Luciano Boi: La nature est-elle géométrique ?

Les sciences s'éloignent de leur motivation première lorsqu'elles s'enferment dans leur vision spécialisée. Il faut impérativement réhabiliter une pensée transversale capable de repérer les similitudes à l'œuvre dans les disciplines et les phénomènes les plus différents. Et cette pensée ne peut être fondée que sur les mathématiques. Plus précisément sur la topologie. La compréhension spatiale des phénomènes est le dénominateur commun capable de les unifier.

Mathématicien et philosophe, Luciano Boi est enseignant-chercheur au Centre de Mathématiques de l'École des Hautes en Sciences Sociales (Paris). Il est l'auteur de plusieurs ouvrages et de nombreux articles de recherche en mathématiques, en physique théorique, en philosophie et histoire des sciences. Il a notamment publié *Le problème mathématique de l'espace* (Springer-Verlag, 1995) et *Science et Philosophie de la Nature* (Peter Lang, 2000).

La Recherche : Vous défendez l'idée que la science a besoin d'une nouvelle philosophie de la nature. Qu'entendez-vous par là ?

Luciano Boi : J'entends que la science à elle seule ne peut donner lieu à des développements théoriques féconds sans l'apport d'une réflexion philosophique fondamentale sur l'origine, la signification et la portée de ses concepts. Or, les différentes disciplines scientifiques connaissent une double tendance très préoccupante à cet égard. D'une part, elles s'hyperspécialisent, perdant de façon irrémédiable une vue d'ensemble des phénomènes et des problèmes, de leurs relations et liaisons profondes. Ce découpage est très regrettable. Le physicien Richard Feynman disait que la séparation entre les différents champs de connaissance était conventionnelle et arbitraire, et il n'a cessé de traverser ces frontières artificielles, passant de la physique à la biologie, ou de la cosmologie aux nanotechnologies – tout problème l'intéressait. D'autre part, les sciences sont de moins en moins une forme de connaissance créatrice, conjecturale et désintéressée parce qu'elles dépendent pour une part croissante d'intérêts économiques, politiques et sociaux qui occultent leur vocation première. On surestime la matrice et la portée sociale de la science, au détriment de ses motivations intrinsèques. Il y a là une façon biaisée d'écarter la question du sens dans la science. Ecrasée entre sa technicité et ses enjeux sociaux, elle s'éloigne de sa source qui est l'émerveillement, le questionnement, la créativité et bien sûr l'explication des phénomènes qui nous entourent. Le projet d'une nouvelle philosophie de la nature entend renouer avec cette source.

Il s'agit donc de rapprocher science et philosophie ?

Oui, il faut redonner une place essentielle à la pensée et à la théorisation, qui doivent primer sur l'ensemble des observations et applications. Le mathématicien René Thom n'a cessé d'insister sur cette nécessité. Précisons : théoriser signifie rechercher les images ou les modèles qui permettent d'établir des liens fondamentaux entre des objets et phénomènes à première vue éloignés. La théorisation n'est évidemment pas absente de l'activité scientifique, mais elle reste confinée au sein des disciplines. Aujourd'hui, il faut privilégier l'exploration de ce que pourraient être les relations profondes entre des phénomènes variés, appartenant éventuellement à des champs scientifiques tout à fait différents. Le propos principal d'une philosophie de la nature me semble être d'explorer les relations entre matière et forme, dans tous les domaines possibles. Et je suis convaincu que le mode de pensée le plus apte à fournir un tel cadre de pensée est la géométrie, parce qu'elle a une vocation universelle. Elle est en quelque sorte la clé et le résumé de toutes les autres sciences. On peut même affirmer que tout phénomène physique et toute forme naturelle peuvent être compris en termes de déploiement d'un noyau géométrique initial.

Dire que la géométrie est universelle, c'est dire que tout peut être décrit en termes d'espace ? Que tous les phénomènes peuvent être appréhendés en tant qu'ils se produisent dans l'espace ?

Oui, c'est bien cela, une pensée géométrique voit un phénomène comme se produisant et s'organisant dans l'espace. Mais pas dans l'espace tout court, dans un certain espace. Ce peut être l'espace euclidien à trois dimensions, ou l'espace-temps de la relativité générale, ou l'espace biochimique substrat de la cellule, ou l'espace des opérateurs en mécanique quantique. Dans chacun de ces exemples, la géométrie pertinente se dégage de l'espace lui-même, de sa structure, de ses propriétés dynamiques. Il faut opérer un renversement profond de la façon dont la géométrie a été généralement conçue, c'est-à-dire comme un cadre fixé par ses axiomes et ses lois, et qui s'appliquerait de façon logique à l'expérience. Il y a plutôt co-existence, interdépendance entre la géométrie de l'espace et les phénomènes qui se déroulent dans cet espace.

Peut-on prendre comme exemple la relativité générale, où le contenu et le contenant s'influencent mutuellement ?

D'une certaine façon, oui. On voit là que la géométrie, et l'espace qui est son support, ne sont pas simplement un contenant dans lequel les phénomènes seraient contenus, mais plutôt un cadre dynamique qui détermine précisément comment les phénomènes se déroulent, tandis qu'en retour ceux-ci modifient l'espace. La courbure de l'espace infléchit les trajectoires des corps et façonne la force gravitationnelle, tandis que la présence des masses modifie la courbure et même la forme globale de l'espace. Dans la théorie des cordes, on a affaire à une géométrie beaucoup plus complexe, où les modes vibratoires d'objets fondamentaux à l'échelle quantique correspondent à des caractéristiques physiques (charge, masse…), mais le résultat est essentiellement le même, c'est que la dynamique des champs quantiques émerge comme un effet de l'action de cette géométrie sur l'espace abstrait donné. Les différentes formes de matière qui nous sont connues seraient donc créées par la structure géométrique de l'espace-temps à l'échelle quantique.

Mais que sont tous ces divers espaces dont vous parlez ? Des aspects différents d'une même réalité ou des réalités différentes ? L'espace substrat de la cellule, par exemple, est-il distinct de l'espace usuel dans lequel nous vivons ?

Oui, car c'est l'espace caractéristiques des activités métaboliques et biochimiques d'un organisme vivant, qui possède des propriétés différentes de l'espace euclidien. C'est un espace déterminé par ces activités métaboliques, et impossible à isoler de celles-ci, tout comme l'espace de la relativité générale est inséparable des phénomènes physiques qui s'y déroulent. Il faut partir du présupposé qu'il y a plusieurs espaces. Dans l'espace tridimensionnel qui est celui de nos activités quotidiennes, il y a un emboîtement d'espaces plus précis et plus spécialisés, dont l'espace cellulaire, l'espace moléculaire, l'espace quantique. Nous avons une pluralité d'espaces, qui n'est pas réductible au seul espace euclidien.

Voulez-vous dire que chaque fois qu'on change d'échelle on change d'espace ?

Pour être précis : chaque fois qu'on change de niveau d'organisation. Il ne faut pas confondre l'échelle des phénomènes et le niveau d'organisation. A une même échelle, vous pouvez avoir plusieurs niveaux d'organisation. Et donc plusieurs structures spatiales. Il n'y a pas de meilleure illustration de ce fait que le phénomène des transitions de phase. Observez un glaçon passer à l'état liquide, puis s'évaporer. Ces transformations se produisent à la même échelle, celle de la physique macroscopique, mais elles font apparaître de nouvelles structures spatiales et de nouvelles propriétés physiques. Ce ne sont pas les molécules qui ont changé de nature, ce sont les symétries spatiales entre elles qui ont changé. Ainsi, à la même échelle macroscopique, des systèmes apparemment aussi simples qu'une couche de fluide, un mélange chimique ou un alliage métallique peuvent s'auto-organiser selon des modes très différents, chacun desquels fait apparaître une grande variété de motifs spatiaux et de comportements dynamiques complexes.

Mais comment ces différents espaces sont-ils reliés ? Sont-il « emboîtés » ou est-ce le même espace qui se comporte différemment selon le niveau d'organisation des phénomènes observés ?

Tout d'abord, il importe de savoir qu'un même espace peut admettre plusieurs géométries. Ce fut une grande révolution de la pensée mathématique du XIXe siècle d'avoir compris que non seulement il existe une pluralité d'espaces, mais qu'en plus chacun de ces espaces peut admettre plusieurs géométries. Par exemple, sur une sphère, un petit triangle est euclidien, tandis qu'un grand triangle est riemannien (la somme de ses angles est supérieure à 180°). Or, on parle toujours de la même sphère, mais vous ne pouvez en percevoir qu'une géométrie à la fois, de même que dans le corps humain vous pouvez étudier le fonctionnement de la cellule ou celui de l'organisme, mais pas les deux à la fois. Donc un même espace peut être qualifié de plusieurs façons, en fonction de l'objet ou du phénomène que l'on veut étudier. Mais il se peut très bien que certaines propriétés demeurent invariantes. Il y a des propriétés essentielles qui se conservent d'un niveau d'organisation à un autre. D'autres qui s'ajoutent, par exemple à l'occasion d'une brisure de symétrie*. Quand une symétrie est brisée, lors d'un changement de phase par exemple, il y a émergence de nouvelles structures spatiales et temporelles. Le système perd une ou plusieurs symétries, mais il en acquiert d'autres. Le nouveau groupe de symétrie englobe, à un niveau plus fin, le groupe antérieur. On garde donc le même espace, mais il s'enrichit de nouvelles propriétés, il se qualifie de plus en plus. Prenez la physique des particules : on a besoin d'un groupe de symétrie très large, très riche, pour englober des forces d'interaction qui n'ont pas les mêmes propriétés physiques. Plus ce groupe est large, et devient une supersymétrie*, plus il peut englober toutes les autres symétries particulières, et plus vous avez la possibilité de capturer un nombre maximal de propriétés physiques.

Pensez-vous que la pensée géométrique peut aussi être fructueuse dans l'étude des systèmes complexes et des êtres vivants ?

C'est ma conviction profonde, confortée d'ailleurs par un très grand nombre de recherches théoriques et d'observations expérimentales. Là aussi vous pouvez réfléchir en termes de propriétés structurelles qui permettent d'établir des classes d'équivalence topologique. La stabilité, par exemple, permet de définir des familles de phénomènes : stables, quasi-stables, instables, très instables, en fonction de la sensibilité aux perturbations. Dans les systèmes complexes les plus stables, la structure globale l'emporte sur les constituants individuels. Ils présentent aussi des invariances d'échelle, c'est-à-dire que certaines propriétés fondamentales sont conservées d'un niveau d'organisation à un autre. Dans un organisme vivant, par exemple, deux mécanismes essentiels comme la régulation et la régénération se retrouvent à plusieurs niveaux, que ce soit moléculaire, cellulaire, ou à l'échelle des organes eux-mêmes. Plus important encore : les propriétés de la matière vivante se manifestent comme le maintien, l'auto-entretien de certaines situations topologiques bien plus que comme des conditions énergétiques et fonctionnelles pures. Par exemple : le processus de l'embryogenèse animale montre une série ordonnée de déformations topologiques fondamentales. Par ailleurs, les enzymes *topoisomérases*, qui sont capables de catalyser les changements de configuration topologique des anneaux de la macromolécule d'ADN, sont indispensables au fonctionnement des cellules vivantes. Ces problèmes sont réels et pas seulement conceptuels : les contorsions du filament d'ADN provoquent des tensions et créent des problèmes topologiques à côté desquels les combinaisons les plus compliquées des anneaux de Möbius sont un jeu d'enfant.

Vous parliez de géométrie, et maintenant vous utilisez le mot « topologie ». Quelle est la nuance ?

Une géométrie est fondée essentiellement sur des notions de distance, de métrique. Elle est locale par définition. La topologie ne s'embarrasse pas de mesures. C'est une sorte de géométrie qualitative qui définit toutes les déformations continues possibles (et éventuellement non continues) que l'on peut réaliser entre deux espaces donnés. La topologie englobe la géométrie, et fournit une qualification de l'espace qui se situe à un niveau beaucoup plus profond et général. Elle s'intéresse à ses propriétés globales. Et, pour revenir à la question précédente, le monde vivant doit beaucoup à certains types de mécanismes topologiques qui interviennent directement dans les processus biologiques. Un exemple : pour assurer leur fonction génétique, les protéines doivent réaliser certains mouvements typiques dans l'espace de la cellule. Elles se déforment, en plusieurs séquences ordonnées de repliement et dépliement afin d'adopter une nouvelle configuration. Cette déformation continue ne fait intervenir aucune notion de métrique, mais s'avère indispensable au déclenchement de certaines activités vitales. Autrement dit, la topologie joue un rôle essentiel dans la communication intracellulaire. Les protéines sont des donneurs d'ordre de nature topologique : l'information n'est pas codée sous forme de programme, mais dans l'espace. Elle est configurée, construite spatialement. C'est un exemple superbe d'interaction entre la géométrie intrinsèque des cellules et le plan d'ensemble de l'organisme dans lequel elles s'insèrent.

Est-ce qu'il y a là de quoi bouleverser les rapports entre mathématiques et réalité ?

Evidemment. Il y a là un rapprochement qui n'est pas seulement un rapprochement, mais l'émergence d'une connexion profonde entre deux niveaux de réalité que l'on a toujours cru être totalement séparés, ou qui n'ont été rapprochés qu'en termes d'application d'outils analytiques. Le paradigme des mathématiques, adopté aussi bien par Newton que par Einstein, c'est que les théories s'appliquent bien à tel ou tel domaine de la réalité physique parce qu'elles fournissent un langage formel qui permet une bonne description des phénomènes. Mais aujourd'hui, je pense que les mathématiques connaissent une révolution profonde parce qu'on observe qu'elles sont partie prenante aux phénomènes qu'elles décrivent et essaient d'expliquer. Le réel agit sur les objets mathématiques. Les espaces se modifient sous l'effet des phénomènes qui s'y déroulent. Finalement, la structure dépend pour une large part des phénomènes dynamiques qu'elle organise et qui en deviennent une part intégrante. Ce qui veut dire, bien sûr, que la connaissance des structures géométriques, ou topologiques, est inséparable de la compréhension des phénomènes qui s'y déroulent. Vouloir étudier l'un sans l'autre reviendrait à vouloir séparer les deux pôles d'un aimant. Le renversement conceptuel est le suivant : c'est le réel qui est intrinsèquement géométrique, et non la géométrie qui serait une science appliquée à la réalité. C'est toute la différence entre une structure interne, un squelette, et une structure plaquée de l'extérieur, comme une gaine. Nous avons donc devant nous toute une mathématique nouvelle, qui reste en grande partie à inventer, grâce à laquelle nous allons acquérir une image interne de la transformation et de l'évolution des objets, plutôt qu'une description externe, et qui de plus contient une foule de possibilités de découvrir des entités et des structures nouvelles.

Vous voulez dire que la topologie possède une valeur heuristique, et en même temps générative, j'ai envie de dire créative ?

Oui. Valeur heuristique, parce que si les phénomènes sont déterminés par des structures mathématiques fondamentales, alors les modèles que nous pouvons construire ne seront pas uniquement des outils pour la simulation des phénomènes, mais ils permettront de comprendre de l'intérieur certaines de leurs propriétés essentielles. Et valeur générative, car c'est de façon topologique que la nature crée en permanence, et sur un mode inépuisable. Il y a d'ailleurs là un point nodal intéressant entre science et art. Malgré leurs motivations et leurs modes de construction radicalement différents, elles sont toutes deux « organisées » autour du phénomène de la création. Et il est intéressant de noter que la richesse d'un système formel, ou d'une forme de connaissance, est liée à son incomplétude, c'est-à-dire à l'impossibilité d'épuiser le système en se servant de ses axiomes. Il restera toujours de nouvelles propriétés à découvrir, qui n'étaient pas contenues ni pensables à l'intérieur du système d'axiomes. C'est là que s'enracine le caractère « magique » de la nature, dans le fait qu'elle peut toujours donner lieu à des phénomènes et des propriétés qui ne nous paraissent pas contenus dans ce que nous connaissons déjà. Par ailleurs, la topologie nous offre une conception de la nature qui ne sépare plus à la hache et de manière absolue le vivant de la matière dite inerte. La grande variété des phénomènes et des formes apparentes que l'on rencontre dans la nature s'appréhende d'une seule et même façon : comme la manifestation des modes suivant lesquels les objets et les êtres sont sujets à transformation permanente sous l'action de quelques grands principes spatiaux et temporels : brisures de symétrie, transition de phase, plis, nœuds, et finalement auto-organisation et complexité. Pour toutes ces raisons, nous devons développer un nouveau type de mathématiques, plus concentrées sur des méthodes qualitatives, ayant comme objet la formalisation et la compréhension des structures et des formes que l'on observe dans la nature, au lieu de les traiter comme des conséquences accidentelles d'interactions à petite échelle. Pendant longtemps, on a répété que le qualitatif était ce que l'on fait lorsqu'on ne peut pas faire du quantitatif. C'est là un point de vue qui, à mes yeux, a perdu toute pertinence. Je préfère renverser l'argument et dire que dans la plupart des cas, et particulièrement en biologie, on fait du quantitatif lorsqu'on ne peut pas (encore) faire de qualitatif. Évidemment, la rigueur et la profondeur de nos théories scientifiques ont tout avantage à considérer les nombres et les entités spatiales comme deux faces complémentaires d'une même réalité.

Propos recueillis par Elisa Brune

* On dit d'une symétrie qu'elle est brisée lorsqu'un système physique, invariant vis-à-vis d'un groupe de symétries donné, cesse de l'être par le même groupe après qu'il a subi une transformation ou un changement brutal d'état.

* La supersymétrie postule qu'à chaque particule ordinaire est associé un superpartenaire dont les propriétés diffèrent simplement par le spin. Parmi les particules élémentaires, les fermions sont les constituants de la matière et ont un spin, ou moment cinétique intrinsèque, demi-entier (1/2, 3/2, 5/2, etc.) ; les bosons sont les particules qui transmettent les interactions entre ces constituants et leur spin est entier (0, 1, 2, etc.). D'après la supersymétrie, chaque fermion possède un superpartenaire qui est un boson, tandis que chaque boson ordinaire possède un superpartenaire qui est un fermion.

Pour en savoir plus :

L. Boi, *New Interactions of Mathematics with Natural Sciences and the Humanities*, Springer-Verlag, Heidelberg Berlin, 2003.
R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogenèse*, InterEditions, 1977.
H. Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton University Press, 1949.
A. Connes, *Géométrie non commutative*, InterEditions, 1990.
P. Davies, *La Nouvelle Physique*, Flammarion, 1993.
R. Feynman, *Leçons sur la physique*, Odile Jacob, 2000.
C. De Duve, *Une visite guidée de la cellule vivante*, Éditions Pour la Science, 1987.
P.W. Anderson, « More is Different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science", *Science*, vol. 177, n°4047, août 1972, 393-396.
J. C. Wang, « DNA topoisomerases », *Ann. Rev. Biochem.*, vol. 54, 1985, 665-697.