

Espace, temps et cognition. A partir des mathématiques et des sciences de la nature

Francis Bailly, Giuseppe Longo

▶ **To cite this version:**

Francis Bailly, Giuseppe Longo. Espace, temps et cognition. A partir des mathématiques et des sciences de la nature. Revue de synthèse, 2003, 124, 10.1007/bf02963401 . hal-03318948

HAL Id: hal-03318948
https://ens.hal.science/hal-03318948

Submitted on 11 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ESPACE, TEMPS ET COGNITION

A PARTIR DES MATHEMATIQUES ET DES SCIENCES DE LA NATURE

Francis BAILLY et Giuseppe LONGO

RESUME : La cognition humaine paraît étroitement liée à la structure de l'espace et du temps relativement auxquels le corps, le geste, l'intelligibilité semblent devoir se déterminer. Pourtant, ce qui, après les approches physico-mathématiques de Galilée et de Newton, fut caractérisé par Kant comme formes de l'intuition sensible, n'a cessé au cours des siècles qui suivirent de se trouver remis en cause dans leur saisie première par les développements théoriques. En mathématiques d'abord, avec les géométries non-euclidiennes, en physique ensuite, où relativité générale puis théories quantiques et critiques ont dû remanier profondément l'objectivité de ces concepts pour en faire des catégories, certes toujours aussi essentielles, mais de plus en plus contre-intuitives, et maintenant en biologie où la temporalité, notamment, et la causalité se révèlent largement différentes de celles de la physique. C'est ce que nous tentons de présenter et de discuter dans ce texte en vue d'en dégager la pertinence pour la cognition elle-même.

MOTS-CLES : espace, temps, cognition, théories scientifiques.

ABSTRACT : Human cognition seems strictly related to the structure of space and time where bodily presence, action and intelligibility are to be determined. Yet, the classical characterization of space-time by Galileo and Newton, brought to the limelight of theories of knowledge by Kant as form of intuition, has been superseded, through the following centuries. In mathematics first, beginning with non-Euclidean geometries, then in physics, where general relativity and quantum and critical theories deeply revised the very formation of scientific objectivity along these concepts and in conjunction with causality. In particular, in physics, space and time, their structure and dimensions, moved away form the intuitive space and time of senses ; a similar non-naive attitude seems to be required in the understanding of temporality and causality in biology, where these notions need to be specified yet in a different way. In this text we try to stress the relevance of these issues for the purposes of the analysis of cognition.

KEYWORDS : space, time, cognition, scientific theories.

ZUSAMMENFASSUNG : Zwischen dem menschlichen Erkenntnisvermögen und der Struktur von Raum und Zeit scheint ein enger Zusammenhang zu bestehen, denn es sieht so aus, als ob Körper, Handlung und Verständlichkeit dadurch bestimmt sind. Doch das, was im Anschluß an das physikalisch-mathematische Vorgehen Galileis und Newtons von Kant als Anschauungsform bezeichnet wurde, wurde im Laufe der späteren Jahrhunderte immer wieder durch die Entwicklung neuer Theorien in Frage gestellt. Das geschah zuerst in der Mathematik durch die nicht-euklidische Geometrie, anschließend in der Physik, wo die allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie die Objektivität dieser Begriffe zweifelhaft erscheinen ließen und daraus Kategorien machten, die zwar immer noch grundlegend sind, sich aber von intuitiven Begriffen immer weiter entfernt haben. Dasselbe gilt für die Biologie, wo die Begriffe der Zeitlichkeit und der Kausalität etwas ganz anderes bedeuten als in der Physik. Dieser Sachverhalt wird in dem vorliegenden Artikel diskutiert, um seine Bedeutung für den Erkenntnisprozeß herauszuarbeiten.

STICHWÖRTER: Raum, Zeit, Erkenntnis, wissenschaftliche Theorien.

*RIASSUNTO **:** La cognizione umana sembra strettamente legata alla struttura dello spazio e del tempo relativamente alla quale il corpo, il gesto e l'intelligibilità stessa sembrano doversi determinare. Tuttavia, la « forma dell'intuizione sensibile » ad essa correlata, caratterizzata da Kant sulla scia della fisico-matematica di Galileo e Newton, e' stata a piu' riprese rimessa in discussione nel corso dei due ultimi secoli dagli sviluppi teorici della fisica e della matematica. In matematica, innanzitutto, dalle geometrie non-euclidee, in fisica in seguito, dove la relaticità generale e, poi, le teorie quantistiche e di tipo critico hanno dovuto rivedere profondamente l'oggettività di questi concetti per farne delle nuove categorie, ancora assolutamente centrali, ma crescentemente anti-intuitive. Ed ora la biologia riapre la discussione per via di un approccio alla causalità ed alla temporalità che sembra molto diverso da quello della fisica. Cercheremo, in questo testo, di riflettere sul rapporto stretto fra quadri spazio-temporali costitutivi della conoscenza, in fisica ed in biologia, come premesse indispensabili ad un chiarimento del loro ruolo nella cognizione umana.*

PAROLE CHIAVE: spazio, tempo, cognizione, teorie scientifiche.

Francis BAILLY, né en 1939, est chargé de recherche au Centre national de la recherche scientifique, laboratoire de Physique du solide et de cristallogenèse (LPSC). Il participe également aux travaux du centre pour la Synthèse d'une épistémologie formalisée (CeSef).

Adresse : Laboratoire de physique des solides et de cristallogenèse-CNRS, 1 pl. Aristide-Briand, F-92195 Meudon Cedex.

Courrier électronique : bailly@cnrs-bellevue.fr

Giuseppe LONGO, né en 1947, est directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique, laboratoire d'Informatique de l'École normale supérieure, depuis 1990. Il est ancien professeur à l'université de Pise (de logique mathématique et, ensuite, d'informatique) ; il a travaillé trois ans aux USA (Berkely, M.I.T. et Carnegie Mellon University) et dirige, depuis 1990, la revue *Mathematical Structures in Computer Science* de la Cambridge University Press.

Adresse : Laboratoire et département d'informatique CNRS-École normale supérieure et CREA, École polytechnique, LIENS, 45 rue d'Ulm, F-75005 Paris.

Courrier électronique : longo@di.ens.fr

http://www.di.ens.fr/users/longo

Ce texte est organisé en deux parties : l'analyse de l'espace et du temps en physique (I), suivie d'une incursion dans le domaine de la biologie et dans celui des concepts gnoséologiques mobilisés par ces disciplines (II).

Il s'agit, bien évidemment, d'une introduction aux problèmes immenses qui sont posés notamment par l'intelligibilité mathématique de « l'espace » dans ces sciences, et bien entendu nous y discutons d'abord des thèmes qui nous sont les plus proches, en tant que physicien et mathématicien, tout en n'abordant que quelques aspects de la biologie, discipline pour laquelle la mathématisation elle-même constitue un enjeu majeur.

Selon notre opinion, ces thèmes entretiennent des liens très étroits avec la cognition. En effet, nous estimons que les philosophies associées aux fondements des mathématiques et des sciences de la nature ont profondément marqué les approches à la cognition humaine et c'est la raison pour laquelle une réflexion sur les thèmes analysés constitue à nos yeux des prémisses indispensables à toute réflexion sur les enjeux des sciences cognitives. Mais, avant d'entrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de. préciser un peu.

Les théories physiques contemporaines – celles qui sont nées et se sont développées au XX^{e} siècle – ont conduit à une géométrisation de plus en plus poussée de la physique. En contrepartie apparaît une physicalisation de plus en plus affirmée de la géométrie. C'est déjà le cas avec la théorie de la relativité générale, par exemple, où la géométrisation de la gravitation (les trajectoires des objets sont décrites comme des géodésiques de la variété riemannienne d'espace-temps correspondante) s'interprète aussi bien comme une physicalisation de l'espace-temps mathématique (la courbure de l'espace-temps est attribuée à la distribution d'énergie-impulsion). Ce l'est encore plus dans les théories quantiques des champs où l'introduction de champs de jauges non abéliens pour rendre compte des interactions quantiques ont conduit pour leur part au développement d'une géométrie elle-même non-commutative [1]. Dès lors, si l'on considère l'épistémologie de l'espace-temps et que l'on accepte de voir dans les déterminations mathématiques de la géométrie le processus d'objectivation des formes de l'intuition que constituent l'espace et le temps phénoménaux, on doit aussi accepter d'aller plus loin, c'est-à-dire accepter que ces formes de l'intuition, comme ces déterminations mathématiques, se trouvent elles-mêmes investies en retour par les déterminations physiques des théories contemporaines.

Quant aux rapports entre mathématiques et biologie, la différence cruciale que l'on essayera de mettre en évidence réside tout d'abord dans le rôle « constitutif » des outils mathématiques pour la physique, par contraste avec la situation conceptuelle qui prévaut en biologie. En effet, les quelques indices et régularités que l'expérience nous fournit sont transformés, en physique, en structures mathématiques très riches, beaucoup plus riches que ces « symptômes » que nous saisissons du monde physique, en particulier en relativité et en microphysique. De plus, ces structures, loin d'être seulement descriptives, sont régulatrices, en fait *normatives*, de la réalité physique (et de son espace) : elles contribuent à déterminer cette réalité, elles la constituent. On ne peut rien dire, en relativité, en physique quantique, sur les systèmes dynamiques (au cœur des théories de type critique) sans les mathématiques : elles sont le langage qui constitue l'objet ainsi que l'espace conceptuel et phénoménal de la physique.

Par contraste, en biologie, le vivant s'impose dans sa richesse phénoménale et toute théorie mathématique n'en saisit que quelques aspects, fractionne l'unité et l'individualité du vivant, son « imbrication » dans l'écosystème. Si l'on veut réfléchir

1. CONNES, 1990.

au rôle de la mathématique dans la cognition humaine, il faut aussi repenser celui de cette discipline en biologie, car le vivant est le point de départ de toute réflexion sur l'entendement. Néanmoins, malgré ces différences et la moindre mathématisation de la biologie, on peut constater, dans bien des secteurs de cette discipline, un mouvement semblable vers la « géométrisation ». La question de l'espace propre ne s'y pose pas seulement au niveau de la structure macromoléculaire (séquences de bases sur l'ADN et les effets génétiques qui en résultent, par exemple, ou structures spatiales des protéines et prions), mais aussi à celui du développement (effets inducteurs des contiguïtés spatiales dans l'embryogenèse, par exemple), du fonctionnement des organismes (géométries fractales affectant des interfaces membranaires ou des réseaux arborescents engagés dans des fonctions physiologiques et des régulations) ou encore au niveau des populations dans le partage de l'environnement et les dynamiques qui s'y trouvent associées. De même, la question du temps s'y pose aussi bien en ce qui concerne l'articulation entre temps de réponse à des stimuli externes et temps itératif associé aux rythmes internes du temps biologique propre, que pour les synchronies et hétérochronies dans les développements dont la prise en compte a conduit à une reformulation récente de la théorie synthétique de l'évolution elle-même.

Mais, quel lien peut-il y avoir entre les espaces de la physique et ceux du vivant ? Le fait est que cette formidable construction conceptuelle que représente la géométrie humaine et dont le but est de rendre l'espace intelligible, de l'organiser, est enracinée dans ces « actes d'expérience » qui marquent notre présence au monde. Elle trouve son origine dans un couplage fondateur et fécond entre notre « agir dans le monde », en tant qu'êtres vivants et engagés dans l'intersubjectivité (on reprend ici, très librement, des thèses d'Edmund Husserl [2], la capacité de symbolisation et d'abstraction dont l'évolution a doté l'espèce humaine, et le développement de son imaginaire créatif – en même temps que celui de sa rationalité – qui en ont résulté. C'est dans un parcours constitutif – qui va de la phylogenèse, à l'ontogenèse, puis au dialogue entre êtres vivants dans l'histoire, stabilisé dans l'intersubjectivité, dans l'écriture, dans la mémoire historique – qu'il faut trouver le sens même des plus complexes parmi les constructions de la physique-mathématique. Sans le tout premier geste du vivant dans l'espace, avec toute son intentionnalité pourvue de ces dimensions imaginaires et cognitives, il n'y aurait pas l'idée d'une « variété à 10 dimensions », pour élaborer la théorie des « super cordes », en physique quantique.

L'objet de ce texte est donc de tenter d'analyser certaines des conséquences épistémologiques de ces situations sur les représentations de l'espace et du temps – et les déterminations théoriques qui régulent désormais ces représentations –, telles qu'elles ressortent de ces avancées scientifiques.

Dans la première partie, nous analyserons donc les statuts de l'espace et du temps engendrés par les trois grands types de théories physiques contemporaines : les théories de type relativiste, les théories de type quantique et les théories de type critique. Dans la seconde partie, chaque auteur évoquera indépendamment la situation dans certains secteurs de la biologie théorique et nous récapitulerons et généraliserons ces approches en tentant de présenter une sorte de catégorisation actualisée, abstraite et formalo-mathématique, des concepts d'espace et de temps en tant qu'invariants gnoséologiques.

2. HUSSERL, 1962.

I.- UNE INTRODUCTION A L'ESPACE ET AU TEMPS DE LA PHYSIQUE

Francis BAILLY et Giuseppe LONGO

A PARTIR DE LAPLACE

La physique du XIX^e^ siècle a été marquée par l'extraordinaire figure de Laplace. Ses mathématiques, sa physique, sa philosophie représentent le moment de la maturité pour le tournant moderne de la science, celui de Descartes, Galilée et Newton.

La physique, en particulier, est organisée dans des espaces cartésiens absolus où les corps sont gouvernés par les lois de Galilée-Newton. La perfection du mécanisme du monde, de l'univers, est complètement exprimée par des règles mathématiques éternelles. Un être parfait qui connaîtrait avec une approximation parfaite la situation du monde à un instant donné – récite une phrase trop connue de Laplace – pourrait prévoir parfaitement toute évolution future. Mais, ce qui compte plus encore pour le scientifique laïque et humainement imparfait qu'est Laplace, ce n'est pas la connaissance parfaite, divine, donc impossible, mais l'analyse des « perturbations » : si l'on connaît, *avec une certaine approximation,* la situation d'un système physique, on pourra, en général, en déterminer l'évolution avec une *approximation du même ordre de grandeur*. En ce sens, selon Laplace, des règles (mathématiques) gouvernent *complètement* le monde et permettent de prédire son futur. Celui-ci est réductible à (et prédictible par) un ensemble fini et complet de règles, bien exprimé par ses systèmes d'équations. En fait, l'analyse des perturbations (planétaires) est une des motivations les plus importantes des progrès extraordinaires de la physique-mathématique du XIX^e^ siècle (et de l'analyse mathématique dans son ensemble).

On verra que la physique du XX^e^ siècle a pris d'autres directions. Dans ce qui suit, on essayera brièvement de rappeler que les systèmes dynamiques, la physique quantique, la relativité ont développé de tout autres concepts et inspiré de tout autres philosophies des sciences.

Or, il n'en va pas de même pour le courant principal des sciences cognitives. Alan Turing, dans son article fondateur de l'Intelligence Artificielle (forte) et de l'hypothèse « fonctionnaliste » en cognition, explicite très bien la notion de causalité physique sous-jacente à son invention de la Machine à États Discrets programmable (MED) : dans une MED, « il est possible de prédire tous les états futurs. Cela nous rappelle les vues de Laplace […]. La prédiction que nous envisageons est, cependant, relativement plus effective que celle que Laplace considère [3] ». L'idée laplacienne de « l'ensemble fini et *complet* de règles » est donc consciemment au cœur du formalisme mathématique qui est à l'origine de l'informatique moderne, la machine de Turing, ainsi que du « jeu de l'imitation » de ce dernier, par lequel il entend démontrer que le cerveau est équivalent à sa machine [4]. En fait, la notion de programme « déterministe », telle

3. TURING, 1950, ici trad. franç., p. 145.

4. TURING, 1950, ici trad. franç., p. 145, reprend une deuxième fois, dans son texte, une référence à Laplace, dans la description de sa MED, à laquelle il contrapose un exemple paradigmatique d'imprédictibilité dans le monde physique « […] le déplacement d'un seul électron […qui] peut faire qu'un homme sera tué par une avalanche un an plus tard, ou en réchappera ». Quant au cerveau, ce dernier fait partie du monde physique, car, il précise : « Une petite erreur dans l'information sur la taille de l'impulsion nerveuse » peut en affecter le fonctionnement global (*ibid.*, p. 162). En terme moderne, le cerveau est plutôt un système dynamique, sensible aux conditions au contour. Toutefois, et voilà le sens

que nous l'avons reçue des travaux en logique mathématique (plus précisément, en théorie de la calculabilité) de Haskell B. Curry, Alonzo Church, Alan Turing, Stephen O. Kleene (1930-1936)… est laplacienne, c'est-à-dire qu'elle implique la prédictibilité de l'évolution du système ordinateur-programme, dans un sens bien précis et dont on discutera. Bref, on espère bien parvenir à savoir comment va évoluer un programme dans un temps fini [5] ! Suite à cette exigence, qui est « logique » (propre des systèmes logiques, pour la déduction formelle, dont l'étude motivait ces calculs des années 1930), et non pas physique, une culture laplacienne du « cerveau comme machine de Turing » et de « programme » s'est transférée dans les analyses de la cognition, voire en biologie. Pour ce qui concerne notre projet, observons que la machine de Turing est indépendante de la structure de l'espace (la dimension cartésienne du « matériel » n'a pas d'influence sur son expressivité) et son horloge engendre un temps séquentiel, sorte d'absolu newtonien discrétisé. Encore une fois, il s'agit d'une machine logique et non pas physique, ne serait-ce que parce que la structure de l'espace et du temps, et de leur dimensionalité, est au cœur de toute analyse des phénomènes physiques, surtout au XX^{e} siècle.

Nous développerons donc d'abord une brève analyse des courants principaux de la physique moderne, principalement dans le dessein de clarifier des enjeux qui se situent, aujourd'hui encore, au centre des philosophies de la connaissance, dont la réflexion sur la physique est, depuis toujours, un des pivots. D'autant que toute réduction du vivant et des activités mentales au « monde physique » devrait d'emblée se demander : réduction, mais vers … quelle (théorie) physique ? Quelles « lois » physiques faut-il utiliser dans l'analyse des phénomènes biologiques et cognitifs ?

TROIS TYPES DE THEORIES PHYSIQUES : RELATIVITE RESTREINTE ET GENERALE, PHYSIQUE QUANTIQUE ET PHYSIQUE DES SYSTEMES DE TYPE CRITIQUE

Il s'agit de présenter ici une « classification » des théories physiques largement influencée par leur façon de « traiter l'espace » : les théories de type relativiste, de type quantique et de type critique.

Relativité restreinte et générale

Le premier type de théories (les théories de type relativiste) introduit un espace-temps quadridimensionnel, dont les lois de conservation et les principes de causalité relativistes sont décrits en tant qu'invariants mathématiques par rapport à un « groupe de relativité » : la théorie de la relativité restreinte nous donne les « objets » physiques et la structure même de l'espace-temps, comme ensemble des propriétés invariantes par rapport au groupe des déplacements – rotations et translation – dans ce nouvel espace (groupe de Lorentz-Poincaré). En relativité générale, la géométrie riemannienne *engendre* l'espace physique, l'univers de repérage, avec sa dimensionalité et ses

---

du « jeu de l'imitation », si l'on suppose qu'il n'y ait qu'une « grille discrète d'accès » aux cerveaux et aux machines, par le langage, du point de vue fonctionnel, le cerveau peut être considéré équivalent à une machine à états discrets. (En fait, la MED serait indistinguable du cerveau d'une femme : le « jeu de l'imitation » consiste à distinguer un homme d'une femme, par des questions écrites ; au cours du jeu, l'homme est remplacé par une machine – voir LASSEGUE, 1998, pour une biographie de Turing et son histoire dramatique avec la justice anglaise, de son homosexualité à son suicide. Ce jeu et son impossibilité du point de vue de la physique mathématique moderne sont analysés *in* LONGO, 2002a.

5. Au moins pour les machines séquentielles, mais on reviendra sur ce point délicat.

symétries propres. Dans les espaces ainsi introduits, les coefficients de la métrique *sont* les potentiels gravifiques, de même que la courbure locale de la variété riemannienne *est* l'énergie et l'impulsion physiques. La géométrie de l'espace se révèle donc comme le lieu constitutif de ces invariants que nous appelons objets et lois physiques. Et la physique ne trouve pas seulement son sens dans l'espace mathématique, mais ce dernier prescrit l'objectité (les objets) *et* l'objectivité (la loi) physiques, comme invariants dans ces espaces.

Cette corrélation, déjà partiellement présente dans la physique galiléenne (et dans sa notion de relativité spatiale), est centrale depuis Einstein. Il faut toutefois rappeler l'incroyable « *insight* » de Bernhard Riemann, qui, au sujet d'une possible corrélation entre énergie-force (gravitation, forces de « cohésion ») et propriétés de l'espace, écrit : « Le fondement des relations métriques doit être trouvé ailleurs, *dans les forces cohésives qui agissent sur lui [l'espace]* [6]. »

Dans ces espaces métriques, structurés par la cohésion des objets et structurant leurs interactions (la stabilité des lois : la conservation de l'énergie, des moments…), les symétries et les géodésiques structurent la physique. Le théorème de Noether décrit, en termes de symétries spatio-temporelles, ces invariants physiques (la conservation de l'énergie, par exemple, est un invariant lié à la symétrie de translation temporelle), tout comme les géodésiques nous fournissent les trajectoires qui sont recevables, en tant qu'elles sont stables (minimales) [7].

Dans ces quelques lignes, nous avons, par rapidité, « unifié » l'approche mathématique de l'espace en relativité restreinte (électromagnétisme, qui relie électricité et magnétisme) et en relativité générale (gravitation, cosmologie). De fait, cette unité existe et la relativité restreinte, par exemple, peut être considérée comme un cas particulier de la relativité générale. Encore une fois, la géométrie « encadre », donne un sens, constitue les nouveaux invariants : elle les unifie dans un même espace, en tant que nouvelles propriétés stables par rapport à des nouveaux groupes de transformations (spatio-temporelles).

Mais il faut faire un autre pas vers l'abstraction mathématique. La générativité mathématique s'empare d'un paradigme constitutif du sens, l'étend en empruntant, si nécessaire, l'idée d'une pratique conceptuelle apparemment sans rapport avec lui et synthétise ainsi un nouvel univers conceptuel et physique. Comme, par exemple, l'idée d'appliquer en physique la « compacification » de la ligne des nombres réels : on prend la droite réelle, infinie, et on la transforme en un cercle, un compact, en ajoutant un point. Par ce biais, on passe de 4 dimensions (3 plus le temps) à 5, mais cette cinquième dimension est un « dérivé » mathématique de l'action lagrangienne attachée à des objets situés dans des champs, à la fois, électromagnétiques (classiques, c'est-à-dire non-quantiques) et gravitationnels (unifications des équations de Maxwell et d'Einstein) : les propriétés physiques imposent que cette nouvelle dimension de l'espace soit « compacifiée » (repliée sur elle-même en un cercle ; théorie de Kaluza-Kein) [8]. Les principes géodésiques et les symétries sont conservés : les observables ne changent pas, car la cinquième dimension structure l'espace en dehors de l'observabilité, elle est une pure conséquence de la générativité mathématique des formalismes.

Toutefois, cette nouvelle dimension contribue à l'explication, car elle permet d'unifier des théories qui étaient très distinctes et elle préserve exactement les invariants (énergie, moments…) au cœur des deux approches. La géométrie nous fournit le nouvel espace de l'intelligibilité physique et, par cette géométrisation de la physique, les

6. Habilitation, Göttingen, 1854 ! Souligné par nous.

7. BAILLY et MOSSERI, 1999 ; BAILLY, 2003.

8. Voir, p. ex., LICHNEROWICZ, 1955.

mathématiques jouent un rôle d'une extrême puissance explicative : elles proposent en fait les modèles d'espace et de temps qui encadrent les phénomènes physiques et leur donnent un sens [9]. Ce faisant, elles jouent au plus haut degré leur rôle « normatif » par rapport à l'analyse physique.

Ces mathématiques ne sont pas « déjà données », mais elles se constituent dans l'interface entre nous et le monde, elles l'organisent. En revenant aux géométries non-euclidiennes – dont celle de Riemann a permis la (ré-)organisation relativiste de la physique – observons que Gauss, Lobatchevski et Riemann visent, grâce à la géométrie, à faire une « nouvelle physique », et ils le disent explicitement. Ils ne se limitent pas à nier par un simple jeu formel le cinquième axiome d'Euclide, comme la caricature formaliste veut nous le faire croire. Riemann, en particulier, travaille dans le but explicite d'unifier électromagnétisme, chaleur et gravitation par « voie géométrique [10] ». Il pense – comme les autres – que l'éther est coextensif à, en fait constituant de, l'espace, en tant que « médium » parfaitement élastique et sans masse. C'est pour cette raison qu'on peut imaginer les corps physiques dans l'espace comme plongés dans un « fluide » élastique qui se déforme avec les « forces cohésives » ou à cause de leur propre présence. L'éther, une notion qui fut ensuite considérée comme erronée, peut avoir aidé à concevoir une idée de l'espace profondément originale et moderne : un espace qui possède une courbure non-nulle (et même variable), qui se façonne autour et avec les objets physiques (et leur « énergie-impulsion »).

La relativité nous donne en fait un des plus beaux exemples de « constitution phénoménale » : en partant de quelques régularités du monde, le plus stable et le plus cohérent de nos langages – les mathématiques –, elle reconstruit, quant au monde, une structure des objets, de l'espace et du temps qui se situe dans un ajustement réciproque permanent, le monde continuant à « faire friction », à imposer de nouvelles régularités, à écarter certaines modèles.

Physique quantique

Les théories de type relativiste nous proposent un espace-temps comme dimension externe aux objets physiques, visant à comprendre ces derniers comme des singularités dans un univers où leur comportement serait régi par des géodésiques. Et, dans ce cas, leur phénoménalité ne serait rien d'autre que la stabilité mathématique des invariants attachés à ces géodésiques. La mécanique quantique ajoute au repérage externe (dans un espace de Minkowski), dont les invariants principaux sont conservés, un *référentiel interne* (où s'expriment les nombres quantiques et leurs propres invariants). Ce référentiel interne est essentiel, car l'atomicité de l'approche ne fait pas tant référence à des « objets tout petits dans l'espace », qu'à une atomicité des *processus*, dont la constitution est l'évolution des champs. Plus précisément, la constante de Planck n'induit pas que l'univers est fait de « petites boules minimales », car sa dimension est une action (une énergie multipliée par un temps). Ce sont donc les variations énergétiques dans le temps qui sont « discrétisées », et non pas la structure de la matière, ni de l'espace-temps : l'espace et le temps restent continus, comme en relativité [11], et, à certains égards, il en va de même des champs quantiques, même s'ils se comportent de façon différente des champs classiques.

9. KAKU, 1994.

10. RIEMANN, 1854 ; BOI, 1995 ; TAZZIOLI, 2000.

11. En termes mathématiques, l'espace-temps externe constitue la base des « fibrés » (espaces dérivés par une généralisation de la notion d'inverse des « projections » cartésiennes), qui organisent l'espace-temps interne. Or, l'espace-temps externe de la physique quantique, considéré comme base du

Toutefois, l'unification mathématique des champs quantiques et du champ gravitationnel est loin d'être accomplie, bien que les espaces globaux, ou externes, puissent se mêler profondément aux espaces locaux, ou internes : par exemple, les particules, en tant que champs, nous donnent des effets de non-localité époustouflants du point de vue de l'intuition. Comme saint Antoine, les quantons [12] peuvent se trouver simultanément dans des endroits bien éloignés de l'espace externe. Mais il ne s'agit pas de magie : les champs de matière ne sont pas « locaux », ils ne se réduisent pas à des singularités de l'espace-temps, comme en relativité générale. Et la matière elle-même est un champ (de fermions). Sur ce sujet, le débat, centré sur les rapports entre espaces internes et externes, a été et reste très vivant, depuis le paradoxe Einstein-Podolski-Rosen des années 1930, qui a apparemment opposé la relativité générale à la physique des quanta [13]. En bref, la mécanique quantique, qui, dans une première approche, semblait n'apporter aucun élément nouveau et essentiel dans la détermination théorique de l'espace externe, introduit néanmoins une problématique très nouvelle (et très contre-intuitive) en matière de *localité*. D'une part, les lois physiques demeurent locales au sens où les évolutions entre les mesures sont gouvernées par des équations aux dérivées partielles ; d'autre part, les propriétés des amplitudes de probabilité associées aux vecteurs d'état (nombres complexes, principe de superposition) engendrent une non-séparabilité quantique, liée à la mesure et corroborée par l'expérience (inégalités de Bell, expériences d'Alain Aspect), affectant des quantons ayant interagi dans le passé [14].

Malgré l'absence d'unification théorique, il y a des invariants mathématiques qui se transfèrent du local au global, et *vice versa* : par exemple, le changement global d'univers de repérage ne change pas la charge électrique ; certaines mesures sont invariantes localement et globalement (théories unifiées de jauge) et les champs eux-mêmes peuvent être associés à des invariances de jauge locale. Mais ce sont les théories de la « supersymétrie » qui tendent le mieux à raccorder les espaces internes et externes : dans ces théories, aux quatre dimensions relativistes on en ajoute d'autres, sur le mode de la compacification de Kaluza-Kein. Toujours dans le but de préserver autant que possible les symétries spatio-temporelles (et leurs significations énergétiques), les théories récentes de la cosmologie quantique, tentatives très audacieuses d'unifier les théories mentionnées ici au niveau du big-bang, représentent l'espace comme une variété à dix dimensions : l'univers se réorganise, dans ce cadre, comme un espace mathématique où quatre dimensions se dilateraient, correspondant à l'expansion de notre univers observable, tandis que la compacification des autres dimensions renverrait à la structuration mathématique de propriétés de matière (champs fermioniques) et d'interaction (champs bosoniques).

Il faut mentionner aussi le rôle possible pour la géométrie joué par la non-commutativité des mesures quantiques (position/moment-moment/position), une différence fondamentale par rapport aux approches classiques et relativistes. Or, à partir

---

fibré de référence, présente en général une topologie continue, conforme aux représentations classiques de la relativité restreinte. Les processus discrets – tels la quantification de l'énergie ou les états de spins par exemple – concernent les dimensions supplémentaires.

12. Nous utilisons le terme de quanton pour désigner les objets quantiques, dont on sait qu'ils sont susceptibles de se manifester sous des aspects « particulaires » ou « ondulatoires » selon la nature des expériences mises en œuvre pour élucider leurs propriétés (pour le dire de façon imagée, selon les questions qu'on leur pose).

13. Au sujet de l'hypothèse d'«incomplétude » de la physique quantique et une analyse comparative entre les différentes notions de « complétude » en logique et en physique, voir BAILLY et LONGO, 2003.

14. Ce sont notamment des traits de cette nature qui ont nourri des approches plus holistiques, comme celui de l'univers impliqué à la Bohm, voir BOHM, 1987.

en particulier des travaux d'Alain Connes, une unification très prometteuse et par voie géométrique est proposée : l'idée de base consiste à reconstruire la géométrie (topologie, géométrie différentielle…) en introduisant l'algèbre non-commutative des mesures (algèbre d'Heisenberg), au lieu des algèbres commutatives usuelles [15]. Encore une fois, la (re-)construction géométrique de l'espace, a pour effet de rendre intelligibles les phénomènes physiques.

Systèmes de type critique (dynamiques, thermodynamiques…)

D'une façon générale, les théories physiques de « type critique » traitent des phénomènes critiques, c'est-à-dire de phénomènes dont le comportement dépend de paramètres de contrôle (comme la température, par exemple, ou des champs appliqués) et qui selon la valeur de ces paramètres présentent des discontinuités ou des divergences de certaines grandeurs physiques (comme dans la solidification d'un liquide) ou des transitions progressives entre ordre et désordre (transition para-/ferro-magnétique), ou encore des changements qualitatifs de régimes dynamiques (bifurcations, passages de cycles au chaos, etc.). Pour le dire de façon ramassée, il s'agit donc des théories générales des transitions de phases. Pour aborder la question du statut de l'espace et du temps dans ces théories, il faut distinguer entre deux classes de théories : premièrement celles, dont les systèmes qu'elles traitent, comportent un nombre très élevé de degrés de liberté et dont l'espace de phase est donc très grand (thermodynamique, physique statistique) ; elles engendrent les premières problématiques relatives à la réversibilité et à l'irréversibilité temporelles ; secondement, celles qui, traitant de systèmes dynamiques non-linéaires, peuvent ne présenter que très peu de degrés de liberté et dont les propriétés (bifurcations, complexification, attracteurs étranges, etc.) sont précisément associées à ces non-linéarités (que ce soit dans le cadre continu d'équations différentielles ou dans celui de procédures itératives discrètes) ; elles aussi posent, mais dans des termes un peu différents, les questions de la réversibilité et de l'irréversibilité. Dans tous les cas, et contrairement aux types de théories antérieures où l'on se situe principalement dans un univers relativement régulier, mathématiquement parlant, l'attention, ici, se concentre donc plus sur les singularités des systèmes physiques rencontrés que sur leurs régularités. D'un point de vue qualitatif et conceptuel, et en rapport bien évidemment avec les processus de complexification qui en découlent, on y trouve aussi des rapports étroits avec la théorie des catastrophes [16] et la géométrie associée.

On remarquera que, dans tous les cas traités par ces théories de type critique, on fait apparemment retour à des conceptions beaucoup plus classiques de l'espace et du temps que celles que nous avons rencontrées dans les types antérieurs de théories physiques. En particulier, l'introduction d'espaces à grand nombre de dimensions (comme les espaces de phase de la mécanique statistique) n'a, dans un premier temps, pas le même caractère déterminant et constitutif que les espaces-temps considérés précédemment. Néanmoins, ces théories font surgir de nouvelles approches pour la connaissance physique, relatives cette fois à des aspects plus particulièrement morphologiques et globalisants d'une part (pour l'espace) et évolutifs et directionnels (pour le temps) de l'autre.

De nombreux autres traits caractérisent ces systèmes. Il faut, tout particulièrement, en souligner un : le rôle souvent globalisant des structures qui y sont

15. CONNES, 1990.
16. THOM, 1980.

impliquées. Si on prend le « plus simple » des systèmes dynamiques, trois corps dans leurs propres champs gravitationnels, c'est son « unité » qui empêche l'analyse laplacienne de ce système : on ne peut pas connaître (prévoir) la position, la vitesse, etc., de chaque corps sans analyser, en même temps, les mêmes paramètres pour tous les autres. Ils sont corrélés par les champs gravitationnels mutuels de sorte que le « tout », sorte de figure qui évolue dans le temps, détermine le comportement de ses éléments. La stratification conceptuelle ou mathématique (analyser un corps, puis deux corps… ou l'approximation par séries de Fourier) n'est pas possible : c'est bien cela qui empêche la complète prédictibilité, au sens de Laplace. Car, pour Laplace, comme nous l'avons dit, une fois donné un certain niveau d'approximation des conditions initiales, on aurait dû pouvoir prévoir le futur du système, à tout instant, avec une approximation du même ordre de grandeur. Au contraire, des systèmes dynamiques suffisamment complexes (trois corps plutôt que deux…) présentent des divergences, voire des discontinuités par rapport aux paramètres de contrôle. La non-linéarité de la représentation mathématique exprime l'unité intrinsèque de ces systèmes.

Bien évidemment, il s'agit de systèmes à analyser dans l'espace et le temps. En fait, les systèmes dynamiques se donnent souvent leur propre temps et d'une façon « péremptoire » : en tant que manifestant des transitions de phase, ils imposent, par leurs bifurcations structurelles (en particulier, de formes dans l'espace), ainsi que par le passage de cycles au chaos, une évolution et une directionalité du temps, ce qui n'est pas toujours le cas pour les autres théories physiques. Le temps est scandé par les transitions de phase et, d'une façon irréversible, par les bifurcations et les passages au chaos. Or, cette essentielle irréversibilité du temps se différencie nettement de la vision du temps « épiphénomène réversible », typique de la relativité, et elle semble bien plus correspondre au temps du vivant (si fortement marqué par les phénomènes thermodynamiques, entre autres). Il est évident que l'irréversibilité du temps dans les théories de type critique, des systèmes dynamiques à la thermodynamique, se couple à l'imprédictibilité ou aux comportements chaotiques de ces systèmes.

Dans cette partie, nous avons très brièvement examiné certains aspects de la « géométrisation » de la physique moderne. Les mathématiques de l'espace et du temps ont constitué un outil de compréhension, en tant qu'« organisateur » des phénomènes, ainsi que d'unification de niveaux et d'aspects phénoménaux différents. L'épistémologie et les mathématiques s'y trouvent profondément mêlées, dans un regard qui restitue toute sa centralité au problème de l'espace et du temps.

En particulier, relativement au problème de l'unification des théories physiques, on a très rapidement mentionné l'unification (non-quantique) entre électromagnétisme (régi par le groupe de Lorentz-Poincaré) et la gravitation (relativité générale, régie par le groupe des difféomorphismes). Dans ce cas, l'ajout d'une cinquième dimension permet de décrire les trajectoires des particules massiques et chargées – accompagnées des champs correspondants – comme géodésiques. Il s'agit donc bien là des conditions spatio-temporelles d'une unification théorique de phénomènes apparemment très distincts.

De même, nous avons mentionné le fait que des symétries nouvelles (des « supersymétries ») spatio-temporelles, en un sens large, associées à des superespaces permettent d'articuler les espaces externes et internes des phénomènes quantiques, voire de l'ensemble des théories actuellement connues.

Du point de vue épistémologique, la visée unificatrice de ces théories physiques conduit ainsi à construire des espaces inhabituels, dont la pertinence est ensuite corroborée par des vérifications expérimentales. Cela inverse la démarche qui, depuis les évidences expérimentales de l'invariance de la vitesse de la lumière ou de la

structure du champ magnétique (équations de Maxwell), avait imposé le recours aux espace-temps relativistes. Puis, tout récemment, se produit une sorte de retour de balancier, ou de nouvelle intégration des deux démarches : la géométrie non-commutative est imposée par la mesure quantique et nous propose une géométrie peut-être encore plus éloignée de celle du monde sensible.

En fait, la géométrie organise notre rapport à l'espace. Elle en est une organisation mathématique, qui unifie une variété d'expériences pratiques et théoriques. Si la mesure (l'accès à l'espace) se base sur des outils, des instruments, bien différents de nos sensations, il s'ensuit une reconstruction de nos espaces nécessairement différente de la géométrie que ces dernières nous suggèrent. La « courbure » des trajectoires lumineuses est un résultat de la mesure en astrophysique, elle n'appartient pas à nos sensations. La géométrie de l'univers se construit alors sur des géodésiques apparemment inhabituelles pour notre expérience sensible. La non-localité des phénomènes quantiques découle de mesures microphysiques, qui n'ont rien à voir avec notre regard physiologique. La géométrie elle-même se construit possiblement sur des structures mathématiques où les points classiques ne sont plus la notion de base [17].

D'ailleurs, la généralisation euclidienne – par des homothéties – des expériences sensibles à toute dimension et grandeur physiques n'était pas moins arbitraire : les lignes droites, les points sans dimensions… n'existent pas non plus. On les remplace donc par d'autres abstractions qui « collent » mieux aux évidences expérimentales et à nos nouveaux outils de mesure.

Il faut enfin ajouter, à propos des théories de type critique, que le traitement qu'elles proposent de l'espace et du temps (transitions de phase, passage des cycles au chaos…) ajoute des éléments importants aux autres théories, surtout en vue de certaines théories cosmologiques récentes (modèles de transition de phase associés au big-bang, singularités et cordes cosmiques, par exemple) et du traitement des relations entre le local et le global. De ce fait, elles constituent un pont privilégié, et ce depuis longtemps, avec les sciences du vivant et, sans craindre de franchir d'une foulée un grand nombre de niveaux d'organisation intermédiaires, avec leurs « épiphénomènes » critiques : les phénomènes cognitifs.

Francis BAILLY et Giuseppe LONGO

17. Cf. la théorie des cordes et supercordes.

II.- SUR L'ESPACE ET LE TEMPS BIOLOGIQUES
SUR LES CONCEPTS GNOSEOLOGIQUES D'ESPACE ET DE TEMPS
DE LA PHYSIQUE A LA BIOLOGIE. LE CHAMP DU VIVANT

Giuseppe LONGO

Une toute première étape dans la discussion des phénomènes de la vie et de leur rapport aux mathématiques de l'espace et du temps peut se fonder sur l'analyse de la temporalité particulière qui est celle du vivant. Nous avons déjà parlé de l'irréversibilité du temps au cœur des systèmes de type critique ou dynamiques. Or, il ne fait pas de doute que l'irréversibilité du temps est tout à fait inhérente au vivant. À tout instant, la phylogenèse et l'ontogenèse sont marquées par des « bifurcations » et par une émergence de phénomènes et de structures non prédictibles qui ressemblent aux phénomènes observables dans les systèmes de type critique, ou les incluent, mais vont bien plus loin qu'eux. Ou, plutôt, tout vivant inclut un grand nombre de systèmes de type critique : dynamiques, thermodynamiques, etc. Cela ne contribue pas seulement à l'irréversibilité du temps de ces systèmes, mais aussi à cette unité qui s'annonce au moins dans certains systèmes dynamiques et que nous évoquions plus haut : les trois corps de Poincaré, dans leur unité très simple, forment une toute primitive « *Gestalt* » associée à une pure interaction gravitationnelle (deux corps ont un tout autre « comportement », stable et prédictible, que trois : ainsi semble se mettre en place, en passant de deux à trois corps, la plus élémentaire des émergences, cette unité des interrelations non stratifiables).

Gestalt, unité systémique, irréversibilité du temps… Mais je voudrais aborder ce monde du vivant, qui nous concerne de près même sans être biologistes, par une remarque de Francis Bailly. Elle nous permettra de mieux « classifier » trois formes (mathématiques) du temps, dont la dernière pourra nous rapprocher de l'analyse du vivant. Cette remarque fait référence à une distinction, proposée dans le cadre de mon analyse des fondements des mathématiques, entre « principes de construction », en particulier géométriques, et « principes de preuve » logiques et formels [18] : les mathématiques se construisent grâce à ces deux types de principes et se fondent sur les deux. La monomanie philosophique du logicisme et du formalisme a exclu les premiers, dans un « tournant linguistique » qui a marqué le siècle, nous a donné des machines logico-formelles extraordinaires, les ordinateurs digitaux, et … a poussé à l'extrême le mythe de la mécanisation complète des mathématiques, voire de toute forme de connaissance (ou de « l'esprit », comme disent certains philosophes).

Selon moi, les phénomènes d'incomplétude mathématique des systèmes logico-formels sont dus à une « brèche » (un « *gap* ») entre ces deux types de « principes » : les constructions conceptuelles basées sur les régularités spatio-temporelles ont une autonomie, une indépendance essentielle par rapport aux descriptions formelles (dans le sens précis de la logique mathématique, « à la Hilbert » pour être précis – malheureusement, les physiciens appellent souvent « formalisation » toute « mathématisation » ; pour nous, logiciens, ce sont deux choses bien différentes : il y a l'incomplétude gödélienne – et bien plus aujourd'hui – entre les deux !). Cette distinction – principes de construction géométriques et principes de preuve algébrico-

18. LONGO, 1999 et 2002.

formels – est, pour ma part, un des éléments de cette approche qui souligne également le rôle constitutif de l'espace et du temps (leur « géométrie ») dans l'analyse de la cognition.

Or, dans ce message électronique récent, Bailly écrivait :

> « Les termes d'espace et de temps, de spatio-temporel, semblent bien n'avoir pas tout à fait la même signification, ni non plus jouer le même rôle, selon les deux approches principales ("géométrique" et "algébrico-formelles") que tu as dégagées.
> « Dans l'approche "géométrique" l'espace est le corrélât de la géométrie elle-même, il intervient dès le niveau perceptif. Le temps est celui de la genèse des structures, de l'histoire des processus de constitution.
> « Dans l'approche "algébrico-formelle", par contraste, la spatialité renvoie à l'inscription linguistique abstraite, à celle de l'écriture symbolique, et la temporalité semble bien être principalement celle du fonctionnement séquentiel, celui de l'algorithme de calcul proprement dit. »

Voici donc ce temps de l'algèbre et des calculs formels qui se réalise dans les algorithmes, voire dans les ordinateurs séquentiels, qui ont été le fruit le plus important de cette vision formaliste des fondements des mathématiques. Le mariage, dans les années 1930, entre d'une part le formalisme hilbertien et les problèmes qu'il posait (complétude et décidabilité des systèmes formels) et, de l'autre, le mécanicisme positiviste, est à l'origine de cette projection de la rationalité humaine sur des machines formidables, infatigables exécutrices d'algorithmes formels.

Mais cet oubli des mathématiques de l'espace, qui en outre produisent leur propre approche du temps (le temps de la genèse des structures), a gravement diminué l'importance de l'analyse de nos formes de connaissance, une fois que l'approche algébrico-formelle – et ses machines – a été « plaquée » sur la cognition humaine (ou, presque pire, animale : les hommes, en effet, utilisent *aussi* logique et calcul formels, ce qui, par leur biais permet donc de saisir au moins *une partie* de l'entendement humain, cela est bien moins évident pour les autres êtres vivants…). Qui plus est, ce qui ne manque pas d'être un retour historique intéressant, on ne peut même plus aujourd'hui étudier – voire construire – des ordinateurs, sans un regard nouveau sur l'espace et le temps, sur leur structuration géométrique, car les systèmes distribués, concurrents, asynchrones posent d'emblée des problèmes spatio-temporels, tout à fait étrangers aux « machines de Turing » (et au lambda-calcul, aux fonctions récursives…), qui ont dominé la théorie de la calculabilité (et de la programmation), des années 1930 jusqu'aux années 1980 (et dont les très intéressantes mathématiques ont constitué mon activité scientifique principale).

Voici donc posé le problème du *temps de la genèse des structures, de l'histoire des processus de constitution.* Ce temps qui implique l'espace, et qui pose donc problème à l'informatique d'aujourd'hui, comme à la physique. Est-ce là aussi l'un des aspects du nouveau rôle de la géométrie dans l'analyse de la cognition ? Est-ce le temps distribué des processus constitutifs ?

Que dire, en fait, du vivant, qui n'existe que dans l'espace et le temps ? des écosystèmes qui s'organisent dynamiquement ? Leur genèse est tout d'abord une genèse de structures, des protéines à la morphogenèse de l'éléphant… Leur temps est marqué par l'histoire du processus de constitution.

Irréversibilité dynamique, *Gestalt*, unité systémique… : que deviennent-elles ces formes de la temporalité chez le vivant, ce vivant qui *agit* dans l'espace ?

Il y a en fait, dans les remarques ci-dessus, l'esquisse de deux façons de constituer le temps phénoménal. Un temps « phénoménal », car il est *construit* entre nous et le monde, élément constitutif de nos formes de connaissance d'un réel qui est là, mais qu'il faut organiser pour qu'il soit intelligible. Le temps dont nous parlions n'est pas seulement le temps « vécu », mais aussi le temps raisonné, le temps des sciences physiques, de leur organisation, si changeante au cours du parcours historique de notre entendement du monde. Ce temps, à l'objectivité remarquable (mais pas absolue) de la coconstrution/organisation du « je » cognitif et du monde, est enraciné dans des régularités que nous voyons dans le monde, qui sont là, mais dont l'explicitation et l'objectivité scientifique sont constituées dans l'intersubjectivité et dans l'histoire. Il nous faut revenir plus précisément sur ces deux formes du temps phénoménal afin d'en proposer une troisième.

La toute première forme, algébrico-formelle, est celle des horloges mécaniques, ces mêmes horloges que l'âge des Lumières nous proposait comme modèle possible pour l'entendement ou qui, plus tard, sera le temps de la machine de Turing. Celle-ci scande le temps par ses mouvements « à droite, à gauche », tic tac, horloge absolue. Rien ne se passe entre un mouvement à droite, un autre à gauche, rien n'est dit de leur « durée » : ils sont la « mesure du temps en soi ». C'est le temps du mythe, propre à la poésie grecque. Bernard Teissier suggère une analogie : pendant la guerre de Troie, le temps est scandé par les sorties d'Achille de sa tente ; Achille sort de sa tente, quelque chose se passe (la guerre), il rentre dans sa tente, tout s'arrête : le temps s'arrête. Achille sort encore de sa tente…, voilà la scansion du temps : il n'y a pas d'autre mesure, il est l'absolu du temps mythique. Troie et la guerre sont hors du monde, ils sont dans le mythe ; leur temps contribue à un extraordinaire effet poétique. Turing n'est pas allé plus loin, car le temps des formalismes des années 1930 est le temps algébrico-formel, cet absolu de la machine sans espace, le « calcul en soi », un pas après l'autre, dans le vide. En fait, ce temps est « sécrété » par l'horloge.

Mais la pensée grecque, dans sa profondeur, nous propose aussi une autre forme du temps : Kronos, fils d'Ouranos. Kronos est le temps « vrai », physique, dérivé du chaos ; c'est la « pagaille » du monde réel : il dévore ses enfants. Voici donc une deuxième forme possible du temps physique, celui qui s'insère bien dans l'analyse des systèmes de type critique. Il est un temps dans l'espace. Au cœur de son déroulement, il y a la géométrie des systèmes dynamiques : le temps est scandé par leurs bifurcations, par les passages vers le chaos et par toute structuration spatiale irréversible. Il est le temps de « la genèse des structures », de l'histoire des processus de constitutions, car une bifurcation, une catastrophe, peut dépendre de toute son histoire et pas seulement de la situation à un instant donné.

Analyser ce temps comme un continu linéaire, la droite des nombres réels, est très commode, on ne peut faire mieux dans maints contextes, mais il faut rappeler ici la grande insatisfaction d'Hermann Weyl dans *Das Kontinuum* (1918) : le continu des nombres réels est une mathématisation très insatisfaisante du temps. Ses « points » ne peuvent pas être isolés comme les points de la droite dans l'espace, car le présent coexiste avec le passé et le futur, il n'a pas de sens sans eux. Quand on essaye de le saisir, d'isoler le présent en un point, il n'est plus là. Weyl, un des plus grands mathématiciens de la relativité, comprend les limites de la vision du temps comme « épiphénomène », pourvu de la même structure que le continu de l'espace, qui est au cœur de l'approche d'Einstein. De plus, le temps est irréversible et sa réversibilité, due

aux équations de la physique relativiste, n'a rien à voir avec le temps phénoménal, ce mélange de temps vécu et de temps raisonné.

Au moins pour ce qui concerne l'irréversibilité, le temps des systèmes de type critique ou dynamiques paraît donc plus adéquat que celui de la relativité (et peut-être que celui de la physique quantique, où, de fait, il joue un rôle moins important). Il est clair, que ce temps n'a de sens que dans l'espace (comme celui de la relativité) : premièrement, les bifurcations, le chaos se présentent dans l'espace, deuxièmement, il n'existe pas *le temps* d'un seul système dynamique isolé, avec une « linéarité » de ses bifurcations, car ce système n'existe pas. La genèse des structures s'opère en parallèle et dans l'interaction d'une pluralité de structures et de systèmes, dans l'espace. Tout au plus peut-il y avoir un temps moyen, statistique, comme au sens relativiste de Weyl [19].

Toutefois, il y a des exceptions apparentes à cette immersion de notre deuxième forme du temps dans l'espace : on pourrait dire que les langues vivantes, sans référence à l'espace, ont aussi histoire et temporalité… Mais, les langues *sont* dans l'intersubjectivité : la pluralité des sujets actifs, dans l'espace, les rend possibles. Encore une fois, on a, même dans les langues historiques, un phénomène d'interaction spatiale entre systèmes : les êtres qui se parlent et qui évoluent avec leur propre dynamique. Cette dynamique n'est jamais isolée, elle n'aurait pas de sens dans l'isolement, où la langue ne serait pas : elle est toujours entre les hommes, dans l'écosystème d'un groupe d'hommes et souvent en friction avec d'autres langues.

Pour plus de précision, il faut ajouter qu'une des formes du temps physique la plus expressive est, à mon avis, celui de la genèse des structures dans l'espace ; son enjeu principal est l'interaction entre systèmes dynamiques et distribués ; en fait, leur *synchronisation*. C'est dans ce cadre que l'on tombe sur l'autre enjeu, qui nous est posé, entre autres, par la physique de la relativité. Il peut y avoir « asynchronie », mais, dès qu'il y a interaction, il peut y avoir ou pas de synchronisation, mais, en tout cas, le problème de la synchronie est au cœur de l'interaction. En informatique, ce problème fait partie intégrante des analyses de la « concurrence » entre processeurs distribués dans l'espace ; en physique relativiste, il est celui de l'échange de messages entre systèmes soumis à différentes accélérations. Aujourd'hui, dans les réseaux d'ordinateurs, les deux problèmes se mêlent (que Achille, la machine de Turing et leur temps *requiescant in pace*).

Après le temps du mythe, parodie poétique du temps, comme les Grecs le savaient très bien, il y a donc le temps physique le plus structuré, celui de la pluralité des systèmes dynamiques, distribués et concurrents (ou qui interagissent), avec leurs temps propres, locaux, à synchroniser si nécessaire. Il n'y a pas de temps, sans (le problème de) l'asynchronie/synchronie : c'est-à-dire, il n'y a pas de temps sans asynchronie, car elle est inhérente à toute interaction « réelle » entre systèmes, dans un univers qui n'est pas purement « local » ; le problème de la synchronie se pose toujours, même quand elle est cherchée, forcée et, souvent, obtenue. Selon moi, c'est le meilleur temps que l'on puisse proposer aujourd'hui pour le monde physique : un temps enrichi par la phénoménologie relativiste et par celle des systèmes dynamiques (en particulier quant à l'irréversibilité), un temps essentiellement relationnel. Non seulement le temps newtonien absolu n'a pas de sens, mais il n'est pas un « temps » : l'horloge absolue ou la machine de Turing, isolés dans un univers vide, ne constituent pas un temps. Ils seraient comme le mètre-étalon de Sèvres isolé dans un univers vide : il n'y a pas de distance dans cet univers, il n'y a que le mètre.

19. DORATO, 1995.

Il y a toutefois une autre forme du temps à discuter, la troisième, un temps possible pour la biologie. Encore une fois, ce temps dont je parle est un temps phénoménal ; il superpose « vécu » et « raisonné » ; il est constitué, dans notre acte de l'expérience du monde, par nos propositions actives qui essayent de le rendre intelligible. Il est dans le vécu, entre nous et le monde, il en résulte, ce qui est essentiel à sa compréhension, qu'il résiste à nos *tentatives* de le comprendre. Il n'est pas « déjà là », toutefois il n'est pas arbitraire non plus, car les régularités que nous utilisons comme référence pour proposer un discours sur le temps sont bien « là », mais c'est nous qui « choisissons de les voir ».

En biologie, en effet, les choses se compliquent encore par rapport à la physique, et l'on est obligé de s'éloigner encore plus de l'idée que notre cerveau, tout le vivant en fait, est une machine logique ou programmable, de Turing pour ainsi dire, un peu compliquée et mal ficelée (nous sommes si lents à faire des inférences formelles et des multiplications à quatre chiffres …).

Tout d'abord, le vivant s'impose dans son unité et ses temps propres, par l'autonomie des horloges biologiques que Bailly présentera en détail dans la suite. Une autonomie bien plus forte que celle de toute horloge dans le monde physique, car le vivant « nous agresse » par son unité individuelle, il impose activement sa présence, son temps.

Dans le temps physique, la deuxième forme mentionnée plus haut (dynamique et relationnelle), la situation présente et future d'un système, du réseau interactif des systèmes qui constitue le monde, dépend « seulement » de la situation passée (l'histoire) du réseau lui-même. Mais la situation se fait encore plus « interactive » chez le vivant.

D'une part, comme on le verra, il y a des horloges « autonomes » propres à l'individu vivant : le temps de son métabolisme, en fait, avec ses temps rythmés (battements cardiaques, respiration…) ; des « nombres absolus », par delà les espèces, pour un phylum très vaste (les mammifères, par exemple). Bien évidemment, ces horloges sont loin d'être isolées : elles règlent des fonctions en permanent échange avec l'extérieur, leur raison d'être est « l'interaction réglée », si typique du vivant.

D'autre part, il y a le temps de l'action dans l'espace de ce même vivant, une action marquée par ses buts, tout au moins celui de la survie. Avant d'y venir, résumons les éléments qui s'ajoutent au temps physique – car le temps physique reste là, bien évidemment, sous-jacent à tout être vivant dans le temps et l'espace (physiques). Nous sommes en train de considérer au moins deux autres composantes du temps :

– le temps local de chaque individu vivant, ses horloges internes, qui se rétablissent même après toute interaction tolérable qui ait pu les affecter ; des horloges aussi qui existent, justement, pour permettre et régler l'interaction ;

– un temps global où les bifurcations possibles se déterminent aussi en fonction des « choix », pour survivre, que le vivant fait à tout instant dans son milieu.

Cette seconde composante du temps biologique dépend donc des « attentes » du futur possible. L'intentionnalité marque l'évolution du temps du vivant, une intentionnalité selon moi aussi préconsciente, comme celle de l'amibe qui va dans une direction pour préserver ou améliorer son métabolisme : ce « geste » dans l'espace et le temps est une des formes les plus élémentaires de « choix » dans la constitution de « bifurcations », de parcours possibles, dans l'espace et le temps. Chez les organismes complexes, ce choix se fait sur la base d'une attente explicite (voire consciente) du

futur : il dépend donc d'un futur possible ou des possibilités considérées pour le futur [20].

Il doit être clair que l'intentionnalité fait référence ici tout d'abord au « finalisme contingent » propre à la vie, elle est donc une « intentionnalité contingente ». Il n'y a pas d'individu vivant, ni d'espèce, sans une finalité implicite, celle de survivre ; mais cette finalité n'est pas métaphysique, elle est immanente et *contingente*, elle pourrait ne pas être – si elle n'était pas, ni l'individu ni l'espèce en question ne survivraient longtemps. Elle est essentielle à la préservation de l'individu – à partir du métabolisme de la cellule – et de l'espèce et s'organise d'une façon très complexe dans tout individu multicellulaire, où elle impose des formes, des tentatives, de « prédiction » du futur. L'intentionnalité, dans le sens très fort d'Husserl, est plutôt une « conscience de quelque chose », de « visée », elle se dirige consciemment vers un but ; elle est donc le résultat ultime, le point d'arrivée d'un parcours constitutif dans la phylogenèse et l'intersubjectivité humaine, qui commence par le « geste dirigé », mais préconscient, de survie [21].

Nous pouvons prendre comme exemple celui des primates (mais cela peut être valable pour nombre de mammifères au cortex visuel assez proche du nôtre). Cet exemple se situe à mi-chemin entre « l'action » de l'amibe et le geste intentionnel conscient de l'individu social (ou, même, de tout un groupe social). Quand nous faisons aller le regard d'un point à l'autre du champ visuel, par une saccade oculaire, le champ récepteur des neurones du cortex visuel pariétal se déplace brusquement, *avant la saccade*, dans la direction du mouvement du regard qui va être effectué [22]. Autrement dit, le cerveau, dans le but de suivre la trajectoire d'un objet ou de précéder le parcours d'un autre animal dont il a compris les « intentions », déplace le champ récepteur et anticipe les conséquences du mouvement. Ce n'est qu'un exemple, parmi tous ceux que nous pourrions donner du rôle de l'anticipation du futur propre au vivant, mais il est de grand intérêt, car elle est une forme d'intentionnalité préconsciente, animale, mais très proche de nos gestes conscients ; *a fortiori*, si la visée est consciente. En fait, ce phénomène prépare les gestes en changeant la *situation biochimique* (et donc physique) des neurones, dans l'attente du futur. Une nouvelle situation est imposée à la structure biologique et *physique,* une situation qui ne dépendra, en fin de compte, non seulement de la situation présente et passée, mais aussi du futur ou de son attente (la position attendue de l'objet dans le champ visuel). Il apparaît donc que le temps chez le vivant, en tant qu'épiphénomène de l'interaction entre systèmes en évolution, s'enrichit d'une synchronisation et d'une réorganisation de ces phénomènes qui lui sont propres, grâce aux nombreux niveaux de l'intentionnalité (préconscients et conscients).

Or, Bailly développera une analogie entre la localité de la courbure dans les espaces riemanniens de la relativité et la localité des rythmes internes au vivant. Cela paraît très expressif : la courbure constante, différente de 0, fournit une échelle spatiale locale, reliée à la métrique (locale), exactement comme les rythmes métaboliques ou cardiaques paraissent donner une mesure du temps, plus ou moins régulière, mais locale, propre à l'individu, qui la partage avec son espèce et son espèce avec des phylums plus larges. Bien évidemment, il faut ajouter à cela l'interactivité du vivant : contrairement à la localité « absolue » d'une métrique-courbure de l'espace, si ces horloges locales existent dans un écosystème, leur but (leur finalité contingente) n'est pas d'isoler l'organisme mais de contribuer à sa stabilité, autant que possible, dans un

20. Des remarques reprises par PAURI, 1999, vont dans le même sens.

21. PACHOUD, 1999, aussi propose d'élargir la notion husserlienne, tout en développant une approche phénoménologique.

22. BERTHOZ, 1997, p. 224.

milieu changeant. Elles le synchronisent avec « ses semblables » et l'aident à rétablir son équilibre, face à ce qui est « différent » : elles sont au cœur de ce jeu entre autonomie de l'organisme et hétéronomie qui est essentiel à la vie. Par contraste, la courbure constante locale fournit un invariant, un mètre localement absolu, parfait et indépendant de toute interaction : elle définit la métrique et les géodésiques locales, c'est-à-dire les courbes de longueurs minimales, indépendamment de ce qui se passe dans le reste du monde.

Si l'on résume, c'est le rôle du « finalisme contingent » du vivant dans son action et sa temporalité qui vient d'être mis en évidence. Ce finalisme, qui vise tout d'abord à garder ou à améliorer le métabolisme, se complexifie comme la vie et avec elle, influence, à mon avis, par une boucle de prévision-action, les bifurcations de l'action, qui contribuent à la constitution de l'irréversibilité du temps biologique. D'autre part, les horloges internes du vivant, par contraste avec « l'absolu local » de la courbure spatio-temporelle en physique, jouent aussi un rôle dans l'interaction : elles aident à l'établissement d'une horloge commune, elles permettent de se régler/synchroniser « sur les autres » dans l'écosystème.

LA DYNAMICITE « AUTOCONSTITUANTE » DU VIVANT

Bailly évoque souvent une autre image forte pour saisir la complexité du vivant. L'individu vivant, voire l'espèce, définit une zone de « criticité étendue » ; il faudrait y réfléchir plus longuement, car cela paraît un fait impossible en physique où les zones critiques sont éminemment singulières et instables. Dans cette zone, des invariants numériques scandent le temps de l'autonomie et réorganisent l'unité face à l'hétéronomie.

Quand on passe à l'espèce, dans son écosystème, le paradigme physique paraît à nouveau insuffisant. Encore une fois, les méthodes des systèmes dynamiques nous donnent des outils formidables pour une mathématique du vivant qui a beaucoup à nous apprendre, car elle suggère des questions et, parfois, donne des réponses. Toutefois, toute analyse mathématique d'un système évolutif, imprégnée de la force des méthodes développées en physique, voit l'évolution du système dans un champ figé de forces ou, tout au plus, dans un réseau de champs de forces *données*. C'est-à-dire, l'espace des phases ne change pas au cours du processus.

Soit le plus simple des systèmes classiques : une bille qui roule dans une coupe. Son champ de forces, la gravité, la structure géométrique de la coupe, les frictions, entre autres, « sont déjà là » : l'analyse des oscillations s'ensuit assez facilement. Dans le cas des systèmes dynamiques plus complexes, leur analyse mathématique peut faire référence à de nombreux champs de forces et rend la plupart des systèmes intrinsèquement imprédictibles (même si ce dernier phénomène apparaît dans des situations qui ne sont pas plus complexes que celle de la bille que nous venons de considérer : un pendule double, par exemple). Toutefois, l'analyse qualitative nous autorise des percées remarquables au sujet des évolutions possibles de ces systèmes (singularités, bifurcations, attracteurs…). Ce peut être déjà très compliqué, mais dans le cas du vivant un élément s'y rajoute encore : le champ de forces *se constitue* au cours de l'évolution. On peut passer d'un espace de phases à un autre tout à fait différent.

Si l'on considère une espèce dans son écosystème, on observe sans doute que ses interactions avec les aspects *physiques* de cet écosystème sont déterminées par les champs de forces relatifs à ces aspects (la gravitation, la physique ou chimie de l'eau, de l'air…). Mais, dans un écosystème, il y a aussi les autres êtres vivants. Ils agissent

sur l'espèce en question. En fait, ils se coconstituent avec cette espèce, ils se mangent entre eux, par exemple. Et ces autres espèces ne sont pas nécessairement déjà là, ni figées, car leur existence même et leur évolution peut dépendre de l'évolution de l'espèce que l'on considère. Les êtres vivants ne forment pas seulement un champ de forces physiques donné : aucun principe physique de minimalité, aucune « géodésique » ne prédétermine complètement leur évolution. Pour l'évolution darwinienne (et l'on n'a pas de théorie meilleure pour l'instant), elles seront tout au plus « compatibles » avec la situation qui *sera* donnée et non pas celle qui *est* donnée.

Voici donc le jeu qui se met en place et que l'évolution (néo-)darwinienne essaye de décrire comme explosion combinatoire de la vie dans « toutes les directions possibles ». C'est-à-dire, qu'aucun développement n'est prédéterminé et encore moins prédictible, sauf dans le cas de petits exemples de laboratoire, d'autant plus efficaces quand il ne s'agit que de bactéries. En général, tout développement est seulement compatible avec – et ne peut vivre qu'avec – la situation qu'il contribuera à déterminer. Dans ce cadre, la nouveauté se constitue certes à partir de la situation donnée (données génétiques incluses, bien évidemment), mais aussi en établissant des interactions qui n'ont pas de sens avant leurs constitutions. Stephen J. Gould rappelle, par exemple, le rôle énorme des « potentiels latents » : la double articulation de la mâchoire de certains reptiles d'il y a deux cents millions d'années, qui devient l'oreille interne des oiseaux. Il n'y a aucune « raison *a priori* » pour qu'il en soit ainsi ; aucun champ de force physique ni aucune donnée génétique chez ces reptiles n'*impose* cette transformation, elle est seulement possible pour l'écosystème à (co-)constituer. Et l'on ne peut le dire qu'*a posteriori,* car il aurait été impossible de le prédire, si nous avions été là à cette époque. On s'éloigne encore plus de Laplace.

Les nouveautés possibles modifient donc le champ des forces induit par le vivant, l'écosystème. C'est comme si la coupe, dans laquelle roule la bille de la mécanique rationnelle, se donnait une forme, champ parmi tous les champs physiquement possibles, en même temps que le roulement de la bille. Mais c'est peut-être même plus que cela, car la bille devrait être extrêmement plastique et, en même temps, chercher à garder son unité et son autonomie, comme le font tout vivant et toute espèce. Bref, au-delà des champs physiques, le champ biologique (l'écosystème) se coconstitue dans le temps : il *dépend* des champs physiques, il *n'y est pas réductible*, ou alors on est encore bien loin de pouvoir le réduire. La réduction, mieux, l'unification, avec la physique reste le but principal. Mais il faudra d'abord plus d'unité en physique, car on devra, probablement, rendre compte aussi, chez le vivant, des phénomènes quantiques [23] et, surtout, on devra enrichir nos concepts de « détermination », « système », etc., par un regard non préconstitué (ni basé seulement sur la force des outils physico-mathématiques existants) sur l'expérience du vivant. Mais on y arrivera, car l'on a déjà su dépasser la profondeur des mathématiques et des systèmes newtoniens et laplaciens par des idées radicalement nouvelles dans la physique du XX^{e} siècle. Notre but, pour le moment, est une analyse conceptuelle qui nous aide à mettre en évidence les analogies et les différences dans les diverses méthodes, en se focalisant sur leur rapport à l'espace.

23. Si possible, sans raccourcis qui relieraient directement des effets « tunnel » dans les microtubules cellulaires à la notion de liberté inscrite dans les chartes constitutionnelles, non pas sur la base d'évidence expérimentale, mais sur celle d'une lecture très naïve du problème de la cohérence de l'arithmétique, voir PENROSE,1994 ; voir FEFERMAN, 1995, pour une critique de cette « lecture » par un formaliste compétent ; voir LONGO, 2002, pour des résultats récents au sujet de l'incomplétude en arithmétique.

Afin de tenter de mieux comprendre ce que peut vouloir dire un « changement-enrichissement des concepts de détermination et de système », on peut évoquer la petite histoire d'un dialogue à distance entre Kepler et Galilée. Kepler, astronome et mathématicien extraordinaire, ne dédaignait pas, pour gagner sa vie (et pour nourrir une vraie passion), les almanachs et l'astrologie, en mélangeant parfois ses différents talents. Sur ces bases, il pensait que la Lune a de l'influence sur le caractère des femmes et sur les marées. Galilée, homme de science et vrai physicien, n'était pas d'accord : le premier problème, quoique important, n'a rien à voir avec la physique, son intérêt principal, et, quant aux marées, prétendre que la Lune, là-haut, si lointaine, puisse en être la cause, revient aussi à de la magie, de l'astrologie. Dans le « Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo », il essaye plutôt d'expliquer les marées en termes physiques, car, en fin de compte, il s'agit bien d'un phénomène physique. Et voilà le moment que l'on pourrait appeler « physicaliste » de cet immense scientifique : les marées sont dues à des phénomènes d'inertie, dans le cadre de la relativité (galiléenne). Les mouvements combinés de la Terre, rotation sur son axe et révolution autour du Soleil, causent des mouvements inertiels des eaux.

Galilée a une théorie physique formidable (inertie et relativité des mouvements), le vrai début de la physique moderne, mais il la « plaque » de force sur ce qui échappe à sa compréhension, même en absence d'évidence expérimentale (son raisonnement le conduirait à déduire une marée toutes les vingt-quatre heures) : c'est cela une erreur de méthode que, par abus de langage, on voudrait appeler physicalisme (y compris à l'intérieur de la physique elle-même). Bref, par physicalisme, on entend ici non pas la position de principe que le monde est, en fin de compte, du réel-physique, car cela est évident pour tout moniste, mais la réduction de phénomènes (du vivant, typiquement) à une théorie physique *donnée*, construite autour d'une phénoménalité physique bien précise et qui n'inclut pas, *a priori*, les phénomènes visés.

Pour le dire en termes modernes, Galilée ne dispose pas du *concept de champ* et, ce qui est plus grave, il ne se rend pas compte que quelque chose lui manque et qu'aucune mesure ne lui permet d'appliquer telle quelle sa théorie physique. Et cela est bien dommage, car s'il y avait réfléchi plus à fond, il était tellement bon que, peut-être, il aurait anticipé Newton, voire… Maxwell. Il faudra, à vrai dire, un long parcours pour arriver au concept de champ et, ensuite, à ses mathématiques : la gravitation newtonienne, d'abord, puis le débat, très riche, sur l'électromagnétisme, au XIX^{e} siècle, jusqu'aux équations de Maxwell dans toute leur splendeur mathématique.

Les difficultés immenses de l'analyse du vivant (et la relative jeunesse de la biologie) donnent l'impression que, peut-être en biologie, et sûrement en sciences cognitives, on a peu dépassé le stade du débat Kepler-Galilée. Si quelqu'un observe que la phénoménalité du vivant présente des aspects qui échappent aux théories physiques courantes, il est accusé de magie (et parfois on trouve vraiment de la terminologie magique-poétique au sujet du vivant et de l'esprit). Alors, on recourt à la notion de programme déterministe, dans le sens de Laplace-Turing et on la plaque sur l'ADN, voire sur le cerveau (simple support d'un logiciel, en tant qu'ensemble de programmes). Ou bien on prend la non-localité quantique dans les microtubules des neurones et l'on y réduit la conscience. Ou, encore, on prend les systèmes dynamiques de la physique et on les utilise massivement pour les réseaux de neurones, les systèmes évolutifs.

Il y a bien évidemment des nuances très importantes entre ces différentes approches. La première frôle aujourd'hui l'arnaque, car on a depuis longtemps compris que le déterminisme de Laplace et de Turing, immenses personnages eu égard à leur

temps et à leur spécialité (respectivement, la mécanique rationnelle du XIX^{e} siècle et l'informatique), a très peu à voir avec la physique contemporaine, encore moins avec la biologie. La deuxième est un défi à relever, mais il faut une évidence expérimentale, une correspondance entre les différentes échelles avec leurs théories physiques, des passages intermédiaires entre les activités des neurones, qui sont de très grosses machines, et le quanton, etc. ; évidences, correspondance et passages qui manquent absolument. La troisième se fonde sur, au moins, une évidence forte, à propos du cerveau : le renforcement hebbien des synapses et, plus généralement, sur l'efficacité des systèmes dynamiques dans le traitement de tout système interactif. Le progrès est remarquable.

Dans ces trois théories physiques, il y a en effet toute l'histoire, changeante, de la notion de « détermination ». Pour Laplace (et pour la programmation séquentielle des ordinateurs), déterminisme implique prédictibilité [24]. Avec les systèmes dynamiques, le concept de déterminisme change, ou se spécifie mieux, car on comprend qu'il n'implique pas la prédictibilité. La physique quantique introduit une spécification ultérieure de ce concept, par dualité, en introduisant la notion d'« indéterminisme essentiel », non épistémique. En moins de deux siècles, les notions de « ceci détermine cela », de « système qui évolue dans le temps » ont profondément changé. Mais nous n'avons pas encore l'équivalent de ces notions pour la biologie : que veut dire l'énoncé selon lequel l'ADN « détermine » l'ontogenèse, ou qu'un système du vivant évolue, ou que l'état d'un système nerveux détermine ses états successifs ? Les tentatives de compréhension par le « plaquage » de nos outils physiques sont très utiles, au moins quand elles se basent sur la physique du XX^{e} siècle : il faut des gens qui entrent dans la cuisine et essayent de travailler avec les outils qu'ils maîtrisent, si possible dans un dialogue serré avec les biologistes. Mais, pour mieux avancer, il faut aussi savoir que nous n'avons pas encore une bonne notion (et stable) de « champ biologique », malgré les quelques tentatives intéressantes, et que nous avons encore moins des mathématiques adéquates ; tout comme Galilée n'avait pas la notion de champ physique, ni les mathématiques correspondantes.

MORPHOGENESE

Il nous faut revenir maintenant à notre projet plus spécifique, concernant l'intelligibilité géométrique de l'espace du vivant.

24. Turing, dès 1935, avait lui-même démontré que ses machines sont sujettes à une sorte d'imprédictibilité : on ne peut pas résoudre (décider) le problème de l'arrêt (on ne peut pas décider si une machine s'arrête ou pas en démarrant sur un input donné ; en fait, on ne peut décider aucune propriété « intéressante » des programmes – théorème de Rice, voir ROGERS, 1967). Toutefois, cette « imprédictibilité » se présente « à la limite » : le non-arrêt est une propriété de l'infini et les propriétés indécidables des programmes sont des propriétés de fonctions en tant que relations infinies arguments-valeurs. Au contraire, l'imprédictibilité, à la Poincaré, des systèmes physiques déterministes se présente « au niveau fini ». Quelle que soit l'approximation qu'on se donne pour définir l'état initial, il existe un temps fini, au-delà duquel on ne peut pas prédire, mathématiquement, l'état dans lequel se trouveront ces systèmes. Malgré les résultats d'indécidabilité, la théorie de la calculabilité classique conçoit donc un processus de calcul déterministe comme « bien encadré » dans les rails d'une évolution prédictible, à tout instant fini. Le fait est que la calculabilité classique est une théorie logique, tout comme les machines de Turing sont des machines logiques, et ni l'une ni les autres ne sont des théories (des concepts) physiques : leur déterminisme et leurs propriétés d'indécidabilité sont logiques, et non physiques, et elles ne sont pas sujettes aux aléas de l'approximation physique.

Une des analyses les plus riches de la géométrie du vivant et de son écosystème est celle qui fait référence à la morphogenèse, en tant qu'étude de l'évolution des formes du vivant et de leur influence sur la structure de la vie en général.

« La stabilité du vivant est géométrique [25]. » Avec ce *motto*, René Thom résume un des points forts de son analyse et de ses motivations. Pour lui, La complexité topologique d'une forme est le lieu de la « signification » et de l'organisation.

Thom donne un rôle presque exclusif à la topologie, outil très riche dans ses mains, comme instrument d'analyse et de compréhension. L'évolution topologique de l'individu vivant doit expliquer sa biochimie et non pas l'inverse [26]. La forme contient une double information : elle détermine des classes d'équivalences par rapport à des groupes de transformations fixés ; elle donne une mesure de complexité computationnelle par le nombre et l'évolution de ses singularités.

Voici donc que s'établit ce « champ morphogénétique » qui façonne le vivant, au cours de la phylogenèse aussi bien qu'au cours de l'ontogenèse. La globalité intervient toujours dans la vision de Thom : chez l'embryon, souligne-t-il, il y a d'abord le dessin global, ensuite la spécialisation des organes [27]. Ou, comme dit Roger Jean, *« plants form cells, not cells plant* [28] *»*.

Mais qu'est-ce que ce « champ morphogénétique » ? Son nom peut induire en erreur, car il renvoie aux champs de la physique, dont on parlait : les champs gravitationnels, électriques, magnétiques. Même si on n'arrive pas (encore) à les unifier, leurs effets réciproques, leur utilisation pour comprendre et expliquer, pour prédire, sont bien établis. Encore une fois, dans un système physique, « ils sont déjà constitués », ils sont un cadre de repère mathématique bien clair.

Le champ morphogénétique contient sûrement tous ces champs physiques en même temps, *plus* les champs propres du vivant, ceux dont nous venons de parler, coconstitués par rapport au phénomène examiné. En particulier, chaque champ – physique, chimique ou biologique – agit à un certain niveau, conceptuellement indépendant de celui des autres : le niveau phénoménal – la façon dans laquelle le phénomène se présente – et sa structuration conceptuelle par nos constructions scientifiques sont nettement différents. Toutefois, l'individu vivant intègre *de facto* cette pluralité de niveaux ; son unité est surtout le résultat d'une intégration de différentes strates, physiques, chimiques, biologiques. Ces différentes composantes, analysées par des méthodes scientifiques différentes (physico-chimiques, biologiques), interagissent entre elles par des boucles spatiales et temporelles ; l'une modifie plastiquement l'autre. Or, aucune théorie physique ne sait nous donner des éléments interprétatifs ou descriptifs de ces formes d'interaction et de « contrôle réciproque » entre différents niveaux (des montées et des descentes entre le tout, l'individu vivant et ses composantes biologiques, chimiques, physiques). La cybernétique, la théorie des systèmes et du contrôle ont sûrement donné des modèles remarquables de boucles autorégulatrices, par exemple, mais ces modèles se situent à un niveau spécifique (celui des systèmes physiques) en rapport avec la force même de leurs méthodes physico-mathématiques, tandis que le vivant établit des boucles entre niveaux conceptuellement différents.

L'analyse de Thom, enrichie depuis par le travail de maints auteurs, saisit aussi les aspects physiques de la plasticité topologique du vivant, même ceux qui sont induits par ces interactions « verticales ». C'est une extraordinaire physique du vivant,

25. THOM, 1972, p. 175.
26. THOM, 1972, p. 175.
27. THOM, 1972, p. 223.
28. JEAN, 1994, p. 270.

extrêmement informative, mais une *physique*. Si, d'un côté, il faut la plasticité évolutive des espèces vivantes pour se conformer à ces champs dynamiques propres à la morphogenèse, d'un autre côté l'évolution topologique se fait selon un schéma physique qui ne rend pas compte des phénomènes dont certains sont rappelés plus haut, tels les potentiels latents ou l'explosion combinatoire de la vie dans toutes les directions « compatibles ». Mais, compatibles avec quoi ? Encore une fois, non pas avec les forces à l'instant donné, mais avec celles qui *seront* en place – voilà le problème (mathématique) que l'on décèle au cœur de la plasticité évolutive du vivant.

Il est clair, par exemple, y compris pour les auteurs qui ont contribué aux aspects les plus travaillés de la morphogenèse, telle la phyllotaxie (à l'origine : l'analyse des formes végétales), que l'on peut obtenir des formes tout à fait similaires à celles de la phyllotaxie au moyen de supraconducteurs superposés dans un champ magnétique dynamique [29]. Par exemple, les suites de Fibonacci, que l'on retrouve partout dans les formes végétales, peuvent être reproduites sur tout treillis *« of soft objects »* sujets à des forces répulsives et soumis à des fortes déformations [30]. Dans ce sens, ces analyses considèrent les formes du vivant dans leur être « physique », c'est-à-dire en tant que corps physiques dans des champs physiques. Bien qu'important et nécessaire, cela n'épuise pas les analyses du vivant.

La morphogenèse est aussi essentielle pour sortir du « tout génétique », autre paranoïa du « tout codé à l'avance » ou du programme de Laplace-Turing « déjà là » (si cher à un fort courant de la génétique américaine et à la prédestination protestante). Il nous aide à comprendre que le programme du vivant est » partout sauf dans les gènes » (comme dit Henri Atlan avec une provocation nécessaire) : les *« patterns »* et les formes de la phyllotaxie ne sont pas entièrement dans les gènes, elles sont dans les propriétés de l'espace, du temps, de la matière physique et de l'énergie ; les gènes ne contiennent pas toute l'information sur les symétries qui se constitueront dans l'interaction avec l'environnement, comme se constituent celles des cristaux ou des minéraux [31]. Le « programme » (ce nom si inadéquat) du développement est dans l'interface entre une mémoire phylogénétique (les gènes) et l'écosystème, physique et biologique.

Un exemple de très grande importance est donné par le cerveau, qui, au cours de l'ontogenèse, présente un développement, à la fois darwinien et lamarckien. Le nombre immense des connexions possibles entre neurones (chacun des 100 milliards environ de neurones ayant jusqu'à 10 000 connexions synaptiques, voire plus) ne peut être que très peu « codé » dans les gènes. De nombreuses connexions, établies très tôt par l'explosion de la croissance dans le fœtus ou chez le nouveau-né, disparaissent par sélection [32]; d'autre part, au cours de toute notre vie, les *stimuli* façonnent le cerveau en établissant de nouvelles connexions ou en renforçant, voire défaisant-déplaçant, des liens existants, sélectionnant certains neurones et pas d'autres (qui meurent). La plasticité cérébrale, à tous les niveaux, est au cœur de la continuité entre phylogenèse et ontogenèse et permet l'individuation : « La structure du système nerveux porte la trace matérielle de l'histoire individuelle [33]. » La constitution des formes géométriques des réseaux de neurones est une composante typique (par sa complexité et sa dynamicité

29. JEAN, 1994, p. 264.
30. JEAN, 1994, p. 265.
31. JEAN, 1994, p. 266.
32. EDELMAN, 1987.
33. PROCHIANTZ, 1997.

permanente), mais elle n'est pas la seule [34], d'une genèse interactive des formes dans un écosystème où les *stimuli* sont de nature physique et biochimique et enracinent dans la matière vivante nos activités mentales. L'intelligence animale est une dynamique de formes, distribuée sur maints niveaux (des protéines, à la structure des synapses, à celle des réseaux de neurones), tous interagissant entre eux. Son unité est un des champs du vivant les plus difficiles à saisir.

INFORMATION ET STRUCTURE GEOMETRIQUE

Un autre enseignement important est à tirer du projet de Thom de géométrisation du vivant. Dans une époque de « bits » qui flottent partout, l'image de l'information (voire de l'intelligence) comme unique question de « suites de bits » est tout à fait courante. Or, le codage digital de l'information est sans doute d'une efficacité extraordinaire, pour certains buts : une fois codée, l'information est transmise et sauvegardée avec une fidélité et une vitesse sans égal ; des méthodes de contrôle binaire permettent même de vérifier, au moins partiellement, la fidélité de sa transmission et sa sauvegarde. Rien de mieux pour construire ces ordinateurs digitaux et ces réseaux qui sont en train de changer le monde. De plus, quelques grands résultats des années 1930 ont démontré que « tous les codages discrets et leur traitement effectif sont équivalents » ; en effet, Kleene, Turing, Church… démontrèrent l'équivalence des différents formalismes de l'époque pour la calculabilité (c'est-à-dire que les fonctions numériques calculées par les systèmes de Herbrand, Curry, Gödel, Church, Kleene, Turing… étaient les mêmes). Par un abus philosophique étonnant, induit par la surprise et la difficulté technique de ces résultats (et par le formalisme positiviste ambiant), on a alors dit que « toute forme d'élaboration de l'information », et donc « toute forme d'élaboration biologique de l'information », « toute forme d'intelligence », sont codables dans n'importe lequel de ces systèmes formels et, donc, en fin de compte, dans des suites de 0 et 1 d'une mémoire digitale.

À l'inverse, et sans encore se plonger dans les mystères de l'intelligence, les analyses morphogénétiques nous montrent le rôle de la structuration géométrique de l'information. Les déformations continues, par exemple, leurs classes d'équivalence, constituent un transfert-élaboration de l'information qui est essentiel chez le vivant (aussi bien qu'en physique). C'est-à-dire que les transformations continues, différentiables ou isométriques qui préservent certaines régularités et non d'autres sont au cœur des phénomènes du vivant, à partir de celles de la structure géométrique de l'ADN ou des protéines et de leurs évolutions. À cela, bien évidemment, s'ajoute la composante discrète et quantitative de l'information, ces bits qui ne sont que des singularités et, donc, des mesures possibles d'une composante de la complexité topologique d'une structure géométrique. L'information a une nature quantitative *et* qualitative : l'insistance sur une seule de ces composantes, la première, a été une limitation grave dans nos descriptions du monde.

Certains continuent toutefois à dire : oui, mais ce continu, ces structures géométriques sont bien réductibles, « en fin de compte », à du « discret tout petit », mais bien déterminé. Plusieurs questions se posent alors :

1° Tout d'abord un problème de complexité. Si, pour l'analyser du point de vue mathématique, on devait décrire par une suite de 0 et 1 la structure tridimensionnelle de

34. Voir la structure fine des synapses analysée *in* EDELMAN, 1987, qui échappe à la dynamique des réseaux mathématiques de neurones.

toutes les protéines échangées dans les cascades postsynaptiques, par exemple, ainsi que l'information transférée par les flux biochimiques dans les liquides d'un cerveau animal et les phénomènes de convection qui les accompagnent, voire par les variations et déplacements d'environ 10^{15} synapses, il n'y aurait pas seulement des difficultés pratiques, mais de principe : des principes physico-mathématiques empêchent, en effet, la saisie discrète et linéaire de ces informations « continues » et tridimensionnelles ; ou leurs mathématiques deviendraient démontrablement insaisissables. Bref, il faudrait occuper la surface de la Terre, avec nos plus petits *chips* et, alors, même des problèmes de synchronisation relativiste se poseraient.

2° De plus, si l'on accepte l'hypothèse d'une discrétisation possible de toute structure spatio-temporelle, quelle grille faut-il établir, quelle finesse d'approximation donner ? Le moindre des phénomènes du vivant inclut aussi des systèmes dynamiques dans le sens de la physique (thermodynamique, de type critique, etc.). Or, n'importe quelle grille discrète, établie *a priori*, peut se révéler insuffisante à l'analyse, car la sensibilité aux conditions initiales peut entraîner des conséquences énormes, bien « au dessus » du niveau d'observabilité, tout en partant d'une variation « en dessous » de la finesse de la grille.

3° Mais de quel « discret » parlons-nous vraiment ? Car si l'on pense que l'on pourra, en fin de compte, pousser le codage jusqu'au niveau de la microphysique (justement, pour ne pas couvrir la Terre de microprocesseurs), alors ce discret ne pourra être que celui de la physique quantique. On passe alors, comme Michel Bitbol l'explique bien [35], à la faillite de l'esprit même de la réduction formaliste et mécaniciste au discret : la référence à un discret bien déterminé et ultime, lieu de la certitude mécaniciste classique, en fait celle de la mécanique laplacienne. Rien de cela n'est possible en physique quantique, car elle est une théorie des champs continus, où la constante de Planck, seule référence possible au discret, a la dimension d'une action (une énergie multipliée par le temps), une fibration orthogonale au continu de l'espace-temps (voir partie I, *supra*, p. xxx). De plus, l'indétermination et le débat épistémologique associé – entièrement ouvert – donnent un rôle profondément antimécaniciste au sujet connaissant. En s'approchant du monde de la microphysique, on s'éloigne en fait des mythes du déterminisme mécaniciste, les suites des bits bien réglées et programmées par les lois de la pensée formalisée.

Pourquoi alors renoncer à l'approximation de l'analogie et au contenu informatif direct de la forme continue et de ses mathématiques ? Les déformations d'une structure géométrique, en tant que telles, peuvent reproduire par analogie une information. De plus, *l'analogie est intentionnelle* : on *choisit* ce qu'il faut reproduire de façon analogue, on *sélectionne* certains aspects de la forme originaire, à élaborer/simuler ; l'analogie est le résultat d'une *visée*, concept propre au vivant, que l'on saisit si mal en physique où la flèche du temps phénoménal est orientée, sans boucles [36]. Or, la reproduction-transformation par formes géométriques peut être hautement analogique et intentionnelle, ce qui est en effet crucial pour toute représentation chez le vivant. L'éventuelle plus grande instabilité dans le temps des formes par rapport aux suites de bits est un élément de richesse, car elle correspond à la possibilité d'évolution et de changement. L'analyse de la structuration géométrique du vivant (y compris du cerveau) permet donc de saisir une composante essentielle de l'élaboration de l'information, voire de l'intelligence animale : la simulation choisie et analogique, avec ses possibilités d'évolution. Au contraire, les fidélité et stabilité parfaites du « bit par

35. BITBOL, 2000.

36. Voir, néanmoins, NOVELLO, 2001.

bit » rendent cette compréhension impossible (en pratique ? en principe ? distinction souvent arbitraire).

En conclusion, dans l'étude des phénomènes du vivant, des plus élémentaires et jusqu'à la cognition humaine, il ne s'agit pas de nier le rôle important de l'élaboration mécanique ou formelle des bits, ces singularités centrales pour l'information et pour la vie, mais d'enrichir ces analyses par l'appréciation, aussi, de la richesse phénoménale des structures géométriques et de leur autonomie cognitive, de leurs particularités et de leur efficacité dans la transformation et l'élaboration de l'information. Encore une fois, le formalisme et le mécanicisme physicaliste ne sont pas une forme de réduction scientifique, ce qui serait normal dans une pratique scientifique, mais une monomanie philosophique qui a fait perdre le sens de la pluralité de nos formes de connaissance et d'approche du monde, de nos outils intellectuels, mathématiques en particulier. La morphogenèse, ainsi que les travaux sur les réseaux dynamiques de neurones [37], malgré leur « incomplétude » (les limites du « regard de physicien », qui toutefois n'est ni formaliste ni mécaniciste), nous rendent au moins la richesse de l'organisation géométrique du vivant et des phénomènes cognitifs.

GLOBALITE ET CIRCULARITE DANS L'ESPACE ET LE TEMPS

Nous avons vu qu'une des grandes difficultés pour une analyse, en particulier mathématique, du vivant et de son évolution réside dans ces circularités coconstituantes qui en sont le cœur. J'ai même ajouté à la dialectique individu-écosystème celle du présent-futur.

Pour revenir brièvement sur ce point une fois encore, et contrairement à certaines théories de l'esprit, je donne également un sens très élémentaire à la notion d'intentionnalité. Notre intentionnalité de la connaissance et de la volonté est l'épiphénomène ultime et non compositionnel, le point d'arrivée, d'une intentionnalité propre à l'être vivant : je faisais en ce sens référence au « geste » de l'amibe qui va dans une direction de l'espace pour préserver ou améliorer son métabolisme. Ce geste implique l'unité du vivant, l'individu avec sa « membrane » si importante pour l'« isoler » en tant qu'unité biologique, condition essentielle à l'autopoièse et à l'autoorganisation [38].

C'est bien cette intentionnalité vivante qui suggère une analyse du temps qui sache décrire des « boucles » : des structurations autodéfinissantes de l'écosystème dans l'espace, ainsi que l'attente des situations futures possibles, contribuent à constituer l'évolution du présent, ses bifurcations. L'interaction dans l'écosystème se fait donc dans les trois dimensions spatiales et dans celle du temps : c'est-à-dire, les temps locaux ou rythmes internes de l'individu ainsi que le temps de l'interaction spatiale. L'unité de l'écosystème est une affaire spatio-temporelle qui entraîne des circularités spatio-temporelles.

Or, les mathématiques ont déjà proposé des méthodes qui peuvent ressembler à une mathématisation de certaines circularités. La logique mathématique, en particulier, en a mis en évidence quelques-unes : les définitions imprédicatives, les ensembles non-bien-fondés, entre autres [39]. Un ensemble défini imprédicativement, par exemple, contient des éléments, des parties, dont la définition dépend de l'ensemble lui-même (ou, si l'on veut, le « local dépend du global »). En fait, la topologie, si importante dans

37. Voir, p. ex., HERTZ, KROGH et PALMER, 1991, et AMARI et NAGAOKA, 2000.

38. VARELA, 1989.

39. BARWISE et MOSS, 1996 ; LONGO, 2000.

les analyses rappelées plus haut, utilise très souvent des notions imprédicatives (intersection sur un ensemble d'ensembles qui contient l'ensemble à définir, etc.). Dans un certain sens, les définitions imprédicatives sont « formellement instables », un peu comme un système dynamique est mathématiquement instable : la structure globale détermine « dynamiquement » ses composantes qui la constituent à leur tour.

Il n'est pas évident que ces approches puissent nous dire quelque chose sur l'unité du vivant, car ce ne sont que de « petites formes » de circularités capturées par certains langages formels : elles nous disent toutefois quelque chose sur des boucles conceptuelles possibles, dont l'expressivité est justement dans la circularité elle-même. C'est-à-dire, les propriétés exprimables et les fonctions calculables dans ces formalismes sont plus nombreuses que dans leurs versions prédicatives ou stratifiées ou le sont avec plus de simplicité [40]. Leur signification dans des structures catégoriques demande une richesse structurelle ou des propriétés de fermeture importantes et complexes [41].

Or, les systèmes non-stratifiés ou imprédicatifs ont reçu peu d'attention dans les analyses des fondements des mathématiques, où ils ont été mis en évidence, et ce à cause de l'hégémonie historique des courants fondationnalistes/mécanicistes qui ont considéré la stratification conceptuelle du monde comme la seule source de certitude et d'explication. C'est ainsi que les prédicativistes/prédicationnistes ont longtemps écarté ces outils qui, au contraire, rapprochent les mathématiques du monde (des systèmes dynamiques composés par… au moins trois corps dans leurs champs d'interaction gravitationnelle à, peut-être, ceux du vivant).

Il est évident que les problèmes qui se posent aux analyses mathématiques sont bien plus profonds ; toutefois, cette exigence de « circularités expressives et constituantes », déjà présente en mathématiques, devrait être enrichie et mieux utilisée. Le besoin qu'éprouve le biologiste de recourir à des arguments ou, au moins, à une terminologie « téléonomiques » devrait nous aider. La finalité, le but sont presque toujours présents dans les descriptions du vivant : la « finalité contingente » de la vie elle-même ou la fonction comme but, par exemple. Après coup, une pudeur héritée du mécanicisme pousse à effacer cette téléonomie ; au contraire, l'analyse du rapport « étant et visé » devrait être intégrée dans toute analyse scientifique, voire conceptuelle, et ensuite mathématique, du vivant.

Giuseppe LONGO

40. GIRARD, LAFONT et TAYLOR, 1989.

41. Voir ASPERTI et LONGO, 1991, pour une application de la notion de « catégorie interne » à la sémantique de l'imprédicativité.

QUELQUES REMARQUES SUR LES DETERMINATIONS SPATIO-TEMPORELLES EN BIOLOGIE ET SUR CERTAINS ASPECTS GNOSEOLOGIQUES

Francis BAILLY

I.- ASPECTS BIOLOGIQUES

Bien que cela n'apparaisse pas toujours dans ces termes, la question de l'espace a joué un rôle très important, voire fondateur, en biologie : d'abord avec l'invention du concept de milieu intérieur introduit par Claude Bernard qui sanctionne une séparation topologique essentielle entre intérieur et extérieur relativement à un organisme et ensuite avec la question de la chiralité biologique mise en évidence par Louis Pasteur qui n'hésita pas, suite à ses expériences sur les tartrates et leur activité biologique différenciée selon qu'ils sont dextro- ou lévogyres, à affirmer « la vie telle qu'elle se manifeste à nous est une fonction de l'asymétrie de l'univers et une conséquence de ce fait ». Ce disant, il anticipait en quelque sorte dans le domaine qui était le sien, et *mutatis mutandis*, ce qui apparaîtra plus tard en physique, à savoir l'asymétrie matière/antimatière, source semble-t-il de l'existence de notre univers dans sa structure matérielle actuelle.

Par ailleurs, du fait que les structures biologiques sont caractérisées par des processus organisationnels conduisant à des formes complexes (développement) et à des fonctions physiologiques assurant les rapports tout/parties par l'intermédiaire d'intégrations et de régulations entre niveaux d'organisation au sein d'un organisme, il est clair qu'une parenté conceptuelle les relie aux théories physiques de type critique. Ce n'est pas un hasard si les premières modélisations mathématiques de situations biologiques intégrées ont fait appel aux modèles de cascades de bifurcations thermodynamiques [42] ou à des systèmes dynamiques permettant de traiter de la complexification et de la criticalité autoorganisée (théories de l'autoorganisation entre autres) [43], voire de géométries fractales [44] et de régimes de fonctionnement chaotiques [45] repérés dans les organismes. De leur côté, la caractérisation et l'engendrement des processus et des formes ont puisé, dans certains cas, dans les modèles de la théorie des catastrophes élémentaires [46] et, plus généralement, dans la théorie des singularités. En fait, ce qui apparaît nettement à l'analyse c'est que la situation biologique se présente toujours – à travers régulations, homéostasie, mais aussi pathologies et mort – comme une situation critique durable, de domaine d'extension limité dans l'espace et le temps mais néanmoins étendu [47].

Avant d'entrer dans des analyses plus précises, un dernier point nous paraît capital, relatif cette fois à la question de la temporalité en biologie. Il faut rappeler, tout

42. NICOLIS, 1986 ; NICOLIS et PRIGOGINE, 1989.

43. HAKEN, 1978 ; KAUFFMAN, 1993 ; VARELA, 1989.

44. MANDELBROT, 1982 ; BAILLY, GAILL et MOSSERI, 1989 ; BOULIGAND, 1989a.

45. BABLOYANZ et DESTEXHE,. 1993 ; AUGER, BARDOU et COULOMBE, 1989 ; DEMONGEOT, ESTEVE et PACHOT, 1989.

46. THOM, 1980.

47. BAILLY, 1991.

d'abord, qu'en physique quantique et dans le cadre de la conjugaison énergie-temps, il existe une dissymétrie entre les deux termes de la conjugaison : si l'énergie est bien une observable quantique (associée à l'opérateur hamiltonien), en revanche le temps n'apparaît que comme un paramètre (et, ce faisant, semble moins essentiel et, pour ainsi dire, moins incorporé à la théorie). La situation semble bien se présenter de façon inverse en biologie : c'est le temps biologique propre (un temps itératif qui préside aux horloges et aux rythmes internes) qui semble détenir le statut d'observable essentielle et « l'énergie » (la taille ou la masse des organismes) apparaître comme un simple paramètre accidentel. En ce sens particulier, on peut considérer que la biologie se présente relativement à la corrélation énergie/temps comme une discipline quasi duale de la mécanique quantique.

I. 1.- Espace : lois d'échelle et criticité ; géométrie et fonctions biologiques

Depuis les travaux pionniers de D'Arcy Thompson [48], des études récentes [49] ont montré que nombre de caractéristiques biologiques macroscopiques (pour les distinguer des caractéristiques génétiques au niveau biomoléculaire) étaient partagées par beaucoup d'espèces, de genres, de classes, voire de tout le règne animal en termes de *scaling*, le paramètre choisi étant précisément la taille de l'organisme (mesurée par sa masse W, ou dans certains cas par son volume V). Ainsi, les durées T (durées de vie, durées de gestation, périodes des pulsations cardiaques, périodes respiratoires, etc.) semblent toutes obéir à une loi d'échelle en puissance 1/4 de la masse ($T \sim W^{1/4}$) – les fréquences « scalant » évidemment en puissance (-1/4). De même, les métabolismes R « scalent » en puissance 3/4 de la masse, et bien d'autres propriétés présentent des comportements similaires. Ce genre de loi d'échelle évoque évidemment des situations critiques, associées aux exposants fractionnaires tels que nous en avons rencontrés dans les théories critiques. Ce qui différencie les groupes d'organismes les uns des autres ce sont simplement les préfacteurs de ces expressions et ceux-ci restent communs à de nombreuses espèces, voire, comme nous l'avons signalé, à des regroupements bien plus vastes (l'exemple le plus spectaculaire semble bien être celui de la durée de vie qui présente la même loi d'évolution en fonction de la masse – le même préfacteur – pour tout le règne animal).

De même, mais au sein des organismes cette fois, on voit apparaître des lois d'échelle, des allométries, reliant certaines caractéristiques géométriques d'organes à la taille des organismes et ce à travers de nombreuses espèces ou, pour un seul et même organisme, au cours du développement. Mais le point principal que nous voulons souligner ici tient à la présence de géométries fractales que présentent certains organes appartenant à ces organismes.

Ces géométries fractales concernent en général des organes engagés directement dans des fonctions physiologiques essentielles (circulation, respiration, digestion, etc.). Elles se présentent comme la trace objective d'un changement de niveau d'organisation dans l'organisme et de l'exercice d'une régulation des parties par le tout (fonctionnalité *top/down*) en même temps que d'une intégration des parties dans le tout (fonctionnalité *bottom/up*). On peut les distribuer en deux classes distinctes : d'une part, les membranes interfaciales (dont les dimensions métriques sont situées entre 2 et 3) – telles la membrane alvéolaire des poumons, la pie mère du cerveau, les villosités intestinales – et, d'autre part, les réseaux arborescents (dont les dimensions métriques

48. D'ARCY THOMPSON, 1961.
49. PETERS, 1983 ; SCHMIDT-NIELSEN, 1984 ; WEST, BROWN et ENQUIST, 1997.

d'extrémités peuvent dépasser 2) – tels l'arbre bronchique ou les systèmes vasculaires ou nerveux. On comprend l'apparition de telles géométries si l'on considère qu'elles permettent de concilier des contraintes antagonistes associées aux propriétés spatiales. En effet, d'un côté, comme il s'agit d'organes engagés dans des échanges, leur efficacité et la taille correspondante doivent être maximales pour favoriser ces échanges et les contrôler finement ; de l'autre, du fait qu'ils sont incorporés dans un organisme composé de nombreuses parties, leur encombrement stérique doit être limité pour assurer une viabilité globale ; enfin, ces organes, dans la mesure où ils sont individués et dévolus dans leur globalité à des fonctions, doivent présenter une certaine homogénéité dans leur extension spatiale. Ces contraintes sont à bien des égards antagonistes et seule une fractalisation des géométries associées aux organes qui doivent y répondre permet de les concilier.

Un autre aspect spatial du biologique qui soulève des questions fort intéressantes tient à sa tridimensionalité intrinsèque. En effet, si l'on s'interroge abstraitement sur les possibilités de voir se développer une biologie en d'autres dimensions, on s'aperçoit que, là encore, les trois dimensions permettent de concilier des contraintes antagonistes. Car, d'une part, il convient que l'organisme présente une différenciation locale suffisante pour permettre des fonctions différenciées concourant au tout et que, d'autre part, il puisse être le siège d'une connectivité interne suffisante pour relier entre elles toutes ses parties. Dans un espace à deux dimensions, si la différenciation peut être suffisante, les liaisons convenables entre les parties ont du mal à s'établir car elles risquent de se croiser et de conduire ainsi à un mélange fonctionnel ; à l'inverse, dans un espace à quatre dimensions, la connectivité est évidemment très favorisée, mais on sait que, en quatre dimensions, les théories de champ moyen [50] s'appliquent bien et, dans ce cas, les contraintes de différenciation locales deviennent insuffisantes pour conduire à un système très organisé et hiérarchisé en niveaux d'organisation. Le développement en trois dimensions semble bien concilier ces tendances au prix de la production (sans doute en tant qu'attracteurs de certaines dynamiques) des géométries fractales inhabituelles que nous venons d'évoquer. Bien entendu, tout cela concerne les espaces internes des objets biologiques, sans préjuger de la dimension et de la topologie des espaces externes.

En effet, à l'instar de la description de certains « espaces » physiques en termes de fibrations à base d'espace-temps, on peut également considérer qu'il existe, en des termes conceptuellement similaires, des sortes d'« espaces » théoriques internes en biologie constitués principalement par les niveaux d'organisation biologiques. Ceux-ci se distinguent de ce qu'on peut appeler des niveaux, liés aux échelles, en physique, en ce qu'ils sont en plus soumis à des phénomènes de régulation par le niveau supérieur et à des contraintes d'intégration dans le tout qu'ils constituent.

I. 2.- Temporalités biologiques

Dans une première approche, qui décrit l'état actuel et effectif d'un organisme (ou d'une population), on peut considérer que le vivant est confronté à deux types distincts

50. Intuitivement, les théories de champ moyen (voir, p. ex., la théorie de Landau du ferromagnétisme) sont des théories où une approximation consiste à remplacer l'effet sur un élément du système (un spin en l'occurrence) de la somme des interactions individuelles dues à tous les autres éléments par un « champ moyen » intégrant ces propriétés individuelles. Ces théories sont d'autant meilleures que le nombre des proches voisins d'un spin donné quelconque est élevé, car alors le spin en question « voit » d'autant mieux la moyenne des effets des autres. Dans un espace à quatre dimensions, ce nombre est suffisamment élevé pour valider une théorie de champ moyen.

de temporalité dont l'articulation est un enjeu essentiel de survie. Le premier type, qui renvoie au temps physique le plus classique, est celui qui est associé au couplage entre l'organisme et son environnement à travers les processus de stimulus et de réponses. Il se manifeste principalement par des processus de relaxation (de la forme quasi canonique $e^{-t/\tau}$ et combinaisons de telles exponentielles) [51]. Le second type est de nature très différente. Il est associé aux horloges internes qui rythment le vivant et assurent son fonctionnement et sa perduration [52] (il prend alors la forme $e^{i\omega t}$ et les combinaisons).

Mais le plus important ne tient peut-être pas encore à ces formes distinctes (encore que mathématiquement parlant on passe du corps des réels à celui des complexes, comme ce fut le cas dans la définition des amplitudes de probabilité pour la mécanique quantique par contraste avec les grandeurs d'état de la physique classique), mais bien au fait que la temporalité interne qui en résulte pour l'organisme est désormais itérative (et non plus « historique ») : de fait, les événements temporels *pertinents* pour cette internalité biologique ne sont plus mesurés par une grandeur dimensionnelle comme en physique (des secondes) mais bien par des nombres purs correspondants aux itérations effectuées ou restantes pour un organisme qui n'en dispose que d'un nombre fini et fixé à l'avance selon son appartenance au groupe qui le définit. Ainsi, pour prendre un exemple particulièrement significatif, tous les mammifères se regroupent-ils bien dans une même classe (de la souris à l'éléphant ou à la baleine), classe caractérisée par le nombre de battements de coeur disponibles sur une durée de vie moyenne (environ 10^9) ou le nombre de respirations correspondantes (environ 2.5×10^8). Les variations de fréquences entre espèces ne sont attribuables qu'à des masses différentes des organismes adultes moyens (le paramètre). Ce trait très spécial est évidemment directement lié aux propriétés d'échelle que nous avons présentées précédemment. On peut remarquer au passage qu'il tend à conférer une objectivité à des classifications plus ou moins intuitives et abstraites qui ont présidé à la taxinomie du vivant.

Pour accentuer encore l'importance de la temporalité propre des objets biologiques dans l'explication théorique, y compris au niveau évolutif, il faut mentionner les tentatives les plus récentes de repenser la théorie de l'évolution et ses caractéristiques principales à partir des *horloges du vivant* [53], interprétant bien des transformations en termes de syn- ou de dyschronies. Cette approche s'adresse aussi bien au niveau individuel de l'organisme (développement) qu'à celui de l'espèce (évolution).

Mais, comme l'a proposé Giuseppe Longo dans son texte (*supra*, p. xxx), il semble bien qu'en biologie il soit nécessaire de prendre en compte un troisième type de temporalité, spécifiquement biologique, associé à ce qu'il appelle le « finalisme contingent », lui-même caractéristique de ce qu'il désigne comme un germe d'intentionnalité (non réflexive), et qui puisse rendre compte des phénomènes évolutifs et adaptatifs propres au vivant. C'est ce type de temporalité (que l'on peut qualifier d'anticipatrice, du fait qu'elle couple l'état actuel du vivant à un état futur de son

51. Le processus de relaxation le plus simple est le retour à l'équilibre d'un système soumis à une petite perturbation, et dont la vitesse de retour est proportionnelle à l'écart à l'équilibre qu'il a subi. Si P est la grandeur considérée de valeur d'équilibre p (P>p), alors on a : $dP/dt = - r(P-p)$ où r est l'inverse d'un temps, ce qui conduit à une décroissance exponentielle avec le temps, de l'écart à l'équilibre. L'inverse de r est le temps caractéristique dit « de relaxation ».

52. GLASS et MACKEY, 1988 ; REINBERG, 1989.

53. CHALINE, 1999.

environnement que lui-même, par son comportement, est en train d'induire) qui serait spécifique d'une existence biologique faisant montre de ce que Jacques Monod appelait une téléonomie. Bien que ce type de temporalité puisse le cas échéant être lu et modélisé comme couplage entre les rythmes propres scandés par les horloges internes et les processus de stimulus-réponse entre l'organisme et son environnement – moyennant l'introduction de délais, comme dans certains modèles de systèmes dynamiques –, il est sans doute méthodologiquement plus fructueux et conceptuellement plus satisfaisant de le caractériser comme tel et d'en faire en quelque sorte une troisième dimension de la temporalité biologique. D'autant que, contrairement aux deux autres dimensions que nous avons décrites, il correspond réellement à une problématique très particulière qu'on ne saurait repérer en physique, en ce qu'il tend à intégrer dans certains facteurs de détermination d'un état de fait actuel des éléments de son propre devenir.

Peut-être est-ce là aussi une des raisons pour lesquelles, comme le souligne Longo, on ne saurait définir une « trajectoire » biologique (des évolutions) comme en physique, c'est-à-dire par l'application d'un principe géodésique qui, parmi toutes les virtualités, en extrait et détermine une seule possible, à savoir la trajectoire critique stable. À l'inverse, il semblerait bien que la « logique » biologique fût tout autre : comme le montre le foisonnement des grands plans d'organisation, ultérieurement sélectionnés par des critères externes – comme Stephen Jay Gould [54] en fait état dans son analyse des organismes trouvés dans le schiste de Burgess –, ce sont dans un premier temps toutes les virtualités qui sont mises au jour, excepté les impossibles. Comme si le critère désormais n'était plus l'émergence du seul possible mais bien l'élimination des quelques impossibles [55] !

Sans chercher à formuler des conclusions prématurées dans le domaine de la biologie, nous pouvons cependant tirer quelques enseignements de la situation épistémologique de l'espace et du temps telle que nous l'avons examinée à la lumière de certains développements récents de la biologie théorique. À l'instar de ce qui se passe en physique, mais dans des registres très distincts, nous trouvons la question de l'articulation entre espaces externes et espaces internes, qui, dans le cas biologique, correspond dans une certaine mesure à celle de l'articulation entre autonomie de l'organisme (la stabilisation homéostatique de ses fonctionnements et de son identité) et hétéronomie (sa dépendance vis-à-vis de l'environnement et la nécessité de s'y

54. GOULD, 1991.

55. C'est dans son texte que Giuseppe Longo souligne plusieurs traits qui font la spécificité du biologique par rapport au physique. Parmi eux, il cite le fait que le biologique, loin de suivre une « trajectoire » évolutive en termes de géodésique, explore au contraire toutes les possibilités compatibles avec son existence de façon à la fois passive (se soumettant aux sélections naturelles) et active (en modifiant son propre environnement, c'est-à-dire aussi les conditions de la sélection naturelle elle-même). La remarque que l'on peut faire est que l'on peut trouver une analogie conceptuelle dans la physique pour le premier aspect (« passif »), mais pour l'instant pas pour le second (« actif »), où viendrait alors se situer le « spécifiquement biologique ». En effet, en théorie quantique des champs, les intégrales de chemin (intégrales de Feynman) constituent des entités (pas encore mathématiquement parfaitement définies, d'ailleurs) visant à prendre en compte (avec les pondérations adéquates) *tous* les chemins menant d'un état initial à un état final (et non pas seulement une trajectoire privilégiée comme géodésique, même si les probabilités autres peuvent être faibles). Un peu comme si, biologiquement parlant, on parvenait à prendre en compte (avec des probabilités à définir) toutes les transformations à partir d'une forme mère (cf. l'explosion du précambrien telle qu'elle apparaît dans la faune de Burgess et telle qu'elle a été conceptualisée par Stephen Jay Gould notamment). En revanche, on remarque que tous ces chemins quantiques dont nous faisons état se situent dans des « espaces » et des modes d'interaction définis à l'avance et qui ne dépendent pas vraiment de l'existence de tel ou tel chemin (même si, à la rigueur, on peut les faire dépendre d'un état final, une fois celui-ci atteint), alors que dans les situations biologiques, par contraste, toute étape évolutive, voire individuelle, modifie les conditions dans lesquelles se produisent les suivantes (plasticité formes-environnement).

adapter) [56]. Nous trouvons également l'articulation entre un espace déterminé physiquement dans sa structure (celui de l'extériorité) et un autre, intérieur, déterminé par la fonctionnalité interne de l'organisme et pourvu de ce fait de morphologies complexes, issues tout à la fois de l'expression de programmes génétiques et de facteurs épigénétiques dans ses rapports avec l'environnement comme dans ses développements propres.

Outre toutes les spécificités spatiales des situations biologiques que nous avons tenté de décrire, l'élément nouveau essentiel qui apparaît en biologie par rapport à la physique tient au fait que la question de cette articulation interne/externe se pose également – et de façon cruciale – à propos du temps et des rapports entre les deux types de temporalité que nous avons évoqués. Une temporalité toute physique et pourvue d'une dimension (au sens cette fois de la dimensionalité des unités, telles des secondes ou des jours) et l'autre plus spécifique, itérative et s'exprimant par des nombres purs et qui semble jouer un rôle quasi constitutif dans la construction de l'objectivité biologique, y compris en servant de bases, en tant que nouveaux invariants, à des classes d'universalité (comme le montre bien l'exemple que nous avons donné des rythmes propres des mammifères).

Nous pourrions peut-être aller un peu plus loin en remarquant l'analogie frappante avec la physique, mais dans une démarche inversée pourrait-on dire, qui s'établit au niveau le plus fondamental de la détermination biologique, celui de la dimensionalité (au sens topologique) de l'élémentaire. Nous avons vu, en effet, qu'en physique, avec la théorie des cordes venant se substituer aux théories de « particules élémentaires », l'élémentarité passait du ponctuel au linéaire, avec toutes les conséquences conceptuelles que cela peut entraîner. En biologie, à l'inverse mais dans un mouvement curieusement convergent, il semble bien que l'élémentarité théorique soit d'une certaine façon, et au niveau le plus bas de l'organisation biologique, en train de passer du volumique (dont nous avons argumenté plus haut la pertinence, voire la nécessité) au linéaire également. En effet, ce qui se révèle, semble-t-il, déterminant dans la programmation génétique fondamentale et la construction organique qui en résulte, est constitué par les séquences linéairement alignées dans un ordre déterminé des bases de l'ADN, constituant les gènes et gouvernant dans une large mesure le développement et le fonctionnement de l'organisme. Bien entendu, il n'est pas question d'oublier les différents niveaux de structure des macromolécules pour les rabattre sur la seule linéarité des séquences, puisque l'on sait que l'activité biologique de ces macromolécules dépend aussi fortement de leurs structures spatiales tertiaires (comme le montre l'activité des prions, par exemple), mais il est néanmoins remarquable que les enchaînements linéaires prennent désormais une telle importance, d'autant que les structures spatiales des repliements sont elles aussi largement dépendantes des séquences constituantes du fait des interactions qui régulent ces repliements.

En tout état de cause, il n'est pas douteux à nos yeux que l'éclairage qu'apporte la biologie aux questions, fondamentales pour elle, de l'espace et du temps et à la façon de les traiter, offre un point de vue épistémologique complémentaire et parfois convergent avec celui que peuvent en suggérer les théories physiques les plus contemporaines. Par-delà les analyses relatives à la perception proprement dite à laquelle on réduit souvent l'apport de la biologie en ces matières, une approche cognitive relative aux statuts de l'espace et du temps, si elle se veut fondée sur les disciplines de sciences de la nature et viser à l'objectivité, ne peut ignorer l'apport de cette composante de biologie théorique.

56. BAILLY, 1998.

II.- ASPECTS GNOSEOLOGIQUES ET DETERMINATIONS MATHEMATIQUES DES UNIVERS DE REPERAGE

Après cet examen de la façon dont les disciplines de science de la nature proposent de traiter de l'espace et du temps et incorporent ces référents dans leurs contenus théoriques propres, il peut être intéressant et instructif de recourir, sur quelques aspects particuliers relatifs à des concepts gnoséologiques associés à ces repérages, à une analyse un peu plus transversale. C'est ce que nous allons tenter d'aborder rapidement, d'une part, à propos de trois couples de concepts qui nous paraissent très importants dans cette optique : celui de *localité/globalité* pour l'espace, celui de *processus/itération* pour le temps (ces deux couples étant largement associés au concept de *causalité*) et celui de *régularité/singularité* pour ce qui est des représentations de référence.

D'autre part, comment ne pas poser la question de savoir si, par delà les déterminations issues des théories physiques et des approches biologiques, il est possible de caractériser d'une façon plus formelle et en rapport avec des déterminations mathématiques et logiques, cette fois, ce qu'il peut en être d'un espace et d'un temps tout formels ? Il s'agirait alors de les appréhender non plus vraiment dans leurs rapports de constitution avec les phénomènes scientifiques, mais précisément en tant que formes abstraites de ces rapports, c'est-à-dire en tant que simples univers de repérage. Abstraites dans les deux acceptions que l'on pourrait donner au terme : celle d'une sorte de processus d'abstractisation à partir de ce que suggère ce que peuvent avoir de commun les traitements théoriques de ces phénomènes et celle, concomitante, d'une sorte de forme fonctionnant alors quasi *a priori* et qui s'impose désormais – à l'issue de ce processus – comme référence nécessaire à l'objectivation elle-même.

II. 1.- Aspects conceptuels

Localité/globalité

Manifestement, lorsque l'on passe des théories physiques de type relativiste, à celles de type quantique, puis critique, puis enfin aux théories biologiques, le couple conceptuel localité/globalité voit l'importance et la pertinence des termes qui le composent se décaler du premier vers le second. En effet, malgré le point de vue globalement interactif du principe de Mach et sa traduction einsteinienne en termes de relativité générale, cette théorie préserve complètement le principe de localité en ce qu'elle s'exprime essentiellement et exhaustivement par des équations aux dérivées partielles. En cela, elle favorise l'interprétation en termes de causalité tout aussi locale et soumise à propagation.

La physique quantique se présente également comme une théorie locale quant aux interactions et à la propagation du vecteur d'état (les équations de Schrödinger, par exemple, ou de Dirac, sont aussi des équations aux dérivées partielles) et répondant à une causalité apparemment du même genre. Mais l'opération de mesure d'une part, les propriétés de non-séparabilité de l'autre interdisent une interprétation locale complète. La causalité classique s'en trouve elle-même affectée en ce sens qu'une mesure conduit à un résultat intrinsèquement probabiliste et que la non-séparabilité rompt avec la représentation associée à la propagation causale des effets [57].

57. On sait que les théories à variables cachées qui visent à surmonter certains de ces aspects considérés comme acausaux sont elles-mêmes non-locales.

Le cas des théories critiques est encore plus net : la non-localité y prend une place importante et ce sous un double aspect. D'une part, du fait que les interactions se font désormais à longue distance, la portée des corrélations devient infinie ; il en résulte que les variations et effets locaux perdent leur pertinence, tant pour l'analyse que pour les mesures, au profit des comportements globaux du système, au point que c'est l'objet lui-même qui s'en trouve redéfini ; d'autre part, ces comportements globaux eux-mêmes se voient gouvernés par des exposants critiques et des lois d'échelle qui n'ont rien de locaux (puisqu'ils dépendent des dimensionalités de l'espace de plongement et du paramètre d'ordre). Il est à noter que, de façon concomitante, la représentation spontanée des règles de la causalité usuelle selon laquelle il existe une commensurabilité simple entre causes et effets (à petites causes petits effets, à grandes causes grands effets) se trouve subvertie (dans les situations critiques à des causes finies peuvent répondre des effets infinis, pouvant même correspondre à des discontinuités des propriétés). De même, le principe de Curie selon lequel la symétrie des causes se retrouve dans la symétrie des effets se trouve remis en question (au moins pour les expériences singulières) du fait des brisures de symétrie qui accompagnent les transitions de phase.

En biologie, enfin, la pertinence de la localité semble se cantonner à la description de processus physico-chimiques sous-jacents, car c'est la définition même de l'objet et de ses fonctionnements qui se fait globale, associée à la non-séparabilité biologique fondamentale du vivant et à la complexité qui le caractérise. Ce sont les niveaux d'organisation qui deviennent déterminants pour la représentation ainsi que les processus de régulation et d'intégration qui les solidarisent en termes de fonctions biologiques. À quoi répond la causalité complexe des hiérarchies enchevêtrées et des effets ago/antagonistes associés. Du coup, la causalité locale peut se trouver remise en cause sans que la causalité globale, que l'on peut associer à ce que l'on désignait comme une « finalité contingente » s'en trouve affectée. Ce qui ouvre la porte à la distinction – qui n'a aucun sens en physique – entre normal et pathologique, puisqu'un fonctionnement « localement » pathologique peut coexister avec le maintien et le fonctionnement globaux de l'organisme dans des conditions où ses caractéristiques vivantes sont conservées.

Processus/itération

Les théories de type relativiste présentent, à travers les métriques qui les caractérisent, une temporalité presque complètement spatialisée. Elles introduisent le concept d'événement comme jalon ponctuel dans cet espace généralisé. Seule la causalité physique – le fait que des interactions ne puissent se propager plus vite que la vitesse de la lumière – ou, d'un point de vue mathématique, le fait que la métrique ne puisse changer de signe, introduit une distinction entre ces dimensions. Conceptuellement parlant, cette distinction tient aussi au fait que, du point de vue des symétries et invariances, le théorème de Noether caractérise la temporalité comme grandeur conjuguée à l'énergie (ou, inversement, l'énergie comme conjuguée au temps) alors que les variables d'espace sont conjuguées aux composantes des moments. Mais pour l'essentiel la théorie, attachée à la covariance, traite le temps comme une variable pratiquement du même genre que les variables d'espace.

Par contraste, en physique quantique, nous l'avons déjà relevé, le temps est traité simplement comme un paramètre. La conjugaison avec l'énergie est préservée (y compris dans les relations d'indétermination de Heisenberg), mais le temps n'apparaît pas comme une observable de la théorie. Par surcroît, il semble bien que certains phénomènes, telle la transition quantique, par exemple, ou même la mesure

proprement dite (malgré la théorie de la décohérence), aient du mal à s'inscrire dans une temporalité bien assignée en terme de durée accessible à l'expérience (il en va de même de l'apparence d'instantanéité associée à la non-séparabilité). De ce fait, la question causale qui, dans l'effectivité physique, est étroitement reliée à celle de l'écoulement temporel s'en trouve directement affectée.

Dans les théories critiques, le temps reprend ses caractéristiques plus classiques, mais il se manifeste sous des aspects phénoménalement assez différents. En effet, outre le caractère événementiel qu'il acquiert lors de la transition proprement dite (dans les transitions de phase), il joue un rôle spécifique et impliqué (par contraste avec son rôle de paramètre) dans la définition de la stabilité, dans la question de l'irréversibilité (temps de récurrence), dans la caractérisation des attracteurs (comportements asymptotiques, notamment lorsqu'ils présentent des géométries fractales – exposants de Lyapounov, etc.) et, bien entendu, lorsque, à l'occasion d'une bifurcation par exemple, il passe d'un statut de repérage ou de condition d'un processus à celui de l'établissement d'un cycle ou d'un rythme et qu'il acquiert ainsi un caractère itératif.

En biologie, enfin, nous avons vu que la temporalité se manifestait sous deux aspects bien distincts : le temps physique externe, du type relaxation, dans le processus stimulus réponse à fonction adaptatrice par rapport à un environnement extérieur, et le temps itératif des nombres purs associé aux horloges biologiques internes à fonction régulatrice des fonctionnements physiologiques. La causalité biologique, à finalité de survie, semble assez étroitement reliée à l'articulation entre ces deux temporalités.

Régularités/singularités

Il est clair que les théories de type relativiste sont dominées par la représentation d'un espace-temps régulier, continu, différentiable dans lequel les singularités (Schwarzschild ou « initiale ») jouent un rôle quasi accidentel qui ne prennent une importance déterminante que dans certains aspects de la cosmologie (trous noirs, big bang).

La situation est déjà différente en physique quantique où la régularité de certains espaces s'associe à des discrétisations pour d'autres et où l'on a même pu envisager des espaces-temps fractals à petite échelle. La dualité conceptuelle régularité/singularité s'est d'ailleurs révélée historiquement particulièrement sensible ainsi qu'en témoigne le vieux débat qui a animé les interprétations de la discipline, débat qui mobilisait les deux pôles de la représentation que constituent les champs et les particules (on a même pu voir la théorie de la double solution tenter d'articuler explicitement ces deux aspects).

L'intérêt théorique des singularités s'accentue évidemment dans les théories critiques où elles s'associent aux complexifications, sans parler de ces produits particuliers des non-linéarités que sont les solitons et leur propagation. De fait, si l'on s'en tient aux phénomènes qu'elles traitent, ces théories sont essentiellement singulières puisque les situations critiques le sont elles-mêmes (apparition de divergences, de discontinuités, de bifurcations, etc.). D'où le rôle prédominant qu'y joue la théorie mathématique des singularités (ou des catastrophes), des mesures singulières, etc., pour modéliser ces comportements et ces situations qui ouvrent à la complexité. Néanmoins, comme nous l'avons remarqué plus haut (p. xxx), il apparaît à l'issue de ces traitements une forme nouvelle de régularité, qui se situe à un niveau plus général de l'analyse : celle corrélée aux lois d'échelle et aux classes d'universalité qui regroupent des systèmes différents mais présentant des comportements singuliers identiques. Par ailleurs, il convient ici de souligner le fait que ces situations critiques n'intéressent en général qu'une extension très étroite, voire une restriction ponctuelle, du paramètre de contrôle qui gouverne la transition autour de sa valeur critique et que, en deçà ou

au-delà de cette zone critique fort étroite, les comportements réguliers redeviennent dominants.

C'est précisément ce dernier aspect qui semble faire contraste avec les situations biologiques. Ces dernières, en effet, peuvent être considérées comme ne pouvant survenir et se maintenir que dans une zone étendue de criticité. La sortie de cette zone équivaut en quelque sorte à la mort de l'organisme qui s'y était dynamiquement installé ; en effet, le biologique s'y réduirait au physico-chimique et renverrait donc à une situation pré- ou postbiotique. Si ce genre d'approche correspond à quelque élément de réalité biologique et si l'on considère l'espace des paramètres de contrôle, tout se passerait comme si le biologique était caractérisé par une zone de distribution dense (et non plus discrète ou même isolée) de points critiques dans cet espace. Ce qui constituerait aussi un élément d'objectivité déterminant une complexification qualitativement accrue. L'homéostasie correspondrait alors à une sorte de stabilité structurelle des trajectoires relatives aux bassins attracteurs des dynamiques associées.

II. 2.- Aspects mathématiques

Si nous quittons maintenant le domaine des traits spécifiques de l'espace et du temps que semblent déterminer les sciences de la nature et les considérations conceptuelles qui peuvent en découler, nous pouvons nous demander s'il n'est pas concevable de franchir un degré dans l'abstraction pour cerner de façon plus formelle ce qu'il en est de ces repères du point de vue de leur détermination mathématico-cognitive, au prix, bien sûr, d'une perte des contenus plus précis qu'ils pouvaient comporter. En effet, dans cette perspective, espace et temps, au sens élargi qu'ont pris ces concepts dans les disciplines de sciences de la nature, en physique contemporaine notamment, ne sont plus considérés alors comme des quantités ou des « objets » que l'on étudie, pas même comme des catégories, mais bien, pour revenir aux considérations philosophiques plus anciennes [58], comme des « formes *a priori* de l'intuition sensible » et comme des conditions de possibilité de toute expérience sensible. Mais, par ailleurs, on peut remarquer que les notions abstraites d'espace et de temps semblent bien renvoyer, au niveau le plus profond de l'analyse formelle que l'on peut en faire, aux structures mathématiques de groupe et de semi-groupe, respectivement [59].

En effet, les propriétés postulées pour l'espace en tant que « lieu » ou « support » des déplacements en général en font le partenaire nécessaire et exemplaire du groupe. De plus, compte tenu des parentés étroites entre structure mathématique de groupe et relation logique d'équivalence [60], nous voyons se constituer une sorte de complexe abstrait qui représente sans doute un des pôles fondamentaux de toute interprétation objective soumise aux démarches de connaissance, à savoir le complexe <espace, structure de groupe, relation d'équivalence>. Parallèlement, les propriétés postulées d'orientation du cours du temps en tant qu'indice de tout changement font fortement penser à la structure abstraite de semi-groupe dont elles semblent reproduire les caractéristiques. Cette structure de semi-groupe pouvant, pour sa part, être mise en

58. KANT, 1986a.

59. BAILLY et LONGO, 2004.

60. Cette parenté apparaît clairement en considérant que les éléments d'un groupe sont équivalents sous la relation « être transformés l'un dans l'autre par les opérations du groupe ». Dans ces conditions, à l'axiomatique de la structure de groupe (transitivité de la loi de composition, existence d'un élément neutre, existence d'un inverse à chaque opération) correspond terme à terme l'axiomatique de la relation d'équivalence (transitivité, réflexivité, symétrie).

rapport avec la relation d'ordre, cela conduit à envisager une seconde sorte de complexe de repérage cognitif, celui de <temps, structure de semi-groupe, relation d'ordre>.

Pour éviter toute confusion, il faut repéter que les espace et temps évoqués dans ces complexes ne font plus vraiment référence à des entités naturelles proprement dites, mais bien plutôt aux cadres conceptuels qui sont censés permettre à toute science de la nature de se manifester, c'est-à-dire à des conditions de possibilité abstraites et non à des actualisations effectives. Cela étant bien précisé, il apparaît, si cette approche est correcte, qu'avec la formation de ces deux pôles renvoyant, notons-le, aux sémantiques respectives de permanence et de changement, de stabilité et d'évolution, d'identité et de différenciation, se trouverait effectivement balisé le champ des conditions de possibilité de toute science de la nature en ce sens que toute phénoménalité de ce type est appelée à se manifester de façon spatio-temporelle.

II. 3.- Discussion

De ce tableau général quoique encore incomplet (notamment dans le domaine des sciences du vivant), il ressort que les différentes théories actuellement en vigueur nous proposent de l'espace et du temps des représentations pas encore vraiment stabilisées et pas encore vraiment clarifiées (même si, en physique, les théories supersymétriques des cordes tendent à unifier les points de vue sous des déterminations communes) : faut-il continuer à distinguer radicalement espace et temps malgré les articulations et mélanges proposés par les théories relativistes ? Faut-il n'en référer qu'à un seul type d'espace malgré les topologies et propriétés variées envisagées dans leurs structures (trou de ver, par exemple) et pour leurs dimensions (compacification, anticommutation, ou encore internalisation – voire fractalisation – de certaines d'entre elles) en physique, espaces environnementaux ou espaces propres de complexification et de fractalisation des formes en biologie ? De même, faut-il s'en tenir à une représentation unique d'un temps paramètre ou le considérer comme observable intrinsèquement irréversible en physique et comment articuler ces temps physiques avec le temps propre itératif de la biologie (sans s'en tenir à la formalisation en termes de bifurcations de Hopf isolées, par exemple, mais en prenant en compte les effets collectifs des syn- et dyschronies correspondantes) ?

Une des raisons de cet état de fait apparemment un peu confus (quoique ces théories variées semblent beaucoup plus proches, dans leurs caractères souvent contre-intuitifs de la réalité objective que ne l'ont jamais été les perceptions spontanées et intuitives) tient sans doute à ce que les concepts mêmes d'espace et de temps restent relativement problématiques d'un point de vue gnoséologique malgré les catégorisations formelles que nous avons nous-mêmes tenté d'introduire plus haut (voir p. xxx). Une des difficultés venant manifestement du fait que désormais en physique (à l'image de ce qui se passe depuis longtemps en biologie) nous devons tenir compte d'une articulation inédite entre espaces-temps externes et espaces-temps internes à l'objet scientifique, pourvus chacun de propriétés communes et en même temps de différences discriminantes. Il est alors frappant de constater que nous sommes reconduits, mais du côté de l'objet cette fois, à une distinction opérée il y a déjà longtemps par les philosophes – et notamment par Kant – du côté du sujet épistémique, entre l'espace comme forme du sens externe et le temps comme forme du sens interne [61]. Une telle distinction du côté de l'objet était inacceptable pour le Kant des *Critiques* du fait que, rompant avec une caractérisation ontologique de l'objet

61. KANT, 1986a.

scientifique, toute internalité lui était déniée et que son repérage était considéré comme totalement externe. Pourtant, vers la fin de sa vie, revenant sur les *Principia* de Newton, il ne pouvait s'empêcher, si l'on en croit *l'Opus postumum* [62], de s'interroger à nouveaux frais sur ce point, relativement à la question de l'énergie, en particulier. Il renouait ce faisant avec certaines des problématiques leibniziennes dont il s'était pourtant largement écarté auparavant et, finalement, il aurait peut-être trouvé dans cette « spatio-temporalisation » interne des objets physiques et biologiques contemporains sinon une réponse au moins une indication pour des investigations nouvelles.

Bien entendu, nous ne pouvons garder sans artificialité, et qui plus est du côté de l'objet, la dichotomie externe/interne correspondant à la distinction entre, respectivement, espace et temps. Néanmoins, et compte tenu des conditions mêmes de la construction de l'objectivité, il ne serait vraisemblablement pas excessif de considérer, en lieu et place des formes de l'intuition sensible du côté du sujet, ce que l'on pourrait appeler des *formes de la manifestation sensible* du côté de l'objet, ces formes pouvant elles-mêmes renvoyer à des concepts d'externalité et d'internalité. En effet, dans le premier cas (l'externalité), on examinerait essentiellement la phénoménalité de la relation entre objets (interactions et mesures correspondantes). Dans le second cas (l'internalité), on étudierait cette fois les contraintes concourant à une phénoménalité de l'identité (ou mieux, pour prendre en compte le mouvement de constitution, de l'identification) de l'objet – sans confondre cette identification avec une individualité problématique comme la non-séparabilité quantique le montre bien.

On remarquera alors que ces distinctions et ces caractérisations conceptuelles sont celles qui structurent de fait la démarche biologique et se révèlent opératoires pratiquement depuis que cette discipline existe, et que l'élément nouveau tient à ce que c'est désormais l'objectivité physique qui n'échappe plus à cette tension épistémique puisqu'elle a maintenant une contrepartie objective dans la théorie avec la distinction entre espaces externes (bases des fibrés) et internes (fibres), dont l'articulation fait partie du corpus théorique. Du coup, ironiquement et par contraste avec certaines tendances épistémologiques qui visent à réduire (conceptuellement, si ce n'est théoriquement) le biologique au physique, c'est du côté du biologique que l'on irait chercher un éclairage conceptuel permettant d'aborder de façon plus compréhensive la phénoménalité physique la plus abstraite !

Puis, franchissant un nouveau pas, dans un second temps de l'analyse, du fait que la relation s'inscrit nécessairement dans une « étendue » (toute spatio-temporelle qu'elle puisse être) et que l'identification s'inscrit dans une permanence – une durée – nécessaire pour stabiliser ne serait-ce que fugacement cette identité, il ne serait pas interdit de parler en un sens rénové d'un {espace} (avec des accolades pour éviter toute confusion) correspondant à cette externalité relationnelle spatio-temporelle et d'une {temporalité} associée à cette internalité identitaire durable.

Nous serions ainsi conviés à une sorte de « renormalisation » conceptuelle. Pour la physique, nous verrions dans les espaces-temps externes, une forme de la manifestation {espace/relation}, alors que la forme de la manifestation {temps/identité} correspondante serait à trouver dans les fibres en tant qu'espaces internes ; du coup, l'articulation des deux (par l'introduction de la supersymétrie et le superespace) engendrerait ce que l'on appellerait un {espace-temps} au sens renouvelé, qui prendrait en compte l'ensemble des déterminations de l'objet : relationnelles et identitaires ainsi que leur articulation. Tandis que, pour la biologie, ce seraient les espaces-temps physiques qui correspondraient à la forme de la manifestation {espace/relation},

62. KANT, 1986b.

éminemment relationnelle en effet, et les morphologies et rythmes propres qui correspondraient à la forme de la manifestation {temps/identité}, associée à l'identité de l'organisme à son fonctionnement et à sa durée. L'articulation entre ces deux formes de la manifestation sensible en biologie serait double : on en trouverait une première réalisation avec la morphogenèse, au cours de l'embryogenèse notamment, et on en trouverait une autre dans la vie organique proprement dite en rapport avec son environnement. Bien entendu, toutes ces considérations demeurent fortement spéculatives et demanderaient à être approfondies pour en confirmer ou en infirmer la pertinence.

D'autre part, et comme nous l'avons déjà vu antérieurement (voir p. xxx), il est clair que les statuts conférés à l'espace et au temps n'ont pas seulement des portées théoriques et descriptionnelles. Comme toute contribution à la construction d'objectivité, ils ont une portée gnoséologique et épistémologique et, en ce qui les concerne, à un niveau tellement profond qu'ils ont également des effets sur les statuts de catégories aussi fondamentales que celle de causalité, par exemple, ou de concepts aussi importants que celui de localité. C'est sans doute que ces catégories et ces concepts sont en réalité plus ou moins dérivés des représentations intuitives ou théoriques que l'on se fait de l'espace et du temps, puisque c'est par rapport à ces dimensions que l'on est amené à les élaborer comme facteurs de rationalité explicative. Dans la mesure où la formalisation mathématique confère aux univers de repérage un statut de plus en plus objectif mais en même temps de plus en plus contre-intuitif, ce sont aussi ces catégories et ces concepts dérivés qui se trouvent de plus en plus objectivement déterminés mais aussi de façon de plus en plus contre-intuitive. Nous en arrivons à un stade où, en même temps que se développent les formalismes mathématiques (ou diagrammatiques, ou symboliques), s'élaborent ce que l'on pourrait appeler des intuitions structurelles, nouvelles intuitions quasiment inhérentes à la générativité de ces formalismes mais aussi de moins en moins empiriques. Le problème qui se pose alors est celui de l'articulation rationnelle entre ces nouveaux types d'intuition et les résultats événementiels qui se présentent dans l'univers usuel des phénomènes naturels (de la physique ou de la biologie). Pour reprendre la vieille distinction des débuts de l'herméneutique, si l'explication progresse, la compréhension a du mal à suivre (ce qui faisait dire à René Thom, dans une de ces boutades qu'il affectionnait, que la mécanique quantique était inintelligible et aussi, dans un ordre d'idée pas si éloigné, que tout ce qui était rigoureux était insignifiant). Il est vrai que la question se fait de plus en plus pressante et difficile : quel rapport peut-il subsister entre ces espaces et ces temps de plus en plus abstraits, formellement déterminés et théoriquement construits, et ceux, tout empiriques et immédiats, qui ont présidé aux développements de nos propres capacités cognitives et ont régulé ces dernières ?

La permanence du vocabulaire, si elle constitue un indice de proximité, ne suffit certainement pas à justifier les parentés et c'est sans doute à l'existence de schèmes cognitifs profonds et invariants sous les transformations des représentations mentales, qu'il faut recourir. Nous avons tenté, avec l'introduction des complexes gnoséologiques que nous avons proposés (<espace, groupe, équivalence> et <temps, semigroupe, ordre>) d'aborder cette question très difficile, mais il est patent que cette approche demeure elle aussi très largement insuffisante.

Francis BAILLY
(mars 2003).

LISTE DES REFERENCES

AMARI (Shun-ichi) et NAGAOKA (Hirochi), 2000, *Methods of information geometry*, trad. par Daishi HARADA, Providence, RI/Oxford, American Mathematical Society (AMS)/Oxford University Press (AMS Translations of Mathematics Monographs, vol. CXCI).

ASPERTI (Andrea) et LONGO (Giuseppe), 1991, *Categories, types and structures*, Cambridge, MA, The Massachussets Institute of Technology Press.

AUGER (Pierre), BARDOU (Alain) et COULOMBE (Alain), 1989, « Simulation de différents mécanismes électrophysiologiques de la fibrillation ventriculaire », *in* BOULIGAND, dir., 1989, p. 197-210.

BABLOYANZ (Agnessa) et DESTEXHE (Alain), 1993, « Non linear analysis and modelling of cortical activity », *in* DEMONGEOT (Jacques) et CAPASSO (Vincenzo), éd., *Mathematics applied to biology and medicine*, Winnipeg, Canada, Wuerz, p. 35-48.

BAILLY (Francis), 1991, « L'anneau des disciplines », *Revue internationale de systémique*, vol. V, *3*, p. 233-397.

BAILLY (F.), 1998, « Sur les concepts d'autonomie et d'hétéronomie dans les disciplines scientifiques et leur extension métaphorique », *Revue internationale de systémique*, vol. XII, *3*, p. 253-284.

BAILLY (F.), 2003, « Invariances, symétries et brisures de symétries comme principes formels d'une possible philosophie moderne de la nature », *in* BOI (Luciano), éd., *New interactions of mathematics with natural sciences*, Berlin-Heidelberg, Springer.

BAILLY (Francis), GAILL (Françoise) et MOSSERI (Rémy), 1989, « La fractalité en biologie. Ses relations avec les notions de fonction et d'organisation », *in* BOULIGAND, dir., 1989, p. 75-93.

BAILLY (Francis) et LONGO (Giuseppe), 2003, « Incomplétude et incertitude en mathématiques et en physique », dans un volume en mémoire de Gilles Châtelet, Paris, à paraître.

BAILLY (Francis) et LONGO (Giuseppe), 2004 "Causalites et symetries dans les sciences de la nature. Le continu et le discret mathematiques" *en préparation.*

BAILLY (Francis) et MOSSERI (Rémy), 1999, « Symétrie », *in* LECOURT (Dominique), dir., *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Paris, Presses universitaires de France (Grands dictionnaires), p. xxx-xxx.

BARWISE (Jon) et MOSS (Lawrence), 1996, *Vicious circles. On the mathematics of non-wellfounded phenomena*, Stanford, CA, Stanford University Press (CSLI Lecture-Notes, *060*).

BITBOL (Michel), 2000, *Physique et philosophie de l'esprit*, Paris, Flammarion.

BOHM (David), 1987, *La Plénitude de l'univers*, trad. de l'anglais Tchalaï UNGER, Paris, Le Rocher (L'Esprit et la matière).

BOI (Luciano), 1995, *Le Problème mathématique de l'espace*, Berlin-Heidelberg, Springer.

BOULIGAND (Yves), dir., 1989, *Biologie théorique*, VII^{e} séminaire de la Société de biologie théorique, Solignac, 1987, Paris, Éd. du CNRS.

BOULIGAND (Y.), 1989a, « L'autosimilitude brisée », *in* BOULIGAND, dir., 1989, p. 143-168.

CHALINE (Jean), 1999, *Les Horloges du vivant. Un nouveau stade de la théorie de l'évolution ?*, Paris, Hachette Littératures.

CONNES (Alain), 1990, *Géométrie non-commutative*, Paris, InterEditions.

D'ARCY THOMPSON (Wentworth), 1961, *On growth and form*, Cambridge, Cambridge University Press.

DEMONGEOT (Jacques), ESTEVE (François) et PACHOT (Pascal), 1989, « Chaos et bruit dans les systèmes dynamiques biologiques », *in* BOULIGAND, dir., 1989, p. 211-225.

DORATO (Mauro), 1995, *Time and reality*, Bologne, CLUEB.

EDELMAN (Gerald), 1987, *Neural Darwinism*, New York, Basic Books.

FEFERMAN (Solomon), 1995, « Penrose Goedelian argument », manuscript, Dept. of Mathematics, Stanford, CA, Stanford University.
GIRARD (Jean-Yves), LAFONT (Yves) et TAYLOR (Paul), 1989, *Proofs and types*, Cambridge, Cambridge University Press.
GLASS (Leon) et MACKEY (Michael), 1988, *From clocks to chaos. The rhythms of life*, Princeton, NJ, Princeton University Press.
GOULD (Stephen Jay), 1991, *La Vie est belle. Les surprises de l'évolution*, trad. de l'américain Marcel BLANC, Paris, Seuil (Science ouverte).
GREEN (Michael), SCHWARZ (John) et WITTEN (Edward), 1988, *Superstring theory*, Cambridge, Cambridge University Press.
HAKEN (Herman), 1978, *Synergetics*, Berlin-Heidelberg, Springer.
HERTZ (John), KROGH (Anders) et PALMER (Richard), 1991, *Introduction to the theory of neural computation*, Reading, MA, Addison-Wesley.
HUSSERL (Edmund), 1962, *L'Origine de la géométrie*, manuscrit non publié de 1933, ici trad. et introd. de Jacques DERRIDA, Paris, Presses universitaires de France (Épiméthée).
JEAN (Roger), 1994, *Phyllotaxis. A systemic study in plant morphogenesis*, Cambridge, Cambridge University Press.
KAKU (Michio), 1994, *Hyperspace*, Oxford, Oxford University Press.
KANT (Emmanuel), 1986a, *Critique de la raison pure*, 1re éd. Berlin, 1781, ici Paris, Presses universitaires de France.
KANT (E.), 1986b, *Opus postumum. Passage des principes métaphysiques de la science de la nature à la physique*, éd. et trad. de l'allemand François MARTY, Paris, Presses universitaires de France (Épiméthée).
KAUFFMAN (Stuart), 1993, *The Origins of order*, Oxford, Oxford University Press.
LASSEGUE (Jean), 1998, *Alan Turing*, Paris, Les Belles Lettres.
LEBOWITZ (Joel), 1999, « Microscopic origins of irreversible macroscopic behavior », *Physica A*, vol. CCLXIII, p. 516-527.
LICHNEROWICZ (André), 1955, *Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme*, Paris, Masson.
LONGO (Giuseppe), 1999, « The mathematical continuum, from intuition to logic », *in* PETITOT, VARELA, PACHOUD et ROY, 1999, p. 401-428.
LONGO (G.), 1999a, « Mathematical intelligence, infinity and machines. Beyond the Gödelitis », *Journal of Consciousness Studies*, special issue on Cognition, vol. VI, *11-12*, p. 191-214.
LONGO (G.), 2000, « Cercles vicieux, mathématiques et formalisations logiques », *Mathématiques, informatique et sciences humaines*, *152*, p. 5-26.
LONGO (G.), 2002, « On the proofs of some formally unprovable propositions and prototype proofs in type theory », Invited lecture, *Types for proofs and programs*, Durham, G.-B., déc. 2000, ici repr. *in* CALLAGHAN *et al*., éd., *Lecture notes in computer science*, Berlin-Heidelberg, Springer, vol. MMCCLXXVII, p. 160-180.
LONGO (G.), 2002a, « Laplace, Turing et la géométrie impossible du jeu de l'imitation : aléas, déterminisme et programmes dans le "Test de Turing" », *Intellectica*, *35*, 2002/2, p. 131-162.
LONGO (G.), 2003, « The reasonable effectiveness of mathematics and its cognitive roots », *in* BOI (Luciano), éd., *New interactions of mathematics with natural sciences and humanities*, Berlin-New York, Springer.
LONGO (G.), 2003a, « Space and time in the foundations of mathematics, or some challenges in the interactions with other sciences », Invited lecture, First American Mathematical Society/SMF meeting, Lyon, juil. 2001 (à paraître en français dans *Intellectica*, 2003, n. 36-37).
MANDELBROT (Benoît), 1982, *The Fractal Geometry of nature*, New York, NY, W. H. Freeman.
NICOLIS (Grégoire), 1986, « Dissipative systems », *Reports on Progress in Physics.,* vol. XLIX, *8*, p. 873-949.

NICOLIS (Grégoire) et PRIGOGINE (Ilya), 1989, *À la rencontre du complexe*, Paris, Presses universitaires de France.
NOVELLO (Mario), 2001, *Le Cercle du temps*, Paris, Atlantisciences.
PACHOUD (Bernard), 1999, « The teleological dimension of perceptual and motor intentionality », *in* PETITOT, VARELA, PACHOUD et ROY, éd., 1999, p. 253-285.
PAURI (Massimo), 1999, « I rivelatori del tempo », preprint, dipartimento di Fisica, università di Parma.
PENROSE (Roger), 1994, *Shadows of mind*, Oxford, Oxford University Press, 1994.
PETERS (Robert), 1983, *The Ecological Implication of body size*, Cambridge, Cambridge University Press.
PETITOT (Jean), VARELA (Francisco), PACHOUD (Bernard) et ROY (Jean-Michel), éd., 1999, *Naturalizing phenomenology. Issues in comtemporary phenomenology and cognitive sciences*, Stanford, CA, Stanford University Press.
PROCHIANTZ (Alain), 1997, *Les Anatomies de la pensée*, Paris, Odile Jacob.
REINBERG (Alain), 1989, *Les Rythmes biologiques*, Paris, Presses universitaires de France.
RIEMANN (Bernhard), 1854, « On the hypothesis which lie at the basis of geometry », trad. angl. William CLIFFORD, *Nature*, 1873, trad. ital. et comment. Roberto PETTOELLO, Milan, Boringhieri, 1999.
ROGERS (Hartley), 1967, *Theory of recursive functions and effective computability*, New York, NY, McGraw-Hill.
SCHMIDT-NIELSEN (Knut), 1984, *Scaling*, Cambridge, Cambridge University Press.
TAZZIOLI (Rossana), 2000, « Riemann Bernhard. Alla ricerca della geometria della natura », *Le Scienze*, Monografia n° 14, numero speciale, supplemento a *Le Scienze*, *380*.
THOM (René), 1972, *Stabilité structurelle et morphogenèse. Essai de théorie générale des modèles*, New York, NY, Benjamin (Mathematical Physics Monograph Series).
THOM (R.), 1980, *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, Paris, Christian Bourgois.
TURING (Alan M.), 1950, « Computing machinery and intelligence », *Mind*, vol. LIX, *236*, p. 433-471, ici repr. *in* TURING (Alan Mathison) et GIRARD (Jean-Yves), *La Machine de Turing*, trad. de l'anglais Julien BASCH et Patrice BLANCHARD, Paris, Seuil (Sources du savoir, *248*), 1995.
VARELA (Francisco J.), 1989, *Autonomie et connaissance. Essai sur le vivant*, trad. de l'américain Paul BOURGINE et Paul DUMOUCHEL, Paris, Seuil (La Couleur des idées).
VARELA (F. J.), 1999, « The specious present. A neurophenomenology of time consciousness », *in* PETITOT, VARELA, PACHOUD et ROY, 1999, p. 266-316.
VIDAL (Christian) et LEMARCHAND (Hervé), 1988, *La Réaction créatrice. Dynamique des systèmes chimiques*, préf. Pierre-Gilles DE GENNES, Paris, Hermann (Enseignement des sciences, *36*).
WEST (Geoffrey), BROWN (James) et ENQUIST (Brian), 1997, « A general model for the origin of allometric scaling laws in biology », *Science*, CCLXXVI, p. 122-126.

(Des versions préliminaires ou revues des articles dont Longo est auteur ou coauteur sont *« downloadable »* de http://www.di.ens.fr/users/longo.)