LA PHYSIQUE ET L'ART

Etienne Klein

klein@dsmdir.cea.fr

On dit de la Médecine qu'elle est un Art ; on le dit aussi bien de la Vénerie, de l'Équitation, de la conduite de la vie ou d'un raisonnement. Il y a un art de marcher, un art de respirer : il y a même un art de se taire.

Paul Valéry

Le thème choisi cette année, "physique et art", est un thème très vaste, impossible à traiter de façon exhaustive. Il est tellement vaste que, mis au pied du mur, on ne sait pas où donner de la tête ni par quel bout démarrer l'affaire. Alors, pour trouver ma voie, j'ai fait comme font les alpinistes lorsqu'ils sont dans une passe difficile : j'ai essayé plusieurs prises différentes, je les ai jaugées, testées du bout des doigts, jusqu'à ce que je trouve celle qui me semblait la plus solide ou la plus idoine.
Je vais donc commencer par vous parler des prises que j'ai essayées mais que je n'ai finalement pas retenues. Cela ne signifie certainement pas qu'elles soient inintéressantes ou infécondes, mais simplement que je ne me sentais pas spécialement à l'aise avec elles, que je n'avais ni le niveau ni les compétences requises pour les utiliser, ou que je préfèrerais les laisser à d'autres.

LES « PRISES » QUE J'AI CHOISI DE NE PAS PRENDRE….

1) La physique comme source d'inspiration des artistes (et réciproquement)

Il s'agirait d'examiner les jeux de miroirs (souvent déformants), les échos mutuels, qui s'organisent entre la physique et l'art, et d'abord de voir comment certaines révolutions de la physique ont pu inspirer ou fasciner les peintres (par exemple). Pour ne retenir que l'histoire récente, citons la nouvelle conception de l'espace et du temps qu'a introduite la relativité d'Einstein et qui a inspiré des artistes comme Marcel Duchamp (« Nu dans un escalier »), ou bien la physique atomique, qui a poussé des peintres comme Kandinsky vers l'abstraction. C'est un sujet en soi, immense. Il y a quelques années, le CERN avait mené une expérience originale dans ce domaine, qui a abouti à un très joli livre, La danse de l'univers.
Inversement (même si c'est sans doute plus rare), la peinture a pu influencer et enrichir la réflexion de physiciens. Je pense au cas exemplaire du physicien Bernard d'Espagnat, fils du peintre Georges d'Espagnat, qui a écrit des livres fort savants sur le « réel voilé » que suggère la physique quantique mais aussi un fort bel ouvrage sur l'influence que la peinture de son père, « préfauviste instinctif », a eue sinon sur ses propres travaux, du moins sur sa sensibilité intellectuelle (notamment sur son rapport au réel[1]).
D'une façon plus générale, on pourrait aussi questionner la nature du lien éventuel qui existe entre la pratique de la physique et la pratique d'un art. La pratique de la physique nourrit-elle la sensibilité artistique ou bien l'éradique-t-elle ? On pourrait ainsi se demander pourquoi tous les pères fondateurs de la physique quantique étaient à la fois musiciens et mélomanes (à l'exception de Erwin Schrödinger, qui ne jouait d'aucun instrument, prétendait ne pas supporter la grande musique et n'apprécier que les chansons d'amour…). N'était-ce qu'une coïncidence ? Ou bien cette activité musicale entrait-elle en résonance avec leur travail de physicien ? Faisait-elle écho à leurs préoccupations ? Ou bien ne s'agissait-il que d'un effet partagé de leur semblable éducation ?

2) Les influences historiques réciproques (approche de type « sociologie des sciences »)

Il existe une deuxième prise dans la même veine que la première, qui consisterait à analyser une fait curieux : autour de la première guerre mondiale, une même crise de la représentation a touché la physique en même temps que les arts. En physique, cette crise a débouché sur la physique quantique, qui est une physique iconoclaste (on ne peut pas dessiner un atome), tandis que, dans le domaine artistique, surgissaient le cubisme en peinture, la musique sérielle, le surréalisme (dont le but, loin d'imiter la nature, était « d'élargir le réel à la mesure de la pensée », c'est-à-dire de donner corps à des idées, à des visions, voire à des hallucinations qui n'ont pas de contrepartie dans la réalité), autant de mouvements d'avant-garde qui se sont eux aussi posés la question du réel et de sa représentation… S'est-il agi d'une simple coïncidence, ou bien d'une corrélation - d'une co-naissance - entre deux activités a priori dissociées, voire d'une causalité stricte entre la physique et les arts ou entre les arts et la physique ? Y a-t-il eu fécondation ? Si oui, dans quel sens ? Je préfère ne pas m'engager dans ce débat car il s'agit d'une nouvelle affaire de poule et

---

[1] Voir *Georges d'Espagnat*, par Bernard d'Espagnat, La Bibilothèque des Arts, Paris, 1990.

d'œuf : il faudrait pouvoir identifier le coq qui intervient dans la basse-cour et j'en suis incapable...

3) La physique dans la littérature.

Ce registre est immense. Il faudrait bien sûr évoquer Victor Hugo, qui a si bien su traduire dans ses romans la physique classique, en évitant les pièges de la facilité. On pourrait aussi évoquer Jules Verne, bien sûr, dont nous allons célébrer le centenaire de la mort. Si j'en avais le temps, je vous parlerais volontiers de l'un de ses romans, peu connu, Le Chancellor, qui s'inspire d'une tragédie qui s'est réellement produite (Le Radeau de la Méduse). Il s'agit donc d'un texte réaliste, non d'une véritable fiction, et encore moins d'une science-fiction. L'intrigue ne s'appuie sur aucune anticipation, elle n'extrapole pas à partir de la science constituée à un moment donné, et c'est pourquoi ce roman n'a pas vieilli.
Dans Le Chancellor, la science reste discrète, implicite. Aucun héros présent à bord du navire ne l'incarne, ne l'explicite ni ne la cherche. Elle n'est pratiquement jamais citée. Mais on assiste à une incroyable mise en scène des sciences de la statique et de la dynamique : les positions dans lesquelles le vaisseau s'arrête décrivent toutes des figures d'équilibre plus ou moins stable. À peine se trouvent-elles rompues par un coup de théâtre ou une circonstance imprévisible que l'on revient à une autre sorte d'équilibre, comme si on suspendait sans arrêt une chute que l'on pressent fatale. Le Chancellor ne cesse de chanceler : il passe d'un équilibre statique à un autre cinématique, puis d'un équilibre thermodynamique à un autre hydrodynamique, et ainsi de suite. Chaque équilibre singulier finit par se rompre pour courir vers un autre, qui lui-même se rompra à son tour. Le Chancellor n'est donc pas seulement un roman. En filigrane, on y découvre un authentique traité sur la suspension.
Le Chancellor est aussi un chef-d'œuvre du suspense : Jules Verne y met le temps sous tension (le roman tout entier est écrit au présent). Suspension, qui a à voir avec l'espace, suspense, qui a à voir avec le temps… Il y aurait beaucoup de choses à dire sur tout cela. Retenons simplement que, bien loin des sirènes de la science-fiction, il s'agit là d'une authentique littérature scientifique, c'est-à-dire un art d'écrire qui est encore de la science et déjà de la littérature (on pourrait également parler de la pièce de théâtre Copenhague, fiction autour de la rencontre qui eut lieu au cours de la seconde guerre mondiale entre Niels Bohr et Werner Heisenberg, et qui permet de mieux comprendre la nature des débats qu'a soulevés la physique quantique).
- Et puis, comme pour la peinture, on pourrait montrer que les bouleversements de la physique au début du XX^{e} siècle n'ont pas été sans influence chez des auteurs comme Virginia Woolf, Faulkner, Joyce, Musil ou Brecht. Mais je pense que toutes ces prises sont plutôt à laisser aux littéraires et je les ai donc personnellement laissées de côté.

4) Le rapport physique et art vu sous l'angle de l'épistémologie.

Il s'agirait d'essayer de comparer l'art et la physique, dans leur démarche mais aussi dans leur intention, ce qui exigerait au préalable de les définir. L'affaire est délicate et nous exposerait à un certain arbitraire. Car comment définir l'art ? Est-il vrai qu'il a pour fonction, comme on le dit souvent, de rendre le réel « visible » ? Et la physique, est-il vrai qu'elle a pour fonction, elle, de « faire parler » l'invisible ? Ou, pour parler comme Jean Perrin, de « rendre compte du visible compliqué par de l'invisible

simple » ? À vrai dire, je n'en sais trop rien et je préfère laisser cette prise qui me semble friable à d'autres mains plus expertes.
En revanche, je pense qu'il est intéressant pour nous de nous arrêter un instant sur une phrase de Jean-Marc Lévy-Leblond, qui aime à dire que « la science, c'est l'art de transformer les questions jusqu'à ce qu'elles aient une réponse possible ». Cette définition nous interpelle puisqu'elle fait de la science un art, un art certes très particulier, mais un art tout de même. Au départ, il y a des questions comme « pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? ». Question vertigineuse, que chacun s'est posé au moins une fois dans sa vie, mais à laquelle nous sommes bien incapables de répondre. Et puis, peu à peu, cette question se transforme et, de proche en proche, finit par devenir une suite de questions qui, elles, sont solubles : « De quoi les corps matériels sont-ils faits ? » ; « Y a-t-il un plus petit élément ? » ; « Toute réalité est-elle matérielle ? ». En somme, une fois que la bonne question est posée, à l'issue d'un « travail d'artiste » qui est le propre du véritable chercheur, trouver n'est presque plus qu'une affaire de technique (Jean-Marc Lévy-Leblond prétend, de façon un peu provocante, que « des trouveurs, on en trouve, mais que des chercheurs, on en cherche », faisant ainsi écho à la remarque du Général de Gaulle : « des chercheurs, on en trouve, des trouveurs, on en cherche »).
Mais de là à défendre qu'il y aurait une sorte de convergence entre la physique et l'art (éventuellement une convergence parallèle, pour reprendre l'oxymoron inventé par Aldo Moro dans un tout autre contexte), il y a un pas qu'à mon avis il faut se retenir de franchir. J'ai personnellement beaucoup de mal à suivre ces scientifiques qui écrivent (comme Stephen Hawking) que les savants et les artistes gravissent la même montagne, mais par des faces ou des arêtes différentes, et qu'arrivés en haut ils tomberont dans les bras les uns des autres. Je pense qu'il s'agit là plutôt d'un hommage réciproque, au demeurant très naïf, que d'une vérité constatée. Sans doute les scientifiques et les artistes partent-ils du même refuge (la condition humaine et ses pulsions créatrices), mais visent-ils pour autant le même sommet ? Et si c'est bien le même sommet qu'ils visent, est-on bien sûr qu'ils l'atteindront en même temps ?
Il y a une idée courante aujourd'hui sur la nature des rapports entre les arts d'un côté, les sciences de l'autre. Le problème à l'ordre du jour serait celui d'une réconciliation : il s'agirait de favoriser la convergence des pratiques artistiques et scientifiques. Mais cette idée d'une réunification œcuménique, ce syncrétisme parfois pompeux, ce désir fantasmagorique des grandes retrouvailles de l'art et de la science, me paraissent relever d'une nostalgie naïve plutôt que d'un véritable projet. Car à bien y regarder, l'histoire des pratiques culturelles de l'humanité n'est pas autre chose que celle de la séparation de ses divers champs d'activité, de leur autonomisation irréversible.
Les rapports entre sciences et arts sont à mes yeux de l'ordre de la rencontre, de la confrontation, voire du conflit, et c'est cela qui les rend intéressants. Ils ne relèvent nullement d'une « nouvelle alliance » qu'il s'agirait de bâtir. Car les liens qu'ils entretiennent sont toujours de nature dialectique.

5) Les approches philosophiques.

Je vois trois pistes essentielles. La première d'entre elles serait de reconsidérer le lien entre art et technique. S'il est vrai qu'il n'y a pas d'art sans technique, l'art ne se réduit pas pour autant à la technique puisqu'il oriente vers d'autres desseins la puissance qu'elle lui livre. Certes, l'art produit, grâce à la technique, des objets, mais ces objets, au contraire des objets techniques ordinaires, ne servent à rien. En ce

sens, l'art, pourtant consommateur de technique, devient comme le paradoxe de la technique. Il est toujours l'effet d'un détournement.
La seconde piste consisterait à réexaminer la place philosophique de l'art vis-à-vis de la science d'une part, vis-à-vis de la religion d'autre part. On pourrait par exemple reprendre l'analyse du jeune Nietzsche dans Humain trop humain, (thèse que le bouillant philosophe nuancera par la suite[2]) selon laquelle nous pouvons faire confiance à la science pour détruire les besoins religieux, ou pour proposer « le passage de la religion à la vision scientifique des choses ». Mais ce passage ne devrait pas s'opérer par « un saut brutal et dangereux », car il s'agit plutôt « d'affaiblir » puis de « détruire » lesdits besoins religieux et métaphysiques. Dans cette évolution, la mission de l'art n'est pour Nietzsche que d'aider « à faire transition », car en toute hypothèse « c'est la science qui dans l'évolution de l'homme prendra la suite de l'art ». Dans la continuité de Nietzsche, on pourrait donc se demander si l'art n'est pas qu'un moment de la science, une phase obligatoire mais seulement provisoire de son histoire. Cette prise philosophique a beau être fascinante, elle est beaucoup trop difficile pour moi et je préfère donc ne pas m'y engager plus avant.
La troisième piste consisterait à rouvrir le vieux débat platonicien sur les liens qui existent entre les « catégories » que sont le Vrai, le Beau et le Bien. Dans trois de ses dialogues (Le Banquet, Le Phèdre et Le Sophiste), Platon explique que le Vrai, le Beau et le Bien sont trois aspects de la même réalité suprême, à laquelle nous aspirons et vers laquelle nous sommes portés par un même élan, l'Eros[3]. Loin de ne s'identifier qu'au désir charnel, c'est lui, l'Eros, qui « donne des ailes » à l'âme[4]. Tout œuvre, quelle soit artistique ou scientifique, procède ainsi d'une même inspiration créatrice, qui résulte elle-même du besoin d'enfanter, de prolonger notre vie par une œuvre authentiquement belle et bonne, durable, voire éternelle. Ce qui est en jeu, finalement, c'est un désir d'immortalité : la découverte de la Beauté parfaite est aussi celle de la vérité, et donc (pour Platon) celle de la vertu véritable, condition nécessaire pour être aimé des dieux. Mais laissons de côté la question du Bien[5], qui n'est pas notre propos, et contentons-nous de nous demander si le Vrai et le Beau sont intimement liés, voire se rejoignent ou se confondent. Souvent, on dit que la physique est belle. Sans doute, mais il ne faut rien exagérer : je suis comme vous, j'ai des étudiants et jamais je ne les vois s'effondrer en sanglots à la suite d'un spasme de réplétion esthétique qu'aurait provoqué en eux telle ou telle équation, tel

[2] Nietzsche se montrera très sévère à l'égard de bien des aspects des sciences modernes, qui à ses yeux, sous couvert de triomphe de la raison et en vue du bonheur de l'humanité, ne font que reconduire les vieilles « volontés de croyance », mais sous un masque qui dissimule la nouvelle idole, allant même jusqu'à donner le change d'être l'alternative vraie aux anciennes religions ! Il écrit dans *Le Gai Savoir* : « On aura compris à quoi j'en veux venir, à savoir que c'est encore et toujours une *croyance métaphysique* sur quoi repose notre croyance en la science – et que nous autres qui cherchons aujourd'hui la connaissance, nous autres sans dieu et antimétaphysiciens, nous puisons encore *notre* feu à l'incendie qu'une croyance millénaire a enflammé, cette croyance chrétienne qui était aussi celle de Platon, la croyance que Dieu est la vérité, que la vérité est divine. »

[3] Pour Platon, l'amour de la Beauté en soi est une première étape d'un cheminement vers la connaissance. Ainsi, loin d'être en conflit avec le savoir, *Éros* a partie liée avec lui. Il est donc très étriqué, affirme Platon (Socrate) de restreindre le domaine d'*Éros* au désir charnel. Il inspire en fait aussi bien le héros qui cherche à se surpasser que le poète attaché à une œuvre impérissable ou que le scientifique à la recherche d'une vérité éternelle.

[4] Platon se permet, à cette occasion, un jeu de mots : on devrait désigner, selon lui, le désir amoureux non par *Éros*, mais par *Ptéros*, l'aile.
[5] Pour Platon, le Vrai et le Bien vont ensemble et s'équivalent presque, car connaître l'être, c'est connaître aussitôt le devoir-être.

ou tel théorème. En règle générale, convenons que la prétendue beauté de la science ne provoque que des émotions mesurées.
C’est pourquoi, là encore, je reste assez sceptique devant les tentatives qui visent à rapprocher les sciences et les arts au motif que la beauté ne serait pas réservée à l’art et que la science n’aurait pas le monopole de la vérité. Beaucoup de choses ont été écrites pour célébrer la splendeur de telle équation ou la grâce de telle expérience, et même pour ériger l’esthétique au rang de principe méthodologique (« cherchez du beau et vous trouverez le vrai », « le beau est l’éclat du vrai, presque son test », etc.). La meilleure réplique à ce genre de considérations tient sans doute dans le simple rappel des innombrables belles théories qui ont échoué sur de minables faits (la physique d’Aristote, la théorie scalaire de la lumière, la théorie de la gravitation de Newton, l’atome de Rutherford, celui de Bohr, la théorie de l’onde-pilote de Louis de Broglie, la théorie du « bootstrap » en physique des particules, la théorie de l’univers stationnaire de Hoyle, Bondi et Gold…).
L’idée de beauté est par ailleurs fort subjective et ne peut donc servir de critère objectif. Un exemple ? En 1926, Erwin Schrödinger publie son équation et invite à considérer que les particules ne sont que des paquets d’onde. Dans le même temps, Werner Heisenberg publie sa mécanique des matrices, très abstraite, qui interdit qu’on puisse représenter les phénomènes quantiques dans l’espace-temps. Pendant plusieurs mois, les deux hommes ont des échanges aigres-doux. Schrödinger écrit à Lorentz que la théorie de Heisenberg est « monstrueuse », Heisenberg écrit à Pauli que la mécanique ondulatoire de Schrödinger est « abominable ». Puis, aidés par Paul Dirac, l’un et l’autre finissent par se rendre compte que leurs théories, mathématiquement si différentes, étaient physiquement équivalentes (conduisaient aux même prédictions)… ! La laideur et la beauté peuvent donc avoir des masques interchangeables.

LA PHYSIQUE ET L’IDÉE AMBIGUË D’HARMONIE

Néanmoins, - et c’est là que se trouve la prise que je voudrais saisir - nul ne saurait contester que l’idée d’harmonie, qui est une idée évolutive, parfois subjective, mais toujours assise sur des critères d’ordre esthétique, a joué un rôle moteur en physique, avec une efficacité souvent décisive. L’harmonie a toujours été perçue comme un gage d’universalité et d’exactitude, ou comme une garantie contre l’incohérence et l’arbitraire.
À des fins d’illustration, on pourrait revenir sur quelques épisodes-clé de l’histoire de la physique : Kepler et l’harmonie des sphères, Galilée et l’unification du mouvement, Maxwell et l’électromagnétisme, Max Planck et la formule du corps noir, Paul Dirac et l’antimatière, Einstein et la relativité générale…
Les approches mystiques n'ont jamais eu d'efficacité scientifique directe, mais la quête d'une harmonie dans la nature n'a pourtant jamais cessé d'irriguer la recherche, de façon plus ou moins souterraine. La science n'aurait guère progressé si des aiguillons esthétiques ne l'avaient constamment pressée. Qu'elles prennent la forme d'une recherche consciente d'harmonie, telle celle revendiquée par Kepler, ou plutôt d'une sorte de rêverie éveillée semblable à celle évoquée à plusieurs reprises par Einstein, de telles motivations jouent un rôle ambigu mais indéniable dans les processus de découverte. Pourtant, certains débats contemporains ne semblent concevoir entre science et métaphysique que des rapports de servilité ou de perpétuelle bouderie, en oubliant qu'en Occident, depuis vingt-cinq siècles, la métaphysique, les mathématiques et la physique se sont toujours accompagnées, et

que c'est une banalité de l'histoire des idées que d'affirmer que chaque révolution scientifique sécrète un nouveau paradigme avec le concours plus ou moins explicite de la métaphysique. Lorsqu'elle s'invente, la science semble toujours trouver sa source en partie hors d'elle-même, notamment dans cet idéal d'harmonie.

LE RÔLE CRUCIAL DE KEPLER

Sans doute est-ce Kepler qui incarne le mieux la transition entre l'exploration mystique de l'harmonie du monde d'une part, et l'approche scientifique et mathématique d'autre part. Il entreprit d'unifier la représentation du monde héritée de l'Antiquité en tentant de faire appel au concept d'une force physique universelle, et en se référant constamment à un principe unitaire, l'immanente omniprésence d'harmonies mathématiques. S'il échoua en définitive dans son projet initial d'apporter l'explication mécanique du mouvement des planètes, il parvint néanmoins à jeter un pont entre l'ancienne conception du monde - celle du cosmos immuable - et la nouvelle - celle d'un théâtre voué au jeu de lois mathématiques[6]. Ce faisant, il réunit les indications dont Newton se servira ensuite pour asseoir la conception moderne du mouvement des planètes.
L'harmonie à laquelle croyait Kepler devait apparaître tout d'abord sous une forme géométrique, avec bien sûr les sphères et les orbites circulaires, mais pas seulement. Dans son Mysterium cosmographicum publié en 1595, longtemps avant qu'il ne découvrit ses fameuses lois, Kepler fit intervenir la géométrie d'une manière extrêmement originale, intercalant entre les diverses orbites planétaires les « solides platoniciens »[7] dans le but de rendre compte de leur répartition dans l'espace. Il n'existe que cinq polyèdres réguliers dans l'espace à trois dimensions, souvent appelés les solides platoniciens parce qu'ils ont joué un rôle considérable dans l'argumentation de Platon. Ce sont le tétraèdre régulier, le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre pentagonal (dont les faces sont douze pentagones réguliers) et l'icosaèdre, qui est limité par vingt triangles équilatéraux (les trois premiers appartiennent à la géométrie très ordinaire, mais la découverte des deux autres est certainement l'une des plus belles de l'histoire des mathématiques). En rattachant les orbites planétaires dans le système solaire aux solides platoniciens, qui seraient alternativement inscrits et circonscrits à des sphères, Kepler pensait avoir pénétré les secrets du Créateur. Les six sphères correspondent aux six planètes : Saturne, Jupiter, Mars, Terre, Vénus, Mercure, séparées respectivement par un cube, un tétraèdre, un dodécaèdre et un icosaèdre (naturellement, Kepler ne connaissait pas l'existence des trois planètes les plus extérieures : Uranus, Neptune et Pluton furent découvertes en 1781, 1846 et 1930). Il essaya de trouver des raisons à cet ordre choisi par le Créateur pour introduire dans le Cosmos les corps platoniciens : ces solides étaient selon lui les meilleurs représentants de la notion de symétrie[8]. Kepler justifie son choix en remettant en cause la prééminence du courbe : « Si Dieu n'avait eu regard qu'au Courbe dans la Création, il n'existerait dans l'édifice du monde rien en dehors du Soleil, au centre, qui est l'image du Père, de la sphère des fixes […] à la périphérie, qui sont l'image du Fils, et de la vapeur céleste qui remplit toute chose,

[6] Le talon d'Achille de la physique céleste de Kepler tiendra à sa conception tout aristotélicienne du principe d'inertie, identifiant l'inertie à la tendance qu'auraient les corps en mouvement à revenir au repos. Un tel axiome lui interdit de formuler de façon efficace les concepts de masse et de force.
[7] Les cinq polyèdres réguliers dont la classification couronne les *Éléments* d'Euclide.
[8] À noter que Kepler, tout comme les Grecs, n'utilisa jamais le mot *symétrique* dans son sens moderne. Pour lui, *symétrique* signifie *proportionné*, ou bien *commensurable*, et non pas invariant sous certaines transformations.

c'est-à-dire l'extension et le firmament, qui est l'image de l'Esprit »[9]. Puisque de nombreux autres corps existent, « il nous faut rechercher la raison de tout cela dans le Droit », et plus précisément dans les polyèdres réguliers dont la perfection est équivalente à celle de la sphère. Mais Kepler se rendit compte lui-même de ce que cette analogie géométrique ne pouvait convenir, sa découverte du caractère elliptique des orbites planétaires réduisant en effet sa pertinence à néant.
Reste que Kepler revendiquait la quête d'une harmonie cachée dans le monde qui fût le reflet de la perfection de Dieu. C'est cette beauté qu'il aspirait à découvrir et à expliquer de façon rigoureuse, c'est-à-dire sans approximation. C'est pourquoi il prit très au sérieux le tout petit écart qu'il avait lui-même mis en évidence par rapport à l'hypothèse de l'orbite circulaire des planètes : un écart de huit minutes d'arc seulement, qu'il avait calculé à partir des observations de Tycho Brahé. Toute la suite, c'est-à-dire la dynamique de Newton, découlera de cette toute petite différence. Aux yeux de Kepler, il s'agissait d'une dissonance, petite certes, mais que son idéal d'harmonie rendait insupportable. Il fallait donc la supprimer, ce qu'il fit, non sans difficultés ni déchirements. Qu'avait-il dû en coûter à Kepler, pythagoricien jusqu'à la moelle, de renoncer aux cercles pour accepter des ellipses ! Mais pour Kepler, « les harmonies doivent être conformes à l'expérience »[10]. Or il découvrit que ses propres travaux exigeaient de lui l'abandon des conceptions premières dont il était empreint pour répondre aux exigences de l'expérience qualitative. Examinant soigneusement l'orbite de Mars, il constate que celle-ci n'est pas circulaire et propose l'hypothèse elliptique[11]. Cet abandon fut certainement un authentique sacrifice, peut-être l'un des plus grands de la science moderne, auquel on ne trouve guère d'équivalent, dans les annales de la science contemporaine, qu'avec les affres que connut Max Planck lors de la découverte du quantum en 1900. Que Kepler ait eu la force d'accomplir un tel acte tient certainement à sa conviction qu'il lui serait donné par là d'explorer encore plus avant l'harmonie du monde.
Il tentera également d'exprimer l'harmonie par la musique, plutôt que par des proportions entre nombres ou par des correspondances entre figures géométriques[12]. L'idée d'un monde en correspondance avec les intervalles musicaux n'était pas nouvelle. Les pythagoriciens, notamment, avaient déjà fait allusion à l'harmonie universelle, engendrée par les sphères célestes[13]. Selon Kepler, un astre émet un son d'autant plus aigu que son mouvement est rapide. Une planète émet ainsi des notes dans un intervalle défini par les caractéristiques de son orbite

[9] J. Kepler, *Le Secret du monde,* trad. A. Segonds, Les Belles Lettres, 1984, 46C, p. 66.
[10] Cité par Max Caspar (éd.), *in* Kepler, *Weltharmonik*, Munich et Berlin, R. Oldenbourg, 1939, p.55.
[11] Kepler fait cette déduction à partir des observations de Tycho Brahé. Il étudie avec une extrême attention l'orbite de Mars, dont il essaie de rendre compte dans le cadre des différents systèmes du monde disponibles. Il connaît la période sidérale de Mars, c'est-à-dire le temps qu'il faut à la planète pour effectuer un tour complet sur son orbite et revenir exactement au même point. Cette période est de 687 jours. Kepler trace donc une représentation circulaire de l'orbite terrestre, ce qui est presque exact et y situe la Terre pour deux dates bien choisies. Il trace ensuite dans le plan de l'écliptique la droite qui « vise » la planète Mars. L'analyse des archives de Tycho Brahé lui permet de trouver cinq couples d'observations de la planète Mars effectuées à l'intervalle de 687 jours exactement. Les cinq points se situent bien sur un cercle, mais dont le centre est bien éloigné du Soleil. Or Kepler est un partisan convaincu de l'héliocentrisme : le Soleil *doit* occuper une position particulière et symbolique. Kepler trouve une figure qui le satisfait, l'ellipse, qui possède un centre géométrique et deux foyers. Sa conclusion est alors définitive : « Il ne reste aucune figure possible, sinon une ellipse parfaite. » (J. Kepler, *Astronomia nova*, s.I, 1609, In-fol, Paris, BNF, Réserve des livres rares, Rés. g. V. 454, p. 149).
[12] Sur la théorie musicale de Kepler, voir l'ouvrage de H. F. Cohen, *Quantifying Music*, Dordrecht, Lancaster, 1984.
[13] Cicéron explique pourquoi nous n'entendons pas les sons correspondants : nos oreilles sont assourdies par le fracas sonore de l'univers, de la même façon que les habitants des bords du Nil n'entendent plus le bruit des cataractes.

elliptique. Il est alors possible d'associer à chaque planète des rapports musicaux, et finalement des notes bien définies[14]. L'harmonie règne dans le ciel, et c'est le résultat d'une volonté divine. Cette harmonie n'est pas simple, compte tenu du caractère elliptique des orbites. Cela ne rebute pas Kepler, au contraire : il juge que cette harmonie « complexe » est supérieure à l'harmonie toute simple qui existerait si les orbites étaient purement circulaires, comme on l'avait pensé jusqu'alors : cet arrangement plus riche offre une « beauté harmonique [qui] dépasse la beauté de la simple géométrie ».
Kepler utilisa en effet tous les concepts mathématiques dont il disposait pour exprimer l'harmonie encore confuse dont il avait l'intuition[15]. Plus tard, d'autres physiciens utilisèrent d'autres concepts pour exprimer l'idée keplerienne d'harmonie, fondée sur un mélange imprécis de mathématiques et d'esthétique. La science s'appropria ainsi une part de la métaphysique qui avait contribué à la faire naître, transférant sous la sécheresse du formalisme un idéal d'harmonie devenu moins explicite et plus discret (en utilisant abondamment les notions de symétrie, dûment mathématisées).
On peut ainsi considérer, par exemple, que la doctrine de l'harmonie de Kepler a joué un rôle décisif dans l'élaboration de la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie et Erwin Schrödinger, au milieu des années 1920. Cette mécanique était une tentative pour appliquer à la matière, c'est-à-dire aux particules, les idées qui avaient permis le passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire. Elle est imprégnée d'une métaphysique qu'on peut qualifier de pythagoricienne (des résonances et des harmoniques font apparaître des nombres entiers) et qui est dans le droit fil des conceptions kepleriennes. Parmi tous les prédécesseurs de Schrödinger, Kepler est le seul à avoir pressenti que l'harmonie - la résonance - confère à la matière sa cohésion. On peut en effet considérer que le résultat le plus important de la mécanique ondulatoire de Schrödinger est d'avoir permis d'établir que ce sont des conditions de résonance qui procurent une cohésion aux atomes et aux molécules.
D'une façon générale, les physiciens du XX^e^ siècle n'ont pas cessé de croire en une harmonie mathématique de l'univers, dont le concept a résisté à l'épreuve d'une connaissance scientifique sans cesse élargie. Mais c'est dans des lois dynamiques qu'ils cherchent à reconnaître cette harmonie, et non plus dans des formes statiques, tels que les volumes réguliers. D'où le statut central qu'a acquis, dans le formalisme de la physique actuelle, la notion d'invariance, notamment lorsqu'elle renvoie à des symétries abstraites (non strictement géométriques).
La symétrie est ainsi devenu le meilleur symptôme de cette « poésie de l'ordre » (Balzac) qu'est l'harmonie. Mais comme nous l'allons voir, toutes les harmonies ne sont également fécondes.

---

[14] Les notes associées à la Terre sont mi et fa : MIsère et FAmine !

[15] Kepler était conscient qu'il n'avait pas dévoilé les véritables lois de la physique céleste. Qu'est-ce qui l'en empêcha ? Certains auteurs, notamment Karl Popper, ont suggéré qu'il avait acquis l'intuition du calcul intégral, mais pas celle du calcul différentiel. Kepler avait compris que les corps s'attirent et se meuvent les uns les autres, et que l'énorme force qui provient du soleil est la cause qui explique le mouvement des planètes. Mais il ne saisissait pas encore la différence subtile entre une cause du mouvement des corps, et une cause de l'altération de leur mouvement. C'est là, selon Karl Popper, toute la différence entre la manière keplerienne et la manière newtonienne d'aborder le problème. Newton s'appliqua à découvrir la cause cachée derrière les lois de Kepler, ce dernier « se contentant » d'invoquer la seule harmonie dont elles étaient le signe (voir K. Popper, *Toute vie est une résolution de problèmes*, Paris, Actes Sud, 1997, p.159-167).

Deux cas d'ecole : la loi de Titus-Bode et la série de Balmer

On peut choisir comme première illustration de la quête d'harmonie la loi de Titus-Bode. Cette formule empirique, proposée dès la fin du XVIII^e siècle pour rendre compte des dimensions des orbites planétaires, exprime la constance approximative du rapport entre les dimensions orbitales de deux planètes successives (ce rapport est voisin de deux). Elle n'a cessé d'apparaître aux astronomes comme le reflet et l'indication d'une loi plus fondamentale à découvrir : où est l'harmonie cachée derrière une telle régularité ? Sur quoi repose-t-elle ? Cette loi empirique a suscité des tentatives d'explication très diverses : certaines font appel à la notion de résonance, d'autres invoquent la turbulence ou l'invariance d'échelle (il en est même qui invoquent le nombre d'or). Toutes ces notions constituent a priori autant de pistes pouvant conduire à une description unique de toute une classe de phénomènes. Mais, dans le cas particulier de la loi de Titus-Bode, aucune d'elles ne s'est vraiment imposée, même si, par la suite, on a pu montrer que cette loi est plus générale que ce que l'on pensait initialement (on a pu dériver des lois analogues pour les satellites des planètes). L'espoir que cette loi puisse par la suite s'expliquer dans le cadre d'une théorie plus globale reste donc déçu (même si elle a permis de découvrir Uranus par calcul).

Un autre exemple doit être cité qui, bien que s'étant au départ développé sur un canevas strictement analogue à celui de la loi de Titus-Bode, eut un succès si considérable qu'il contribua à révolutionner la physique au début de ce siècle. Il s'agit de la classification, en fonction de leurs fréquences, de certaines des raies spectrales de l'atome d'hydrogène, connues sous le nom de série de Balmer. Le Suisse Johan Balmer (1825-1898), maître d'école doué pour la manipulation des nombres et sans doute motivé par des convictions pythagoriciennes, montra en 1885 que l'on pouvait retrouver les fréquences $\square$ de ces raies (en nombre infini) grâce à une seule formule empirique : $\square_n = R(1/2^2 - 1/n^2)$ dans laquelle n prend les valeurs entières et où R désigne la constante de Rydberg. Cette expression simple représente un extraordinaire tour de force : elle fournit en effet un nombre infini de valeurs exactes de fréquences, bien qu'elle ait été établie sur la connaissance - empirique - de quatre seulement ! Peu après, en 1890, cette formule empirique fut élargie par le Suédois Johannes Rydberg qui proposa tous les termes de la forme $\square_{nm}= R(1/m^2 - 1/n^2)$. Le statut de ces formules était a priori exactement le même que celui de la loi de Titus-Bode. Comme pour cette dernière, la présence de nombres entiers suggérait que, derrière elles, pouvait se dissimuler une harmonie à sortir de l'ombre. Celle-ci fut comprise par Niels Bohr, qui proposa en 1913 un modèle d'atome intégrant parfaitement ces règles empiriques. Niels Bohr parvint même rapidement à calculer la constante de Rydberg R à partir d'autres constantes plus fondamentales de la physique : $R = 2\square^2 me^4Z^2/h^3$, formule dans laquelle h désigne la constante de Planck, e la charge électrique de l'électron et Z le numéro atomique. Le désir de trouver une explication théorique harmonieuse à des lois empiriques fut donc cette fois comblé.

Ces exemples suggèrent un modèle épistémologique possible pour la progression des idées en physique. On commence par établir une loi empirique (loi de Kepler, loi de Titus-Bode, loi de Balmer, loi de Planck, ...) rendant compte d'une catégorie de phénomènes. Ce premier pas est d'emblée unificateur puisqu'il rassemble, dans une seule et même description, des situations certes apparentées, mais initialement distinctes. La loi obtenue est d'autant plus crédible qu'elle laisse place, dans la distribution des phénomènes, à des « cases vides » qui seront ultérieurement remplies.

L’exemple le plus célèbre est celui du tableau périodique des éléments (de Mendéleiev). Un autre exemple, plus récent, moins connu mais tout aussi spectaculaire, est la prédiction, en 1964, par Murray Gell-Mann, de l’existence d’une particule inconnue de spin 3/2, le baryon □$^{-}$. Gell-Mann avait proposé une classification des hadrons (les particules sensibles à l’interaction forte) selon les représentations irréductibles du groupe SU(3). Il manquait une particule pour compléter le décuplet des hadrons de spin 3/2. L’existence de cette particule inconnue, appelée □$^{-}$, fut donc prédite, ainsi que la valeur de sa masse, sur la base exclusive de considérations de symétrie. Elle fut découverte quelques mois plus tard, au laboratoire national de Brookhaven, grâce à un cliché de chambre à bulles montrant la collision d’un kaon avec un proton. Cette découverte constitua une confirmation éclatante de la symétrie SU(3) des interactions fortes, qui allait ouvrir au modèle des quarks.

LES SYMÉTRIES ABSTRAITES DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Aujourd'hui, la physique des particules offre, au coeur même de la théorie quantique des champs, un exemple de vision harmonique qui s'exprime, comme nous le verrons, en termes de symétries. Les théories récentes utilisent en effet une correspondance entre les comportements des particules (plus exactement la structure des interactions qui les gouvernent) et des groupes particuliers de symétrie.
Si, au départ, la reconnaissance et la définition des diverses particules relève par nature d'une démarche particulaire, la classification proposée par les théories modernes relève d'une approche harmonique, puisqu'il s'agit de dégager les symétries qui s'y appliquent. Une vision semblable avait conduit les Grecs à associer des polyèdres (les solides platoniciens, précisément caractérisés par leurs symétries) aux quatre éléments[16]. Depuis, les mathématiciens ont fait évoluer la notion de symétrie : la théorie des groupes donne accès à des symétries plus riches et plus complexes que celles de la simple géométrie (des polyèdres). La physique des particules contemporaine fait constamment appel à ces symétries généralisées, avec une efficacité et une générativité spectaculaires.
Les symétries d’une théorie révèlent sa structure profonde. C’est même au point qu’elles peuvent faire apparaître une contradiction formelle entre deux théories voisines. Ainsi, à la fin du XIX^{e} siècle, on découvrit que le groupe de symétrie de l’électromagnétisme de Maxwell était différent de celui de la mécanique de Newton. La crise, très profonde, fut résolue par la théorie de l’électron de Lorentz et finalement, en 1905, par la théorie de la relativité restreinte d’Einstein, qui allait révolutionner la physique.
Aujourd’hui, la plupart des symétries qui intéressent les physiciens sont « abstraites », au sens où elles opèrent au sein d'espaces construits par les mathématiciens, et en général distincts de l'espace physique à trois dimensions. Les physiciens considèrent par exemple que les propriétés des particules peuvent être représentées par des éléments de l'un ou l'autre de ces espaces. On peut alors imaginer qu'une transformation abstraite fasse passer d'un type de particules à un autre, par exemple du proton au neutron. Ces deux particules ne sont évidemment pas identiques, ne serait-ce que par leur charge électrique, mais on considère qu'elles peuvent ainsi être mises en relation d'une façon qui n'est ni gratuite ni arbitraire. Cela implique qu'elles partagent certains points communs, comme par

[16] Le tétraèdre pour le feu ; l'icosaèdre pour l'air ; le cube pour l'eau ; le dodécaèdre pour la terre. S'y ajoutait l'octaèdre pour l'éther, le cinquième élément, ou « quintessence », remplissant les cieux.

exemple le fait d'être sujettes aux mêmes interactions, de pouvoir interagir mutuellement, voire de se transformer l'une en l'autre dans certaines conditions. Se dévoile ainsi une connexion très forte entre le comportement des particules et certaines symétries mathématiques.
C’est d’ailleurs en recherchant les symétries auxquelles obéissent les interactions fondamentales (gravitationnelle, électromagnétique, nucléaires) que des progrès importants ont été accomplis ces dernières décennies. Des concepts nouveaux (notamment celui de « symétrie de jauge ») ont élargi le domaine d'application de la théorie des groupes, en même temps qu'ils ont révolutionné la façon de décrire les interactions fondamentales.
Un tel constat invite à réexaminer le lien entre physique et mathématique.

DE L’HARMONIE A LA SYMÉTRIE : LA QUESTION DE L'EFFICACITÉ DES MATHÉMATIQUES

La question posée est la suivante : comment se fait-il que les mathématiques, réputées abstraites, « marchent » aussi bien en physique, considérée comme la science du concret par excellence ? Ou, pour reprendre la formulation d'Einstein : « Comment est-il possible que la mathématique, qui est un produit de la pensée humaine et est indépendante de toute expérience, puisse s’adapter d’une si admirable manière aux objets de la réalité ? La raison humaine serait-elle capable, sans avoir recours à l’expérience, de découvrir par la pensée seule les propriétés des objets réels »[17] ? On sent, de la part d'Einstein, une sorte d'étonnement, qu'il formulera de façon plus concise par une phrase devenue célèbre : « ce qui est incompréhensible, c'est que le monde soit compréhensible ».
D’une façon générale, les réponses à cette question oscillent entre le mystère d’une prédestination quasi-divine et celui d’un occasionnalisme arbitraire.
Notons d’abord que le constat de l'efficacité des mathématiques inspire toujours une sorte d’étonnement, aujourd’hui renforcé par les confirmations expérimentales très précises apportées à la physique quantique, à l’électrodynamique quantique, à la théorie électrofaible (qui a permis la prédiction et la découverte des bosons intermédiaires et aujourd'hui celle du boson de Higgs) ou encore à la théorie cosmologique standard. Les mathématiques ont élargi et même augmenté l'ontologie de la physique (antimatière, bosons intermédiaires)
Sauf à avoir l'esprit très borné, on doit donc se reposer la question que Galilée avait laissée en suspens : doit-on contempler dans la mathématique l’essence même des choses ou doit-on simplement y voir la description correcte des liens existant entre des choses qui sont premières par rapport à elle ? La mathématique dit-elle les choses du monde ou simplement les relations entre les choses ? Ces interrogations ont fait l’objet d’un article célèbre écrit en 1960 par le physicien Eugene Wigner, intitulé « La déraisonnable efficacité des mathématiques dans les sciences de la nature »[18]. Wigner y expliquait que cette efficacité ne peut être qualifiée qu’en termes de « miracles » ou de « don magnifique que nous ne comprenons ni ne méritons », comme si ses raisons profondes étaient situées au-delà des limites de notre

[17] Cité par R. Boirel, « Les applications des mathématiques » in *Les mathématiques*, Paris, Retz-CEPL, 1973-1975, Les encyclopédies du savoir moderne, p. 184.
[18] E.P. Wigner, « The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences », Communications on Pure and applied Mathematics, XIII (1960), 1-14.

compréhension du monde. Le mot de miracle n'est-il pas, en l'occurrence, un peu trop fort ?

Mais que veut dire « efficace » ?

La notion d'efficacité des mathématiques recouvre plusieurs significations.

1) Il peut s'agir d'abord d'une capacité de prédiction ou de rétrodiction. Une théorie mathématique sera dite efficace dans un domaine des sciences si elle peut anticiper les résultats expérimentaux ou reproduire les données obtenues précédemment. Elle doit être capable de fournir des résultats numériques qui reproduisent ce que l'on mesure ou ce que l'on observe. Il faut que « ça colle ».

2) Mais l'efficacité ne se mesure pas seulement à cette possibilité de « sauver les phénomènes ». L'efficacité d'une théorie mathématique peut aussi venir du fait qu'elle met en évidence des structures « explicatives ». Ainsi, la théorie de jauge par laquelle on décrit aujourd'hui l'interaction électrofaible ne manifeste pas seulement son efficacité par le fait qu'elle reproduit les courbes expérimentales recueillies auprès des détecteurs de particules ; elle est surtout efficace parce qu'elle donne un schéma expliquant la structure de cette interaction électrofaible, en le faisant dériver d'un concept profond de symétrie, en l'occurrence l'invariance sous une transformation de jauge locale. La structure de la théorie possède donc, en plus de l'efficacité strictement prédictive, une efficacité explicative. On retrouve ici les remarques de René Thom qui, dans son livre Prédire n'est pas expliquer, soulignait la nécessité de ne pas confondre les fonctions prédictives et explicatives de toute science de la nature[19].

3) Enfin, l'efficacité des mathématiques peut également être considérée à un troisième niveau, plus aérien, celui de la générativité : une théorie mathématique est efficace si elle permet d'engendrer de nouvelles idées, de nouveaux concepts, des stratégies inédites ou des solutions originales à des problèmes anciens. L'importance de cette définition a été notamment soulignée par Alain Connes[20], et également par le physicien théoricien Freeman Dyson, qui rappelle que « pour le physicien, les mathématiques ne sont pas seulement un outil permettant de calculer les phénomènes, ce sont la source principale des principes et des concepts qui permettent d'élaborer de nouvelles théories »[21].

Ces trois définitions de l'efficacité étant posées, on peut, à la suite de Roger Penrose, établir une classification des théories mathématiques en fonction de leur capacité prédictive en physique[22]. Penrose qualifie de superb les théories qui sont les plus efficaces de ce point de vue, et il cite en exemple la mécanique classique, la relativité, l'électromagnétisme de Maxwell, l'électrodynamique quantique. Il qualifie de useful les théories qui, tout en ayant une bonne confirmation expérimentale, ne possèdent pas le niveau de prédictivité et la cohérence interne des superb théories. Parmi ces théories figurent la théorie électrofaible, la chromodynamique quantique, le modèle standard de la cosmologie. Enfin, Penrose introduit le concept de tentative theory qui renvoie à des théories élégantes et séduisantes qui ne sont confirmées par aucune donnée expérimentale, comme par exemple la théorie des supercordes.

---

[19] R. Thom, *Prédire n'est pas expliquer*, Paris, EsHel, 1991.

[20] Alain Connes insiste beaucoup sur la « générativité conceptuelle » des formalismes mathématiques de la physique dans le livre qu'il a écrit en collaboration avec Jean-Pierre Changeux (J-P. Changeux, A. Connes, *Matière à pensée*, Odile Jacob, 1989, pp. 91-92).

[21] Cité par I. Stewart, *Les mathématiques*, Paris, Science-Belin, p. 247.

[22] R. Penrose*, The Emperor's New Mind. Concerning Computers, Minds and the Law of Physics*, Oxford University Press, 1989, pp. 152-155.

Ces trois types d'efficacité doivent être pris en considération si l'on ne veut pas mutiler la notion d'efficacité des mathématiques dans les sciences. Prenons quelques exemples. En 1918, Hermann Weyl élabore une théorie par laquelle il tente d'unifier la gravitation et l'électromagnétisme en étendant la relativité générale d'Einstein au-delà d'elle-même, c'est-à-dire en essayant de géométriser l'électromagnétisme. Cette théorie ne fut pas directement efficace pour ce qui est des prédictions expérimentales, mais elle ouvrit la voie à ce qui allait devenir les théories de jauge. De même, il est clair que l'actuelle théorie des supercordes n'est pas prédictivement efficace, pour l'instant du moins, mais cela ne veut pas dire qu'elle ne soit pas efficace du tout. Elle suggère en effet un ensemble d'idées sur la manière dont on doit changer notre conception des particules élémentaires pour arriver à une unification des quatre interactions fondamentales. Par exemple, elle invite à abandonner l'idée que les particules seraient des entités ponctuelles. Elle est donc un parfait exemple de tentative theory au sens de Penrose. Il en va de même pour les géométries non-commutatives[23] grâce auxquelles on peut espérer fonder une cosmologie quantique. (Par ailleurs, le fait qu'elles fournissent, dans certains cas, une explication intrinsèque du phénomène de brisure de symétrie, censé conférer une masse aux particules, leur donne une efficacité indéniable[24]). Bref, tout cela pour dire que le concept d'efficacité est beaucoup plus riche que ce que pourrait laisser croire une application superficielle des mathématiques dans les sciences.

Par quoi les mathématiques « efficaces » se caractérisent-elles ?

Ce qui semble polariser l'attention du physicien théoricien, ce sont des relations qui sont caractérisées par une grande variété d'invariants relatifs à diverses transformations. Ces invariants peuvent être des nombres, des variétés, des structures, des classes d'équivalence, la forme d'une équation. Je voudrais donc prolonger ici une remarque très profonde de Dirac, qui avait noté que la richesse en invariants est souvent un indice de la profondeur de la théorie, de sorte qu'un bon critère de l'applicabilité d'un formalisme mathématique en physique est l'existence de groupes assez riches de transformations[25]. Exemples : théorie des nœuds, théorie des groupes, théorie des fonctions à une variable complexe, équations covariantes.

Dans la physique contemporaine, la description du monde physique se réalise effectivement par l'intermédiaire de grandeurs qui se conservent lorsque l'on effectue certaines transformations. La présence d'invariants associés à certaines transformations est toujours lue comme la trace de l'existence même d'un « élément de réalité », d'une « chose » qui possède une certaine indépendance, de la même façon que dans la perception usuelle, nous parvenons à reconnaître une « réalité » à un objet en voyant comment il se comporte lorsque nous changeons notre position

---

[23] Les géométries non commutatives permettent de considérer des structures spatiales qui présentent un caractère discontinu mais qui ne brisent pas les symétries fondamentales. Ces nouvelles géométries sont obtenues en remplaçant les coordonnées spatiales usuelles, qui sont des nombres ordinaires, par des opérateurs algébriques. L'appellation de la théorie provient de ce que ces opérateurs ne commutent pas entre eux (l'ordre de leur application n'est pas indifférent), mais vérifient au contraire certaines relations de commutation qui définissent les propriétés de l'espace à petite échelle. Les propriétés habituelles de l'espace étant restituées aux échelles de la physique habituelle, ce n'est qu'au-dessous d'une certaine échelle que les effets de ces géométries apparaissent. Cette échelle, qui pourrait être celle dite de Planck (10^{-35} m), représenterait une limite à la divisibilité de l'espace.

[24] Ce point est discuté par Alain Connes dans son livre *Géométrie non-commutative*, Paris, Inter Editions, 1990.

[25] P.A.M. Dirac, « The Relation between Mathematics and Physics », *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, **LIX**, part II, (1938-39), 122-129 : « It would be probably a good thing also to give a preference to those branches of mathematics that have an interesting group of transformations underlying them… ».

par rapport à lui. Dès lors, est-il très étonnant que de telles mathématiques soient efficaces ? Pour commencer de répondre à cette question, il faut essayer de définir, ou de caractériser, ce que l'on entend par élément de réalité.

Qu'est-ce qu'un élément de réalité ?

Pour qu'on puisse parler d'une réalité, il faut que subsiste ou persiste quelque chose dans le flux temporel ou dans les changements de points de vue ou d'instruments d'observation. Un critère de réalité essentiel est donc l'existence d'invariants sous des transformations particulières. Par exemple, lorsque nous voulons savoir si ce que nous voyons est réellement un cube, il nous suffit, pour en décider, de bouger la tête ou le corps et d'évaluer la persistance de nos sensations visuelles tout au long de ces mouvements.

Mais la réalité, c'est aussi ce qui nous apparaît comme doué d'une certaine unité, d'une certaine cohérence interne. Si deux ensemble de choses ne semblent reliés en aucune façon dans notre perception visuelle, nous ne parlerons pas d'une réalité, mais de deux. Une réalité est toujours reconnue par nous comme une unité. Cela signifie que la notion de relation unissant des parties à un tout est l'un des ingrédients nécessaires pour que nous prenions conscience d'une chose comme d'une réalité particulière.

Tout ceci se traduit formellement en disant que la représentation théorique de tout élément de réalité doit comprendre la donnée d'une symétrie formelle. En effet, ce genre de symétrie implique un lien constitutif entre des relations et des invariants, ce qui traduit tout à la fois et la persistance du réel et sa cohérence, c'est-à-dire son unité. En termes techniques, on parle de la covariance des lois, c'est-à-dire de l'invariance de leur forme dans des changements de référentiels : transformation de Galilée en mécanique classique, transformation de Poincaré en relativité restreinte… C'est cette covariance qui rend des « lois » susceptibles de décrire une réalité physique et de manifester qu'il ne s'agit pas d'un effet lié à un choix particulier de point de vue.

Conclusion : les mathématiques qui sont orientées vers la recherche de relations caractérisées par de riches classes d'invariants semblent être les mieux adaptées à la physique et ce sont d'ailleurs celles qui y contribuent de façon essentielle. Ces mathématiques prolongent en quelque sorte le processus qui est déjà à l'œuvre dans la perception ordinaire, c'est-à-dire la reconnaissance des éléments de réalité autour de nous. Et lorsque la réalité se dérobe à notre regard, comme c'est le cas pour le monde microscopique, les mathématiques « significatives » nous en offrent encore une intuition par la puissance d'un langage riche en invariants. L'efficacité indiscutable, étonnante et bien réelle des mathématiques « évoluées » en physique des particules ou en cosmologie n'est donc sans doute pas le fruit d'un pur miracle.

Mais le véritable mystère réside dans l'origine de cette capacité que possède le langage mathématique à produire des structures riches en invariants, autrement dit des symétries généralisées. Comme vous voyez, le chien se mord ici la queue et c'est pour moi l'avertissement qu'il est temps d'arrêter.

Alors, en guise de conclusion, je vous livre ce court texte de Bertold Brecht : « Les gens qui ne comprennent rien à l'art ni à la science croient que ce sont là deux choses immensément différentes, dont ils ignorent tout. Ils s'imaginent rendre un service à la science en lui permettant d'être sans imagination, et ils croient faire progresser l'art en empêchant quiconque d'en attendre de l'intelligence. Il se peut que tel homme ait un don particulier pour une discipline particulière, mais il n'est pas

d’autant plus doué dans cette discipline qu’il est plus incapable dans toutes les autres.
Même si l’humanité a dû souvent et longtemps se passer du savoir comme de l’art, il reste que l’un et l’autre sont essentiels à ce que nous considérons être « l’humain ». Il n’existe personne qui soit totalement dépourvu de savoir et il n’existe personne qui soit totalement dépourvu d’art. »
Cet extrait, tiré de L’Achat du Cuivre écrit en 1945, ne devrait pas manquer d’interpeller les pédagogues que vous êtes aussi bien que les vulgarisateurs que nous tentons de devenir.