

LA MÉTHODE PHYSIQUE AU SENS DE DUHEM DEVANT LA MÉCANIQUE DES QUANTA

L'étude critique de la méthode scientifique n'offre d'intérêt que si des données permanentes s'en dégagent, qui puissent survivre aux bouleversements entraînés par le développement constant de l'expérience.

Au contact immédiat de la science classique, DUHEM avait défini l'objet et la structure de la théorie physique¹. Je me propose de montrer que cette analyse conserve aujourd'hui encore une grande part de sa valeur, en la confrontant avec la mécanique des quanta.

Pour prévenir toute ambiguïté à la lecture des citations, je me conformerai ici au langage de DUHEM; celui-ci emploie toujours le terme de *représentation* dans un sens abstrait et symbolique. Aussi qualifierai-je d'images les éléments comme l'onde et la particule que l'on rencontre en optique ou en mécanique.

Beaucoup de physiciens tiennent à doter ces images d'un sens concret; ils y voient une explication des apparences sensibles, un *modèle* traduisant un aspect de la réalité. Il est alors nécessaire que l'image soit unique dans son domaine de validité: l'onde seule explique les interférences, la diffraction et la polarisation, la particule seule explique l'effet Compton ou l'effet photo-électrique. Les compartimentages de cette nature sont assez courants en physique, et l'appel à des modèles variés offre au sensualiste un moindre mal que le renoncement à toute image concrète.

A l'opposé, l'anti-sensualisme farouche de DUHEM s'exprime ainsi:

« Voici un livre² destiné à exposer les théories modernes de l'électricité. Il n'y est question que de cordes qui se meuvent sur des poulies, qui s'enroulent autour de tambours, qui traversent des perles, qui portent des poids; de tubes qui pompent de l'eau, d'autres qui s'enflent et se contractent; de roues dentées qui engrènent les unes les autres, qui entraînent des crémaillères. Nous pensions entrer dans la demeure paisible et soigneusement ordonnée de la raison déductive; nous nous trouvons dans une usine ».

Pour DUHEM, l'école française s'oppose ici à l'école anglaise, la force et droiture d'esprit — au sens de PASCAL — à l'amplitude d'esprit:

« L'élément qui (chez les physiciens anglais) accompagne presque invariablement l'exposé d'une théorie, c'est le modèle... L'effort nécessaire (pour suivre ce modèle) est souvent beaucoup plus grand que celui dont le Français a besoin pour comprendre dans sa pureté la théorie abstraite que le modèle prétend incarner ».

Je ne suivrai pas DUHEM sur le terrain fragile des nationalités, car la science anglaise compte des idéalistes de marque: NEWTON, qui déclarait qu'en matière scientifique il faut savoir faire abstraction des choses, B. RUSSEL et tout près de nous DIRAC. Je ne discuterai pas non plus du rôle du modèle dans la genèse de la pensée physique, rôle que DUHEM sous-estime peut être³.

En matière physique, il faut toujours partir de l'expérience pour y revenir: mais *dans l'intervalle*, et ceci est l'une des idées maîtresses de DUHEM, les exigences de la logique mathématique sont les seules auxquelles le théoricien soit tenu de satisfaire:

« Lorsqu'au cours d'une théorie optique, nous parlons de vibration lumineuse, nous ne songeons plus au véritable mouvement de va-et-vient d'un corps réel; nous imaginons seulement une grandeur abstraite, une pure expression géométrique dont la longueur périodiquement variable nous sert à énoncer les hypothèses de l'optique, à retrouver, par des calculs réguliers, les lois expérimentales qui régissent la lumière. Cette vibration est pour nous une représentation et non pas une explication ».

Ce point de vue, gratuit dans une certaine mesure en science classique, s'impose en mécanique quantique: l'association de l'onde et de la particule est nécessaire pour résoudre les contradictions, révélées dès l'origine par POINCARÉ, entre la dynamique ordinaire et l'indivisibilité du quantum d'action, hypothèse fondamentale introduite par PLANCK pour rendre compte de la répartition des longueurs d'onde dans le rayonnement du corps noir.

3. Je ne voudrais pas laisser croire que DUHEM manquât de libéralisme intellectuel: « Le meilleur moyen, dit-il, de favoriser le développement de la science, c'est de permettre à chaque forme intellectuelle de se développer suivant ses lois propres et de réaliser pleinement son type; c'est de laisser les esprits forts se nourrir de notions abstraites et de principes généraux et les esprits amples s'alimenter de choses visibles et tangibles ». Ce qu'il reproche essentiellement aux sensualistes, c'est de prendre, suivant l'expression de LEIBNITZ, la paille des mots pour le grain des choses.

1. *La théorie physique*, CHEVALIER et RIVIÈRE Ed. 1906.

2. O. LODGE: *Les théories modernes de l'électricité*.

Si la théorie des modèles de BOHR pouvait se borner en apparence à pratiquer une simple sélection dans l'infinité continue des trajectoires classiques de l'électron planétaire, c'était au prix d'attribuer aux états stationnaires une sorte de stabilité hypermécanique, le processus de transition entre ces états échappant à toute description.

En fait, l'association onde-particule, introduite par L. de BROGLIE, est indispensable pour intégrer logiquement à la mécanique les conditions des quanta. L'onde et la particule sont, comme l'a montré BOHR, des concepts *complémentaires* dont seule la considération simultanée peut offrir une généralisation naturelle du mode de description classique : à l'une se trouve liée la quantité de mouvement, à l'autre la position d'un élément de matière ou d'un photon. La connaissance simultanée de ces deux données est impossible, dans le domaine où intervient la constante de PLANCK.

Ainsi s'évanouit le rêve de DESCARTES, auquel DUHEM ne pouvait ajouter foi, car il rejetait toute explication métaphysique « au fond de laquelle gît toujours l'inexpliqué ». Il citait à ce sujet PASCAL :

« Il faut dire en gros : cela se fait par figure et mouvement, car cela est vrai. Mais de dire quels, et composer la machine, cela est ridicule ; car cela est inutile et incertain et pénible ». (*Pensées*, art. XXIV).

Il serait certainement abusif de voir dans cette citation le germe de l'incertitude heisenbergienne et de la valeur exclusivement statistique du déterminisme classique. Il reste que les images de l'onde et de la particule, et corrélativement les éléments conjugués (position et vitesse) de l'axiome copernicien des conditions initiales sont réduits à l'état d'*idéalisations* (au sens de BOHR : abstractions ayant seulement une valeur approchée). Aucune difficulté à cela aux yeux de DUHEM, alors que MEYERSON y voit l'indice du désarroi du physicien.

Il y a plus : la dualité onde-corpuscule est inéluctable. Si de toute évidence le corpuscule ne suffit plus, l'onde n'est pas matérielle, elle ne *pilote* pas le corpuscule, elle n'est pas une onde d'électricité, elle n'est qu'une onde de probabilité, c'est-à-dire une onde essentiellement abstraite quelles que soient ses manifestations, comme les anneaux de DAVISSON et GERMER.

Rappelons à ce sujet que DUHEM réfutait l'existence de tout *experimentum crucis*, ceci en vertu de la transcription symbolique que subit dans la théorie tout fait d'expérience. La réduction à l'absurde, procédé des géomètres, est interdite au

physicien « qui n'est jamais sûr d'avoir épuisé toutes les suppositions imaginables ». C'est ainsi qu'en optique aucune expérience, contrairement à l'affirmation d'ARAGO, ne permet de décider de la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière. Il en va de même pour la matière, depuis l'introduction des quanta.

Entia non multiplicanda sunt praeter necessitatem : cet excellent principe des scolastiques semble perdu de vue en mécanique quantique où l'on a vu naître le photon, l'électron positif, le neutron, etc... Mais en revanche cette théorie établit des connexions entièrement nouvelles entre le problème de la matière et celui du rayonnement (processus de matérialisation ou de dématérialisation). Ces deux courants contraires sont, d'après DUHEM, caractéristiques de l'évolution de la physique : découverte de nouvelles catégories par le développement de l'expérience, fusion de qualités distinctes par la théorie.

Au sens de DUHEM, la théorie physique ne saurait offrir une *explication* de la réalité. Les symboles mathématiques auxquels elle a recours doivent être distingués des propriétés qu'ils représentent : ils n'ont avec celle-ci « qu'une relation de signe à chose signifiée ».

Cette restriction nous est indispensable en mécanique quantique : l'algèbre des états et des observables, édiflée par DIRAC et fondement rationnel de l'axiomatique quantique, est de toute évidence une doctrine des plus abstraites.

L'algèbre des états se traduit par le fait que « l'espace des états » est un espace de HILBERT. L'algèbre des observables déroge à l'algèbre ordinaire du fait que la commutativité de la multiplication ne s'y vérifie pas toujours. L'observable agit sur l'état comme une transformation dans l'espace de HILBERT.

Les *opérateurs* que l'on rencontre en mécanique quantique ne sont pas tous doués de sens physique ; les observables elles-mêmes ne sont que des objets du second ordre, analogues rationnels d'objets du sens commun⁴.

C'est en règle générale par les probabilités des différentes valeurs possibles d'une observable que cette algèbre symbolique se raccorde à l'expérience. Toutefois il existe des cas privilégiés où l'on peut énoncer une certitude : mesure d'une observable dans un état propre, répétition immédiate d'une mesure.

Probabilités et certitudes doivent être considérées au même titre dans l'interprétation physique

4. Pour un résumé élémentaire de l'axiomatique de DIRAC, cf. René DUGAS : *La méthode dans la mécanique des quanta*, Hermann, éd. 1935.

de la théorie : il serait aussi arbitraire de réduire la mécanique quantique aux seuls *cas purs* où une certitude s'énonce immédiatement que de nier le caractère privilégié de ceux-ci en assimilant la mécanique quantique à un simple jeu de dés⁵.

Je passe sous silence le débat relatif à l'absence ou à l'existence d'une réalité objective indépendante de l'observateur, du fait des perturbations essentielles qui affectent certaines mesures ; la question, au sens de DUHEM, ne se pose pas ou plus exactement appartient au domaine métaphysique où il se refuse à pénétrer.

Je ne dissimule pas qu'à première vue les caractères généraux de la mécanique quantique, schématisés ici à l'excès, peuvent à certains égards heurter le sens commun. Mais celui-ci n'a jamais dicté que la physique d'ARISTOTE et celle des scolastiques :

« Ce que nous enseigne l'expérience de chaque jour, c'est qu'une voiture qui n'est pas attelée demeure immobile ; c'est qu'un cheval qui développe un effort constant entraîne le véhicule avec une vitesse constante ».

Rappelant ceci, DUHEM conclut qu'il est illusoire de penser extraire les axiomes de la connaissance commune. Pour concevoir le principe de l'inertie il fallait en effet faire abstraction des phénomènes de frottement qui dominent la traction vulgaire.

Si les axiomes de la mécanique ne découlent pas du sens commun, s'ils constituent déjà des abstractions, ils réclament cependant le « contrôle perpétuel de l'expérience » (MACH).

Ce serait se comporter en scolastique moderne que de vouloir se refuser *a priori* à la révision des axiomes qu'entraîne nécessairement la considération des expériences sur la structure des raies spectrales.

Cette révision des valeurs porte essentiellement sur l'axiomatique copernicienne. Bien loin d'enlever toute portée au langage exclusivement mathématique de la mécanique rationnelle classique, elle nous en révèle l'extraordinaire fécondité.

Dans l'arsenal des théorèmes de LAGRANGE, HAMILTON, JACOBI, la physique quantique a trouvé la base de départ dont elle avait besoin ; l'équation de JACOBI, sous forme classique ou relativiste, domine la théorie des modèles de BOHR ; l'équation de SCHRÖDINGER prolonge celle de JACOBI. Une nouvelle preuve est apportée par la formulation de la mécanique quantique à l'aide d'une extension des crochets de POISSON : une

5. René DUGAS, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 202, 1936, pp. 636 et 1414.

notation sans valeur intrinsèque de la mécanique analytique classique devenant, grâce à un postulat restrictif sur la commutativité de la multiplication, un outil essentiel permettant d'écrire les équations du mouvement sans la connaissance préalable de variables canoniques.

Cet ensemble de circonstances : renoncement aux axiomes, permanence ou adaptation facile du symbolisme, est à rapprocher de la déclaration suivante de DUHEM :

« Lorsque les progrès de la physique expérimentale mettent la théorie en défaut, lorsqu'ils obligent à la transformer ou à la modifier, la partie purement représentative entre presque entière dans la théorie nouvelle, lui apportant l'héritage de tout ce que la théorie ancienne possédait de plus précieux, tandis que la partie explicative tombe pour faire place à une autre explication »⁶.

Pour faire admettre dans ce qui précède plusieurs des nouveautés quantiques, nous avons dû invoquer souvent la largeur des vues de DUHEM. Enumérons maintenant les conditions qu'il impose au choix des hypothèses d'une théorie physique.

Ces conditions sont au nombre de trois : pas de contradiction interne, pas de contradictions mutuelles, accord *global* avec l'expérience.

Je souligne le mot global, essentiel dans l'esprit de DUHEM : liberté complète du symbolisme, à la seule condition de satisfaire aux exigences de la logique mathématique ; pas d'*experimentum crucis* qui sauve une hypothèse au détriment des autres.

Logique tout autant que la mécanique classique, mais abstraite au point de défier toute interprétation sensualiste, la mécanique quantique se justifie globalement par le domaine expérimental, d'ailleurs considérable, dont elle offre une transcription symbolique.

J'en arrive maintenant à l'illégalité quantique, c'est-à-dire aux dérogations qu'entraîne la nouvelle mécanique au déterminisme copernicien.

L'axiome copernicien des conditions initiales étant détruit par l'impossibilité de mesurer simultanément, par exemple, la coordonnée x d'une particule à un degré de liberté et sa quantité de mouvement p , l'axiome quantique correspondant

6. On pourrait appeler progrès « horizontal » le développement d'une théorie dans un cadre déterminé d'axiomes. Le progrès « vertical », l'évolution en profondeur, résiderait au contraire dans la révision des axiomes, en mathématique pure aussi bien qu'en mécanique.

Il n'est pas exclu qu'en dépit d'une évolution verticale les algorithmes anciens demeurent utilisables, moyennant au besoin certaines adaptations : le domaine de la théorie nouvelles s'étend alors horizontalement d'une manière immédiate, grâce à cette conservation du symbolisme.

part d'une *observation maximum* incomplète au sens copernicien : en l'espèce la mesure d'une seule fonction arbitraire $F(x, p)$. En particulier l'état initial de cette particule peut être spécifié par la seule mesure de x . Cette analogie scolastique est d'ailleurs fragile et ne résiste pas à une incertitude sur la mesure de x .

M. J. L. DESTOUCHES invoque alors le postulat essentiel suivant : à partir de l'observation maximum spécifiant l'état initial du système, il doit être possible d'énoncer des prévisions⁷.

Je n'ai pas trouvé trace, dans la *Théorie physique* de DUHEM, d'une hypothèse déterministe de ce genre. Il serait contraire à sa pensée de voir dans un tel critère un attribut de la réalité physique. Plus simplement, ce *postulat de prévisibilité* est caractéristique des systèmes susceptibles, au sens le plus large, d'une interprétation mécanique.

Pour achever la construction formelle de la mécanique générale, qui englobe la mécanique quantique, M. J. L. DESTOUCHES a recours à un second postulat, celui de la *stabilité* des prévisions, répondant directement à une condition que DUHEM formulait ainsi :

« Une déduction mathématique est inutile au physicien, tant qu'elle se borne à affirmer que telle proposition, rigoureusement vraie, a pour conséquence l'exactitude rigoureuse de telle autre proposition. Pour être utile au physicien, il lui faut encore prouver que la seconde proposition est à *peu près* exacte lorsque la première est à *peu près* vraie. Et cela ne suffit pas encore : il lui faut délimiter l'amplitude de ces deux à peu près ; il lui faut fixer les bornes de l'erreur qui peut être commise sur le résultat, lorsqu'on connaît le degré de précision des méthodes qui ont servi à mesurer les données ; il lui faut définir le degré d'incertitude que l'on pourra accorder aux données, lorsqu'on voudra connaître le résultat avec une approximation déterminée ».

Il est tout à fait remarquable que cette régularité de la mécanique générale ait été prévue par DUHEM. Celui-ci ne dissimulait pas la grande difficulté de ces « mathématiques de l'à peu près ». M. G. BOULIGAND⁸ a comblé le vœu de DUHEM en précisant la notion de stabilité des propositions mathématiques ; les *modules de déplacement* de

l'hypothèse et de la conclusion, d'abord définis sur des ensembles distancés, ont été étendus par la suite aux espaces à voisinages de M. FRÉCHET : c'est sous cette dernière forme que M. J. L. DESTOUCHES a introduit la stabilité en mécanique générale.

Dans les mécaniques anciennes, la possibilité de prévoir avec certitude, à partir des conditions initiales, la valeur à tout instant des différentes observables attachées à un système correspond à ce que j'ai proposé d'appeler *légalité*⁹.

En mécanique quantique, il y a encore — sauf perturbation — *légalité symbolique* dans l'évolution de l'état d'un système ; mais en règle générale, pour les observables de ce système, une certitude initiale ne livre que la distribution à tout instant des probabilités des différentes valeurs possibles (*semi-légalité*). La *légalité* de style classique ne subsiste que pour les seules intégrales premières. Ces deux résultats se conjuguent : grâce à une mesure *convenable*, on peut prédire la valeur d'une observable quelconque à un instant *isolé* convenablement choisi (FERMI).

La mécanique quantique comporte encore un principe de relativité (auquel correspond un *domaine de causalité* au sens de M. BOULIGAND). Elle se réconcilie statistiquement (EHRENFEST) avec la *légalité copernicienne* qui règne sur le macroscopique.

Grâce à ces diverses régularités — et en particulier à la stabilité des probabilités et des certitudes qu'elle permet d'énoncer — la mécanique quantique — pour abstraite et symbolique qu'elle soit — peut logiquement passer, au sens de DUHEM, pour utile au physicien : de fait celui-ci ne saurait plus aujourd'hui s'en passer.

**

Je n'ai fait ici que relire DUHEM avec des yeux quantiques. Si l'on m'accorde de n'avoir pas trahi sa pensée, j'ai pu rendre hommage à sa sagacité ; mon propos était toutefois de montrer, à la lumière de ce grand esprit, que l'étude de la méthode est de nature à éclairer certains aspects de la physique moderne.

Quaedam perennis philosophia... Ce vœu de LEIBNITZ, DUHEM l'aurait-il comblé pour quelque temps encore ?

René Dugas,

Ingénieur au Corps des Mines.

7. J. L. DESTOUCHES : *Bulletin de l'Académie Royale de Belgique*, t. 22, 1936, p. 525.

8. G. BOULIGAND : Sur la répercussion de quelques courants d'idées géométriques en matière de logique et d'enseignement, *Revue Générale des Sciences*, 15 nov. 1936. Cet article contient une analyse détaillée des idées de DUHEM en matière de « déductions mathématiques inutiles au physicien » et renferme la bibliographie des mémoires originaux.

9. René DUGAS, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 203, 1936, p. 41 et *Bulletin de l'Académie Royale de Belgique*, 1936, p. 1318.