

## *Interdisciplinarité*

---

# ÉVOLUTION HISTORIQUE DE QUELQUES MODÈLES : DE L'ANALOGIE FIGURATIVE À L'ABSTRACTION

Jean Rosmorduc

Université de Bretagne Occidentale

Plusieurs philosophes du XIX<sup>e</sup> siècle ont prétendu que l'histoire humaine serait - ainsi que la Nature - soumise à des lois. Le *Positivisme* d'Auguste Comte a sans doute été, à cet égard, l'une des plus catégoriques. Hegel a soutenu de semblables thèses. On les retrouve aussi dans le *marxisme*, davantage d'ailleurs chez la plupart des marxistes du XX<sup>e</sup> siècle que chez Marx lui-même.

Plus prudent aujourd'hui que je ne l'aurais certainement été il y a vingt ans, je ne vais pas - contrairement à ce que paraît indiquer mon titre - démontrer une **loi de l'histoire des sciences**. J'essaierai seulement d'illustrer, par quelques exemples, un processus qui se présente assez fréquemment. Ceux  
*NDLR* - Pour des raisons de commodité, les notes, très nombreuses, ont été regroupées page 170.

*Bulletin APMEP - n° 403 - Avril-Mai 1996*

qui le souhaiteraient auraient le loisir, s'ils le voulaient, de l'ériger en "loi"!

### **Le schéma de F. Halbwachs**

Les *historiens des sciences* et les *épistémologues* se sont interrogés depuis longtemps sur les caractéristiques de l'évolution des théories scientifiques. Ils ont été rejoints, plus tard, par les *didacticiens*. Ceux-ci se préoccupent surtout de la compréhension individuelle des sciences, quitte à rechercher des similitudes éventuelles avec l'histoire (1). Ces réflexions sont ébauchées dès le XIX<sup>e</sup> siècle, reprises et développées ensuite au cours des années 1920-1940 par divers penseurs dont Bachelard (2) est le plus marquant, et bien sûr Jean Piaget dans plusieurs de ses ouvrages (3).

De nombreuses études sont relatives à la construction des représentations scientifiques et à leur succession, que le concepteur examiné soit un individu ou un groupe de savants, l'un et l'autre se situant évidemment dans le cadre d'une société historiquement définie. Selon les choix philosophiques et langagiers, les concepts varient et les appellations changent : *paradigmes* chez Kuhn (4), *modèles* chez quelques autres, *représentations* d'une manière plus générale...etc.

Notre but n'étant pas de disserter sur les justifications, les avantages et les inconvénients des différentes options, nous allons nous contenter d'adopter, *comme fil conducteur*, l'analyse de F. Halbwachs.

Pour ce physicien, au premier niveau de perception, le cerveau élabore ce qu'il nomme un "*modèle-image*". Il précise ce concept en écrivant que, dans ce modèle, «...les notions introduites...entretiennent avec le sujet qu'elles représentent le même rapport qu'une photographie...avec l'objet photographié» (5). Au fur et à mesure que le savoir progresse, le modèle change, se complexifie en devenant de plus en plus scientifique. Halbwachs utilise l'expression "*modèles emboîtés*", en se référant explicitement à l'image des poupées gigognes russes.

Nous allons, à partir de quelques exemples, illustrer le mouvement, schématisé par cet auteur, du "*modèle-image*" au *modèle scientifique*.

### **La "structure granulaire" de la matière, de l'atome de Démocrite aux particules élémentaires du XX<sup>e</sup> siècle.**

Un *raisonnement par analogie* figure très souvent au départ de la compréhension d'un phénomène auparavant inexpliqué. «L'efficacité du raisonnement par analogie», écrit A. Weil-Barais, «tient au fait qu'il permet de fournir une représentation d'un objet inconnu à partir de ce qui est déjà connu. Cette représentation est le point de départ d'investigations ultérieures.

C'est donc une *méthode heuristique* (\*) de découverte (6)(\*)(souligné par l'auteur). La démarche conduit dans un premier temps à ce que Drrckeim appelle une "pré-notion" (7), résultat en quelque sorte de "l'expérience première" de Bachelard (8).

Tel est probablement le cas de la première forme de l'atomisme antique. Un matériau, apparemment compact, est formé, selon Démocrite, d' "atomes et de vide" (9). Selon Epicure, l'atome a une masse, une forme, un mouvement (10). De la manière dont s'assemblent les atomes, et de leur forme elle-même, dépendent la forme et les propriétés du corps. L'affirmation est suscitée par l'observation de l'univers - formé de corps célestes et de vide - et par celle de substances comme le sable et la poussière. L'univers des atomistes est infini, comme l'est également le nombre d'atomes.

Ce dernier trait - et sans doute aussi l'assimilation ultérieure de l'épicurisme à une philosophie du plaisir - vaudra à l'atomisme l'opprobre des religions médiévales révélées. Giordano Bruno devra son supplice en 1600, autant à cette philosophie qu'à son soutien au système de Copernic. Néanmoins, "l'intuition atomistique" (11) persiste et réapparaît périodiquement, entre autres, chez Galilée, Gassendi et Newton. La représentation de l'atome ne se modifie pas sensiblement. Nous en restons à une particule extrêmement petite et non sécable. Du fait de sa masse, Newton pense qu'elle est soumise à la gravitation universelle (12).

Plus innovant est l'apport de Bernoulli au siècle suivant. En 1738, pour rendre compte de l'augmentation de la pression d'un gaz dans une enceinte fermée quand on élève la température, il imagine une explication qui va, au siècle suivant, donner naissance à la *théorie cinétique des gaz*. Le gaz est composé de particules et la chaleur est liée au mouvement par l'intermédiaire de leur "force vive"  $mv^2$ . La pression est consécutive au choc des corpuscules sur les parois (13). Une conception "granulaire" de la structure de la matière revient donc cette fois dans le cadre de la philosophie mécaniste qui domine les sciences du XVII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle.

Le XIX<sup>e</sup> siècle a vu le triomphe de la **théorie atomique** mais aussi, à la fin du siècle, le rejet du modèle de l'atome insécable. Le retour en force de ce qui n'était au départ que "l'hypothèse atomique" est venu de la volonté de fonder les lois expérimentales (loi de Proust ou des proportions définies, loi de Gay-Lussac) auxquelles les relations chimiques étaient soumises. C'est l'anglais John Dalton qui, en 1808, formule des explications basées sur la constitution atomique des corps (14). Le débat sur ce sujet a opposé les chimistes pendant tout le siècle. Des arguments, inspirés par les résultats de l'électrolyse de diverses substances, ont été utilisés par ceux qui défendaient

la théorie atomique. La mesure, en 1865, par Loschmidt, de ce qu'on a appelé ensuite le *nombre d'Avogadro*, a en fait tranché le débat. Il n'empêche que les opposants à l'atomisme (J.-B. Dumas, M. Berthelot...) n'ont pas désarmé et qu'il a fallu attendre les dernières années avant 1900 pour que la cause soit définitivement entendue. Mais l'atome de ces chimistes du XIX<sup>e</sup> siècle était - comme d'ailleurs ses devanciers depuis l'Antiquité - une sorte de petite sphère *insécable* comme le voulait son étymologie, quel que soit le procédé de fractionnement (physique ou chimique) auquel on recourait. Le modèle ne se résumait pas toutefois à cette particule. Il intégrait les différentes propriétés découvertes depuis le début du siècle : l'atome de chaque élément chimique avait une masse particulière ; il possédait une "*valence*" qui le rendait susceptible de s'unir à un, deux, trois... atomes d'un autre élément ; les molécules organiques possédaient une structure que les travaux de Pasteur, Le Bell, Van'T Hoff avaient permis de suggérer... L'atome est donc bien autre chose qu'une petite boule.

Les recherches sur l'électrolyse (qui ont conduit, entre autres, à l'idée de l'existence d'une *charge électrique élémentaire négative*), la découverte des *rayons cathodiques* (Crookes, 1879) et la reconnaissance de leur identité (J.-J. Thomson, J. Perrin, 1895), celle de l'*effet photoélectrique* (Hertz, 1887), et pour finir celle de la *radioactivité* de l'Uranium (H. Becquerel, 1896)... sonnaient déjà, à peine la théorie atomique acquise, le glas de l'insécabilité de sa particule ultime. En 1891, Stoney baptise *électron* la particule élémentaire négative. Les expériences sur le spectre de l'hydrogène (1885), les découvertes successives sur la radioactivité... etc., imposent l'idée d'une structure atomique complexe : modèle de Rutherford (1911), de Bohr (1913), de Sommerfeld (1916).

La particule ne se résume pas à un schéma (les orbites de Bohr et de Sommerfeld sont quantifiées), mais on peut quand même la représenter par une structure figurable. Ce n'est plus le cas ensuite. L'essor de la physique quantique après 1920, les découvertes successives d'une foule de particules, la mise en évidence de leurs propriétés et de celles des édifices atomiques... ont rendu illusoire de le tenter.

Il est entendu que l'atome n'est ni ultime, ni simple. Ses constituants eux-mêmes ne se définissent pas rapidement. La première édition (1983) du *Dictionnaire de Physique* de Fleury, Kastler et Mathieu, écrit :

«**Particule :**

1) En Physique classique, portion de matière assez petite pour qu'on puisse la traiter comme un point matériel en Mécanique newtonienne ou relativiste, et que l'on considère comme un *élément d'intégration en Physique des milieux continus*.

2) En Physique quantique, une particule est un objet qui obéit à la mécanique quantique du point et qui est caractérisée par diverses grandeurs...» etc (15). Suit l'énumération de ces grandeurs : nombres arithmétiques (masse propre, vie moyenne, spin,...) pour certaines, nombres algébriques (charge électrique, nombres baryoniques,...) pour d'autres. L'article "**Particule**" occupe deux pages et demies de l'ouvrage.

### Le modèle ondulatoire de la lumière

Les histoires un peu sommaires de la physique résument souvent l'histoire des conceptions humaines de la Lumière à une lutte constante entre un "*modèle corpusculaire*" et un "*modèle ondulatoire*", c'est-à-dire à un schéma dialectique très simplifié. L'histoire réelle est plus complexe, même si le fil conducteur principal en est effectivement *grosso modo* ce processus. Nous nous contenterons ici d'évoquer seulement le second de ces modèles.

La recherche de "*précurseurs*" est, là aussi, tentante. Le *pré-modèle* (le "*proto-modèle*", pourrait-on dire en paraphrasant M. Hulin) (16) apparaît dans le cadre de la tentative d'Aristote de comprendre ce qu'il est loisible de nommer le "*mécanisme des sensations*" humaines.

Le **toucher** est dû à un contact matériel évident entre l'organe du sens (la peau) et l'objet perçu. La nature vibratoire du **son** aurait, selon divers auteurs, été découverte par Pythagore ou l'un de ses disciples. Diogène Laërce, commentateur très postérieur, attribue cette reconnaissance à un obscur philosophe, Archéalos, lequel «fut élève d'Anaxagore et maître de Socrate» (17). La paternité des pythagoriciens est très vraisemblable. Essentiellement mathématiciens, adeptes d'une philosophie quelque peu ésotérique et qui se perpétua fort longtemps (J. Kepler, par exemple, fut l'un de ses disciples), ils ont étudié les rapports numériques entre les sons et établi ce qui deviendra plus tard la *gamme musicale*. Il semble qu'ils aient, pour ce faire, observé le mouvement des cordes de certains instruments de musique utilisés en Grèce antique (18). D'où, du fait de la persistance rétinienne, la perception concrète des vibrations des cordes.

L'explicitation de cette idée apparaît sans contestation possible dans plusieurs ouvrages d'Aristote (IV<sup>e</sup> siècle A.C.). L'émetteur de son - la voix par exemple - produit une **vibration**. L'air au contact vibre à son tour et entraîne le même phénomène dans «l'organe sensoriel» (19).

Il n'y a, dans la compréhension du processus même de l'effet physique et physiologique, aucun doute. Il s'agit bien d'un "**mouvement**" qui se propage de proche en proche de l'objet sonore à l'oreille, par l'intermédiaire d'un milieu qui est l'air. Il peut y avoir ambiguïté dans la signification du **concept**

(ou plutôt de la notion, au niveau d'ARISTOTE) de **vibration**. L. de BROGLIE en donne la définition simplifiée suivante: "Définie d'une façon concrète à partir de l'expérience courante, la vibration peut être considérée comme un tremblement rapide d'un milieu matériel de part et d'autre d'un état d'équilibre" (20). Il est assez vraisemblable que cette conception intuitive - "un tremblement rapide d'un milieu matériel" - ait effectivement pu représenter ce qu'un philosophe grec du IV<sup>e</sup> siècle A. C. pouvait entendre par vibration.

**Par analogie**, et dans le cadre d'un "projet" qui consiste à comprendre comment s'opèrent les sensations, ARISTOTE essaye d'analyser le phénomène lumineux ou, plutôt, la vue. Comme le son, la lumière est "un mouvement" qui, dit-il, "... ne se disperse pas en largeur mais va tout droit" (21). L'émetteur est l'objet lumineux, le récepteur est l'oeil. Ce qui tient ici le rôle joué par l'air dans la transmission du son est baptisé "*diaphane*" (22). On reconnaît par ailleurs une comparaison des couleurs et des rapports numériques (ceux de la gamme) entre les sons. (23). En tenant compte des réserves formulées plus haut sur le concept de "*précurseur*", ceci préfigure en quelque sorte ce qui deviendra le concept de longueur d'onde au XIX<sup>e</sup> siècle.

Cette conception aristotélicienne va en rester là - et même être sans doute oubliée pendant près de quatorze siècles. La nature du phénomène lumineux n'inquiète pas outre mesure les physiciens. Par ailleurs, la philosophie dominante est néoplatonicienne. Pour elle, la *lumière* - forme très pure du *feu* - est une matière et, comme toute matière, elle est formée de particules d'une forme spécifique. Les géomètres sont intéressés par le *rayon lumineux*, symbolisé pour eux par une droite. L'optique est de fait une géométrie, celle d'EUCLIDE, de C. POTELEMÉE, plus tard celle d'IBN AL HAYTHAM au cours du florissant moyen-âge musulman.

Avec la traduction du corpus aristotélicien par les Musulmans puis par les Chrétiens, les thèses d'ARISTOTE sont, dans une interprétation due à Saint THOMAS D'AQUIN, à nouveau diffusées à partir du XIII<sup>e</sup> siècle. L'analogie "*proto-ondulatoire*" revient alors, couplée à l'optique géométrique de l'Irakien IBN AL HAYTHAN.

Tout ceci est à situer dans le cadre de la préhistoire des conceptions ondulatrices. Le **risque d'anachronisme** est, de toute évidence, très grand. En tout état de cause, nous pratiquons ce que BACHELARD appelait "**une récurrence historique**" (24). Connaissant, non la fin de l'histoire (qui est encore bien loin d'être terminée), mais le stade où elle est rendue en 1994, nous examinons et nous interprétons les premiers prémisses et les étapes intermédiaires en ayant dans l'esprit nos connaissances actuelles. **Quelles que soient notre bonne volonté et notre honnêteté, notre perception**

**d'une époque est obligatoirement perturbée par le fait que nous savons ce qui s'est passé ensuite.**

Mais toute vision de l'histoire est ainsi, avec une ampleur plus ou moins accentuée selon les aspects envisagés, mais forcément modifiée par rapport à la réalité initiale. Quel est par exemple l'historien qui pourrait aujourd'hui se pencher sur l'évolution de l'ex-Empire tsariste comme il aurait pu le faire vers 1970 alors que personne ne prévoyait l'effondrement de l'U.R.S.S. en 1991 ? Il faut refuser de falsifier sciemment certaines particularités, on ne peut pas éviter l'influence inconsciente des interprétations *a posteriori*.

Dans son livre sur l'incroyance au XVI<sup>e</sup> siècle, L. FEBVE cite une phrase de P. MONTEL sur le rôle des mathématiques dans notre vie actuelle, y compris en ce qui concerne nos goûts artistiques et jusqu'à nos conceptions morales. Et il explique qu'un homme du XVI<sup>e</sup> siècle n'aurait rien compris aux affirmations de P. MONTEL <sup>(25)</sup>. Dans un état d'esprit assez semblable à celui de ce dernier auteur, nous jugeons aussi (alors que nous savons de quelle manière cette évolution s'est accentuée par la suite, notamment après l'introduction de la *géométrie analytique* et celle du *calcul infinitésimal*) l'importance, pour l'avenir de la science, de l'introduction du "**langage mathématique**" par GALILÉE.

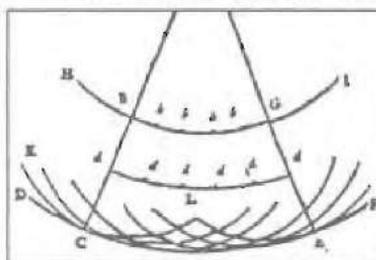
Il n'empêche : quelle qu'ait été la perception des hommes du XVII<sup>e</sup> siècle, la mathématisation galiléenne a été une innovation considérable. Si GALILÉE en a été le principal promoteur, la plupart des physiciens de cette période ont eu une attitude similaire. Les gens cultivés de l'époque n'en avaient sans doute pas conscience mais il n'empêche que l'évolution, préluant aux conceptions actuelles, était en marche.

La géométrie est la branche-reine des mathématiques au XVII<sup>e</sup> siècle. Le langage scientifique a donc été principalement "*géométrisé*" dans un premier temps. En optique - partie que le Florentin n'a guère abordée <sup>(26)</sup> - cela se voit chez KEPLER dès le début du siècle (1604 et 1611), et, à un moindre degré, chez DESCARTES. Chez l'un comme chez l'autre, il s'agit surtout d'optique géométrique. Pour ce qui concerne l'optique physique, la transformation commence à poindre chez ANGO <sup>(27)</sup> et devient évidente dans la première théorie qui, à l'aune de nos critères actuels, mérite vraiment l'appellation "**ondulatoire**", c'est-à-dire celle de C. HUYGENS. Rédigée selon l'auteur en 1678 au cours de son séjour à PARIS, elle est publiée en 1690. Il spécifie d'entrée que, dans son optique, "... la géométrie est appliquée à la matière..." <sup>(28)</sup>. L'**analogie avec le son** sert de fil conducteur au physicien hollandais, comme c'était déjà le cas chez ARISTOTE. Il ne s'agit plus cependant de s'interroger en priorité sur la vision, le sujet est bien cette fois la lumière elle-même. HUYGENS doit intégrer plusieurs données incon-

nues d'ARISTOTE. Il sait que le vide (d'air) existe <sup>(29)</sup>, que la lumière s'y propage alors que le son ne le fait pas (expérience faite par R.BOYLE). La **vitesse du son** a été mesurée par MERSENNE en 1636, celle de la **lumière** a été déterminée par ROMER en 1676. L'importance de leur différence amène HUYGENS à conjecturer l'existence d'un milieu qu'il appelle "*éther*", qui existerait dans le vide ainsi que dans toutes les substances transparentes, et dans lequel "... le mouvement successif de la lumière...s'étend par des ondes sphériques, ainsi que le mouvement du son" (qui, lui, se propage dans l'air) <sup>(30)</sup>. Il imagine des particules d'éther très dures et très élastiques, serrées les unes contre les autres <sup>(31)</sup>. Quant aux sources, "chaque petit endroit d'un corps lumineux, comme le Soleil, une chandelle, ou un charbon ardent, engendre ses ondes dont cet endroit est le centre" <sup>(32)</sup>



Il s'agit bien, cette fois, d'un **modèle** géométrique d'onde lumineuse et d'un **modèle-image** de l'éther. Chaque point d'une source lumineuse émettant une onde sphérique (du moins dans un milieu optiquement isotrope), l'onde globale produite par la source est l'enveloppe de toutes les ondelettes composantes.



Le modèle de HUYGENS (et notamment sa représentation de l'éther), inspiré par la production et la propagation du son dans l'air, détermine les orientations réciproques de la vibration et de sa direction de propagation. La vibration peut être soit **longitudinale** (c'est-à-dire parallèle à la propagation, au rayon, si l'on préfère), soit **transversale** (dans ce cas, elle lui est perpendiculaire), ou toute autre orientation entre ces deux extrêmes. Dans l'onde de HUYGENS, elle est obligatoirement **longitudinale**.



Avec ces outils, le physicien démontre les "lois" de la réflexion et de la réfraction il traite de la diffraction et de ce qu'il appelle "l'étrange réfraction du cristal d'Islande". Selon lui, ce cristal est anisotrope. Il est susceptible de propager des ondes lumineuses sphériques (ce qui donne le rayon dit "ordinaire") et des ondes ellipsoïdales (ce qui donne le rayon "extraordinaire").

Le modèle d'HUYGENS est figurable, même si certaines de ses propriétés (la dureté et l'élasticité des particules d'éther, etc.) n'apparaissent pas sur un dessin. Quelques particularités lui sont ajoutées par L. EULER, puis par T. YOUNG (début XIX<sup>e</sup>), mais sans le modifier sensiblement. Leur intention (comme d'ailleurs celle de la plupart des physiciens postérieurs du XIX<sup>e</sup>) reste conforme à l'objectif de HUYGENS pour lequel, "... dans la vraie Philosophie... on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mécanique..."<sup>(13)</sup>. L'arsenal mathématique d'EULER est, notamment, du fait de l'invention du *calcul infinitésimal*, bien plus important qu'il ne l'était à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. YOUNG, en ce qui le concerne, a une culture mathématique restreinte et ses articles sont essentiellement intuitifs et expérimentaux.

Une "théorie analytique" de la lumière sera développée par MALUS, mais dans le cadre de la théorie corpusculaire<sup>(14)</sup>. Le modèle ondulatoire de la physique classique, emprunté pour l'essentiel au départ à HUYGENS et YOUNG, est dû à Augustin FRESNEL. Insatisfait de la théorie corpusculaire affirmée par les newtoniens depuis plus d'un siècle, FRESNEL a entrepris, en 1814-1815 - après avoir lu HUYGENS, EULER et YOUNG sur le conseil de F. ARAGO - de compléter l'interprétation de la diffraction que HUYGENS avait seulement ébauchée. Le modèle de l'éther du physicien hollandais convenait à cette explication. FRESNEL, s'inspirant de ce qu'il appelle "le principe d'interférence" et qui est dû à YOUNG, aboutit à un "Mémoire sur la Diffraction"<sup>(15)</sup> qui est couronné en 1819 par l'Académie des Sciences. La vibration lumineuse, comme chez HUYGENS, reste longitudinale. Sa théorie de la diffraction n'en souffre pas. Par rapport à l'autodidacte T. YOUNG<sup>(16)</sup>, FRESNEL a, sur le plan scientifique, un net avantage. Il sort de l'Ecole Polytechnique qui a vu le jour en 1794. Si sa formation initiale en physique laisse semble-t-il, à désirer, il a par contre un solide bagage en mathématiques et en mécanique. Il utilise donc les concepts et les théories modernes des mathématiques. Ses développements sur la lumière et ses propriétés font appel, non seulement à la géométrie et à la trigonométrie comme ceux de HUYGENS, mais encore au calcul infinitésimal, aux équations différentielles et à la géométrie analytique. Ceci étant, mises à part ces formes d'expression et de calcul, les fondements de son modèle ne diffèrent pas de ceux de HUYGENS.

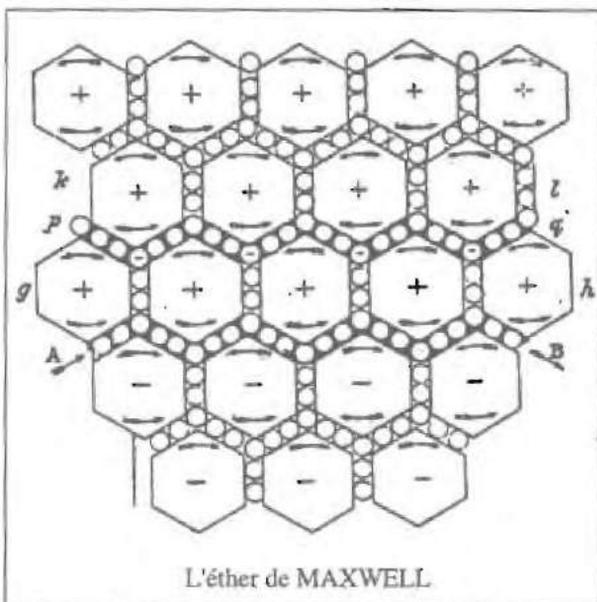
Sans entrer dans le détail de l'œuvre de FRESNEL, disons que ce sont ses travaux sur *la polarisation de la lumière* qui, après une période d'hésitation de 1816 à 1821, l'ont amené à remettre en cause pour partie son point de vue initial<sup>(27)</sup>. La lumière est toujours une onde se propageant dans l'éther, mais les contradictions entre les réalités expérimentales et les prévisions découlant du modèle le conduisent à conjecturer que **la vibration lumineuse est transversale**. De ce fait, l'éther de HUYGENS ne convient plus. Inspiré par l'analogie avec le son, calqué sur le schéma des molécules d'air, cet éther ne peut conduire une vibration transversale. FRESNEL aboutit à un point de rupture : en bonne logique son nouvel éther n'est plus représentable. Qu'est-ce en effet que ce soit-disant fluide qui, au lieu de porter comme ses congénères une vibration longitudinale, est le siège de vibrations transversales ? Permettant d'expliquer la plupart des phénomènes optiques connus, d'en prévoir d'autres que l'expérience vérifie, la nouvelle théorie ondulatoire mise au point par FRESNEL de 1821 à 1823 constitue l'une des disciplines principales de la physique au XIX<sup>e</sup> siècle. Pour autant son éther est, quoiqu'en pense le physicien qui recherche toujours un modèle mécanique, abstrait. Par ailleurs, et malgré différents essais de plusieurs physiciens prestigieux (expériences de FIZEAU, de MICHELSON...), la réalité physique de l'éther reste invérifiable.

On sait que, parallèlement, l'électromagnétisme est né en 1820, (expérience d'OERSTED) et a rapidement pris son essor. Suite aux travaux de différents savants (AMPERE, ARAGO, BIOT, GAUSS, FARADAY...), le dernier nommé postule l'existence de ce qu'il nomme des "*lignes de force électrique et magnétiques*". C'est la propagation de ces "lignes de force" qui est, selon lui, la cause des actions électriques et magnétiques apparemment "*à distance*"<sup>(28)</sup>.

Dans ce cas, comme d'ailleurs dans celui de l'hypothèse de l'éther, c'est la possibilité d'**une action à distance sans support matériel** que les physiciens refusent. Le vide complet, souvent assimilé au néant, a été rejeté par de nombreux philosophes depuis l'Antiquité. L'explication du magnétisme requérait en général la présence "d'effluves", "d'émanations" diverses, voire d'une sorte de "colle". Une fois démontrées la possibilité de la création d'un vide d'air et son existence dans l'espace interplanétaire, les physiciens se sont ingénies à le peupler d'un milieu qui soit l'intermédiaire obligé par lequel se transmettent différentes actions. C'est la fonction de l'éther de NEWTON (différent de celui de HUYGENS) qui transporte aussi bien l'attraction gravitationnelle que les forces électriques et magnétiques, etc.<sup>(29)</sup>.

De 1847 à 1851, W. THOMSON (LORD KELVIN) a cherché, en s'ins-

pirant de la théorie de l'élasticité, à bâtir une représentation mécanique de l'électromagnétisme. Restée en partie inachevée, sa tentative a cependant ouvert la voie à J.C. MAXWELL (40). Celui-ci, se basant principalement sur les résultats d'AMPERE et FARADAY, édifie de 1855 à 1864 ce qui restera comme la



**théorie électromagnétique de la lumière.** Il avance l'idée de l'existence d'un *champ électromagnétique* (41) qui se déplace. Il démontre théoriquement les équations de ce champ, et identifie la lumière à une *onde électromagnétique* (42).

Chez MAXWELL, L'onde est une perturbation d'un milieu qui reste l'éther, celui de l'optique de FRESNEL auquel le physicien anglais ajoute des propriétés découlant de sa théorie électromagnétique. La représentation schématique qu'il tente d'en donner sera rapidement abandonnée, alors que les quatre équations subsistent encore. La vérification expérimentale, par HERTZ, de la théorie de MAXWELL, l'a confirmée au regard des physiciens. Cette validité reste d'actualité, plus que jamais pourrait-on dire dans la mesure où de nombreuses applications ont, au XX<sup>e</sup>, conduit les scientifiques et les ingénieurs à étudier de multiples cas de propagation d'ondes électromagnétiques. Reprenons le Dictionnaire de physique. Nous lisons :

#### "Lumière

Rayonnement électromagnétique auquel l'œil est sensible. Sa longueur d'onde est comprise entre 0,4  $\mu\text{m}$  et 0,75  $\mu\text{m}$  environ, et sa fréquence  $\nu = \lambda/c$  entre  $7,5 \cdot 10^{14}$  hz et  $4 \cdot 10^{14}$  hz. A ces valeurs est reliée la sensation de couleur....." (43)

#### "Rayonnement

Transport d'énergie et de quantité de mouvement dans le vide ou dans un

milieu matériel..."<sup>(44)</sup>

#### "Rayonnement électromagnétique

Le champ électromagnétique rayonné par une distribution de charges contenues dans un volume  $T$  dont la densité  $\rho$  et la vitesse  $\vec{v}$  sont connues en chaque point  $M$ , peut se calculer en un point  $P$  à chaque instant  $t...$ "<sup>(45)</sup>

#### "Champ électromagnétique

Ensemble d'un champ électrique et d'un champ magnétique existant dans une même région de l'espace, vide ou contenant de la matière. Il a pour sources des charges électriques au repos ou en mouvement..."<sup>(46)</sup>

#### "Onde

Mode de propagation d'une grandeur  $G$  dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à l'autre, à un instant donné, par une équation aux dérivées partielles, l'équation d'onde, qui dépend de la nature de  $G$ .

$G$  peut être une grandeur scalaire, vectorielle, tensorielle ou spinorielle. Suivant que la grandeur vectorielle qui se propage est parallèle ou perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, celle-ci est dite **longitudinale** ou **transversale...**"<sup>(47)</sup>

#### "MAXWELL (équations de —)

Ensemble d'équations résumant les lois fondamentales de l'électromagnétisme, sous une forme macroscopique, en appliquant les principes de la physique du continu. On peut leur donner une forme intégrale ou différentielle...

...*Forme différentielle* : .....

...Les équations peuvent se mettre sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}_c \\ \text{div } \vec{D} = \rho \\ \text{div } \vec{B} = 0 \end{array} \right.$$

Où  $\vec{j}_c$  est la densité de courant de convection,  $\rho$  la densité de charge électrique..."<sup>(48)</sup>

Nous nous limitons ici à une formulation **contemporaine** de la physique classique, avant l'apparition des concepts et écritures nouveaux apportés par la physique quantique au XX<sup>e</sup> siècle.

A titre indicatif, nous pouvons aussi citer ce que le même dictionnaire écrit à l'article

### "Ether

Fluide hypothétique emplissant l'espace, même vide, et dont l'existence parut nécessaire à la propagation de la lumière, à l'époque où l'on rapprochait les ondes élastiques des ondes acoustiques (HUYGENS). Les ondes lumineuses étant transversales (FRESNEL), les propriétés élastiques attribuées à l'éther: rigidité extrême et résistance presque nulle aux mouvements étaient incompatibles entre elles. Avec la théorie électromagnétique de la lumière, l'éther disparut en tant que milieu élastique, mais subsiste jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, comme un fluide continu baignant les atomes constituant la matière et servant de support aux ondes électromagnétiques...

La cinématique de la Relativité restreinte, qui abandonne la notion de référentiel absolu, rend inutile l'hypothèse de l'éther" (\*).

Il arrive que des universitaires débutent un cours d'électromagnétisme, par exemple en licence de physique, en disant : "une onde électromagnétique est la réalité physique représentable par les quatre équations de MAXWELL", et en écrivent sur le tableau les relations énoncées plus haut. Le pédagogue pourra considérer qu'une telle introduction est par trop dogmatique et axiomatique. Ceci étant, elle est scientifiquement correcte.

### De l'image à l'abstraction

L'histoire des sciences foisonne d'exemples analogues aux deux évolutions que nous venons d'esquisser rapidement.

Nous aurions pu poursuivre l'histoire des conceptions de la lumière jusqu'à la *mécanique ondulatoire* de L. de BROGLIE et, au-delà, jusqu'à l'*électrodynamique quantique*. La conception actuelle est encore moins figurable que celle de MAXWELL.

Sur une période plus courte, un processus identique a existé pour l'explication du courant électrique, du *fluide* justifiant le "*modèle hydraulique*" jusqu'aux théories actuelles. Idem pour la chaleur, du *calorique* à la thermodynamique d'aujourd'hui. Idem pour les réactions chimiques, des atomes "*crochus*" et des *affinités* aux manuels de chimie de cette fin de 1994. Idem pour les modèles cosmologiques, de l'Égypte et de Sumer à l'astrophysique du XX<sup>e</sup> siècle. Idem pour l'histoire de la Terre où la *tectonique des plaques* n'a qu'une trentaine d'années de reconnaissance....., etc.

Il ne s'agit pas, répétons-le, d'énoncer **une loi** de l'histoire des sciences. Tout au plus est-ce **une tendance générale** pour le moins très fréquente. Sauf s'il est question d'objets physiques, de grandeurs ou de concepts mis en évidence très récemment, par une discipline déjà très théorique et très axiomatisée, les premiers modèles représentatifs sont le plus souvent concrets,

imaginés, inspirés par une analogie avec d'autres réalités déjà supposées bien connues. Puis, progressivement, le modèle intègre de plus en plus de données et finit par ne plus être quelquefois qu'un système d'équations. **La tendance générale est donc bien, historiquement, du figuratif vers l'abstrait** <sup>(8)</sup>.

Cela n'empêche d'ailleurs pas, dans certains cas, des modèles anciens, en principe obsolètes, de subsister et quelquefois d'être encore opératoires dans un domaine restreint. Il en est ainsi de l'*atome de BOHR* qui permet toujours de rendre compte de réactions chimiques. Il en est ainsi des structures moléculaires où sont associées des boules colorées reliées par des tiges. Le tout est de les prendre pour ce qu'elles sont - **des représentations schématiques commodes à certains égards** - et non des "*photographies*" fidèles d'objets complexes en réalité non figurables.

## NOTES

(1) J.L. MARTINAND, Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? (1993), *DIDASKALIA* n°2, Décembre 93, page 89-99.

J.ROSMORDUC, l'Histoire des sciences et leurs didactiques (1993), *Les Sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, n° 4-5,1993, page 153-172.

(2) Notamment G. BACHELARD, *la Formation de l'esprit scientifique* (1938), PARIS, VRIN.

(3) Voir en particulier son livre posthume (avec R. GARCIA), *Psychogénèse et histoire des sciences* (1983), PARIS, FLAMMARION.

(4) T.S. KUHN, *la Structure des révolutions scientifiques* (1975), traduit PARIS, FLAMMARION.

(5) F. HALBWACHS, *la Pensée physique chez l'enfant et le savant* (1974), NEUCHÂTEL, LE GRIFFON, page 44

HALBWACHS est un physicien qui s'est aussi intéressé à l'histoire de sa discipline et à sa didactique (il a travaillé avec PIAGET).

(6) A. WEIL-BARAIS (dir.), *l'Homme cognitif* (1993), PARIS, P.U.F., page 505.

(7) E. DURCKHEIM, *les Règles de la méthode sociologique* (1895), 15<sup>ème</sup> édition, 1963, PARIS, P.U.F., page 15-18 - cité par P. BERNOUX, *la Sociologie des organisations* (1985),PARIS,SEUIL,page22.

(8) op. cité note (2)

(9) J. VOILQUIN, *les Penseurs grecs avant SOCRATE* (1964), PARIS, GARNIER - FLAMMARION, page 193

Le mot "*atome*" vient du grec "*atomos*" = insécable

(10) EPICURE, *lettre à HERODOTE*, in B. BENSUADE-VINCENT, C. KOUNELIS, *les Atomes. Une anthologie historique* (1991), PARIS, PRES SE-POCKET, page 21-40.

(11) l'expression est de BACHELARD.

(12) op. cité note (10), page 61-70.

(13) J. ROSMORDUC et al., *Histoire de la physique, I. la Formation de la physique*

classique (1987), PARIS, LAVOISIER, page 164-165.

(14) B. BENSUADE-VINCENT, C. KOUNELIS, op. cité note (10), page 79-89.

(15) J.P. MATHIEU, A. KASTLER, P. FLEURY, *Dictionnaire de physique* (1983), PARIS, MASSON, EYROLLES, page 376-378.

(16) M. HULIN, *le Mirage et la nécessité* (1992), PARIS, PRESSES de l'E.N.S. et Palais de la Découverte.

(17) DIOGENE LAERCE, *Vies, doctrines et sentences des philosophes illustres*, trad. fran. (1965), PARIS, GARNIER FLAMMARION, page 108.

(18) voir TH. HENRI-MARTIN, *Hypothèse astronomique de PYTHAGORE* (1872), ROME ; P. BRUNET, A. MIELI, *Histoire des Sciences Anti'quité* (1935), PARIS.

(19) ARISTOTE, *de l'Âme*, trad. fran. (1966) PARIS, LES BELLES LETTRES, pages 0, 51, 53.

*Petits traités d'histoire naturelle*, trad. fran. (1953), PARIS, LES BELLES LETTRES, pages 24, 26, 46, 51.

(20) L. de BROGLIE, *Sur les sentiers de la science* (1960), PARIS, A. MICHEL, page 291.

(21) ARISTOTE, *de la Génération des animaux*, trad. fran. (1961), PARIS, LES BELLES LETTRES, page 183.

(22) ARISTOTE, *Petits traités d'histoire naturelle*, page 50  
*de l'Âme*, page 49.

Il serait impropre de qualifier le "diaphane" de milieu. En l'absence de tout éclariage dans l'obscurité, par conséquent - existe du diaphane "en puissance". Ce diaphane se réalise en tant que diaphane - il est alors "en acte" et non plus "en puissance" - en donnant de la lumière. La lumière est "le diaphane en acte" - de l'Âme, édit. citée, page 49.

(23) *Petits traités d'histoire naturelle*, édit. citée, page 29, 30.

(24) G. BACHELARD, *l'Activité rationaliste de la physique contemporaine* (1965), PARIS, P. U. F., page 21-49.

(25) L. FEBVRE, *le Problème de l'incroyance au XVI<sup>e</sup> siècle, la religion de RABELAIS* (1942), rééd., PARIS, 1968, A. MICHEL, page 365.

(26) Il a quand même essayé de mesurer la vitesse de la lumière - la quantification est aussi une forme de mathématisation du langage - et il a amélioré la lunette astronomique, utilisée par lui à partir de 1609.

(27) P. ANGO, *l'Optique divisée en trois livres* (1682), PARIS. ANGO a, selon ses dires, publié surtout les travaux que PARDIES, son collègue au Collège des Jésuites de la FLECHE, n'avait pas eu le temps d'écrire.

(28) C. HUYGENS, *Traité de la Lumière* (1690), LA HAYE - réédition de la version française, avec introduction et notes de M. BLAY, PARIS, DUNOD, 1992, page 51.

(29) Il a été obtenu en 1651 par OTTO DE GUERICKE à l'aide d'une machine pneumatique de son invention. La démonstration de la propagation de la lumière dans le vide avait auparavant été effectuée par TORRICELLI (C. HUYGENS, op. cité note (28), page 56-59)

(30) C. HUYGENS, op. cit., page 57.

(31) il les dessine sphériques tout en indiquant qu'il n'y a aucune raison pour

qu'elles aient cette forme.

(32) op. cité, page 62.

(33) *ibid.*, page 53

(34) E-L. MALUS, *Théorie de la double - réfraction de la lumière dans les corps cristallisés* (1810), PARIS

Traité d'optique, *Mémoires présentées à l'Académie par divers savants*, janvier 1811, T II, page 303 -508.

(35) A. FRESNEL, Mémoire sur la diffraction de la lumière, in *Œuvres complètes d'AUGUSTIN FRESNEL*, T I., (1866), PARIS, Imp. Nat., page 247 - 382.

(36) YOUNG était médecin de profession, mais physicien et égyptologue amateur (mais néanmoins inspiré).

(37) Voir notre article, l'Œuvre scientifique et technique d'AUGUSTIN FRESNEL, *Connaissance de l'Eure*, n° 69, juillet 88, page 25-38

(38) C. BLONDEL, l'Electricité et le magnétisme au XIX<sup>e</sup> siècle, in J. ROSMORDUC, *Histoire de la physique , I - la formation de la physique classique* ( 1987), PARIS, LAVOISIER, page 185-215.

(39) I. NEWTON, *Traité d'optique* (1704), trad. franc., réédition, PARIS, GAUTHIERVILLARS, 1955

(40) E. BAUER, *l'Electromagnétisme, hier et aujourd'hui*, (1949), PARIS, A. MICHEL., page 111 -113

(41) c'est-à-dire, intuitivement, du déplacement d'une perturbation périodique des propriétés électriques et magnétiques de l'espace.

(42) E. BAUER, op. Cit. note (40), page 113-126.

J. ROSMORDUC, op. Cit. note (38), page 231-235.

(43) op. cité note (15), page 290.

(44) *ibid.*, page 440.

(45) *ibid.*, page 440-441.

(46) *ibid.*, page 62.

L'article "**champ d'une grandeur physique**" dit ceci : " le champ d'une grandeur mesurable, scalaire, vectorielle ou tensorielle, est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine, il existe une détermination complète de cette grandeur...(page 60)

(47) *ibid.*, page 350.

(48) *ibid.*, page 302 -303 .

E est le champ électrique, H le champ magnétique, D est le déplacement électrique, B est l'induction magnétique (*ibid.*, page 62)

(49) *ibid.*, page 176-177.

(50) voir : Modèles et modélisation, ASTER, n° 7, 1988, PARIS INRP.