction anglaise de l'article de Heisenberg sur les relations d'indétermination: "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik")

2./Articles

DE KONINCK, Charles, "Abstraction from Matter". Extrait du *Laval théologique et philosophique*", Vol XVI, 1960, no 1 et no 2. Québec: Presses de l'Université Laval, 40 p.

DE KONINCK, Charles. "Le langage philosophique", *Laval théologique et philosophique*". Vol XX, no 2, pp. 205-213

DE KONINCK, Charles, "Random Reflections on Science and Calculation", *Laval théologique et philosophique*". Vol XII, 1956, no 1. pp. 84-119.

DE KONINCK, Charles, "Three sources of philosophy", reprinted from the *Proceedings of the American Catholic Philosophical Association*, Washington D.C.: The Catholic University of America, 1964.

HEELAN, Patrick A., "Heisenberg and radical theoretic change", *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*". VI. 1, 1975, pp.113-136; 138. Commentaire de Heisenberg, p.137.

3./Ouvrages généraux

LALANDE, André, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, Paris: Presses Universitaires de France. 1947.

Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, Herausgegeben von Jürgen Mittelstraß. Stuttgart: Verlag J.B. Metzler. 1996.

Routledge Encyclopedia of Philosophy, General Editor Edward Craig, London: Routledge, 1998.