

CHAPITRE V¹

A PROPOS DES OPERATIONS THEORICO-PRATIQUES DE TRAITEMENT DU REEL :

MESURE

Dans la mesure même où les activités de recherches disciplinaires visent à la connaissance du réel (fût-il construit) et à l'action sur lui, il est clair qu'elles ne peuvent le plus souvent se cantonner à une approche purement théorique qui risquerait de ne rester que spéculative : la méthode scientifique comporte une composante essentielle de nature expérimentale et observationnelle (quand bien même cette composante demeurerait masquée ou devrait être interprétée en un sens particulier suivant les spécificités de la discipline, comme cela peut être le cas en mathématiques ou en philosophie par exemple). Comme nous aborderons brièvement, sous cet angle, au chapitre suivant (paragraphe 3.3.), l'analyse très générale des couples conceptuels théorique/expérimental ou théorique/observationnel, nous ne nous y étendrons pas ici. Nous nous limiterons dans ce chapitre, par souci de précision et d'approfondissement, à considérer la détermination et le fonctionnement selon les secteurs disciplinaires, du seul concept de **mesure**, déjà extrêmement riche par lui-même.

Le premier paragraphe aura pour objet de caractériser (et de distinguer) ce que l'on entend par *mesure* selon qu'il s'agit des mathématiques ou des sciences de la nature, notamment de la physique ; à cette occasion nous serons conduits à développer (paragraphe 2) une réflexion sur ce que recouvrent les concepts d'**observabilité** et d'**inobservabilité** physiques. Le troisième paragraphe tentera d'explicitier les présupposés théoriques associés aux opérations de mesure dans ces domaines disciplinaires et les conditions de possibilité de ces opérations, que celles-ci soient abstraites ou concrètes ; nous serons alors conduits à étendre la discussion aux cas des disciplines biologiques, voire de sciences sociales.

1. MESURES MATHÉMATIQUES, MESURES PHYSIQUES

En mathématiques, le concept de mesure ne prête pas à ambiguïté, même s'il existe, techniquement parlant, plusieurs façons de définir des mesures mathématiques particulières (par exemple, les intégrales de Riemann, ou la mesure de Lebesgue, ou de Radon, etc.) : il s'agit toujours d'un objet construit à propos d'autres objets construits. Intuitivement, cela concerne la détermination de certaines propriétés ou attributs métriques d'objets mathématiques : la longueur d'une courbe, l'aire d'une surface, la mesure d'un ensemble. Théoriquement, la mesure répond à une axiomatique précise et elle est toujours définie sur un *espace* (espace "usuel", espace fonctionnel, espace de probabilité, ensemble...). Certaines considérations d'ensembles particuliers peuvent d'ailleurs conduire à des situations tout à fait contre-intuitives, voire paradoxales (par exemple s'il s'agit d'ensembles fractals à la Cantor ou d'ensembles de Julia [1] ou encore s'il s'agit des mesures associées à des opérations de découpages de sphères du type Hahn-Banach [2], dont on montre qu'à partir d'une sphère on peut en construire deux, sans perte ni sans reste !). Il faut donc prendre de grandes précautions conceptuelles et théoriques dans le maniement opératoire (et *a fortiori*, discursif) du concept. En tout état de cause, la théorie mathématique de la mesure constitue un domaine bien spécifié, particulièrement élaboré et délicat, des mathématiques et dont les applications dans les sciences de la nature sont parfois, comme nous le verrons, tout à fait essentielles, y compris dans ces aspects contre-intuitifs.

Par contraste avec la mesure en mathématiques, la mesure physique concerne moins un objet donné que le *rappor*t entre cet objet et l'observateur qui cherche à en connaître les propriétés : il s'agit moins d'une définition et d'un calcul que d'une *action* sur l'objet d'expérience ou d'observation. En cela, l'opération de mesure représente une modalité essentielle du rapport général entre théorie et pratique dans le domaine scientifique.

¹ Ce chapitre est entièrement nouveau par rapport à la publication de 1991 (R.I.S.).

Qui dit rapport dit aussi précautions à prendre pour ne pas en altérer la signification et l'interprétation. Comme dans le cas des mathématiques ces précautions sont d'ordre théorique (cf. en particulier tout le domaine de la métrologie), mais en plus elles doivent ici être très concrètes. Mais elles ne sont pas identiques quel que soit le secteur de la physique qui les appelle.

En physique classique où l'objectivité de l'objet soulève moins de difficultés théoriques et conceptuelles qu'en physique quantique, on prendra en compte principalement des qualités relatives à l'instrument de la mesure (précision, fidélité, exactitude...) bien plus que des propriétés qui concerneraient l'objet lui-même.

En physique quantique, en revanche, on devra tenir compte de la spécificité du problème physique qui fait l'objet de la mesure (par exemple en rapport avec les relations d'indéterminations de Heisenberg qui concernent des variables conjuguées¹ et du rôle physique *interne* au problème (que sont censés manifester les résultats de la mesure) de la réalisation des interactions entre observateur et objet de la mesure (ce qu'on appelle "réduction du paquet d'onde" ou "projection du vecteur d'état"). Ce sont ces conditions très spéciales qui régissent le statut théorique intrinsèque de la mesure en physique quantique qui donnent naissance aux débats sur le caractère "non causal" (relativement au système quantique lui-même) de cette mesure, ou encore aux paradoxes du type EPR [3]. Ce que manifestent le plus spectaculairement les propriétés de *non séparabilité* de l'objet quantique [4].

A la limite, on peut dire qu'en physique quantique la mesure revêt un aspect *constitutif* de l'objet quantique observé et que celui-ci n'apparaît que comme actualisation seconde (de par la mesure) par rapport à une virtualité première que représente l'*observable* quantique (ce terme sera plus largement discuté dans le paragraphe suivant ; il s'agit d'un opérateur - mathématique - auto adjoint sur un espace de Hilbert).

Mais ce n'est pas que dans le domaine de la technicité quantique que se pose la question de l'observabilité ou de la non observabilité physique. La question de la mesure introduit tout naturellement à ce thème, et c'est celui que nous voulons maintenant aborder.

2. OBSERVABILITE ET INOBSERVABILITE EN PHYSIQUE

2.1. Les termes d'observables ou d'inobservables revêtent en physique des significations suffisamment différentes et variées selon le contexte de leur emploi pour qu'il soit nécessaire de commencer par une brève présentation avant d'engager la discussion sur leur statut et sur leur rôle théorique ou épistémologique.

(i) Pour commencer, il y a l'utilisation du terme dans le sens habituel du langage courant : des entités physiques dont l'existence est supposée ou postulée peuvent être inobservables pour des raisons de difficultés techniques, comme ce fut le cas, par exemple pour les atomes (en tant qu'entités proprement physiques et non plus métaphysiques) à l'époque où Boltzmann formulait sa théorie cinétique des gaz. Dans ce cas, on peut espérer qu'une amélioration des techniques permettra une mesure et une observabilité future, pour autant, bien entendu, que les postulats d'existence soient vérifiés.

(ii) A un second niveau, toujours dans le domaine de l'analyse de l'objectivité physique et de la mesure qui l'accompagne, il peut exister des situations d'inobservabilité théorique, liées à la nature même des entités considérées. Pour reprendre un exemple déjà utilisé, à propos de la mesure proprement dite, il n'est par principe pas possible d'observer simultanément, avec une précision arbitraire, la vitesse et la position de particules quantiques (inégalités de Heisenberg) ; de même, il n'est, par principe, pas possible, en cosmologie, d'observer directement un trou noir, même si on peut en déceler les effets sur son environnement. On peut aussi ranger dans cette catégorie des objets effectivement existants et néanmoins théoriquement inobservables tous ceux qui se révèlent structurellement instables (tels des états dynamiques d'équilibre sensibles aux conditions initiales, par

¹ Si A et B sont des variables conjuguées au sens de la théorie quantique (correspondant à des observables qui ne commutent pas), on sait que les précisions des mesures simultanées sur chacune de ces variables, dA et dB , sont telles que leur produit est, en gros, supérieur à la constante de Planck h , c'est-à-dire que l'on a : $dA dB > h$.

exemple). Dans tous ces cas, ce sont les conditions mêmes de construction des objectivités physiques qui comportent l'interdiction théorique de certaines observabilités.

(iii) Troisièmement, et l'on voit que le point de vue est très différent, il y aura dans le cadre de la technicité physique elle-même, les *observables* de la physique quantique que nous venons de mentionner, ces opérateurs mathématiques auto adjoints, définis dans un espace de Hilbert ; ils se présentent comme des êtres à partir desquels les effets proprement physiques pourront se manifester (toujours par le biais de la mesure physique) sous forme de réalisation statistique des valeurs propres de ces opérateurs. Sous cet angle l'observable physique renvoie métaphoriquement à ce qui en effet est susceptible d'une observation au sens plus habituel, c'est-à-dire d'une mesure, mais en fait il s'agit d'entités purement théoriques et de nature strictement mathématique.

(iv) Enfin, en nous plaçant dans une perspective plus épistémologique, cette fois, on soulignera le rôle et l'importance de l'expression de certaines inobservabilités de principe, sous la forme de principes de relativité. En effet, l'existence d'invariances sous des opérations de symétries et des groupes de relativité exprime sans aucun doute des restrictions formelles à certaines possibilités d'observation (par exemple une invariance de translation dans le temps ou dans l'espace implique l'incapacité de fixer une origine absolue des temps ou la définition d'une vitesse absolue) ; invariances, théories de jauge, groupe de relativité fixent les limites de la connaissance que l'on peut avoir d'un système et des quantités que l'on peut mesurer et observer. L'extraordinaire, épistémologiquement parlant, tient au fait que ce sont précisément ces principes de relativité, et donc ces limites imposées à l'observation qui contribuent à *déterminer*, en un sens très fort, les objectivités physiques qui y obéissent [5]. En effet, le théorème de Noether associe à chaque type d'invariance ainsi imposée la conservation de grandeurs physiques qui constituent les éléments mêmes de la réalité physique, de la mesure, de l'observation. Ainsi, par exemple, à l'invariance de translation dans le temps est associée la conservation de l'énergie ; à l'invariance de la translation dans l'espace, la conservation de la quantité de mouvement, à l'invariance dans le changement global de phase en mécanique quantique (impossibilité de fixer - d'observer - une origine absolue des phases), la conservation de la charge électrique, etc. Dans ce cas, on pourrait presque dire que, paradoxalement, c'est la condition d'inobservabilité de principe de certaines grandeurs qui conduit à la caractérisation réelle du système physique et de ses grandeurs observables.

Dans ce qui suit, nous nous attacherons principalement à la discussion de ces différents aspects et, à l'occasion, des modes plus ou moins implicites de relations causales qui peuvent y être rattachés. Mais avant de passer à un examen plus approfondi il peut se révéler intéressant et pertinent, d'un point de vue conceptuel, de procéder à une brève réflexion sur ce que l'on pourrait presque appeler une observabilité des êtres mathématiques ou logiques eux-mêmes, telle qu'elle semble surgir relativement "naturellement" de la théorie des modèles.

On sait, en effet [6], qu'une axiomatique donnée (par exemple l'axiomatique de Peano pour l'arithmétique, dans la logique des prédicats du premier ordre) peut donner naissance (pour des raisons de non catégoricité ou d'incomplétude) aussi bien à des modèles non standard qu'à des modèles standard. Sans entrer dans les détails, le point important que nous voulons souligner ici tient au fait qu'il existe dans les modèles non standard des constantes (des êtres mathématiques) que le modèle standard ne sait ni discerner ni, donc, "nommer". Ces constantes peuvent être considérées sans excessif abus de langage comme des "inobservables" pour le modèle standard, inobservables que le modèle non standard permet pour sa part de caractériser et d'"observer". Il est alors intéressant de remarquer que cette observabilité nouvelle s'accompagne, selon l'approche qui a permis l'introduction du modèle non standard, soit d'un changement syntaxique (introduction d'un nouveau prédicat unaire "st"), soit d'un "élargissement" (au sens technique du terme) de l'univers sémantique de référence, c'est à dire soit d'une modification de la structure du langage formel, soit d'une modification de l'ontologie de l'univers de référence.

2.2. Revenons maintenant, pour les discuter brièvement, sur chacune des configurations que nous venons d'évoquer.

(i) La première situation est la plus classique et elle a fait l'objet de bien des analyses épistémologiques, aussi ne nous y étendrons-nous pas longuement. Soulignons simplement le rôle que la postulation de l'existence de certaines entités physiques peut jouer dans la modélisation, puis dans la formalisation de la réalité physique. Ces entités peuvent être conçues comme réelles (et se présentant à ce titre comme des objets valides d'une recherche visant à les mettre en évidence) ou comme métaphoriques (supports heuristiques à l'imagination et au raisonnement, visant à produire une représentation adéquate des phénomènes réels dont il convient par ailleurs de découvrir la nature) par ceux qui les introduisent.

Ainsi, dans le premier registre, on peut citer les longs débats des physiciens de l'optique sur le caractère ondulatoire ou corpusculaire de la lumière (débat laissé longtemps en suspens, jusqu'à la construction des théories quantiques). Sur un terrain comparable on peut aussi rappeler la violente controverse, à la fin du XIX^{ème} siècle, entre Boltzmann et Ostwald notamment sur la question de l'existence objective des atomes. On peut dire dans une certaine mesure, qu'à cet égard, jusqu'à l'avènement des théories modernes (relativité, physique quantique), il pouvait y avoir une plus ou moins grande coïncidence entre la recherche de la démonstration de l'existence effective de ces entités et l'expérimentation physique visant à les observer. Il est significatif que ce soit finalement la situation paradoxale engendrée par la capacité d'observer et de mesurer des propriétés envisagées comme mutuellement exclusives (ondes ou corpuscules, par exemple) qui ait ouvert la porte à des théories non classiques, beaucoup moins intuitives que les précédentes et relativement auxquelles le statut de l'observation et de la mesure devait profondément changer. On remarquera que ce genre d'approche privilégiée, du point de vue de la représentation causale, tout ce qui relève des *causalités matérielles et efficaces* (pour reprendre les vieilles catégorisations), que l'on cherche à observer des objets réels ou que l'on cherche à identifier des interactions à travers les effets desquelles il se peuvent se manifester.

Sous le second aspect, on peut mentionner les représentations heuristiques que l'on pouvait se faire de l'éther ou de résonateurs électro-magnétiques, ou de "masses invisibles", en cherchant à en dégager des structures formelles plus qu'à mettre en évidence une réalité que l'on savait métaphorique. De ce point de vue, le statut de l'observabilité était reporté aux conséquences pratiques que l'on pouvait inférer du fonctionnement des modèles bien plus qu'à l'identification des éléments et interactions entrant comme ingrédients dans ces modèles. La démarche à cet égard se comparerait alors un peu à la situation contemporaine, à ceci près, qui reste essentiel, que les modèles en question s'appuient aujourd'hui principalement sur la postulation de structures mathématiques (groupes de relativité, symétries) bien plus que sur une représentation plus ou moins substantielle ou mécaniste d'objets et d'interactions. Néanmoins on peut noter qu'avec ce souci modélisateur et malgré ces profondes différences, on tend à se rapprocher du fonctionnement d'une causalité formelle, telle que nous la verrons opérer à plein dans les constructions théoriques les plus récentes (voir paragraphe 2.4.). Dès lors ce qui tombe dans le champ de l'observabilité est censé relever des conséquences que l'on peut en tirer plus que de l'identification matérielle et substantielle des sources qu'on peut leur prêter.

(ii) Sur ce dernier point, la situation est encore plus spectaculaire lorsqu'il s'agit de rechercher des conséquences, des effets caractéristiques, qui justifieraient des hypothèses théoriques relatives à l'existence de certains objets dont la théorie elle-même les voue à ne pas être "observables" au sens classique, c'est-à-dire directement, dans leur identité propre. Ainsi en va-t-il, avons-nous vu, des trous noirs en cosmologie, par exemple, ou de la mesure simultanée de certaines grandeurs en physique quantique. Référencer à de tels concepts, c'est se placer dans la position paradoxale de construire une objectivité condamnée à ne pouvoir accéder directement aux objets ainsi construits.

Le trou noir n'est, quasiment par définition, pas observable comme tel puisque tout moyen d'observation, fût-ce le plus fin et le plus immatériel comme l'est la lumière, est destiné à être capté par lui dès qu'il entre dans son champ d'attraction. Le plus que l'on puisse observer d'un trou noir est donc, à distance, la matière qu'il perturbe en l'aspirant. C'est donc seulement par une inférence abstraite que l'on peut conclure qu'il y a là un "objet" qui cause ces effets, effets dont nous devons nous contenter pour décider s'il s'agit ou non de ceux que l'on peut attendre de l'objet théoriquement construit.

Dans un autre registre, un état dynamique d'équilibre peut bien éventuellement exister théoriquement (voire pratiquement sous certaines conditions de contraintes imposées *ad hoc*) et pourtant se révéler complètement inobservable selon les critères d'observabilité des phénomènes dans lesquels il peut apparaître, s'il est fondamentalement instable. Ainsi, par exemple, un crayon à la pointe extrêmement fine peut bien posséder, s'il présente les conditions de symétrie requises, l'état d'équilibre correspondant au fait qu'il peut reposer verticalement sur sa pointe, l'instabilité foncière d'un tel état interdira qu'on puisse jamais l'observer dans l'expérience (à la limite les fluctuations quantiques *intrinsèques* à tout objet l'interdiront).

De façon similaire, bien que nous plaçant dans un tout autre paysage conceptuel, il en va de même, avons-nous vu, de la mesure simultanée, avec une précision arbitraire, de variables conjuguées telles, par exemple, la vitesse et la position d'une particule quantique : les inégalités de Heisenberg s'y opposent strictement. Dans ce cas, les contraintes d'inobservabilité pèsent sur une corrélation de deux mesures, corrélation que les théories classiques considèrent comme inexistante : les mobiles classiques ont une vitesse et une position séparément bien déterminées et leurs mesures opèrent en principe indépendamment l'une de l'autre. En fait, comme l'on sait, c'est la notion même de "particule" qui, dans ce cas, se trouve subvertie au profit de l'introduction d'une entité bien moins intuitive, le quanton, dont les réponses aux sollicitations expérimentales peuvent varier d'un comportement de type corpusculaire (effet photo-électrique, par exemple) à un comportement de type ondulatoire (interférences, par exemple). Si l'on s'obstine à raisonner selon les catégories classiques on en arrive à une situation épistémologiquement intenable : ce que l'on observe semble changer de nature selon le moyen d'investigation (la réponse dépend de la façon de poser la question) et le terme d'observabilité est désormais couplé à la désignation de ce sur quoi elle porte et des méthodes utilisées pour la réaliser.

(iii) Examinons maintenant de façon un peu plus détaillée que précédemment une autre situation qui se présente spécifiquement dans la physique quantique et dans laquelle le terme d'"observable" revêt un sens technique, totalement intra-théorique. Dans ce cas, nous sommes confrontés à une sorte de dédoublement du champ théorique. En effet, les univers d'objets que ces théories considèrent se dédoublent, pour ainsi dire, entre un univers d'objets que l'on peut qualifier de **virtuels** - interactions et éléments sur lesquels portent en général les équations d'évolution (et qui correspondent à des ensembles de cardinalité continue : fonctions d'ondes, potentiels, par exemple) - et un univers **des valeurs d'observables** à quoi seul accède la mesure (et qui, généralement, constituent des ensembles dénombrables, le plus souvent discrets dans les cas typiques)¹.

Les observables elles-mêmes sont donc représentées par certains opérateurs pourvus de propriétés mathématiques particulières et opérant dans un espace mathématique abstrait, bien caractérisé mais sans contrepartie dans la réalité physique proprement dite. S'il est essentiel de rappeler que l'introduction de ce genre de distinction entre objets théoriques est étroitement associée à l'analyse de l'opération de mesure quantique et du rôle, en ce sens, de l'observateur, il est également important de souligner que toutes virtuelles ou "inobservables" que demeurent les entités à partir desquelles on définit les phénomènes et on décrit les processus, elles n'en demeurent pas moins indispensables pour permettre les calculs et établir les prévisions (souvent de nature statistique) relativement aux valeurs que doivent prendre les observables. Un peu comme si ces valeurs se présentaient comme des manifestations de surface d'une virtualité plus riche, mathématiquement bien délimitée, mais qu'on ne peut espérer atteindre au moyen de mesures physiques directes.

(iv) Enfin, un des aspects le plus intéressant, selon nous, de certains postulats d'inobservabilité est le rôle proprement *déterminant* pour les théories physiques que, paradoxalement, ils peuvent être amenés à jouer, ou encore le rôle *constructif* (par exemple pour des interactions physiques) qu'ils peuvent remplir. Considérons à cet égard, successivement, les théories relativistes, invariantes sous les transformations de certains groupes de difféomorphisme d'espace (portant donc sur des variables

¹ Un tel dédoublement rappelle les problématiques de la non catégoricité et de l'incomplétude que nous avons évoquées plus haut et suggère une analogie possible avec la distinction entre version dénombrable et version de cardinalité supérieure en théorie des modèles [7].

externes) et les théories de jauge, invariantes sous l'action de groupes de jauge (portant sur des variables internes).

Dans les théories relativistes, on pose par exemple l'inobservabilité physique d'une translation des coordonnées d'espace, ou de rotations de ces coordonnées, ou d'un changement d'origine des temps. Il en résulte les propriétés de conservation, respectivement du moment cinétique, du moment de rotation, de l'énergie. Or ce sont ces invariants qui se présentent comme les grandeurs mesurables essentielles de ces théories, c'est-à-dire comme les observables fondamentales. Il apparaît donc que les observables sont dans un rapport de *dualité intrinsèque* avec les quantités principiellement inobservables et que la caractérisation au moyen des groupes de relativité qui expriment mathématiquement ces inobservabilités détermine en effet les grandeurs invariantes accessibles à l'expérimentation et la mesure.

On sait par ailleurs qu'en relativité générale, la caractérisation de la géométrie de l'univers considéré associée aux groupes de relativité qui la concerne (c'est-à-dire aux définitions des inobservables mutuelles) revient à la définition de l'énergie-impulsion dans cet univers : les forces sont relativisées à la géométrie dont les invariances (l'incapacité de distinguer un repère par rapport à un autre) définissent les traits principaux.

Il en va de même dans les théories de jauge où, cette fois, ce sont des variables internes qui sont caractérisées, au moyen des groupes de jauge, comme des quantités inobservables. Par exemple, l'inobservabilité d'une origine des phases, pour la fonction d'onde quantique, conduit à déterminer l'invariance de la charge électrique ; et c'est le cas pour bien d'autres nombres quantiques. Mais il y a plus : comme dans le cas de la relativité, le choix des jauges et leurs changements permettent de définir, ou au contraire de faire disparaître, les interactions elles-mêmes qui caractérisent les effets réciproques des champs entre eux. Par exemple, c'est le choix de la jauge de Lorentz qui permet de faire apparaître les potentiels d'interactions électromagnétiques comme corrélats de l'invariance de jauge.

Tous ces exemples montrent bien qu'à ce niveau la caractérisation formelle des limites de ce que l'on pose comme le physiquement connaissable d'une théorie - et donc de ce que l'on peut appeler, sans extension abusive, les limites de l'observabilité qu'elle permet - détermine du même coup les invariants de la théorie, ses lois de conservation et par conséquent la nature physique de ses objets et les interactions qui les gouvernent. Bref, tout ce qui va pouvoir entrer dans le champ de la mesure et de l'observation proprement dites. Il est clair que dans cette configuration de l'analyse du fonctionnement des théories physiques, on est conduit à attribuer un rôle essentiel à ce que l'on peut à bon droit appeler une *causalité formelle*.

2.3. Ce bref survol des concepts d'observabilité ou d'inobservabilité en physique nous a permis de dégager des situations assez différentes entre elles, selon le niveau d'analyse et le caractère plus ou moins épistémologique ou plus ou moins technique de ce à quoi ces notions pouvaient renvoyer. Mais pour conclure nous voudrions faire appel ici à un autre concept, repris et renouvelé par J-P. Baton et G. Cohen-Tannoudji [8a], [8b] à la lumière des résultats obtenus par la physique des particules dans ses développements les plus récents et dans le cadre des questions fondamentales qu'elle continue à soulever : le concept d'horizon.

L'horizon, selon les points de vue développés par ces auteurs, peut être (grossièrement) caractérisé notamment par ce qui sépare, relativement à la démarche de connaissance scientifique, ce qui relève de la modalité du possible (le domaine du virtuel en quelque sorte) et ce qui relève de la modalité du réel (le domaine de l'accessibilité expérimentale et de l'obtention de résultats effectifs). Cette séparation est objective en ce qu'elle est définie au sein de la théorie elle-même qui la formule mathématiquement (par exemple par les inégalités de Heisenberg ou par la caractérisation d'éléments minimaux de temps, tel le temps de Planck), mais son existence ne s'oppose pas à la construction d'autres objectivités théoriques susceptibles de la déplacer, toujours d'un point de vue scientifique objectif, à l'image d'un horizon qui semble se déplacer au fur et à mesure de l'avancée de l'observateur.

Si l'on adopte un tel schéma d'analyse, il devient alors tentant de rapprocher au moins certains aspects du concept d'observabilité de cette modalité de réalité et d'accessibilité effective et certains aspects de l'inobservabilité de la modalité du possible. Dès lors, le couple conceptuel observable/inobservable s'articulerait autour de cette ligne d'horizon, tout à la fois objective et "mobile" selon la nature des propriétés considérées.

3. PRESUPPOSES ET CONDITIONS DE POSSIBILITE DE LA MESURE ; PRATIQUES DISCIPLINAIRES DE LA MESURE

Comme on le sait, dans les sciences de la nature l'opération de mesure n'est pas un acte simple ni pur. Il présuppose et comporte beaucoup de théorie qui s'y condense, beaucoup de prédéterminé, voire de préjugé, qui s'y exprime, beaucoup d'interprétation qui l'oriente et oriente les conclusions que l'on peut en tirer. De fait, l'acte de mesure renvoie à trois domaines de constitution au moins : celle de l'objet ou du phénomène à mesurer, celle des moyens expérimentaux ou observationnels de la mesure proprement dite, celle enfin de la signification de la mesure, de sa pertinence relativement au cadre interprétatif, conceptuel et causal auquel on le rapporte. Ce sont ces aspects que nous voulons maintenant examiner, dans leur généralité et exemples principalement issus de la physique à l'appui d'abord, relativement aux spécificités d'autres disciplines ensuite.

3.1.

(i) Le fait que l'acte de mesure ne soit pas seulement pratique et empirique mais comporte une quantité considérable de théorie qui contribue à le constituer est évident à bien des égards. Théorie d'abord qui guide et mène la mesure : on ne mesure pas n'importe quoi au hasard, mais déjà un phénomène délimité et construit comme tel. Théorie condensée dans l'instrument de la mesure, ensuite ; soit dans sa construction propre (balance, télescope, RMN...), soit dans la construction du rapport entre l'instrument et le phénomène ou l'objet qu'il doit mesurer. Théorie relativement aux principes de validation des résultats de la mesure enfin : l'arpentage et la mesure des surfaces de formes circulaires par exemple ne donne pas les mêmes résultats selon que π ($= 3,14159\dots$) « vaut » $3, 22/7, 355/113^1$, ou le nombre transcendant que l'on a démontré (assez tardivement) qu'il était, mettant fin à tous les espoirs de quadrature du cercle. Tous ces traits relatifs aux composantes théoriques impliquées dans l'opération de mesure ont été si largement reconnus et analysés dans l'épistémologie contemporaine [9] qu'il n'est pas nécessaire d'y revenir.

(ii) Il en va un peu de même, grâce aux travaux de sociologie et d'histoire des sciences cette fois [10], à propos des prédéterminés qui gouvernent sans qu'on en ait parfois une claire conscience, les procédures et relevés de mesure. Ces préjugés qui renvoient souvent à une vision du monde plus globale, ou à un désir plus profond, de l'auteur des mesures peuvent avoir des conséquences positives ou négatives, selon que ces préjugés coïncident ou non avec des éléments de réalité objective (dans le cas positif on parle volontiers d'une intuition physique ou d'un sens physique développé ; dans le cas négatif on a plutôt tendance à parler de fantasmes).

Ainsi, du côté heureux, voit-on Galilée manipuler allègrement certains résultats effectifs de ses mesures de chute des corps ou de déplacements sur les plans inclinés pour les faire corroborer de façon plus convaincante sa propre conviction qu'il existe une loi mathématique et une seule de la chute des corps ; en principe, il a raison : dans le vide et sans frottement cette loi idéale est constitutive de la dynamique ; mais avec la résistance de l'air ou le frottement du plan incliné il en va bien autrement et les fluctuations, qui dépendent cette fois de la taille et de la forme des corps, peuvent être importantes. Guidé par sa représentation, il passe outre. D'une façon un peu semblable on peut évoquer la manipulation de ses résultats de mesure sur les petits pois par G. Mendel, convaincu de l'existence des lois statistiques de la génétique. Là encore l'auteur se révélera avoir eu raison, du fait que la non absolue pureté de ses lignées induit des fluctuations, renforcées par des phénomènes plus fins mais pas encore pertinents pour la génétique de ce temps.

¹ Toutes ces valeurs approximatives ont effectivement été utilisées, en un lieu ou en un autre, à un moment ou l'autre de l'histoire.

Mais sans même parler des fraudes [11], il y a des effets moins heureux de tels préjugés et le cas de Blondlot et de ses rayons N "français", concurrents des rayons X "allemands" de Roentgen (après la guerre et la défaite française de 1870 et avant la "revanche" de 1918) est trop connu pour qu'on y revienne.

(iii) De la même façon que les théories ont des rapports étroits à la pertinence et à la signification, relativement aux systèmes de représentation et aux ensembles conceptuels de l'époque et du lieu de leur production [12], les opérations de mesure entretiennent ces mêmes rapports avec la construction des objectivités scientifiques.

On sait par exemple que, du point de vue de l'*observation*, les taches du soleil, bien repérées et reconnues en Chine dès le treizième siècle [13] n'"existaient" pas, au même moment, en Occident (vraisemblablement parce que l'image du soleil évoquait encore fortement l'idée de perfection et que les taches auraient contredit cette perfection). Mais il n'est pas nécessaire de remonter au Moyen-Age pour trouver des exemples très nets de l'importance de la catégorie de pertinence par rapport aux cadres établis.

Ainsi, du point de vue proprement *expérimental* maintenant, la découverte très récente des quasi-cristaux et de l'existence dans la nature des symétries approchées d'ordre 5 (par exemple) fait-elle suite à la mise au rebut d'un grand nombre de résultats obtenus par diffraction de rayons X, sous prétexte que les symétries exactes d'ordre 5 sont exclues de notre univers par la théorie des groupes d'espace. Avec la reconnaissance de l'existence effective de tels matériaux, pourvus d'ordre à longue distance malgré le désordre à courte distance, s'est ouvert un domaine de recherche très actif et très profond, tant sur le plan expérimental que théorique (*cf.* pavages de Penrose, par exemple).

De façon très similaire, mais relativement au travail par *simulation* sur ordinateur cette fois, il faut signaler le cas des recherches menées par Lorenz sur des modèles météorologiques (versions simplifiées des équations hydrodynamiques de Navier-Stokes) [14,15]. Les résultats obtenus semblaient tellement bizarres et aberrants, irreproductibles et aléatoires que l'on recherchait des erreurs de programmation, là où l'on devait finalement découvrir les propriétés de sensibilité aux conditions initiales et de régimes chaotiques, propriétés intrinsèques (dans certains domaines d'existence) de ce système dynamique non linéaire. Là encore, la refonte des cadres conceptuels devait conduire au développement considérable de ce secteur de recherche que sont les systèmes dynamiques, les régimes chaotiques qu'ils peuvent comporter, les attracteurs étranges (mesures fractales) qu'ils peuvent présenter. En soulignant au passage qu'en fait certaines de ces propriétés étaient déjà bien connues des mathématiciens et des théoriciens de la mesure depuis la fin du XIXème et le début du XXème siècle, mais qu'il a fallu que ce soit la mesure par simulation sur ordinateur qui intervienne, pour qu'on soit conduit à les considérer comme des concepts pertinents, ayant des contreparties observables, dans les sciences de la nature jusques et y compris en biologie. Depuis, bien des résultats de mesure qui semblaient aberrants ont été repris dans cet esprit et font l'objet d'analyses nouvelles.

Ainsi, il n'est pas de domaine de la mesure (qu'il soit relativement découplé de son objet, avec l'observation, plus manipulatoire, avec l'expérimentation, voire complètement artificiel, avec la simulation) qui échappe à la question de la pertinence des résultats relativement aux cadres conceptuels et aux systèmes interprétatifs existants.

Les critères même de scientificité et de portée scientifique de la mesure peuvent s'en trouver modifiés : les systèmes dynamiques peuvent produire des résultats qui paraissent aléatoires (et peuvent être dépouillés comme tels) alors même que les dynamiques qui les gouvernent répondent à des lois strictement déterministes et parfaitement définies ; les régimes sensibles aux conditions initiales peuvent conduire à des résultats non reproductibles, y compris sur des ordinateurs, alors que seule la précision sur les conditions initiales est engagée, indépendamment de toute modification de la dynamique elle-même ou de tout effet de bruit ou de fluctuation ; simultanément, la prédictibilité des résultats de la mesure sur de tels systèmes est complètement remise en question sans que pour autant ils échappent le moins du monde aux nécessités de leurs déterminations. Nous y reviendrons au prochain chapitre.

3.2. Outre le fait qu'elles soient soumises à de profondes évolutions théoriques et historiques dans un cadre disciplinaire donné, les questions et pratiques de mesure sont fortement modulées par le domaine disciplinaire dans lesquels on les considère. Dans le domaine strictement individuel humain de la psychologie on peut même se demander si, en dehors des tests de la psychologie expérimentale (sujets pour leur part à bien des controverses, moins quant à leur technique, d'ailleurs, que quant à la nature de ce qu'ils sont censés mesurer - problématique de la constitution de l'objet -), le concept usuel de mesure conserve une pertinence. C'est que la caractérisation quantitative elle-même, préalable nécessaire à toute mesure au sens classique, tombe dans l'indétermination (nous reviendrons d'ailleurs sur cette question essentielle tout au long de la troisième partie de ce texte). Y compris pour la psychanalyse, malgré tous ses emprunts métaphoriques aux sciences physiques, depuis la thermodynamique jusqu'à la physique quantique et aux systèmes dynamiques [16], voire aux mathématiques (il est d'ailleurs symptomatique que le niveau de structure mathématique mobilisé dans les représentations théoriques "à la Lacan", soit en général parmi les plus faibles, à savoir le niveau topologique, très loin du niveau métrique).

Quant aux sciences sociales, parler dans leur cas de mesure en un sens opératoire revient presque exclusivement à utiliser les concepts et outils des statistiques et probabilités (du fait que les objets considérés et les grandeurs mesurées réfèrent en général à des collections d'individus) : enquêtes, sondages, etc.

A cette occasion, c'est-à-dire à propos de l'emploi des méthodes statistiques, il convient de faire trois remarques de nature épistémologique concernant l'attitude que l'on peut avoir par rapport à la mesure.

(i) Tout d'abord, l'approche statistique promeut essentiellement la démarche *inductive* dans la détermination des lois régissant le réel, par contraste à la démarche plutôt déductive qu'implique l'application mathématique rigoureuse d'une théorie *a priori* de la mesure qui vient corroborer ou réfuter un corpus théorique. Par exemple, d'un point de vue conceptuel strict, malgré les imprécisions et erreurs de mesure qui s'introduisent nécessairement dans l'investigation des théories *a priori*, l'égalité comme telle ne peut jamais être considérée comme une absence systématique d'inégalité ; l'égalité est considérée comme un concept intrinsèque. Du point de vue des statistiques, par contraste, l'égalité peut être considérée comme une telle absence attestée d'inégalité : le concept est relatif au corps d'épreuve et aux procédures de son analyse.

(ii) Deuxièmement, le statut ontologique des objets pris en compte peut n'être pas le même : l'*existence* des idéalités mathématiques est bien caractérisée, celle des objets physiques est, même si ce n'est que provisoirement, bien déterminée ; dans le cadre statistique, une moyenne, tout en correspondant à une définition mathématique sans ambiguïté, peut jouer un rôle très important sans pour autant trouver de contrepartie dans la réalité phénoménale (par exemple, l'espérance mathématique - la moyenne - des jets du jeu de dés est 3,5 mais chaque jet fournit nécessairement un nombre entier).

(iii) Troisièmement, dans l'interprétation des résultats de mesure statistique, bien plus encore que dans des résultats apportés par d'autres types de mesure, la question de la distinction entre la mise en évidence d'une *corrélation*, par rapport à la manifestation d'une réelle *causalité* est vraiment cruciale tant du point de vue épistémologique [17] que de celui des conclusions théoriques que l'on peut dériver.

Mais c'est plus spécialement à propos de la mesure en biologie que surgissent des problèmes originaux et importants.

En biologie en effet, la mesure soulève des difficultés spécifiques, en rapport avec les particularités épistémologiques de la discipline et de ses sous-disciplines. Elle peut certes revêtir des aspects très classiques, de nature physico-chimique, tels les dosages, par exemple, ou l'investigation de propriétés de transports ou d'excitations chimiques ou électriques, ou encore l'analyse des comportements réactionnels à diverses échelles (moléculaire, métabolique...). Mais en ce cas c'est

souvent la signification et l'interprétation des résultats de la mesure qui posent des questions qui seraient complètement non pertinentes pour la physique ou la chimie ; notamment lorsqu'il s'agit d'analyses biologiques tournées vers l'exercice de la médecine. Rappelons trois de ces spécificités parmi les plus importantes (nous reviendrons plus en détail sur certaines d'entre elles aux chapitres suivants, en particulier au chapitre VII, lorsque nous examinerons certains des rapports que l'on peut établir entre physique et biologie) :

(i) la tolérance aux variabilités individuelles et locales, c'est-à-dire en quelque sorte à une non universalité stricte des lois biologiques (dans le cadre évidemment d'une régularité fonctionnelle globale), ce qui est inconcevable pour la physique. Il en résulte la pertinence en biologie du couple de concepts *normal/pathologique* [19], qui ne revêt par ailleurs aucun sens en physique ou chimie. Les résultats de la mesure doivent alors être réinterprétés relativement à ces concepts, complémentaires aux interprétations physico-chimiques plus usuelles ;

(ii) le statut théorique particulier de l'existence d'une totalité intégrée relativement à ses parties. Les processus de régulation et d'intégration solidarisent les unes et les autres en sorte qu'il semble en résulter une *non séparabilité* biologique particulière des sous-objets les uns par rapport aux autres lorsqu'ils sont des parts d'un objet individué (la cellule et ses organites, l'organisme et ses organes, voire le système écologique et les espèces qui y participent). Il en résulte notamment la nécessité d'une scrupuleuse distinction entre les résultats et interprétations des mesures selon qu'elles sont effectuées "*in vivo*" ou "*in vitro*". Là non plus il ne semble pas exister de contrepartie dans l'analyse épistémologique de la mesure en physique ;

(iii) l'importance et le rôle de l'existence des *niveaux* d'organisation qui structurent le vivant et permettent à ces régulations et intégrations de fonctionner selon une finalisation apparente. Le fait que des mesures visent les propriétés d'un niveau donné ne signifie pas qu'elles laissent inchangées les propriétés d'autres niveaux, dont d'éventuelles modifications peuvent retentir sur le niveau examiné, soit pour amplifier, soit au contraire pour atténuer ses réponses. A l'inverse, une mesure qui vise une totalité peut n'enregistrer de réponse que sur un ou quelques niveaux d'organisation de cette totalité.

Ces traits particuliers s'articulent dans l'analyse des résultats de mesures en biologie (et plus nettement encore lorsqu'il s'agit de statistiques de mesures) pour renforcer l'ambiguïté possible, déjà relevée plus haut, à propos de la distinction à opérer entre corrélations et causalités. L'organisation en niveaux, l'intégration fonctionnelle, les processus de régulation, les variabilités individuelles et locales, les tolérances aux écarts concourent à la difficulté de caractériser précisément la nature de ce qui est effectivement mesuré et surtout la signification profonde du résultat obtenu.

Il est encore un autre aspect de la mesure qui, si l'on n'en est pas averti, peut parfois prêter à perplexité ou confusion et qui se rencontre assez fréquemment en biologie dans la mesure où cette discipline fait bien souvent appel à des procédures morphométriques [20]. Dans les cas habituels, en effet, on s'attend à ce que les changements d'échelle (par exemple sous microscope avec des grossissements variables) n'affectent en rien les résultats de mesures morphométriques ; tout au plus s'attend-on à une amélioration de la précision de la mesure. Or, on sait que les mesures d'objets fractals, qu'ils soient ou non vraiment self-similaires, conduisent à des résultats qui eux sont variables avec l'échelle de mesure. Comme bien des objets biologiques (en particulier ceux qui remplissent une fonction vitale [21a]-[21b], [22]) présentent ces propriétés fractales (en général pour des raisons d'optimisation des fonctionnements qu'ils assurent), il faudra s'attendre à ce que leurs mesures présentent ce comportement à première vue surprenant. Il pourra en aller de même dans le cas où il s'agira de caractériser métriquement des attracteurs étranges de certaines dynamiques chaotiques que l'on a de plus en plus tendance à déceler dans les fonctionnements biologiques.

Avec l'irruption conceptuelle et pratique de ces nouveaux objets pertinents dans ces disciplines se trouvent remises sur le chantier la théorie et la pratique de leurs mesures. Et, à partir de l'expérience de ces domaines les plus concrets, nous sommes amenés à rejoindre les problématiques les plus abstraites de la mesure proprement mathématique que nous avons évoquée au début de ce chapitre.

4. CONCLUSION

A la suite de cette brève analyse, il apparaît nettement que les problèmes de la mesure se distribuent, suivant les disciplines et sous-disciplines que nous avons évoquées, selon des questions de nature plus ou moins *épistémique* ou plus ou moins *ontologique*.

Ainsi, en physique classique, où le statut de l'objet phénoménal paraît assez stable et assuré, en tout cas quasi-indépendant des opérations de mesure à quoi il est soumis, il semble bien que le problème de la mesure soit essentiellement épistémique. Les questions principales portent sur les performances de la mesure elle-même, sur les perturbations éventuelles qu'elle peut apporter, sur la délimitation précise de ce qu'elle atteint.

En physique quantique, comme nous l'avons vu, se superpose à cet aspect épistémique un problème réellement ontologique de la mesure en ce que cette dernière contribue à la constitution des propriétés de l'objet mesuré ; ce que l'on appelle le rôle de l'observateur.

Il en va un peu de même, mais pour d'autres raisons, toujours en physique, dans la mesure associée à l'étude des phénomènes critiques, en particulier des dynamiques chaotiques. Dans ce cas aussi se conjuguent un aspect plutôt épistémique (questions de prédictibilité, de reproductibilité, de catégorisation des résultats) et un aspect plutôt ontologique lié aux propriétés intrinsèques du système : sensibilité aux conditions initiales (et, de ce fait, dépendance des résultats obtenus par rapport aux perturbations que peut apporter la mesure de ces conditions initiales), question des limites physiques du déterminisme causal de ces systèmes en rapport avec leurs comportements aléatoires apparents, etc. [23].

La biologie présente, elle aussi, le même genre de distinction : aux aspects épistémiques classiques de la physico-chimie et à ceux qui résultent des variabilités tolérées, des pathologies possibles, de la distinction à faire entre les mesures effectuées *in vivo* et *in vitro*, s'articulent les aspects plus ontologiques associés à l'existence de niveaux objectifs d'organisation, aux phénomènes d'intégration et de régulation et à la non séparabilité concomitante de l'objet biologique.

Comme nous pouvions nous y attendre, s'agissant de disciplines scientifiques fortement liées aux procédures d'observation et d'expérience et très dépendantes de leurs méthodes et des résultats qu'elles obtiennent, l'analyse du concept et de l'opération de mesure soulève en fait des problèmes essentiels de théorie de la connaissance. La mesure ne se contente pas de fournir des données, elle ouvre à la discussion des causes et des raisons.

REFERENCES DU CHAPITRE V

- [1] B. MANDELBROT, *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman, San Francisco, 1982.
- [2] M. GUINOT, *Le paradoxe de Banach-Tarski*, Aleas, Lyon, 1990.
- [3] COLLECTIF, *Le monde quantique*, S. Deligeorges Ed., Seuil, Paris, 1984.
- [4] D. D'ESPAGNAT, *A la recherche du réel*, Gauthier-Villars, Paris, 1980.
- [5] J. PETITOT, *Séminaire "Idéalités mathématiques et réalité objective"*, EHESS, Paris, 1987-1991.
- [6] COLLECTIF, *La mathématique non standard*, Ed. H. Barreau et J. Harthong, CNRS, Paris, 1989.
- [7] F. BAILLY, Théories physiques et cardinalités mathématiques, Colloque de Cerisy, in : *Le continu mathématique*, Ed. J-M. Salanskis et H. Sinaceur, Springer, 1990.
- [8a] J-P. BATON, G. COHEN-TANNOUDJI, *L'horizon des particules*, Gallimard, Paris, 1989.
- [8b] G. COHEN-TANNOUDJI, *Les concepts d'horizon de réalité et de référentiel en physique théorique*, Journée H.P.M.P. (organisée par J. Petitot) : Epistémologie et physique théorique, I.H.P. 7, Paris, Juin 1991.
- [9] G-G. GRANGER, *Epistémologie*, Odile Jacob, Paris, 1989.
- [10] A. KOHN, *Par hasard ou par erreur*, Eshel, Paris, 1990.
- [11] M. DE PRACONTAL, *L'imposture scientifique*, L.D.P.4102, La découverte, Paris, 1986.
- [12] T. KUHN, *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, 1983.
- [13] J. NEEDHAM, *La science chinoise et l'Occident*, Seuil, Paris, 1973.

- [14] D. RUELLÉ, *Hasard et chaos*, Odile Jacob, Paris, 1991.
- [15] J. GLEICK, *La théorie du chaos*, Albin Michel, Paris, 1989.
- [16] S. FAURE-PRAGIER, G. PRAGIER, *Un siècle après l'Esquisse : nouvelles métaphores ?* Rapport au 50ème Congrès des Psychanalystes, Madrid, 1990.
- [17] M. VEUILLE, Corrélation, in : *D'une science à l'autre*, I. Stengers Ed., Seuil, Paris, 1985.
- [18] M. GUTSATZ, Loi et causalité, in : *D'une science à l'autre*, I. Stengers Ed., Seuil, Paris, 1985.
- [19] G. CANGUILHEM, *La connaissance de la vie*, Vrin, Paris, 1980.
- [20] J. SERRA, in : *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Acad. Press, Londres, 1982.
- [21a] F. BAILLY, F. GAILL, R. MOSSERI, Fonctions biologiques, niveaux d'organisation et dimensions fractales, *Rev. Int. Syst.*, 2, 1988.
- [21b] F. BAILLY, F. GAILL, R. MOSSERI, La fractalité en biologie; ses relations avec les notions de fonction et d'organisation, in : *Biologie théorique*, Solignac 1987, Ed. CNRS, Paris, 1989.
- [22] Y. BOULIGAND, L'autosimilarité brisée, in : *Biologie théorique*, Solignac 1987, Ed. CNRS, Paris, 1989.
- [23] COLLECTIF, *Chaos et déterminisme*, Ed. A. Dahan Dalmedico, J-L. Chabert, K. Chemla, Seuil, Paris, 1992.