

ANNUAIRE
DE L'EHESS

Annuaire de l'EHESS

Comptes rendus des cours et conférences

2010

Annuaire 2008-2009

Géométrie, théorisation scientifique et philosophie de la nature

Luciano Boi



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/annuaire-ehess/19805>

ISSN : 2431-8698

Éditeur

EHESS - École des hautes études en sciences sociales

Édition imprimée

Date de publication : 1 janvier 2010

Pagination : 113-119

ISSN : 0398-2025

Référence électronique

Luciano Boi, « Géométrie, théorisation scientifique et philosophie de la nature », *Annuaire de l'EHESS* [En ligne], | 2010, mis en ligne le 01 juin 2015, consulté le 20 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/annuaire-ehess/19805>

Ce document a été généré automatiquement le 20 mai 2021.

EHESS

Géométrie, théorisation scientifique et philosophie de la nature

Luciano Boi

Luciano Boi, maître de conférences

Structures mathématiques et concepts philosophiques de l'espace-temps dans la physique contemporaine

- 1 LE séminaire a été consacré à l'étude de trois grands problèmes conceptuels qui jouent un rôle central dans la physique contemporaine. Un premier problème fondamental est celui du caractère non local des entités physiques qui entrent dans les théories des champs quantiques, ainsi que la nature globale des structures mathématiques qui modélisent les propriétés de ces mêmes entités. Un deuxième problème touche à l'origine de l'univers et à la manière dont on peut expliquer la singularité (physique et topologique) initiale. Il existe aujourd'hui une pluralité de modèles cosmologiques, qui ont été proposés afin de décrire les conditions initiales de notre univers et les lois de son expansion spatiale et de son évolution temporelle. Un troisième problème très important concerne la nature et la structure de l'espace-temps : il s'agit de comprendre si l'espace-temps est une réalité donnée *a priori*, et qui donc précéderait la formation des champs physiques, ou s'il ne serait en fait déterminé par la dynamique de ces mêmes champs. Il s'agit également de comprendre les effets des fluctuations quantiques sur la géométrie locale et la topologie globale de l'espace-temps. Certaines reformulations récentes des théories des champs quantiques, et en particulier la théorie de la gravité quantique, conduisent à prendre en considération deux nouveaux scénarios possibles de la physique : a) la nature émergente de l'espace-temps à partir de la dynamique inhérente à une théorie spécifique de champ quantique, b) le fait que plusieurs structures mathématiques peuvent caractériser une même théorie physique qui décrit les phénomènes aux échelles atomique et subatomique.

- 2 Au cours de trois dernières décennies, notre conception de l'espace et de l'espace-temps s'est enrichie considérablement sur le plan conceptuel et elle a connu des changements profonds grâce à l'introduction de plusieurs nouvelles structures mathématiques non ponctuelles, non linéaires et non commutatives. Ces structures forment aujourd'hui ce qu'on appelle la *géométrie quantique*, une géométrie aux propriétés fort différentes par rapport aux propriétés qui caractérisent la géométrie euclidienne mais aussi la géométrie riemannienne. Ces structures sont au cœur des théories des jauges non-abéliennes, qui ont réussi à unifier les particules et les champs, la géométrie de l'espace-temps et la dynamique des phénomènes physiques en montrant que *la description et l'explication des interactions fondamentales à l'échelle quantique étaient à mettre en correspondance avec la structure de certains groupes de transformations (groupes de Lie compacts) et leurs représentations (algèbres de Lie)*. La construction élargie du modèle standard, qui englobe en un modèle unitaire l'interaction électrofaible (force électromagnétique plus force faible) et l'Interaction forte (qui tient unis les protons et les neutrons à l'intérieur du noyau), est en fait entièrement fondée sur *l'idée de groupe de symétrie et d'espace* (il s'agit d'un espace fibré, un concept plus général que celui de variété) *muni d'une connexion* (un objet géométrique qui généralise celui de métrique riemannienne) *sur lequel il agit*. Cette connexion peut en plus avoir *une courbure* et *une torsion*, ce qui aura des conséquences importantes sur le comportement des phénomènes physiques considérés. Mais si, d'un côté, le modèle standard de la physique est parvenu à donner une description profonde et cohérente des interactions physiques émanant des trois forces fondamentales agissant dans le monde subatomique, de l'autre, ce même modèle est incapable d'expliquer la force de gravitation et, par conséquent, d'englober la relativité générale dans une vision unitaire de l'univers physique. Les tentatives faites jusqu'à maintenant pour unifier les forces électrofaible et forte (dont le modèle standard a su donner une image unitaire dans le cadre des théories quantiques des champs de jauge) avec la force de la gravitation de la relativité générale, ont produit, à partir des années 1970, plusieurs développements théoriques fondamentaux. La théorie des supercordes et la géométrie non-commutative comptent parmi les plus significatives, tant sur le plan des structures mathématiques nouvelles, très fines, qu'elles ont permis de découvrir, que sur le plan des nouveaux concepts épistémologiques que l'on y découvre et qui sont nécessaires pour penser une réalité physique extrêmement complexe et imbriquée.
- 3 Une idée philosophique fondamentale, sous-jacente à ces théories, consiste à étendre le modèle d'espace-temps quadridimensionnel de la relativité générale à des dimensions supérieures. Cette idée fut originellement proposée dans les années 1920 par le physicien Theodor Kaluza et le mathématicien Oscar Klein, et elle a été reprise et développée au début des années 1970 par la théorie de la Supergravité. Plus précisément, la théorie des supercordes propose de considérer nos espaces à trois et à quatre dimensions comme des objets géométriques « vivant » dans un espace particulier qui comporte plusieurs dimensions supplémentaires : six dimensions spatiales qui s'ajoutent aux trois dimensions de notre espace usuel et à la dimension temporelle de la relativité. Ces dimensions « cachées » pourraient avoir une influence importante sur la force de gravité à de très courtes distances, et ainsi aider à comprendre le comportement de certains phénomènes physiques dû à la supposée nature quantique de la gravitation à l'échelle de Planck.

- 4 Voici les principaux sujets que nous avons abordés dans le séminaire : 1) La manière dont la structure géométrique et topologique de l'espace-temps influence le comportement des phénomènes physiques. 2) Le statut et le rôle des symétries « internes » dans les théories physiques actuelles. 3) La structure et la nature de l'espace-temps.
- 5 Résumons l'étude que nous avons faite de ces thèmes. Les tentatives récentes pour parvenir à une théorie non-perturbative des champs quantiques embrassant la gravitation de façon intrinsèque, reposent sur l'idée que l'espace-temps à l'échelle quantique doit avoir une structure essentiellement floue (résultant d'un mélange de propriétés continues et propriétés discrètes). Une telle structure comporte des singularités topologiques d'un certain type comme solutions non linéaires des équations (monopoles, solitons, etc.). Il est en effet possible de montrer, en s'appuyant sur des raisonnements à la fois mathématiques et physiques, que pour les phénomènes existants à l'échelle de Planck 10^{-33} cm, les effets des fluctuations quantiques sur la courbure de l'espace-temps sont assez grands pour produire des modifications importantes dans sa topologie. Cela suggère l'idée d'un certain type de superposition non linéaire des différentes topologies, qui ressembleraient très peu à ce que d'ordinaire on appelle une « variété lisse » (ou continûment différentiable). Plus précisément, on peut faire l'hypothèse que la structure de l'espace-temps à l'échelle quantique n'est pas celle d'une variété différentiable C^∞ , mais vraisemblablement l'équivalent d'un espace topologique non classique construit à partir d'une surface de Riemann compacte complexe à bords sur laquelle on définit plusieurs sortes d'invariants topologiques et algébriques (invariants de lacets, de nœuds, de tresses...), et où les valeurs de ces invariants correspondraient aux états dynamiques de la théorie physique concernée. La théorie des supercordes a remarquablement développé cette idée sur le plan aussi bien mathématique que physique. L'une des conséquences de cette hypothèse, en particulier dans la théorie des champs quantiques, est que les propriétés topologiques globales de la variété M . (lorentzienne ou pseudo-riemannienne) jouent un rôle fondamental et, partant, plusieurs effets physiques quantiques proviennent de la structure géométrique globale et de la topologie de M .

Topologie et Biologie

- 6 Le séminaire de cette année a été consacré à mettre en évidence l'importance pour les mathématiques et la biologie de l'interface remodelages de la chromatine et processus épigénétiques. Aussi bien du point de vue de la formation de ses structures que de sa dynamique fonctionnelle, le génome des eucaryotes apparaît comme un système hautement complexe, dont la régulation se fait au moins à trois niveaux hiérarchiquement organisés. Ces niveaux sont : 1) la séquence linéaire de l'ADN et sa géométrie et chimie locales ; 2) la chromatine et ses différentes structures et fonctions ; 3) la structure nucléaire qui inclut la dynamique et l'organisation spatiale tridimensionnelle du génome dans le noyau de la cellule. Nous avons décrit et discuté de façon détaillée ces trois niveaux d'organisation du vivant.
- 7 L'analyse de certaines interactions entre objets topologiques et processus biologiques a été le fil conducteur du séminaire. Nous avons d'abord montré que les événements génétiques les plus fondamentaux à l'intérieur de la cellule, tel que la réplication, la transcription, la recombinaison et la réparation, sont profondément liés à certains

changements dans la conformation topologique et dans l'état dynamique de la molécule en forme de double hélice. Ensuite, nous avons décrit la façon dont les cellules peuvent moduler le degré de surenroulement, de nouement et de désenchevêtrement des brins d'ADN grâce à l'activité de plusieurs familles d'enzymes *topoisomérases*. Nous avons enfin esquissé quelques méthodes topologiques permettant de décrire la propriété morphodynamique et fonctionnelle du surenroulement de l'ADN autour des nucléosomes et du repliement de la chromatine dans le noyau. Nous pensons que ces méthodes pourraient également permettre d'inférer de nouvelles propriétés structurelles et biologiques du génome, et peut-être aussi de mieux comprendre certains aspects de son activité complexe à l'intérieur de la cellule.

- 8 Or, pour arriver à une compréhension effective du fonctionnement du génome, le bon niveau à prendre en compte ne peut pas être celui de la simple description de la séquence linéaire de l'ADN. En effet, il est apparu de plus en plus clairement qu'il est essentiel d'étudier la manière dont le génome s'organise topologiquement et dynamiquement à l'intérieur de l'espace nucléaire des cellules, et en interaction avec l'activité des autres composants cellulaires. Nous avons en particulier décrit l'architecture du noyau, la compartimentation spatiale de la chromatine à l'intérieur du chromosome, et l'interface dynamique entre la chromatine et les autres composantes nucléaires. La principale motivation pour développer une telle approche du vivant, est de comprendre comment et pourquoi ces niveaux d'organisation conditionnent l'expressivité des gènes et l'activité cellulaire lors de la morphogenèse, ainsi que l'évolution du phénotype.
- 9 La mise en évidence de quelques propriétés topologiques et épigénétiques de la chromatine et de la compartimentation spatiale du chromosome dans le noyau nous a servis de point de départ pour aborder la question de la signification biologique réelle du rapport entre la condensation et la compaction de la chromatine dans les chromosomes et la régulation de l'expression génétique. Il s'agit là d'une question centrale de la biologie *intégrative*. Par biologie « Intégrative », nous entendons une conception du vivant qui prend en compte les liens essentiels qui existent entre les différents niveaux d'organisation biologique, en particulier entre les niveaux macromoléculaire, cellulaire, organismique et environnemental, et aussi, qui combinent dans une approche unitaire l'étude du développement, de l'évolution et des écosystèmes. Nous pensons que cette démarche est la seule à même de fournir une compréhension profonde des relations complexes entre le génétique, l'épigénétique et l'environnement naturel et social.
- 10 Une telle conception exige que l'on aborde, par de nouvelles méthodes théoriques et empiriques, la connexion entre plasticité topologique (ou conformationnelle) et complexité biologique (ou fonctionnelle), connexion qui doit être au cœur d'une définition plus large et dynamique de la vie et des formes animées. On a montré que la plasticité topologique intervient à tous les niveaux d'organisation des structures supramoléculaires, et elle joue donc un rôle fondamental dans l'ensemble des événements majeurs du cycle cellulaire (réplication, transcription, recombinaison et réparation). Cette plasticité est également essentielle pour permettre le remodelage de la chromatine et la re-organisation spatiale du chromosome, qui opère en synergie avec les dynamiques temporelles du développement physiologique et métabolique des cellules et des organismes au cours de l'ontogenèse. Enfin, la propriété de la plasticité topologique (changement et adaptation de la forme des composants cellulaires et

tissulaires au cours de la croissance) explique, du moins en partie, le rôle des systèmes d'interactions fonctionnelles entre les différentes structures macromoléculaires, ainsi que les phénomènes de la régulation et de l'expression des génomes.

- 11 Un exemple que nous avons discuté en détail concerne l'un des problèmes fondamentaux de la biologie à l'heure actuelle : comment comprendre les processus de régulation transcriptionnels et post-transcriptionnels. Les données expérimentales et théoriques dont on dispose à présent permettent de faire l'hypothèse que la régulation de l'expression génétique et les systèmes d'interactions fonctionnelles jouent un rôle essentiel dans la construction de ce qu'il convient d'appeler la complexité structurale des gènes. L'étude d'une telle complexité nous a conduits à faire la distinction entre propriétés topologiques, dynamiques et biologiques de la régulation génétique et épigénétique. Par ailleurs, on a besoin d'une description plus fine des processus épigénétiques et de l'influence qu'ils exercent sur les événements génétiques dans la cellule, les mécanismes sous-jacents à la construction des organismes et à l'évolution des espèces.
- 12 Nous avons enfin insisté sur l'exigence d'élaborer de modèles topologiques adaptés aux situations biologiques, et effectifs d'un point de vue empirique. Ces modèles peuvent aider à mieux comprendre la nature des propriétés de *robustesse*, de *stabilité* et d'*auto-organisation* que présentent les auto-assemblages moléculaires et supramoléculaires. On observe ces propriétés pour ainsi dire *génériques* chez tous les organismes vivants en dépit des fluctuations et des instabilités physiques et biochimiques, en partie aléatoires et chaotiques, que caractérise le comportement des structures individuelles à des stades précis de leur évolution spatio-temporelle.
- 13 Dans les dernières séances du séminaire, nous sommes revenus sur quelques aspects pour en préciser les enjeux à la lumière de plusieurs résultats récents : 1) Les propriétés géométriques structurales du génome et les propriétés topologiques et dynamiques de la chromatine. 2) Le rôle des topoïsoomérase et des complexes ADN-protéines histones dans la compaction de la chromatine dans le chromosome métaphasique. 3) Les mécanismes responsables de la mise en place des systèmes interactifs de régulation, de la réponse du génome aux signaux de l'environnement extra-chromosomique et cellulaire, et de leur rôle dans la reproduction et le métabolisme des organismes. 4) La relation entre les processus épigénétiques et certaines pathologies tumorales, ainsi que les rapports encore plus complexes entre la stabilité et/ou instabilité de l'épigénome et les caractéristiques de l'environnement.

Science et art des nœuds : des quipus précolombiens aux nœuds de la topologie moderne

- 14 Ce séminaire se voulait une tentative de mettre en relation la mathématique et l'art en vue d'en mettre en évidence quelques analogies profondes. L'étude de ces analogies a été développée à travers une exploration de l'intérieur de trois objets-concepts : nœuds, trous et espaces. Nous avons poursuivi de manière complémentaire un double objectif : une analyse fine des détails formant la structure locale de ces objets-concepts, et un regard sur leur organisation et dynamique globales. En premier lieu, nous avons montré que les nœuds et les trous se compénètrent sur plusieurs plans, et redéfinissent les configurations et les dynamiques de l'espace à plusieurs niveaux. Le but était de comprendre les modalités transformatrices et les effets de sens que cet entrelacement

est à même d'engendrer. Nous avons ensuite montré que les nœuds et les trous sont à la fois des objets physiques, doués d'une certaine force et des propriétés inhérentes à leur déploiement dans l'espace et le temps, et des concepts abstraits, capables d'une puissance qui transcende la pure physicalité de leur support matériel. En résumé : ce sont des instruments de création et des générateurs de formes. En effet, les nœuds et les trous créent des nouveaux « espaces » (de nouvelles dimensions spatiales) à l'intérieur et sur (notamment le bord de) la surface d'un même support spatial. En d'autres termes, ils permettent d'engendrer de nouvelles formes à partir de transformations qui agissent dans un champ de variations possibles, également à partir de conflits entre forces et gestes qui peuvent se re-composer selon des formes inattendues, et enfin, à partir de connexions invisibles qui en produisant des situations événementielles s'échangent des contenus de signification. En troisième et dernier lieu, nous avons montré que les nœuds et les trous affranchissent l'intuition spatiale et l'imagination des schèmes fort rigides du formalisme mathématique et artistique (du purisme formel), ainsi que des limites trop étroites des langages codifiés, qu'ils soient ceux de la figuration symbolique ou ceux du scientisme positiviste. De cette manière, ils sont à même de libérer de nouvelles forces et qualités inhérentes à l'« intériorité cachée » de la spatialité comme forme de vie, comme lieu où la matière et la pensée se rencontrent, et où la naturalité des êtres vivants et l'humanité des objets instaurent une trame de relations.

- 15 Nous avons souligné l'importance que la mathématique et l'art soient tout d'abord conçus comme des modes de pensée, comme générateurs de concepts et de formes ; ce sont en fait des instruments et des théories très raffinées permettant de comprendre le monde qui nous entoure. Un trait caractéristique de la mathématique tout comme de l'art est leur *nature globale*, ce qui veut dire qu'on ne peut pas isoler une de leurs parties sans qu'on prive l'ensemble de son essence même. Ces parties font sens dans la mesure où elles s'agencent pour former un « tout ». De ce fait, la meilleure métaphore pour nous représenter l'ensemble des théories mathématiques et artistiques est celle d'*organisme* (et non pas celle, beaucoup plus commune, de « structure pyramidale »), selon laquelle il n'existerait pas de centre mais bien plutôt un réseau, un entrelacs grâce auquel les différentes parties entrent en résonance et se mettent à interagir. Une telle « unité organique » est possible parce que les objets mathématiques et les objets artistiques peuvent se réaliser dans de différents substrats et se manifester dans de diverses incarnations. Il y a quelque chose de tout à fait extraordinaire dans cette réincarnation (ou métamorphose) des objets mathématiques et artistiques, et c'est le dynamisme qui les génère. L'image de *vie organique* est probablement la plus profonde permettant de symboliser la mathématique et l'art.
- 16 La dernière séance du séminaire a porté sur un autre aspect de la question abordée. Nous y avons souligné que les formes mathématiques n'ont pas qu'un contenu et une signification linguistiques, ni elles peuvent être réduites à un ensemble fermé et auto-consistent de propriétés logiques ; en réalité, la signification fondamentale de l'incomplétude tient à ce qu'elle n'est pas seulement une limite à la connaissance autoréférentielle, mais aussi et davantage un facteur intrinsèque de découverte. Pour des raisons assez analogues, les formes artistiques ne sont pas qu'un système de signes, car, en réalité, elles sont aussi un tissu de choses et d'événements qui s'organisent en une ontologie stratifiée et différenciée d'un certain type d'objets et de relations entre ces mêmes objets. Le sens de ce tissu n'est pas fixé *a priori* ou donné de façon

exhaustive, parce qu'il est en mouvement constant et parce qu'il se reconfigure de manière plastique en fonction des (et en réponse aux) différents contextes objectifs et subjectifs dans lesquels il « baigne ». Pour résumer, la mathématique et l'art ont comme principale fonction la création de nouveaux concepts et objets, et les deux sont une vraie forme de connaissance, à la fois universelle et singulière, de phénomènes et d'événements.

Publications

- « Topological ideas and structures in fluid dynamics », *JP Journal of Geometry and Topology*, 8 (2), 2008, p. 151-184.
- « La Nature est-elle géométrique ? », entretien d'Elisa Brune avec Luciano Boi, *Mayak*, « Traditions & Modernités I », 3, 2008, p. 57-65.
- « Epigenetic phenomena, chromatin dynamics, and gene expression. New theoretical approaches in the study of living Systems », *Rivista di Biologia/Biology Forum*, 101, 2008, p. 405-442.
- Avec L. Verner, « La realtà come creazione e trasformazione di nodi », dans *Jorge Eielson – Arte come nodo/Nodo come dono*, Gli Ori Editore, Pistoia, et Centro Studi Jorge Eielson, Florence, 2008, p. 38-55.
- « Creating the physical world ex nihilo? On the quantum vacuum and its fluctuations », dans *The Two Cultures: Shared Problems*, sous la dir. d'E. Carafoli, G.-A. Danieli, G.-O. Longo, Springer-Verlag, Milan, 2009, p. 51-97.
- Avec Éric Bois, « Mathématiques créatives, physiques significatives et le livre ouvert de la nature : quelques remarques sur la théorie des systèmes dynamiques et chaotiques, le déterminisme et la nature du temps », *Eikasìa*, revista de filosofia, 27, 2009, p. 215-247.
- « Geometria e dinamica dello spazio-tempo nelle teorie fisiche recenti. Su alcuni problemi concettuali della fisica contemporanea », *Giornale di Fisica*, revue de la Société Italienne de Physique, 50 (suppl. 1), 2009, p. 1-10.
- « Ideas of geometrization, geometric invariants of low-dimensional manifolds, and topological quantum field theories », *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 6 (5), 2009, p. 1-57.
- « Il senso del vivente 2. Morfologie, dinamiche e significati dei sistemi biologici », *Pubblicazioni del Centro Internazionale di Semiotica e Linguistica*, Urbino, n° 390-391-392/A, septembre 2009, p. 1-64.
- « Clifford geometric algebra, spin manifolds, and group action in mathematics and physics », *Advances in Applied Clifford Algebras*, 19 (3-4), 2009, p. 611-656.
- « The geometric foundations of contemporary physics, and some reflections about the nature of space-time », dans *Proceedings of the XVIIIth SIGRAC Congress on « General Relativity and Gravitational Physics »*, Publications de la Société Italienne de Relativité Générale et Physique de la Gravitation, 2009, p. 1-34.

INDEX

Thèmes : Méthodes et techniques des sciences sociales