

DE LA MATIÈRE

Du même auteur

La Physique en questions

T. 1, Mécanique

Vuibert, 1980 (nouv. éd., 1999)

T. 2 (avec A. Butoli), Électricité et magnétisme,

Vuibert, 1982 (nouv. éd., 1999)

L'Esprit de sel

(Science, culture, politique)

Fayard, 1981 ; Seuil, « Points sciences », 1984

Quantique, rudiments

(avec Françoise Balibar)

Interéditions/CNRS, 1984 (nouv. éd., Masson, 1997)

La Pierre de touche

(La science à l'épreuve)

Gallimard, « Folio Essais », 1996

Aux contraires

(L'exercice de la pensée et la pratique de la science)

Gallimard, « NRF Essais », 1996

Impasciences

Bayard Éditions, 2000 ; Seuil, « Points sciences », 2003

La Science en mal de culture / *Science in Want of Culture*

Futuribles, 2004

La Vitesse de l'ombre

(Aux limites de la science)

Seuil, « Science ouverte », 2006

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND

DE LA MATIÈRE

relativiste, quantique, interactive

COLLÈGE DE LA CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

2004

OUVRAGE PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS
DU CENTRE NATIONAL DU LIVRE

ÉDITIONS DU SEUIL
27, rue Jacob, Paris VI^e

TRACES ÉCRITES

Collection dirigée par Dominique Ségлар

ISBN: 2-02-084836-8

© Éditions du Seuil, septembre 2006

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.seuil.com

Cette collection se veut un lieu éditorial destiné non à des livres inédits, dormant dans quelque tiroir et qu'un esprit curieux aurait tirés de son fond obscur, ni à des ouvrages posthumes au sens propre, sous la forme de notes personnelles, pensée repliée sur elle-même, avant qu'elle ait été présentée au public.

Elle accueille des cours, conférences, séminaires, et se veut l'écho d'une parole vivante. Elle tire sa légitimité et son originalité de ce qu'on y trouvera uniquement des transcriptions d'événements de pensée d'origine orale. Les notes de cours, photocopiés, bandes magnétiques, etc. utilisés comme matériaux de base seront toujours retranscrits le plus fidèlement à leur statut initial.

Traces écrites, donc, imprimées d'une pensée publiquement exprimée – contributions, en leur apport singulier, à l'édifice d'une œuvre.

D. S.

Avant-propos

Les trois conférences ici publiées ont pour objectif d'explicitier les conceptions que la physique moderne se fait de la matière, et tout particulièrement l'impact sur ces conceptions des révolutions quantiques et relativistes qu'a connues la physique au début du xx^e siècle. J'ai choisi d'y mettre l'accent sur la nouveauté et l'originalité des idées plutôt que sur les détails de la connaissance des objets ou sur le travail expérimental qui a révélé ces objets et permis d'élaborer ces idées. On ne trouvera donc pas ici la classification actuelle des constituants élémentaires (ou provisoirement supposés tels) de la matière, ni celle de leurs interactions fondamentales (ou provisoirement supposées telles) : nous nous intéresserons à l'essence de ces constituants et au principe de ces interactions plus qu'à leurs propriétés particulières. C'est délibérément aussi que l'exposition ne revêt aucun caractère historique, et que les notions fondamentales de la physique sont présentées telles qu'en elles-mêmes les a transformées un bon siècle de pratiques théoriques et techniques. La complexité de la lente et confuse élaboration de ces idées ne peut d'ailleurs être saisie que rétroactivement, de sorte que l'analyse historique, pour trouver toute sa pertinence, gagne à être précédée par une présentation extemporanée comme celle ici proposée.

On voudra bien se souvenir que le texte de ces conférences, quoique largement repris à partir de l'enregistrement de leur présentation orale, garde la trace de cette origine. S'il fallait justifier ce choix, qui, après tout, est au principe même de cette

collection, les remarques suivantes y pourvoiraient éloquemment :

« Les professeurs aux Écoles normales ont pris avec les Représentants du Peuple et entr'eux, l'engagement de ne point lire ou débiter de mémoire des discours écrits. Ils parleront ; leurs idées sont préparées, leurs discours ne le seront point. Ni une science ni un art ne peuvent être improvisés ; mais la parole, pour en rendre compte, peut l'être : ils ont pensé qu'elle devait l'être ; en ce sens, tous improviseront. C'est donc ce qu'ils auront dit en improvisant, qui sera recueilli par des sténographes, et publié par l'impression. On comprend que la justice la plus commune demande que des discours faits ainsi ne soient point jugés comme des discours écrits avec soin dans un cabinet. Un cours sera une série de conversations, et la meilleure conversation, lorsqu'on l'imprime, ne peut pas, pour le style, valoir un bon livre. La parole va et vient, pour ainsi dire, dans un sujet : elle se coupe au milieu d'une phrase, pour faire à cette phrase un commencement qui vaudra mieux et plus droit à la fin de l'idée. Après avoir essayé une expression, elle en essaie une autre ; elle ne peut pas effacer ce qu'elle vient de dire, mais elle le corrige en disant la même chose d'une autre manière. Tout cela ne peut pas faire de bons discours, mais tout cela est peut-être nécessaire pour faire de bonnes démonstrations et de bons cours¹. »

J'ai tenu à conserver, à la fin de chaque conférence, les questions formulées par l'auditoire, qui m'ont permis, en y répondant, de préciser certains points ou d'en développer d'autres ; on trouvera au fil du texte des renvois aux questions relatives au passage concerné.

Il me reste à remercier très chaleureusement Roland Schær qui m'a invité à donner ces conférences dans le cadre du Collège de la Cité des sciences et de l'industrie, Taos Aït Si Slimane

1. Avertissement placé au début du premier volume de l'édition 1801 des cours donnés aux normaliens de l'an III. Toute ma gratitude à Étienne Guyon pour m'avoir fait connaître ce texte.

qui a mené à bien le très ingrat travail initial de décryptage des enregistrements, Nicolas Witkowski qui m'a suggéré certaines corrections, et surtout Thierry Marchaisse qui m'a fait bénéficier de sa lecture critique et m'a proposé de publier ce texte dans la collection «Traces écrites» qu'il a créée et longtemps dirigée avec pertinence et conviction.

I. La matière quantique

La conception moderne de la matière est étroitement tributaire de la révolution intellectuelle que l'avènement de la physique quantique a représentée au début du xx^e siècle. Après un siècle d'existence, cette physique, tant théorique qu'expérimentale, est universellement admise et sa validité reste incontestée – chez les physiciens. Encore faut-il, pour bien comprendre l'impact des idées quantiques, faire le point sur les notions classiques qu'elles vont bouleverser.

Succès et limites du réductionnisme physique

Commençons par remonter aux atomistes de l'Antiquité. Démocrite, Épicure puis Lucrèce ont eu cette intuition géniale que la matière, telle que nous la connaissons et la pratiquons spontanément, est en fait constituée d'éléments invisibles, imperceptibles, donc extrêmement petits, et dont les agencements et les comportements peuvent expliquer ceux de la matière à notre échelle. En découle un double projet :

- analyse d'abord, descente au cœur de la matière, pour découvrir ses constituants élémentaires,
- synthèse ensuite, remontée aux fins d'expliquer les propriétés de la matière en termes des comportements de ses constituants.

Un tel programme, dans l'Antiquité, ne put qu'être énoncé, mais non pas réalisé, faute des connaissances théoriques et des méthodes expérimentales nécessaires. Il ne prit son plein essor

qu'assez tardivement, puisque la découverte effective des atomes ne date que du XIX^e siècle : moins de deux siècles, c'est donc tout récent. Mais ce programme a connu une considérable

« Mais ne va pas croire que la couleur soit la seule qualité dont sont dépouillés les corps premiers ; ils sont aussi exempts de toute température tiède, froide ou brûlante ; ils errent, privés de son, dénués de saveur, et n'exhalent aucune odeur particulière [...]. Du reste, en général, tout ce qui est de nature périssable, d'une substance molle et souple, cassante ou friable, poreuse et rare, tout cela doit nécessairement être étranger aux atomes, si nous voulons asseoir l'univers sur des fondements éternels sur lesquels son salut puisse reposer éternellement. »

Lucrèce, *De natura rerum*, II,
842-864, trad. Ernout.

accélération au cours du XX^e siècle ; il a permis de mettre en évidence une structure de la matière pour ainsi dire feuilletée, comprenant différents niveaux d'organisation que je voudrais brièvement présenter et commenter.

À partir du niveau de la matière ordinaire, celle qui nous entoure, la première phase de la descente amène au niveau des atomes et

des molécules ; puis, au sein des atomes, on découvre des noyaux et des électrons ; ensuite, dans les noyaux eux-mêmes, des hadrons (baryons et mésons) ; enfin (provisoirement), on comprend que ces particules subnucléaires sont composées de quarks et de gluons, atteignant ainsi un cinquième niveau de structuration de la matière (**tab. I.1**).

<i>Niveau</i>	<i>Découverte</i>	<i>Échelle</i>
Matière ordinaire	(depuis toujours)	10^{-3} m
↓		
Atomes et molécules	XIX ^e siècle	10^{-10} m
↓		
Noyaux et électrons	début XX ^e	10^{-14} m
↓		
Nucléons et autres hadrons	vers 1935	10^{-16} m
↓		
Quarks et gluons	vers 1970	10^{-18} m

TABLEAU I.1

Les niveaux d'organisation de la matière. Descente analytique.

Il vaut la peine de considérer plus précisément les échelles spatiales de ces différents niveaux et la séquence temporelle de leur découverte. La matière ordinaire est par nature connue depuis toujours; elle concerne les distances et longueurs communes, kilomètres et mètres, jusqu'aux fractions de millimètre, échelle familière déjà dans l'Antiquité et au Moyen Âge, et qui ne sera guère étendue avant le XIX^e siècle. C'est alors que la science commence à plonger plus profond, et va découvrir les atomes et les molécules à une échelle de 10^{-9} m, c'est-à-dire l'échelle du milliardième de mètre, ou nanomètre.

Pour effectuer ce bond considérable, d'un facteur 10^6 (soit un million), du millimètre au nanomètre, il a fallu plusieurs siècles. Mais quelques décennies ont suffi pour gagner encore un facteur d'un million, et atteindre dès le début du XX^e siècle le niveau interne à l'atome, celui des noyaux, à l'échelle du femtomètre (encore appelé fermi), soit 10^{-15} m: la découverte du noyau atomique date de 1913. Un peu plus tard, vers 1935, on commence à percevoir la structure interne des noyaux, débouchant dans les années 1950 sur la découverte de la faune complexe des hadrons à une échelle inférieure à 10^{-16} m. On atteint enfin, vers 1970, le niveau des quarks et des gluons à une échelle de 10^{-18} m. Ne mentionnons que pour mémoire les spéculations encore incertaines concernant la matière à des distances bien inférieures (jusqu'à l'échelle de Planck, de 10^{-34} m). Mais prenons la pleine mesure de cette plongée vertigineuse qui, en à peine plus d'un siècle, nous a fait gagner 9 ordres de grandeur décimaux: de 10^{-9} m à 10^{-18} m, c'est-à-dire à peu près autant que pendant plus de deux millénaires, depuis l'Antiquité jusqu'au XIX^e siècle.

Cette descente vers l'élémentaire est un succès considérable de la science moderne, et les physiciens sont en droit d'être fiers de leur réussite dans cette phase d'analyse – encore qu'il faille moduler l'expression utilisée de "descente vers l'élémentaire", puisque c'est la notion même d'élémentarité qui se trouve progressivement mise à mal à chaque niveau successif, et que rien ne garantit aujourd'hui l'existence d'un niveau ultime. Nous y reviendrons.

En revanche, on ne peut certainement pas jeter un regard aussi satisfait sur la seconde phase du programme, celle de la

<i>Niveau</i>	<i>Statut</i>
Matière vivante	
↑	????
Matière ordinaire	
↑	??
Atomes et molécules	
↑	?
Noyaux et électrons	
↑	??
Nucléons et autres hadrons	
↑	???
Quarks et gluons	

TABLEAU I.2

Les niveaux d'organisation de la matière. Remontée synthétique

Les points d'interrogation indiquent, par leur nombre, le statut de la compréhension d'un niveau à partir de celui qui le sous-tend.

synthèse, qui aujourd'hui encore pose bien des problèmes (**tab. I.2**). L'étape de la remontée à l'heure actuelle la mieux comprise est celle qui permet de passer du niveau des noyaux et des électrons à celui des atomes et des molécules. La théorie quantique s'est d'ailleurs développée dans les années 1920 pour permettre cette reconstruction. Dès les années 1930 et 1940, elle fournit une bonne compréhension du comportement des atomes et des molécules sur la base de leur constitution en termes de noyaux et d'électrons. Laissons pourtant à cette étape un point d'interrogation, car notre compréhension, pour être satisfaisante, n'est pas parfaite. Elle est aussi bonne qu'on peut l'espérer quand il s'agit d'atomes légers ou de petites molécules. Mais pour des atomes lourds, ayant un grand nombre d'électrons, et plus encore pour de grosses molécules, si l'on peut aujourd'hui, grâce aux moyens de calcul modernes offerts par les grands ordinateurs, faire des calculs détaillés qui donnent de bons résultats, il n'est pas sûr pour autant qu'on obtienne ainsi une compréhension intellectuelle suffisante. En tout cas, et cela peut paraître surprenant, la phase de remontée qui pourtant serait la plus proche de notre niveau, permettant de remonter des propriétés des atomes

et des molécules au comportement de la matière ordinaire, est en fait plus problématique que la précédente. Certes, beaucoup de comportements de la matière ordinaire sont, quant à leur principe, compris, essentiellement sur la base de sa structure électronique : la conductivité électrique et calorifique, la cohésion des matériaux, les changements d'état (solide/liquide/gazeux), etc. Mais, et plus encore qu'en ce qui concerne les atomes et les molécules, le détail de ces propriétés est fort loin d'être bien expliqué.

Prenons un exemple particulièrement frappant parce qu'il ne s'agit pas d'une substance ésotérique, mais de celle qui est la plus familière et la plus importante, l'eau. Comme chacun le sait, la glace est moins dense que l'eau. Sinon d'ailleurs, nous ne serions pas là pour en parler ! Car si la glace ne flottait pas, les océans auraient gelé en masse au cours des phases glaciaires, et la vie aurait été éradiquée ; c'est bien parce que la glace flotte que l'eau reste liquide sous les banquises, et que la vie dans les fonds marins est protégée. C'est donc un phénomène absolument capital – mais étrange : la plupart des solides sont plus lourds que leurs liquides, et cela paraît normal car un solide est un assemblage d'atomes plus ordonné qu'un liquide, donc plus tassé. Mais ce n'est pas le cas de l'eau ! Or, à l'heure actuelle, si l'on en a une explication qualitative *a posteriori*, nous ne serions pas capables de prévoir cette situation. Supposons que nous ne connaissions pas les propriétés macroscopiques de l'eau, et que nous sachions seulement qu'elle est constituée des fameuses molécules H_2O . Ces molécules, nous connaissons leur constitution, leur forme géométrique, les distances entre les différents atomes, leurs modes de vibration, etc. Mieux, nous connaissons fort bien les interactions entre ces molécules prises deux à deux, ces mêmes interactions qui gouvernent l'ensemble d'une masse liquide. Mais passer du comportement d'une, deux, trois molécules d'eau à celui d'un très grand nombre, nous ne savons pas bien le faire, et nous serions incapables, si nous n'avions pas les faits expérimentaux, de prédire que la glace flotte sur l'eau, et de comprendre, au sens fort, ce comportement quotidien banal. On pourrait multiplier de tels exemples.

En ce qui concerne les autres phases, le passage des baryons et des mésons aux noyaux est problématique. C'est pour expliquer les comportements des noyaux que s'est développée la recherche des particules subnucléaires, qui a débouché sur la découverte des baryons et des mésons. Mais on s'est vite aperçu que cela ne suffisait pas vraiment pour comprendre les noyaux, d'où, par une sorte de fuite en avant, la descente au niveau sous-jacent, ce qui en fait n'a rien réglé, puisqu'il est encore plus compliqué, à l'heure actuelle, de remonter des quarks et des gluons aux baryons et aux mésons ! Ne faisons que mentionner la question du passage de la matière ordinaire, inanimée, à la matière vivante, qui mérite évidemment quatre points d'interrogation. Le projet réductionniste qui vise à expliquer la biologie (et pourquoi pas la psychologie...) à partir de la physique et de la chimie, ce grand programme de la biochimie moléculaire contemporaine, ne connaît, malgré des proclamations quelque peu triomphalistes, que des résultats modestes. Et l'on peut avoir des doutes sérieux sur sa signification même.

Pourquoi donc ce succès variable, ambigu, de la remontée synthétique, de la compréhension d'un niveau à partir d'un autre ? C'est que, sous ses apparences familières, la matière se comporte (en particulier – mais pas seulement – à petite échelle, au niveau atomique) d'une façon extrêmement différente de celle qui nous est coutumière. Nous arrivons ainsi au cœur de notre sujet.

Qualités premières et qualités secondes de la matière

Les physiciens classiques ont fait un effort de pensée considérable pour distinguer, dans les qualités perceptibles de la matière, ce qu'ils ont appelé "qualités premières" et "qualités secondes". En 1632, Galilée écrit ainsi dans *L'Essayeur* :

« Je dis que je me sens nécessairement amené, sitôt que je conçois une matière, une substance corporelle, à la concevoir tout à la fois comme limitée et douée de telle ou telle figure, grande ou petite par rapport à d'autres, occupant tel ou tel lieu à tel moment, en

mouvement ou immobile, en contact ou non avec un autre corps, simple ou composée. Et par aucun effort d'imagination je ne puis la séparer de ces conditions. Mais qu'elle doive être blanche ou rouge, amère ou douce, sonore ou sourde, d'odeur agréable ou désagréable, je ne vois rien qui contraigne mon esprit de l'appréhender nécessairement accompagnée de ces conditions. Et peut-être, n'était le secours des sens, le raisonnement ni l'imagination ne les découvrirait jamais. Je pense donc que ces saveurs, odeurs, couleurs, etc., ne sont que de purs noms et n'ont leurs sièges que dans les corps sensitifs eux-mêmes, de sorte qu'une fois le vivant supprimé, toutes ces qualités sont détruites et annihilées.»

Autrement dit, l'odeur, la couleur, la saveur n'appartiennent pas en propre aux objets matériels : ce ne sont pas des propriétés

« [...] nos sens nous excitent souvent à apercevoir clairement et distinctement, une matière étendue en longueur, largeur et profondeur, dont les parties ont des figures et mouvements divers, d'où procèdent les sentiments que nous avons des couleurs, des odeurs, de la douleur, etc. »

Descartes, *Sixième Méditation*.

des corps, mais les formes de notre perception des corps. Ce qui appartient en propre aux objets matériels, pour la physique classique, ce sont non pas ces qualités dites secondes, mais les qualités premières

qui sont, comme dit Galilée, la forme, le mouvement, etc.

On trouve la même idée chez Descartes, chez Boyle, mais son énoncé le plus clair sans doute est dû à Locke, dans un passage célèbre de l'*Essai sur l'entendement humain*, datant de 1690 :

« On doit distinguer dans les corps deux sortes de qualités. Premièrement celles qui sont entièrement inséparables du corps en quelque état qu'il soit de sorte qu'il les conserve toujours, ces qualités sont de telle nature que nos sens les trouvent toujours dans chaque partie de matière assez grosse pour être aperçue et l'esprit les regarde comme inséparables de chaque partie de matière, même si nous ne pouvons pas l'apercevoir. Ces qualités du corps qui n'en peuvent être séparées, je les nomme qualités originales premières, ce sont la solidité, l'étendue, la figure, le nombre, le mouvement ou le repos et qui produisent en nous des idées simples comme chacun peut à mon avis s'en assurer par soi-

même. Il y a en second lieu, des qualités qui dans les corps ne sont effectivement autre chose que la puissance de produire diverses sensations en nous par le moyen de leurs premières qualités, c'est-à-dire par la grosseur, figure, contexture et mouvement de leurs parties insensibles comme sont les couleurs, les sons, le goût, etc., je donne à ces qualités le nom de qualités secondes.»

L'idée est alors naturelle de descendre vers le niveau élémentaire, celui des atomes, pour tenter de comprendre les qualités secondes des corps (couleurs, odeurs, etc.) sur la base des qualités premières (figures, formes, nombres, mouvements) de leurs constituants élémentaires. Le XVII^e siècle redécouvre Lucrèce et l'atomisme antique, qui se répand et s'imposera pleinement au XIX^e siècle. Mais, et j'annonce la suite, quelque peu ironique, de l'évolution des idées, force sera de constater que les corpuscules dits élémentaires, au niveau de l'atome, les électrons par exemple, ou les noyaux, ne présentent *pas* ces qualités premières tenues pour naturelles ! Si Galilée, Descartes, Locke, pensaient la figure, le nombre, le mouvement, comme inséparables de tout objet – à la fois expérimentalement et conceptuellement –, les physiciens modernes vont découvrir, péniblement, à partir du début du XX^e siècle, que tel n'est pas le cas. C'est un gigantesque défi qu'ils devront relever, un défi à l'intuition, qui, à rester fondée sur l'expérience commune de la matière, celle que nous touchons, voyons, sentons, ne pourra pas rendre compte de la nature des objets microscopiques. Et c'est là qu'apparaissent les objets quantiques dans toute leur spécificité. Ces êtres quantiques, nous allons leur donner une dénomination qui n'est pas à l'heure actuelle encore universellement partagée, mais qui me semble être la meilleure : nous les appellerons “quantons”, ce néologisme relativement récent étant forgé, bien entendu, sur le modèle des termes électron, proton, photon, neutron, etc. ; toutes ces particules sont en fait des instances particulières, des exemples spécifiques, de la catégorie générique des quantons.

Les objets de la physique classique

Pour bien comprendre ce qu'est un quanton et réaliser à quel point son comportement rompt avec les notions qui décrivent les objets classiques, il faut revenir un instant à ces derniers. Pour la physique classique, c'est-à-dire jusqu'à la fin du XIX^e siècle, on peut rendre compte de la structure de la matière grâce à deux types de concepts. En premier lieu, les corpuscules, particules, ou encore points matériels. Il s'agit bien sûr d'une idéalité, d'un objet théoriquement construit (par Newton au premier chef) : à partir de l'observation d'objets concrets – cailloux, grains de sable, planètes vues de loin –, on définit le concept de point matériel, objet ponctuel sans étendue, doté de masse. Ce n'est pas un simple point géométrique, c'est un point physique, car il porte une propriété quantitative, la masse. Insistons-y, ce point matériel est une abstraction – mais c'est le propre de la science que de travailler avec des concepts abstraits qui idéalisent les objets réels. Ce concept de point matériel va se révéler d'une extrême fécondité. À la base de toute la mécanique classique, de Newton à Laplace, il va permettre de développer la notion de trajectoire, l'idée de force, les équations différentielles du mouvement (la fameuse loi de Newton $F = ma$) et sous-tendre toute la mécanique céleste du XIX^e siècle. Reste pourtant un problème gravissime – celui-là même que Newton ne put résoudre et à propos duquel il énonça son fameux «*Hypotheses non fingo*» («Je ne feins pas d'hypothèses», ou plus simplement : «Je ne fais pas semblant de savoir») : celui des interactions entre corpuscules.

En effet, ce qui reste très mystérieux dans la théorie newtonienne de la gravitation est la nature de cette force qui agit à distance entre les corps. Comment la Lune “sent”-elle la Terre située à 384 000 kilomètres d'elle, et comment comprendre que la Terre exerce une force sur la Lune à travers le vide interplanétaire ? C'est un phénomène on ne peut plus étrange quand on ne connaît, comme c'est le cas à cette époque, que des actions de contact, des chocs, des pressions. Quand deux corps se touchent,

on comprend – tout au moins on croit comprendre – pourquoi, comment ils agissent l'un sur l'autre. Mais quand ils sont séparés – par le vide ! –, comment font-ils pour agir l'un sur l'autre ? Newton énonce sa loi, la fameuse loi de la gravitation, selon laquelle la force varie comme l'inverse du carré de la distance, mais *hypotheses non finxit*, il ne sait pas pourquoi, et ne fait pas semblant de savoir.

C'est pour résoudre cette énigme que va naître, au XIX^e siècle, un deuxième concept-clef de la pensée classique, qui déjà – et ce point est capital ici – va mettre en question l'idée de qualités premières des corps, c'est le concept d'onde, ou de champ.

La notion d'onde émerge d'abord pour rendre compte des mouvements particuliers de certains milieux, les vagues sur

« Avant Maxwell, on concevait la réalité physique en termes de points matériels. Après lui, on la représenta par des champs continus, sans explication mécanique [...]. Cette transformation dans notre conception de la réalité est la plus profonde et la plus féconde que nous ayons connue depuis Newton. »

Albert Einstein, 1931.

l'eau, le son dans l'air. Elle décrit de façon globale et macroscopique le comportement d'un substrat sous-jacent. Plutôt que de suivre en détail les mouvements individuels des atomes de l'air ou de

l'eau, la description ondulatoire en donne une représentation d'ensemble, simple et générale. Ce concept se révélera des plus utiles en électromagnétisme, où il s'appliquera aux ondes électromagnétiques – la lumière, les ondes radio, bientôt les rayons X. Mais dans quel milieu se propagent ces ondes ? On invente un milieu hypothétique dans lequel la lumière est censée se propager, à l'instar du son dans l'air ou des vagues sur l'eau : c'est le fameux éther. Malheureusement, il va falloir doter ce milieu de propriétés des plus étranges et finalement contradictoires : il doit être très rigide pour expliquer la vitesse extrême de la lumière et très ténu pour pouvoir remplir tous les interstices de la matière. On finira par se résoudre à y renoncer et à accepter l'idée que les ondes électromagnétiques ne décrivent nullement le mouvement d'un substrat sous-jacent, mais que le champ électromagnétique constitue un être physique en soi. Le concept d'onde s'émancipe ainsi de sa base matérielle ; le terme

