

La constitution des objectivités dans les sciences de la nature ; compte-rendu de *Mathématiques et sciences de la nature ; la singularité physique du vivant*, par Francis Bailly et Giuseppe Longo, collection « Vision des sciences », Hermann, Paris, 2006, 284 p., ISBN 2 7056 6630 3, 27 €. ¹

1. Une nouvelle donne épistémologique : l'inaccessible et le construit (autour du chapitre 1).....	4
11. L'inaccessible et l'approfondissement du statut scientifique de la biologie.....	5
12. La constructivité des concepts et la question de la nature des objets en biologie	7
2. Exploration des résultats d'incomplétude en mathématiques et en physique (autour du chapitre 2).....	8
21. Les conséquences épistémologiques des résultats d'incomplétude en mathématique et en physique	9
211. Le cas des mathématiques	9
212. Le cas de la physique quantique	10
213. Le cas de la physique de type critique.....	12
22. Les conséquences cognitives des résultats d'incomplétude en mathématiques et en physique.....	12
3. De la constitution de l'objectivité mathématico-physique à sa transposition possible en biologie (autour des chapitres 3, 4 et 5).....	14
31. Les deux régimes épistémologiques dans les sciences de la nature : déterminisme prédictif et déterminisme non-prédictif	15
32. L'espace-temps en physique et en biologie.....	16
321. L'espace-temps dans les trois théories physiques contemporaines	16
322. Les trois formes de l'espace-temps en biologie.....	17
323. Principes transcendants de l'espace-temps en biologie	20
33. La question de l'optimalité en physique et en biologie	22
331. Invariants diachroniques : analogie et homologie dans l'évolution des espèces	23
332. Invariants synchroniques : invariance d'échelle	23
34. Constitution physique, simulation informatique et finalité biologique	24
341. Causalité et Détermination comme principes constitutifs en physique.....	25

¹ Merci à Clarisse Herrenschildt, Giuseppe Longo et John Stewart pour leurs remarques et leurs suggestions.

342. L'informatique comme physique artificielle.....	27
343. La spécificité du vivant : la finalité contingente.....	28
4. Le vivant comme criticité étendue (autour du chapitre 6).....	30
5. Conclusion (autour du chapitre 7).....	31

Le livre de F. Bailly et G. Longo cherche à ouvrir de nouvelles pistes de recherche en biologie théorique en proposant de nouveaux principes d'intelligibilité propres aux phénomènes biologiques. Cette enquête passe, pour les auteurs, par un vaste examen de nature épistémologique sur les rapports que doit entretenir la biologie avec les mathématiques, l'informatique et la physique. Se situant dans la lignée de physiciens tels que Schrödinger qui, en 1944, se lança dans une enquête de nature biologique sur ce qui allait devenir la notion d'information génétique, les auteurs considèrent qu'il est nécessaire, pour proposer de nouveaux modes d'intelligibilité pour la biologie, de préciser les liens qui l'unissent aux autres sciences de la nature ainsi qu'aux mathématiques et à l'informatique. L'éclaircissement de ces rapports aura non seulement pour conséquence de faire accéder le lecteur à un point de vue original sur ce qui unit fondamentalement mathématiques, informatique et sciences de la nature mais aussi de lui faire percevoir que cette épistémologie théorique participe d'un mouvement de grande ampleur qui vise à en finir avec un modèle étroitement réductionniste de la cognition naturalisée, que les auteurs jugent complètement dépassé du point de vue même des sciences de la nature.

Il faut, pour bien comprendre l'intention des auteurs, partir du fond argumentatif qui charpente le cadre épistémologique de l'ouvrage : la distinction entre les *principes de construction* et les *principes de preuve*. Ces deux types de principe sont en fait des *phases* dans un processus unitaire et c'est la raison pour laquelle ils permettent de rendre compte de deux points épistémologiques capitaux qui semblent, au premier abord, aller en sens opposé : d'une part, le fait qu'il y a, en mathématique et en physique, de l'*inaccessible* et que cet inaccessible permet de *circonscrire les domaines phénoménaux* qui leur sont propres et d'autre part, le fait que la réalité mathématique et physique relève d'une *construction* théorique au moyen d'outils développés historiquement dans l'interaction intersubjective. Que la réalité mathématique et physique échappe à *la fois* à une complète maîtrise tout en relevant d'une construction opérée par les sujets n'est qu'apparemment paradoxal, dans la mesure où mathématiques et physique sont affaire de *points de vue partiels sur un monde à construire*.

Il est en tout cas possible de relire les débats, aujourd'hui largement dépassés, entre logicisme, formalisme et intuitionnisme sur le fondement des mathématiques d'une part et ceux entre l'empirisme radical et le positivisme en physique d'autre part comme autant de choix théoriques visant à *rabattre* les principes de construction sur les principes de preuve. Du point de vue du fondement des mathématiques, le logicisme et le formalisme ont partagé la croyance selon laquelle il était possible d'*identifier* les principes de construction aux principes de preuve : les principes logico-formels étaient censés pouvoir décrire, et même décrire exhaustivement, les grands principes gouvernant la construction des structures mathématiques. Du point de vue de la physique, le positivisme et l'empirisme radical ont partagé la croyance selon laquelle il était possible de *faire l'économie* de la nature interprétative des principes de construction par rapport aux principes de preuve, identifiés à la simple factualité physique. Dans les deux cas, c'est au prix d'une *rupture dans la circularité entre les deux phases du processus* de connaissance que ces choix théoriques ont été accomplis et qu'il convient maintenant de les remettre en question.

Pour ce qui est de la biologie, c'est aussi dans la coexistence, apparemment paradoxale, entre construction et preuve que se joue, selon les auteurs, son statut *théorique* parce que c'est à partir d'elle qu'il devient possible de préciser le domaine phénoménal qui lui revient en propre et, ce faisant, la place que la biologie occupe par rapport aux autres sciences de la nature. Ainsi, la non-appartenance institutionnelle des auteurs à la biologie peut certes avoir, aux yeux de certains, l'inconvénient de ne pas leur permettre d'y produire des résultats positifs, elle a néanmoins l'immense avantage méthodologique de permettre d'y promouvoir un cadre interprétatif dans lequel on peut espérer que les distinctions épistémologiques élaborées pour les mathématiques et la physique pourront, une fois introduites, y conserver de leur pertinence.

Il y a donc, dans l'ouvrage, un programme de recherche que les auteurs vont essayer de défendre en plongeant progressivement dans le champ de la biologie ce qui fait l'essence de la parenté théorique propre aux mathématiques et à la physique et qui, selon eux, devrait être également partagé par la biologie, tout en préservant son autonomie théorique. D'où la structure du livre, distribuée en quatre grands moments : (i) nouvelle donne épistémologique (chapitre 1) (ii) exploration des résultats négatifs en mathématiques et en physique (chapitre 2) ; (iii) esquisse d'une transposition des grands principes de la physique (espace-temps ; moindre action, symétries) vers le champ biologique par un jeu de différenciations et dualités conceptuelles (chapitres 3, 4 et 5) ; (iv) approche de la criticité du vivant comme phénomène limite (chapitres 6 et 7).

1. Une nouvelle donne épistémologique : l'inaccessible et le construit (autour du chapitre 1)

Il faut donc commencer par insister sur la distinction épistémologique première entre principes de construction et principes de preuve, véritable cheville ouvrière du cadre épistémologique de l'ouvrage. Les principes de construction – comme celui du successeur, du passage à la limite ou de l'ordonnement discret dans l'espace engendrant le bon ordre –, ancrés dans le bagage cognitif des sujets et peut-être même, à un degré moindre, dans celui d'autres espèces dépourvues de systèmes symboliques (p. 87), rendent compte de la constitution de *structures ayant un sens*, que l'on rencontre aussi bien en mathématiques qu'en physique : c'est ce qui explique le *caractère réciproque* des échanges et des emprunts théoriques entre les deux disciplines, même si les mathématiques jouent également un rôle constitutif pour la physique. Deux exemples peuvent éclairer la nature de cet échange réciproque. Dans la direction allant des mathématiques vers la physique, les auteurs notent que certains concepts mathématiques tels que l'*infini actuel* « joue un rôle constitutif dans la théorisation des phénomènes » (p. 97) en physique, par exemple quand il s'agit de décrire l'irréversibilité des phénomènes thermodynamiques. Dans la direction allant de la physique aux mathématiques², les auteurs insistent par exemple sur le mode de pensée essentiellement physique rendant possible l'élaboration mathématique du concept de *variété*, indispensable à la description des phénomènes relativistes : ainsi de Riemann dont l'œuvre « vise à unifier les différents champs physiques (gravitation et électromagnétisme) par la structure géométrique de l'espace » (p. 34). Les principes de preuve, quant à eux, servent à justifier les modalités de saisie des objets construits et varient entre les deux disciplines : alors qu'ils sont de nature logico-formelle dans le cas mathématique, ils relèvent de la mesure *via* l'expérimentation dans le cas de la physique.

La distinction entre principe de construction et principe de preuve permet ainsi d'établir d'une part une *communauté de principes* entre mathématiques et physique et d'autre part une *préséance cognitive* des principes de construction sur les principes de preuve³ qui se

² Les transferts de la physique vers les mathématiques sont nombreux : fonction de Dirac, intégrale de chemin de Feynman, algèbres des théories quantiques ; autant de théories physiques dont le statut mathématique demande à être explicité. (cf. p. 44 note 11).

³ La thèse forte que défendent les auteurs est que « le problème de la constitution des structures [...] est un problème qui est strictement lié à la structuration du monde physique et à son objectivité » (p. 41).

traduit par une *dépendance épistémologique* des principes de preuve à l'égard des principes de construction, puisque les principes de preuve se nourrissent des structures élaborées à partir des principes de construction⁴. Comment envisager, dans ce cadre épistémologique, le cas de la biologie ? Il faut commencer par étudier, pour cette discipline, la façon dont se situe les deux caractéristiques dégagées dans les cas mathématiques et physique : l'inaccessible et le construit.

11. L'inaccessible et l'approfondissement du statut scientifique de la biologie

Les auteurs montrent qu'il est possible d'interpréter les grands résultats négatifs du siècle dernier en physique et en mathématiques comme un *décalage* entre principe de construction et principe de preuve : dans les deux disciplines, se trouve mise à mal l'idée fondamentale du déterminisme classique selon laquelle tout *événement* dans un système physique ou dans un système formel devrait être *décidable dans l'avenir*. Cette idée avait été défendue de façon emblématique par Laplace en physique et par Hilbert dans sa reconstruction axiomatique des fondements des mathématiques. Or, du point de vue de la physique, Poincaré a établi dès la fin du dix-neuvième siècle – et ce, contrairement au modèle laplacien originellement élaboré pour le cas de la mécanique céleste mais généralisé par la suite à toute la physique –, le caractère non-prédictible de certaines dynamiques physiques pourtant *formellement déterminées* par des équations : dès que se fait jour une "sensibilité aux conditions initiales", comme pour un système gravitationnel de trois corps ou plus, les limites, de principe, de la mesure physique empêchent toute prévision au-delà d'un certain temps. Du point de vue des mathématiques, l'acte de naissance de la logique moderne peut être daté du moment où Gödel démontra qu'il n'était pas possible de rabattre toutes les structures porteuses de sens mathématique sur des arrangements logico-formels – autrement dit, les principes de construction sur les principes de preuve –, comme l'espérait initialement Hilbert. Dans les deux cas, on assiste à un grand retour des *contraintes géométriques* au cœur de ce qui fait la notion même de détermination : en physique, c'est la structure locale de la géométrie de l'espace-temps qui permet d'approcher le caractère globalement aléatoire des trajectoires de l'évolution d'un système un tant soit peu complexe et en mathématique, comme les auteurs y insistent, c'est l'intervention de jugements géométriques dépassant le

⁴ C'est une autre thèse forte des auteurs que de souligner la nécessité aujourd'hui de réintroduire des procédures de construction dans ce qui fut encore naguère considéré comme l'apanage exclusif des principes de preuve (p. 66)., par exemple dans le champ de la théorie de la démonstration avec les travaux récents en logique linéaire.

cadre formel qui permet de mettre au jour les limites internes à la prédictibilité dans le cadre axiomatique. Ainsi la profonde mutation du paradigme déterministe au début du vingtième siècle, pensable à partir de la différence entre principes de construction et principes de preuve, devient-elle plus claire quand on observe conjointement les cas de la physique et des mathématiques et qu'on y reconnaît le rôle sous-jacent qu'y joue la géométrie : se dessine alors une analogie entre une première phase du paradigme déterministe, celle du déterminisme *prédictif*, représentée par les travaux emblématiques de Laplace en physique et de Hilbert en mathématique et une deuxième phase, celle du déterminisme *non-prédictif*, représentée par ceux de Poincaré en physique et de Gödel en mathématique. Où se situe alors le cas de la biologie dans cette analogie ?

La réponse à cette question passe par une interrogation portant sur le problème, lui aussi géométrique, de l'*individuation des formes*, si capital en biologie. De ce point de vue, le parcours d'un Turing apparaît comme exemplaire : après avoir contribué, dans le cadre axiomatique, à dévoiler les limites internes du déterminisme prédictif, il a, dans le cadre physique, *à la fois* poussé à l'extrême le déterminisme prédictif en incarnant dans le monde physique globalement non-prédictif une machine entièrement prédictive – l'ordinateur –, et proposé, dans le cadre du déterminisme non-prédictif, un modèle chimique rendant compte de l'émergence de formes, individuées à partir d'une brisure de symétrie dans un substrat physique d'abord indifférencié. L'exemple de ce parcours permet aux auteurs de mettre l'accent sur le point crucial qui distingue, selon eux, le cas de la biologie de celui des mathématiques et de la physique : la constitution d'un objet en objet proprement biologique passe par la reconnaissance du fait que la dynamique du processus biologique implique non seulement la détermination de la façon dont évoluent ses observables au sein d'un même espace de repérage mais implique aussi de *changer les observables en changeant d'espace de repérage de façon imprédictible au fur et à mesure de l'individuation de la forme*, méthode totalement inédite du point de vue de ce qui est développé ailleurs dans les sciences de la nature puisqu'il implique l'usage d'un principe de téléonomie. Les auteurs rappellent un exemple donné par Gould dans lequel la mâchoire de certains reptiles deviendra, sans aucune prédictibilité possible, l'oreille interne des oiseaux quelques millions d'années plus tard (p. 126) : l'apparition d'un organe si fondamental change les observables mêmes de l'écosystème.

La *parenté géométrique* entre les mathématiques, la physique et la biologie dans le cadre du déterminisme non-prédictif, tout en posant des problèmes tout à fait spécifiques à chacune d'entre elles dans la mesure où elles font intervenir des principes idiosyncrasiques

corrobore donc bien la *légitimité du transfert à la biologie* du cadre interprétatif construit par les auteurs sur la distinction entre principes de construction et principes de preuve en mathématiques et en physique. Cependant, pour concevoir une certaine communauté dans les principes de construction, il est nécessaire de concevoir une réciprocité des échanges et donc un certain type de transfert de la biologie vers les autres sciences de la nature : comment en concevoir les modalités ?

12. La constructivité des concepts et la question de la nature des objets en biologie

Il est indéniable que la biologie possède des principes de construction propres, comme le principe de téléonomie, et qu'il y ait là, au premier abord, une source importante de difficulté théorique du point de vue des rapports qui régissent mathématiques, physique et biologie. Mais, correctement interprétée, cette difficulté révèle en fait que si les mathématiques et la physique jouent bien un rôle *constitutif* pour la biologie en lui fournissant des modèles, celle-ci joue, à leur égard, un rôle *réflexif*. Il y a donc bien un échange *réciproque* entre les trois disciplines, même si cet échange ne se situe pas au même niveau gnoséologique que celui qui existe entre mathématiques et physique. En effet, la biologie *modifie en retour* le regard qu'il convient de porter sur le statut des concepts mathématiques et physiques eux-mêmes. C'est en particulier à propos de l'épineuse question de l'apparition de nouveaux concepts mathématiques et physiques au cours de l'histoire humaine que la référence à la biologie permet d'aller de l'avant. Car cette apparition se comprend mieux à partir d'un processus d'*individuation progressive de formes* sur le modèle de ce qui se produit en biologie qu'en supposant un « monde » où tous les concepts, mathématiques et physiques, seraient déjà donnés d'avance. On comprend dès lors que les auteurs puissent, par exemple, interpréter les objets mathématiques comme des « collection d'«objets» [...] dont ce qui compte est *l'individuation des transformations qui les préservent* [...]. » (p. 35, c'est moi qui souligne). Ce type d'interprétation des objets mathématiques et physiques qui emprunte à la biologie son mode de réflexion modifie en profondeur la nature du débat fondationnel concernant le statut de *l'objectivité*.

En effet, celui-ci a jusqu'à présent porté, dans la tradition issue du logicisme et du formalisme, sur la façon de concevoir un objet *déjà constitué*, préalablement à toute intervention humaine, et qualifié de ce fait de « transcendant », y compris en mathématiques, où les objets, tout idéaux qu'ils soient, sont crédités de toutes les propriétés des objets perçus. Or, pour les auteurs, « il n'y a pas de transcendance qui ne soit le résultat de parcours constitutifs » (p. 30). Aussi, outre le fait que ce que l'on entend généralement par « objet » ne

dépasse guère la description élémentaire d'exemplaires « d'objets manufacturés de taille moyenne » (p. 24) – comme si l'objet quantique n'avait pas radicalement transformé depuis un siècle ce qu'il faut entendre par objet –, les auteurs font remarquer que les propriétés accordées aux objets ne sont pas des *faits bruts* déjà entièrement donnés avant l'intervention de sujets connaissant : seules nos capacités linguistiques, développées dans l'interaction avec le milieu et avec les autres, sont susceptibles de nous faire constituer en « objet » ayant alors pour nous un *intérêt vital* ce qui n'est encore que de vagues et capricieux indices provenant de la « nature ». Ainsi la notion d'objectivité est-elle bien *unique* au sein des sciences de la nature mais, du fait qu'elle consiste en *l'explicitation des systèmes de repérage* des objets (p. 38), implique-t-elle une *diversité* dans la justification, dont les principes de preuve témoignent. Le cas de la biologie se rapproche de la physique dans la mesure où la justification passe par le recours à l'expérience et à l'observation empirique. Elle s'en distingue cependant dans la mesure où il faut introduire une différence entre *l'in vitro* assimilable à du physico-chimique et *l'in vivo* régulé par des fonctions biologiques (p. 6).

La conséquence épistémologique majeure est que les régimes de justification de l'objectivité propres aux mathématiques et à la physique *ne peuvent plus être tenus pour absolus*. Les auteurs parviennent ainsi à *relativiser* la place accordée aux justifications mathématiques et physiques de leurs régimes propres d'objectivité, tout en évitant le *relativisme* qui consisterait d'une part à leur dénier toute objectivité et d'autre part à faire une place à la biologie au sein des principes de construction, essentiellement géométriques, des sciences de la nature.

2. Exploration des résultats d'incomplétude en mathématiques et en physique (autour du chapitre 2)

Le but de ce chapitre est de montrer la *persistance du sens* dans tout usage des principes de preuve, et ce, *y compris dans les procédures les plus formelles*. Si cette conclusion se vérifie, il n'est plus possible de considérer comme autonomes les principes de preuve par opposition radicale aux principes de construction.

Pour parvenir à cette conclusion, les incomplétudes des théories mathématiques et physiques jouent un rôle capital. En effet, les découvertes d'incomplétudes dans les formalismes mathématiques repérées dans les années trente ainsi que toutes celles mises au jour en physique (incomplétude des théories de type critique et des théories de type quantique) sont interprétées par les auteurs comme des *redécouvertes de la persistance du sens*, qui avait été refoulé dans la phase précédente du déterminisme, celle du déterminisme

prédictif. L'enjeu d'une analyse des incomplétudes des théories mathématiques et physiques en termes de persistance du sens est donc, une fois ce refoulement levé, de dégager les fondements *cognitifs* permettant de rendre compte de la mise en phase, spécifique au nouveau régime de sens de l'étape non-prédictive, entre principes de construction et principes de preuve. Les résultats d'incomplétude jouent donc un rôle tout à fait particulier dans l'architecture de l'ouvrage : outre leur rôle *épistémologique* comme moment de basculement d'une étape du déterminisme à l'autre, ils sont aussi exemplaires par ce qu'ils dévoilent du niveau proprement *cognitif* dans la construction du sens. D'où les deux parties du chapitre, la première consacrée aux conséquences épistémologiques et la seconde aux conséquences cognitives des résultats d'incomplétude en mathématique et en physique.

21. Les conséquences épistémologiques des résultats d'incomplétude en mathématiques et en physique

On a déjà souligné que le développement du paradigme déterministe en physique et en mathématiques s'est effectué, selon les auteurs, en deux phases successives, la première de nature prédictive (Laplace / Hilbert) et la deuxième de nature non-prédictive (Poincaré / Gödel). Cette analogie permet de mettre en rapport un certain nombre de résultats concernant la notion d'incomplétude et de tenter de les comparer.

211. Le cas des mathématiques

On peut présenter le champ mathématique de l'incomplétude comme résultant de la découverte selon laquelle les principes de preuve ne peuvent pas *constitutivement* capturer toutes les conséquences des principes de construction. L'un des exemples privilégié par les auteurs est celui de la comparaison entre le principe d'induction formelle et le principe du bon ordre. Le principe d'induction permet certes d'engendrer potentiellement les nombres mais ne capture pas ce qui rend possible la structure propre à leur bon ordre. Il est en effet possible d'engendrer inductivement les nombres entiers si l'on conçoit à l'avance et par des moyens non précisés formellement ce que c'est qu'un plus petit élément à partir duquel faire porter l'induction. Les moyens non précisés en question relèvent des *structures de sens* et sont d'ordre *géométrique*. On parvient en effet très facilement à imaginer un plus petit élément (au moins pour nous qui vivons dans un contexte culturel où la linéarité de l'écriture alphabétique est omniprésente) dès lors que l'on se représente une droite composée de points discrets s'éloignant progressivement d'une butée – le « bout » de la ligne – servant de repère. Aussi, un énoncé mathématique du type : « un ensemble générique non vide de nombres entiers

possède un plus petit élément », dont on peut se faire quasi-immédiatement une représentation géométrique sous la forme d'une demi-droite s'éloignant indéfiniment, n'est que très improprement considéré comme justifié par le principe d'induction. Historiquement parlant et de façon plus générale, les auteurs font remarquer qu'à partir des théorèmes d'indécidabilité de Gödel qui parvint à exhiber un énoncé équivalent à la cohérence de l'arithmétique, tout en étant indécidable, jusqu'aux théorèmes contemporains où l'on s'efforce de construire des énoncés qui, tout en ayant une définition rigoureuse, échappent à la calculabilité effective parce que le sous-ensemble numérique convoqué dans leur preuve ne permet pas d'y saisir un plus petit élément pourtant indispensable à la preuve en question, on fait toujours appel, pour manifester l'incomplétude, à des étapes *géométriques* dans le raisonnement qui *découplent* la manipulation réglée et locale d'éléments indifférenciés et les structures globales de sens – c'est-à-dire les principes de preuve et les principes de construction –. L'interprétation de l'incomplétude proposée dans le livre consiste à dire que ces théorèmes permettent de prendre la mesure du *décalage* entre les principes de preuve et les principes de construction mais il est tout aussi possible de souligner que c'est la *circulation* entre ces principes qui a permis à leurs auteurs – et à Gödel en premier lieu – de trouver un point de vue épistémologique où l'usage des ressources non effectives des principes de construction *peut cependant avoir une représentation* au sein même de la preuve.

Le recours au jugement géométrique n'apparaît donc ni comme un appel à un *réalisme* des objets mathématiques qui seraient déjà donnés ni comme un appel à l'*intuition* confondue avec une introspection psychologique d'objets mathématiques qu'il suffirait d'apprendre à « voir » : il relève d'un retour des principes de construction au sein même des preuves, retour justiciable d'une analyse en termes cognitifs à laquelle il conviendra de revenir après avoir exposé le cas de la physique.

212. Le cas de la physique quantique

On doit distinguer plusieurs niveaux dans l'étude de la notion d'incomplétude en physique. Le niveau le plus trivial consiste à faire remarquer qu'aucune accumulation empirique de faits ne suffit à confirmer une théorie physique qui met nécessairement en jeu des *interprétations*. Mais il faut évidemment distinguer d'autres niveaux plus profonds selon les théories physiques étudiées, qui sont aujourd'hui au nombre de trois : les théories de type relativiste, de type quantique et de type critique. Le cas relativiste est simple dans la mesure où l'incomplétude n'y est pas présente : en effet, si Einstein n'est plus « newtonien » dans sa conception de l'espace, il reste « laplacien » dans sa conception du déterminisme qui exclut,

par définition, toute incomplétude. Ce sont donc les théories de type quantique et critique qui font basculer dans une nouvelle étape du déterminisme, celle du déterminisme non intégralement prédictif, où l'incomplétude a sa place.

Pour ce qui est des théories de type quantique, les auteurs partent de la triple caractérisation de l'objet physique qui rendrait une théorie complète selon les critères proposés par Einstein, Podolski et Rosen (EPR) : (i) il y a des éléments de réalité hors de nous ; (ii) il est possible de dégager un principe de causalité ; (iii) il y a une séparabilité des objets physiques. Les expériences d'Aspect ont remis en question le troisième point portant sur la séparabilité puisque des objets quantiques, après avoir interagi, restent, pour certaines mesures, non séparables quelle que soit la distance qui les sépare. Dans son interprétation standard, la théorie quantique, dans le mesure où elle prévoit cette non-séparabilité, s'oppose donc à la caractérisation de l'objet physique avancée par EPR et de ce point de vue, la théorie quantique serait à considérer comme complète. Il y a toutefois une « incomplétude » de la théorie quantique au regard d'une interprétation très générale faisant intervenir des « variables cachées ». Dans ce cas, il devient possible d'introduire des interprétations *non standard* de la théorie où le 3^{ème} critère d'EPR est vrai si l'on précise que ces variables cachées doivent être *non-locales*. La proposition : « il existe des variables cachées non locales » joue alors en physique quantique, estiment les auteurs, le même rôle qu'une proposition indécidable en logique, dans la mesure où elle est vraie dans un modèle et fausse dans un autre. Une comparaison entre incomplétude logique et incomplétude quantique devient dès lors possible en suivant les trois points de la typologie dégagée par EPR : (i) aux *éléments* de réalité en physique correspondent les *preuves constructives* en logique ; (ii) à l'existence d'un principe de *causalité* en physique correspond la norme de *l'effectivité* de la preuve en logique ; (iii) à la *localité* des objets en physique correspond la *décidabilité locale* des théories en logique. Il y a donc bien, dans le cas de la physique quantique, une incomplétude qu'il est légitime de comparer avec l'incomplétude logique et qui relève de la mise en évidence d'une articulation, pour la constitution de l'objet étudié lui-même, des principes de construction et des principes de preuve.

Trois points concernant l'incomplétude spécifique à la théorie quantique doivent alors être soulignés. Premièrement, cette incomplétude fait apparaître la réalité physique comme dédoublée, selon que l'on étudie les objets conçus par la théorie ou selon que l'on étudie les états associés à ces objets. Dans le cas des objets, la question qui se pose est du type : « l'objet est-il local ou global ? » ou encore « l'objet est-il une particule ou une onde ? ». Dans le cas des états, la question relève plus de l'indétermination que de l'incomplétude dans la mesure

où les opérateurs associés au traitement des variables, comme les vitesses et les moments, ne sont pas commutatifs et empêchent donc que l'on puisse avoir une connaissance simultanée et exacte de toutes les variables en question. Deuxièmement, une des grandes difficultés rencontrées dans la représentation des entités quantiques vient de ce qu'elles sont déterminées au moyen de nombres complexes et qu'elles ne sont donc pas adaptées à la structure d'ordre qui rend la mesure possible et qui, elle, nécessite l'usage des nombres réels. Troisièmement et plus profondément encore, c'est l'espace-temps classique, que ce soit l'espace newtonien ou l'espace riemannien associé la relativité générale, qui fait défaut pour penser les phénomènes quantiques, parce que l'espace-temps classique mobilise un espace conçu comme ensemble de *points* à la façon de la théorie des ensembles alors qu'il faudrait, pour rendre compte des phénomènes en question, imaginer un espace qui ne soit justement pas décomposable selon l'élémentarité du point mais qui possède d'emblée une nature d'intervalle (en ayant recours à des objets géométriques comme les branes ou à la théorie des cordes).

213. Le cas de la physique de type critique

Dans les théories de type critique, comme par exemple les systèmes dynamiques chaotiques, l'incomplétude est liée à la sensibilité aux conditions initiales qui, parce qu'elles ne sont pas reproductibles à l'identique au-delà d'un certain seuil de précision dans la mesure, rendent indécidables toute prévision à long terme sur l'évolution future du système. Cette incomplétude est d'un autre type que celle qui apparaît dans les théories quantiques parce qu'elle n'est pas intrinsèque au système étudié. Aussi la théorie, grâce à son ancrage dans le continu mathématique, permet-elle de retrouver, par passage à la limite, le cas du déterminisme prédictif classique dans lequel l'évolution d'un système physique est reproductible. C'est donc seulement au niveau des principes empiriques de preuve que se manifeste ici une incomplétude et non pas dans l'articulation entre construction et preuve comme c'était le cas en physique quantique ou en logique. C'est cette articulation qui, en permettant d'exhiber l'incomplétude, exige une justification en termes cognitifs.

22. Les conséquences cognitives des résultats d'incomplétude en mathématiques et en physique

Sur quoi se trouve cognitivement fondée la *mise en phase* des principes de construction et des principes de preuve ? Pour répondre à cette question, il faut faire appel non pas à une base formelle et simple, considérée comme absolue, qui, par générativité intrinsèque, parviendrait à engendrer cette mise en phase mais à une phénoménologie de notre rapport au monde – ce à quoi les auteurs procèdent en s'appuyant à la fois sur certaines

traditions du siècle dernier⁵ et sur des recherches plus contemporaines⁶. L'idée centrale consiste à soutenir que la mise en phase des principes de construction et des principes de preuve ne résulte pas d'un acte purement intellectuel émanant d'une âme ou de son succédané profane mais d'une *géométrie de gestes socialement capitalisés, à la fois linguistiquement et techniquement*, ce qui a pour effet de changer *leur régime temporel*.

Par « geste », il faut entendre ici une référence à la *motricité* et à la façon dont les animaux et, parmi eux, les humains, *habitent* l'espace en y constituant des environnements vivables, c'est-à-dire dotés pour eux de pôles d'intérêt. Par exemple, la relation proie-prédateur implique, pour les protagonistes, d'être capables de suivre, généralement visuellement, une trajectoire dans l'espace ; ainsi, « l'action, le mouvement imposent (nous font pratiquer) une identification (un isomorphisme) entre l'expérience du mouvement inertiel, en ligne droite, et le regard en avant, qui précède le mouvement » (p. 69). Le regard (et la perception en général) a donc un rôle *anticipateur* que l'on retrouve à un tout autre niveau quand il s'agit de construire mentalement la suite des nombres entiers, à l'infini : il paraît impossible de concevoir le caractère ordonné de cette suite sans faire appel à la mémorisation de l'isomorphisme entre la trajectoire d'un objet en mouvement doué d'intérêt et la saccade oculaire. L'ordre structuré des entiers relève ainsi de la « mémoire d'une prévision » (p. 71) dérivée du mouvement et le fondement cognitif qui en est à l'origine ne se réduit pas à une structure formelle simple, extensible par un mécanisme générateur lui-même simple parce que la construction d'un bon ordre sur les entiers nécessite bien d'autres types d'interventions, relevant cette fois de la culture symbolique propre aux humains et non pas de dispositions déposées progressivement de façon interne à l'échelle temporelle de l'évolution : le symbole, « expression synthétique des liens de signification » (p. 64) est conçu comme geste *socialement co-constitué* et comme accès conjoint à une *situation* et à une *norme*, engageant ainsi une *virtualité* ayant un effet de *relance*. En tant qu'ébauche à compléter, le symbole mobilise la mémoire de l'attention collective qui l'a fait naître tout en rendant possible sa propre plasticité de par son aspect normatif et ce, même dans le cas le plus stable et le plus univoque, celui du symbole mathématique. C'est pourquoi la marque matérielle du nombre ne peut-elle devenir collectivement instituée comme faisant partie d'un répertoire

⁵ Tout particulièrement Husserl et Cassirer.

⁶ Gilles Châtelet et Giulio Preti au premier chef, mais également Alain Berthoz, Pierre Cadiot, Stanislas Dehaene, Clarisse Herrenschildt, Bernard Tessier et Yves-Marie Visetti.

technique mécaniquement exécutable que si le geste qui la constitue est entouré d'un halo de virtualité qui en fait une totalité ouverte. Aussi, à vouloir cantonner le rôle de la norme propre au symbole mathématique à la simple exécution d'un schéma intégralement pré-défini, comme c'est le cas lors de l'exécution d'un programme informatique, prend-on le risque de *briser la mise en phase* de ce qui relève de la construction et du sens d'une part et de ce qui relève de la preuve et de l'exécution de l'autre. Non que l'informatique, dont la puissance et l'efficacité ont révolutionné la pratique scientifique, ne soit pas en soi l'un des succès les plus patents de la deuxième moitié du vingtième siècle ; mais la thèse épistémologiquement forte des auteurs est qu'en détruisant l'architecture *géométrique* des déductions, son usage exclusivement formel *ne permet pas de développer toute la puissance symbolique de l'informatique* qui exige au contraire qu'on y réintroduise des principes de construction susceptibles d'étendre son champ phénoménal en y faisant surgir de nouveaux objets.

3. De la constitution de l'objectivité mathématico-physique à sa transposition possible en biologie (autour des chapitres 3, 4 et 5)

Les rapports réciproques entre mathématiques et physique ont été marqués au 20^{ème} siècle par un rapprochement inédit touchant leur terrain commun de détermination, celui de la géométrie de l'espace : le mouvement de *géométrisation* de la physique est en effet allé de pair avec une *physicalisation* de la géométrie. Que ce soit dans le cadre de la géométrisation de la physique (par exemple, dans le concept relativiste de gravitation) ou dans celui de la physicalisation de la géométrie (par exemple en mécanique quantique où le caractère non-commutatif des opérateurs associés aux variables de position et de moment a contribué à la naissance de la géométrie non-commutative), la géométrie retrouve aujourd'hui, sous une nouvelle forme, le rôle transcendantal traditionnel qui est le sien dans les sciences de la nature. Mais ce double mouvement pose des problèmes épistémologiques très profonds dans la mesure où la géométrisation / physicalisation de la détermination de l'espace a emprunté, au cours du 20^{ème} siècle, *deux* régimes épistémologiques distincts, dont la compatibilité est loin d'être assurée parce que la géométrie n'y assume pas le même rôle : celui du déterminisme prédictif d'une part (en théorie de la relativité) et celui du déterminisme non-prédictif de l'autre (dans les systèmes de type critique et en mécanique quantique). Ce double régime a enfin des conséquences philosophiques importantes portant sur le caractère plus ou moins *doué de forme* de l'espace et du temps, débat qui parcourt la tradition transcendantale depuis que le dernier Kant avait redécouvert la leçon leibnizienne selon laquelle la notion de forme devait appartenir en propre à l'espace et au temps.

31. Les deux régimes épistémologiques dans les sciences de la nature : déterminisme prédictif et déterminisme non-prédictif

Le déterminisme prédictif – dont la figure éminente est Laplace mais qui constitue le fond épistémologique de la *mathesis universalis* de Newton à Einstein – suppose que tout système physique déterminé à un degré d'approximation quelconque continuera à n'importe quel moment ultérieur d'être déterminable avec une approximation *du même ordre de grandeur*. L'avatar le plus récent de cette perspective est sans aucun doute la construction de l'ordinateur – machine à calcul déterministe incarnée matériellement dans l'univers physique mais complètement indépendante de la structure géométrique de l'espace. L'exemple de l'ordinateur montre bien, cependant, que le déterminisme prédictif n'est pas le dernier mot dans la détermination de la nature de l'espace : Turing – et dans une moindre mesure, von Neumann – assumait déjà *explicitement* dès la fin de la seconde guerre mondiale le fait que le déterminisme prédictif écartait une dimension capitale dans cette détermination, celle de la non-linéarité des processus physiques responsables de l'élaboration des formes organisées qui dépend, elle, et de façon cruciale, de brisures de symétrie, c'est-à-dire d'une structure de l'espace géométriquement différenciée⁷. Outre qu'un tel constat met d'entrée de jeu à mal toute utilisation exclusivement séquentielle et linéaire de l'informatique dans l'explicitation des processus d'élaboration des formes organisées, qu'elles soient biologique ou sémiotique – c'est-à-dire, en particulier, toute cognition qui voudrait se naturaliser par ce biais à moindre frais –, il rend du même coup nécessaire un profond renouvellement de la perspective physicaliste pour tout ce qui a trait à l'idée de forme organisée, qui appartient non seulement à la physique *mais aussi à la biologie*. On voit donc que l'extension du cadre épistémologique mathématico-physique à la biologie n'est pas simplement un exercice d'école de la part des deux auteurs : il relève bien d'une nécessité propre à l'évolution des sciences de la nature et à leurs problèmes épistémologiques internes, en particulier celui de l'articulation problématique du déterminisme prédictif et du déterminisme non-prédictif auquel il faut faire appel pour rendre compte de l'idée de forme.

Le déterminisme non-prédictif fait figure de nouveau venu par rapport à la tradition prédictive datant de l'origine de la *mathesis universalis*, même s'il existe déjà depuis le 19^{ème}

⁷ On comprend pourquoi, comme l'indique les auteurs, l'informatique d'aujourd'hui ait à faire face à de nouveaux enjeux concernant l'espace : les réseaux, les processus concurrents dans des systèmes distribués *dans l'espace physique* exigent de repenser profondément le rapport de l'informatique à l'espace en retrouvant la problématique des pères fondateurs, occultée par la suite.

siècle puisqu'il a été développé soit à l'occasion des travaux portant sur les processus irréversibles de la thermodynamique soit dans les théories de type critique à partir des travaux de Poincaré sur le problème cosmologique des trois corps. Dans les deux cas, il renouvelle en profondeur le rapport géométrique à l'espace puisque c'est précisément la notion même d'un espace homogène et sans structure interne qui tend à s'effacer au profit d'un espace géométriquement différencié dans lequel la prédiction à long terme peut faire défaut. Le cas de la mécanique quantique enfin apparaît, lui, tout à fait spécifique, dans la mesure où il associe un pouvoir de prédiction d'une précision jusqu'alors inégalée et une indétermination radicale quant à la localisation de l'objet, dont l'ontologie ne peut plus impliquer l'unité simultanée de la détermination. Les auteurs en concluent que les trois théories qui se partagent aujourd'hui le domaine de la physique vivent jusqu'à présent sous des régimes épistémologiques *mutuellement incompatibles*, d'où le grand intérêt des différents processus d'« unification » dont il est brièvement fait état dans le livre.

Du point de vue des deux auteurs, qui consiste à tenter d'évaluer comment pourrait s'étendre au cas de la biologie les transformations qui affectent aujourd'hui les sciences de la nature, cette incompatibilité implique deux types de conséquence. En termes de diagnostic tout d'abord, c'est bien sur le terrain de la biologie que se situe aujourd'hui la forme la plus aiguë de cette incompatibilité puisque les deux points de vue y sont appliqués *aux mêmes objets* : tout ce qui est susceptible de s'apparenter à du *codage* dans le vivant relevant du déterminisme prédictif d'une part et tout ce qui a trait au *développement* environnemental des formes vivantes relevant déterminisme non-prédictif de l'autre. Mais en termes prospectifs ensuite, le fait que le « codage » génétique en biologie soit radicalement tributaire de l'auto-organisation du développement, comme l'a montré J. Stewart, doit permettre de remettre au cœur de la réflexion épistémologique la spécificité du rapport que le vivant entretient avec l'espace-temps, par opposition aux rôles qu'il joue dans les trois grandes théories physiques dont il vient d'être question.

32. L'espace-temps en physique et en biologie

321. L'espace-temps dans les trois théories physiques contemporaines

Dans le cas de la relativité, la géométrie prescrit absolument la nature des objets ainsi que l'objectivité des lois de leur comportement du fait qu'ils sont assimilés à des invariants géométriques : l'espace-temps apparaît alors comme une dimension externe aux objets physiques qui sont assimilés à des singularités dans un univers où leur comportement est

optimisé par le biais de géodésiques. De ce point de vue, la géométrie riemannienne engendre littéralement l'espace physique : les coefficients de sa métrique sont les potentiels de gravitation et les grandeurs physiques comme l'impulsion et l'énergie sont des courbures locales de la variété riemannienne.

Dans le cas de la physique quantique, au repérage géométrique externe des objets s'ajoute un système de coordonnées interne permettant la mesure discrète des variations énergétiques affectant les processus dans le temps. L'articulation entre l'espace-temps continu du repérage géométrique externe et les variations énergétiques discrètes dépendant du système de coordonnées interne pose problème, comme en témoignent les effets de non-localité des particules quantiques identifiées à des champs de matière, effets qui défient complètement l'intuition. Le problème vient de ce que les mesures des évolutions physiques sont explicitées, de façon classique, par des nombres *réels* et que les évolutions sont bien, de ce fait, localement déterminées mais que ce sont des nombres *complexes* qui gouvernent les probabilités associées aux états quantiques discrets, et qui, de ce fait, ne se raccordent pas aux mesures continues des évolutions locales dans l'espace-temps puisque les champs de matière ne s'y réduisent pas à des singularités.

Dans le cas des systèmes de type critique, dans lesquels sont étudiés la divergence de certaines grandeurs physiques comme la solidification d'un liquide, la transition entre l'ordre et le désordre comme dans la transition para- et ferro-magnétique ou les changements de régimes dynamiques comme dans les bifurcations, bref, dans tout ce qui relève d'une théorie générale des transitions de phase, on accorde des aspects morphologiques à l'espace et des aspects directionnels au temps. C'est en particulier la conception du temps qui éloigne les systèmes de type critique des deux autres théories physiques quand on les compare à la biologie, dans la mesure où le temps apparaît comme scandé par des transitions qui agissent de façon irréversible. C'est précisément cette propriété qui rapproche ce type de systèmes de ce qui se produit en biologie.

322. Les trois formes de l'espace-temps en biologie

L'argumentation épistémologique des auteurs retrouve ici l'une des leçons philosophiques de Bergson, développée par d'autres voies. La thèse centrale des auteurs est double et consiste à soutenir qu'*il existe un espace-temps propre au vivant* et que cet espace-temps peut néanmoins s'apparenter, du point de vue physique, à une situation critique qui serait comme *étendue* : alors que les transitions de phase de la physique sont des points infinitésimaux enveloppant l'infini actuel, le vivant serait la manifestation de ce que des

transitions peuvent *durer*, pour une portion de l'espace et dans un temps limité. Pour en venir à justifier la première partie de leur thèse selon laquelle il existe bel et bien un espace-temps qui serait spécifique au vivant, les auteurs développent une argumentation en trois étapes, correspondant à trois types de rapport à l'espace-temps, allant de ce qui est le moins spécifique au vivant – et donc du plus apparenté à la physique –, au plus spécifique. Ces trois types correspondent à trois fonctions cardinales chez le vivant : la fonction d'adaptation, la fonction de régulation et celle d'anticipation.

La fonction d'*adaptation* permettant un couplage entre environnement et organisme se rapproche le plus de l'espace-temps de la physique classique en ce qu'elle engage des processus de type stimulus / réponse.

La fonction de *régulation* engage un temps de type itératif qui est celui des *horloges internes* propres à un individu, une espèce ou même un phylum. Il s'agit des cycles métaboliques, des battements cardiaques, des cycles de respiration, des durées de gestation et même de la durée de vie à travers tout le règne animal, qui semblent obéir à une loi d'échelle dans laquelle la durée d'un cycle se calcule en puissance $\frac{1}{4}$ de la masse de l'organisme considéré. Cet aspect itératif d'un temps cyclique s'oppose au temps de la mécanique quantique par exemple, dans laquelle l'énergie est un observable alors que le temps n'est qu'un paramètre : dans le cas du vivant au contraire, le temps itératif est un observable, tandis que ce qui peut s'assimiler à l'énergie des organismes (leur taille ou leur masse) est un simple paramètre et c'est pourquoi certains cycles traversent tout le règne animal. D'autre part, ce niveau local est caractérisé du point de vue de l'espace par sa *tridimensionnalité*. Cette caractéristique dimensionnelle est sans doute essentielle dans la mesure où elle seule semble pouvoir résoudre le problème de l'articulation entre des contraintes de différenciation locale nécessaires à l'élaboration de fonctions diverses et celles de connectivité entre les parties différenciées en question. C'est sans doute la raison pour laquelle il a fallu faire appel à des géométries fractales oscillant entre les dimensions deux et trois pour rendre compte de certaines fonctions de base comme celles de circulation, de digestion ou de respiration.

La fonction d'*anticipation* se manifeste à un niveau *global*, dans un espace-temps qui est celui de l'*action au sein d'un milieu*. Cet espace-temps se distingue radicalement de l'espace-temps de la physique et engage la seconde thèse des auteurs, selon laquelle l'espace-temps propre du vivant serait celui d'une situation critique étendue, autrement dit d'une *durée*. En effet, cet espace-temps spécifique doit rester compatible avec l'environnement futur que l'organisme est en train d'induire en le transformant au présent. Il y a là une sorte d'*imprédictivité du rapport de l'organisme à son environnement* qui rend complètement

imprévisible les transformations de l'organisme au fil du temps. Comme le rappellent les auteurs, S. J. Gould (1997) appelait ce phénomène celui des « potentiels latents » et donnait l'exemple de la mâchoire de certains reptiles qui s'était transformée, de façon imprévisible, en oreille interne chez certains oiseaux deux cent millions d'années plus tard. La différence capitale qui se fait jour entre la conception physique et la conception biologique du temps est donc que, dans le cas de la physique, la situation présente et future d'un système dépend *exclusivement* de la situation passée, et ce, même dans le cas des processus irréversibles, alors que, dans le cas biologique, intervient un tout autre régime temporel qui, loin de s'écouler selon une direction, semble plutôt actualiser des compossibles : c'est dans cette mesure que le temps est bien un observable, surplombant en quelque sorte toute transformation, qu'elle soit passée, présente ou à venir et non pas un simple paramètre qui rendrait compte d'un déroulement linéaire. Cette conception du temps permet de rendre explicite une dimension capitale de l'organisation propre au vivant : le champ des forces qui rend compte de l'apparition de formes vivantes n'est pas donné mais il est lui-même en voie d'auto-constitution. D'où sa *durée* intrinsèque qui ne relève pas d'un calcul d'optimalité : « Les êtres vivants ne constituent pas seulement un champ de forces physiques données : aucun principe physique de minimalité, aucune "géodésique" ne prédétermine complètement leur évolution. Pour l'évolution darwinienne [...], elles seront tout au plus "compatibles" avec la situation qui *sera* donnée et non pas celle qui est donnée. » (p. 126). Ainsi, même s'il est possible de reproduire le système physique rendant compte d'un phénomène vivant, s'agit-il seulement d'un *instantané de sa forme* et non de sa *dynamique évolutive*, globalement imprévisible : comme le rappellent les auteurs, il est par exemple possible de reproduire physiquement dans un champ magnétique au moyen de supraconducteurs sur un treillis l'arrangement spatial des feuilles sur la tige des plantes – selon la suite de Fibonacci, comme le veut la description phyllotaxique standard –, mais on ne donne encore, ce faisant, aucune raison de la dynamique évolutive qui a présidé à sa constitution.

On comprend alors la critique que les deux auteurs adressent à tout projet d'une génétique réductionniste gagée sur la notion complètement internalisée d'information discrétisée et indéfiniment reproductible : les symétries (et les brisures de symétrie), sources d'organisation des formes du vivant, s'*auto-constituent* dans l'interaction avec l'environnement, contrairement à ce qui se produit pour les cristaux ou les minéraux, comme l'avait déjà remarqué le Pasteur des *Recherches sur la dissymétrie moléculaire* (1860 et 1883). Deux arguments sont ainsi avancés par les auteurs contre l'usage trop paresseux que la thèse réductionniste fait de la notion d'information dans un contexte biologique. D'une part,

un argument empirique : encoder en une suite binaire la structure tridimensionnelle de toutes les protéines échangées dans les cascades post-synaptiques ou les flux biochimiques dans le système nerveux ou bien encore les déplacements de 10^{15} synapses dans le cerveau n'a proprement *aucun sens* informatique, compte tenu du nombre d'événements en jeu et sans même mentionner le problème physique de la dynamique évolutive des formes évoqué à l'instant. D'autre part, un argument physique : si le codage binaire doit aller jusqu'au niveau micro-physique, alors le niveau supposé ultime *est celui de la mécanique quantique*. Mais dans ce cas, on doit quitter le domaine du déterminisme prédictif et on perd, du même coup, tout le bénéfice d'une stratégie réductionniste qui fait de la détermination prédictive son idéal épistémologique. Comme le montrent les analyses morphogénétiques au contraire, la dimension *géométrique* de l'information doit être prise en compte dans le cas du vivant et ce, dès le niveau de la structure de l'ADN ou de celui des protéines et de leur évolution. Bref, c'est la *dimension topologique de l'élémentaire* qui doit orienter la recherche des principes transcendants rendant compte de l'espace-temps propre au vivant.

323. Principes transcendants de l'espace-temps en biologie

3231. Illustration gnoséologique

Les auteurs ont recours à trois couples d'opposition gnoséologique pour aborder la question des principes transcendants régissant la spécificité de l'espace-temps en biologie : local / global ; processus / itération et régularité / singularité. Dans le cas de la première, la spécificité du biologique se note par le fait que le local se limite aux processus physico-chimiques sous-jacents et que l'aspect global de l'organisme peut ne pas en être intégralement affecté, rendant ainsi possible toute une échelle de comportements allant du normal au pathologique. Dans le cas de la deuxième, on a vu que la distinction processus / itération recouvrait en biologie la distinction de deux fonctions, la fonction d'adaptation pour ce qui est des processus de stimulus / réponse et la fonction de régulation pour ce qui est du temps itératif propre aux cycles du vivant. Dans la troisième, on remarque que les trois théories physiques (respectivement, relativité, mécanique quantique, théorie critique), font de plus en plus intervenir la notion de criticité et que c'est aussi elle qui appartient le plus à la biologie, dans la mesure où, si l'on utilise la théorie des singularités pour éclairer le fonctionnement du vivant, on se rend compte que celui-ci occupe une zone étroite de points autour des situations critiques, la sortie hors de cette zone signifiant la mort pour l'organisme et le retour au niveau physico-chimique, localement déterminable.

Reste la fonction d'*auto-constitution* qui dégage un plan de rationalité propre au vivant et qui n'a pas de contrepartie directe dans l'état actuel de la physique.

3232. *Illustration mathématique*

La recherche des principes transcendants gouvernant le rapport spécifique du vivant à l'espace-temps oriente les deux auteurs vers une homologie entre les notions de symétrie, de structure de groupe et de relation d'équivalence d'une part et les notions de brisure de symétrie, de structure de semi-groupe et de relation d'ordre d'autre part.

La structure de groupe est le moyen mathématique le plus adéquat pour étudier les symétries et les invariances d'un système : elle participe donc profondément à la définition même de l'identité de l'objet dans l'espace en général. Dans la mesure où elle entretient un rapport d'isomorphisme avec la relation logique d'équivalence, les perspectives mathématique et logique traversent toute la structure de la connaissance *a priori* et assument un rôle cognitif à un haut degré de généralité.

La structure de semi-groupe (qui se distingue de la structure de groupe par son absence d'inverse aux opérations qui la constituent) peut être rapprochée de la relation d'ordre en logique (qui se distingue de la relation d'équivalence par l'absence d'axiome de symétrie) et celle de temps.

3233. *Illustration philosophique*

S'il y a une leçon sur l'espace et le temps que les sciences de la nature contemporaines peuvent nous apprendre, c'est bien la modernité des recherches finales du Kant de *l'Opus posthumum* (1804) qui retrouvait l'idée leibnizienne selon laquelle l'espace et le temps ne s'opposent pas, respectivement, comme les formes du sens externe et du sens interne mais que le partage doit dorénavant être conçu autrement : l'espace et le temps possèdent en eux-mêmes des *formes intrinsèques*, ce qui implique de concevoir le rapport externe / interne au sein même de l'objet, le sens externe régissant les *relations* entre objets et le sens interne les conditions de possibilité de l'*individuation* de l'objet. Ces deux traits ont une conséquence capitale : sémiotiquement, l'intelligibilité doit être conçue *à même l'objet*, pourrait-on dire, comme une phase dans le processus de sa constitution ; épistémologiquement, le renouvellement de la distinction entre sens interne et sens externe fait que l'espace-temps n'apparaît plus sous l'aspect d'une intuition homogène propre aux conditions de possibilité de la détermination de l'objet en général mais qu'il relève lui-même d'une construction, variable selon le type d'outils théoriques sollicités. Le rapport à l'observable s'en trouve

considérablement transformé : alors que l'espace-temps conçu comme intuition homogène rendait possible l'observation de tout événement en général, c'est au contraire la *limitation dans l'observabilité* qui rend possibles différentes structures, mutuellement incompatibles, dans lesquelles des événements peuvent se produire. Les auteurs en concluent : « [...] la détermination des objectivités physiques semble corrélative de l'indétermination (réglée) des repères relativement auxquels elles se manifestent. » (p. 169). On voit bien la transformation opérée dans le rôle joué par l'espace-temps dans la détermination de l'objectivité telle qu'elle est conçue dans la *Critique de la raison pure* : alors que le partage se faisait entre ce qui avait lieu dans l'espace-temps comme condition de toute détermination objective et ce qui existait au-dehors, sous forme d'Idée, le partage se situe désormais *dans l'espace-temps lui-même*, entre des univers de repérage mutuellement incompatibles, au sein desquels se négocient différents types d'espace-temps (en particulier un espace-temps externe, celui de la relativité et un espace-temps interne, celui de la mécanique quantique) et, partant, différents types d'objectivités. Cette situation a d'importantes conséquences pour la biologie parce qu'il devient possible de mieux caractériser sa situation spécifique au sein des sciences de la nature.

33. La question de l'optimalité en physique et en biologie

Pour rendre possible la comparaison entre les situations qui prévalent en physique et en biologie, les auteurs font remarquer que, malgré les différences conceptuelles fondamentales existant entre les trois théories physiques envisagées, elles respectent toutes les trois un principe épistémologique commun, le *principe géodésique*, connu aussi sous le nom de principe du « plus court chemin » ou de « moindre action » selon les contextes géométrique, optique ou dynamique dans lesquels il a été primitivement employé. Il permet de décrire tout processus comme une fonction d'une ou plusieurs grandeurs en distinguant, parmi tous les parcours possibles du processus, celui qui est optimal, une fois que l'on s'est donné un espace particulier et sa métrique. Ce principe a acquis, au sein de la physique moderne, un rôle organisateur capital, en particulier grâce aux travaux de Noether, dans la mesure où il permet d'établir une correspondance stricte entre invariants mathématiques et lois de conservation en physique (invariance par translation dans l'espace / conservation du moment cinétique ; invariance par translation dans le temps / conservation de l'énergie ; invariance dans un changement de l'origine des phases de la fonction d'onde / conservation de la charge électrique). Le principe géodésique révèle ainsi la place capitale de la notion mathématique de groupe de symétrie pour la détermination des invariants de tout système physique. Si maintenant on tente une comparaison avec la biologie, a-t-on affaire, dans ce cas,

au même principe, y rencontre-t-on au contraire un autre type d'optimalité ou même pas d'optimalité du tout ? Deux groupes d'invariants peuvent être isolés en diachronie et en synchronie : c'est donc à partir d'eux qu'on peut tenter de répondre à la question.

331. Invariants diachroniques : analogie et homologie dans l'évolution des espèces

Quand on se place en diachronie du point de vue de l'évolution des espèces, un premier groupe d'invariants biologiques composé de deux types apparaît : *analogique* quand des organes différents convergent par pression de sélection vers des formes semblables ayant des fonctions identiques et *homologique* quand un même organe évolue dans des formes différentes mais dont l'origine commune reste pourtant reconnaissable. Ces deux types d'invariants rendent compte de l'évolution des organes dans tout le règne végétal et animal mais s'étendent également, dans ce dernier cas, aux *enchaînements comportementaux* dont un grand nombre sont trans-spécifiques. Les auteurs étendent de plus la notion d'homologie à la sphère de la *culture* : celle-ci est définie comme transmission non génétique d'une mémoire collective et repose sur des *homologies de tradition* (p. 172) qui sont présentes non seulement chez les humains mais aussi, de façon beaucoup plus rare, dans d'autres espèces – oiseau et primate essentiellement –, l'exemple canonique étant celui de la transmission sur plusieurs générations de la technique du lavage des patates douces, observé dans les années 70 chez un groupe particulier de macaques à face rouge du Japon et que l'on a remarqué, par la suite, dans d'autres comportements au sein de différentes bandes d'animaux.

332. Invariants synchroniques : invariance d'échelle

Le second groupe d'invariants mis en lumière par les auteurs est de nature synchronique et a trait à la notion d'invariance d'échelle. Comme on l'a vu au § 33, il existe en effet des invariances d'échelle affectant non seulement les organes (selon des coefficients de lois de dilatation) mais aussi les rythmes métaboliques, les durées de vie (nombres purs calculés selon un rapport durée de vie / masse) ou les rapports entre systèmes physiologiques comme les systèmes nerveux, respiratoires ou vasculaires (faisant intervenir des géométries fractales).

L'existence de ces invariants tend à montrer qu'il existe bien des principes *d'optimisation* dans le vivant, même si les redondances et dégénérescences y sont également nombreuses. Mais dans la mesure où on peut supposer que ces invariants sont soit des réponses à des pressions de sélection provenant de l'environnement ou de la physiologie des fonctions, soit des réponses locales adaptées au niveau physico-chimique des organismes,

évidemment régi par les lois de la physique, les optimalisations en question dépendent étroitement des structures biologiques dans lesquelles elles jouent et n'ont pas le même degré de généralité que le principe géodésique. Il reste néanmoins possible de comparer biologie et physique. Pour ce faire, les auteurs caractérisent tout organisme vivant à partir de quatre points de vue : le point de vue *topologique* fondé sur la distinction entre intérieur et extérieur ; le point de vue *énergétique* fondé sur la notion de métabolisme ; le point de vue *informationnel* fondé sur la notion de patrimoine génétique ; le point de vue que l'on pourrait qualifier d'*aptatif-adaptatif* fondé sur la possibilité d'une transmission de ce patrimoine tout en restant doté d'une aptitude à l'évolution. Ces quatre points de vue ne sont pas tous pertinents en physique et, s'ils le sont, ne le sont pas dans le même sens qu'en biologie : la différence intérieur / extérieur n'y a pas le degré de nécessité qu'elle a en biologie ; la mesure des échanges énergétiques est capitale en physique mais n'y a pas le même sens qu'en biologie, dans la mesure où la notion d'individuation n'y est pas reconnue ; l'idée de patrimoine informationnel ne se retrouve évidemment pas en physique ; quant à la possibilité d'une évolution imprévisible, elle est certes commune aux deux disciplines mais dans des sens très différents puisqu'à aucun moment, en physique, il ne peut être question d'une *auto-constitution progressive* d'un système physique par le truchement du rapport qu'il entretient avec son environnement, comme c'est le cas pour l'organisme vivant. Il y a donc encore un long cheminement à parcourir pour clarifier pleinement la nature des principes d'optimalité en biologie et les rapports éventuels qu'ils entretiennent avec ceux de la physique, au premier rang desquels les auteurs ont placé le principe géodésique. Ces différences se retrouvent également quand il s'agit de caractériser les régimes de causalité propres à la physique, à l'informatique et à la biologie.

34. Constitution physique, simulation informatique et finalité biologique

La notion de causalité permet aux auteurs de corroborer une de leur thèse épistémologique majeure : selon le type de mathématiques utilisées dans la constitution de l'objectivité au sein des sciences de la nature – mathématiques du continu ou mathématiques du discret – *ce n'est pas le même type* de phénomènes qui se trouve constitué. Il n'y a donc pas lieu de rabattre un domaine phénoménal sur un autre jugé plus fondamental, la structure en quelque sorte *feuilletée* de l'expérience correspondant à des niveaux de complexité spécifiques lié chacun à une constitution d'objectivité, c'est-à-dire à une science de la nature particulière. On va le voir sur trois cas : celui des mathématiques du continu et de la

physique ; celui des mathématiques du discret et de l'informatique ; celui des mathématiques des systèmes dynamiques et de la biologie.

341. Causalité et Détermination comme principes constitutifs en physique

A la typologie d'origine aristotélicienne des quatre causes (matérielle, formelle, efficiente et finale) qui envisageait celles-ci comme relevant toutes d'un même ordre de phénoménalité (au moins dans le sublunaire), les auteurs opposent l'idée d'une différence entre ordre des causes (parmi lesquelles ils conservent les causes matérielle et efficiente) et ordre des déterminations (objective et formelle). En partant d'une explicitation du rôle joué par le signe d'égalité dans une équation classique comme celle de l'accélération, les auteurs font remarquer que le signe en question n'est pas interprété comme pouvant être lu dans les deux sens : la force, représentée dans le membre de droite, est bien interprétée comme *causant* l'accélération représentée dans le membre de gauche et associée à la masse du corps. Au contraire, une interaction symétrique se trouve être mise en lumière quand on s'élève au niveau de la détermination : ainsi en relativité générale, on peut dire que le tenseur énergie-impulsion *cause* bien une déformation de l'espace mais que, tout aussi bien, la courbure de l'espace est la source du champ. Causes et déterminations ne relèvent donc pas du même ordre de phénoménalité et il faut détailler leur mode spécifique d'intervention dans ce que l'on appelle une explication physique.

En s'appuyant sur la thèse épistémologique liant construction mathématique et type d'objet, les auteurs distinguent tout d'abord deux niveaux dans le concept de détermination. Il existe d'une part des déterminations *objectives* exprimées par les invariants relatifs aux symétries de la théorie considérée et d'autre part des déterminations *formelles* qui s'expriment mathématiquement dans les lois et équations de cette théorie. Les déterminations formelles peuvent varier : dans le cas de la dynamique classique par exemple, celle-ci revêt différentes présentations mathématiques selon qu'il y est fait usage des équations de Newton fondées sur le concept de force, de celles de Hamilton fondées sur celui d'énergie ou de celles de Lagrange fondées sur celui d'optimisation d'une trajectoire. Il est cependant possible d'établir une parenté entre ces déterminations formelles en mettant au jour d'une part les symétries qui, associées à certains groupes de transformation, les sous-tendent et d'autre part les invariants qui correspondent à ces symétries. Ces invariants décrivent alors soit des propriétés (dans l'exemple de la dynamique classique, la masse) soit des états (dans le même exemple, l'énergie).

D'un point de vue général, trois cas, correspondant aux trois types de théorie physique, sont possibles : dans le cas des théories relativistes, les groupes de transformation opèrent sur l'espace-temps externe et ces symétries externes rendent compte, selon certains groupes de transformation, de la dynamique classique, de l'électro-magnétisme et de la relativité restreinte ainsi que de la relativité générale ; dans le cas des théories quantiques, les groupes de transformation opèrent sur les fibres d'espaces fibrés et on a alors affaire à des symétries dites internes ; dans le cas des théories de type critique, ce sont les brisures de symétrie qui sont capitales et elles sont accessibles au moyen d'une transformation par semi-groupe. Il devient possible de caractériser les invariants qui correspondent à ces symétries, comme des propriétés ou comme des états. La différence entre propriété et état permet alors d'introduire le niveau de la *causalité* proprement dite, définie comme propriété ou ensemble de propriétés pouvant modifier des états.

Les auteurs distinguent deux formes de causalité, efficiente et matérielle : la causalité matérielle est conçue comme l'ensemble des propriétés causales modifiant une propriété, tandis que la causalité efficiente est corrélée à la variation d'un ou de plusieurs états. Les auteurs font remarquer que chaque forme de causalité peut cependant se lire de deux manières, selon qu'elle est interprétée de façon objective comme enveloppant une « flèche du temps » ou de façon épistémique comme n'enveloppant qu'un rapport indirect à la temporalité (par exemple, un système change de température sans que le paramètre de température soit corrélé au temps). L'usage du terme « objectif » par opposition à « épistémique » employé ici pour caractériser la causalité se distingue alors de celui utilisé pour décrire la détermination « objective » qui s'opposait alors à la détermination « formelle » et impliquait la mise au jour d'invariants au moyen des symétries et de leurs groupes de transformation.

Ainsi la détermination, gravitant autour du concept de symétrie, rend-elle possible l'apparition des causes : dans l'exemple déjà cité de la loi d'accélération, ce qui permet de lire l'équation de façon non-symétrique, c'est-à-dire de façon causale, consiste précisément à opérer une brisure dans la symétrie formelle de l'équation. De façon générale, cette brisure de symétrie due à une cause efficiente se manifeste comme apparition d'une temporalité, notion dont la prise en compte est indispensable, aux yeux des auteurs, à toute généralisation des méthodes physiques aux phénomènes propres au vivant.

342. *L'informatique comme physique artificielle*

On vient de voir sur le cas de la physique une confirmation de l'une des thèses épistémologiques forte des auteurs consistant à soutenir que le type de phénomène constitué dépend du type de mathématiques – mathématiques du continu ou mathématiques du discret – assurant sa constitution. Ce principe épistémologique se trouve confirmé négativement par le rôle que l'épistémologie réductionniste tente de prêter à l'informatique.

On sait en effet que l'épistémologie en question a vu dans la généralisation de l'informatique la confirmation de la fécondité du rabattement des principes de construction sur les principes de preuve puisque l'informatique y était interprétée comme le cœur de l'arithmétisation prédictible du monde, présente à la fois d'un point de vue logico-formel dans le souhait d'une auto-fondation des mathématiques au moyen de l'arithmétique finitiste et d'un point de vue physique, dans celui d'une représentation approchée mais effective parce que prédictible, de la réalité matérielle. Le pivot de l'arithmétisation prédictible du monde repose donc sur l'idée que l'effectivité du calcul au niveau informatique *correspond* à la matérialité des processus présents dans la réalité physique. Ce faisant, cette correspondance permet tout au plus, et dans le meilleur des cas, une *simulation* dans la mesure où elle ressort d'une problématique de la *ressemblance* et non de la *constitution*.

En effet, du point de vue physique tout d'abord, on sait qu'une petite perturbation au-dessous du seuil de mesure *brise la symétrie* décrite par l'équation d'évolution du système et devient la cause d'une variation des conditions initiales qui peut avoir des conséquences radicales sur l'évolution à terme du système. Et si l'on s'en tient, dans la mesure des conditions initiales, à des valeurs exactes *réitérables* parce que c'est ce qu'impose la discrétisation arithmétique propre à l'informatique, alors on assure une *trop grande* stabilité de l'évolution des systèmes physiques et on perd radicalement en intelligibilité dans la description de certains phénomènes critiques qui deviennent proprement *invisibles* : qu'on songe aux orbites trop régulières du système solaire reconstruit informatiquement ou même aux oscillations pour toujours identiques d'un double pendule, à partir de conditions initiales à jamais inchangées, alors qu'il s'agit en réalité d'un système chaotique. On peut donc dire que le principe d'itération à l'identique recouvre une symétrie dans la séquentialité des pas de calcul *qui n'a pas de sens physique*. La physique simulée informatiquement peut alors devenir, dès les cas pourtant relativement simples, une physique *artificielle*, au double sens de factice et de fabriqué. Et on comprend également pourquoi les auteurs récusent d'emblée une approche de la cognition qui passerait par une physicalisation fondée sur une base si limitée du point de vue de la théorie physique.

Du point de vue informatique ensuite, le problème posé par l'exactitude de la réitération des pas de calcul se pose en termes de gestion de l'arrondi. Si, idéalement, exécuter un algorithme revient à considérer le calcul comme une « géodésique dans l'espace prédéterminé par le programme » (p. 210), il n'empêche que l'arrondi implique, lui, une *perte d'information* à chaque pas de calcul, que les auteurs assimilent à la croissance irréversible d'une entropie. Or cette perte d'information ne correspond à rien dans le phénomène physique considéré : *c'est un pur artefact de la structure discrète de la simulation*, qui peut avoir des conséquences profondes sur la nature de ce qui est simulé. En effet, dans les cas linéaires, cette perte d'information reste contenue dans des limites qui ne perturbent pas la prédictibilité. Mais dans les cas non-linéaires – les auteurs prennent l'exemple de la fonction logistique –, cette prédictibilité n'est plus assurée parce qu'il n'est pas toujours possible de simuler arithmétiquement une suite des nombres réels par la suite digitale censée l'approximer et ce, *dès le premier pas de calcul*. Ainsi, s'il est possible d'approximer des suites digitales par des suites continues, l'inverse n'est pas toujours vrai.

On voit donc que rien ne vient confirmer ce qui constitue pourtant la clé de voûte de l'épistémologie réductionniste, à savoir que la correspondance entre l'approximation de la mesure en physique et l'arrondi du calcul en informatique *reste a priori dans des limites de stabilité assurant la prédictibilité*. Le rôle de l'informatique et des mathématiques discrètes qui en constituent l'ossature est donc bien de simuler des phénomènes physiques mais elle ne peut jouer de rôle *constituant*, au sens que ce terme prend en physique, dans la mesure où l'informatique ne rend pas intégralement raison des différents régimes de causalité propres à la physique. Comment appréhender le cas encore différent de la biologie et du régime causal si particulier qui la caractérise ?

343. La spécificité du vivant : la finalité contingente

Il paraît clair que différents types de causalité, matérielle, efficiente, formelle, jouent en physique comme en biologie, mais c'est surtout la notion de régulation impliquant une finalité qui établit une différence entre physique et biologie.

La fonction de régulation possède deux sens, l'un physique et l'autre biologique. En physique comme en biologie, la fonction de régulation vise l'*homéostasie*, c'est-à-dire la tendance à maintenir certaines contraintes (chaleur, débit sanguin, tension artérielle, etc.), propres à un système donné, à l'intérieur de limites fixées à l'avance. Dans le cas physique, la régulation est entièrement prédéterminée par les conditions de départ, comme par exemple dans un thermostat qui régule la chaleur d'une pièce selon des géodésiques pré-assignées. De

plus, les relations causales sont locales et ne se transmettent que par transitivité entre des interactions locales. Dans le cas biologique en revanche, le régime causal *global* assure la régulation et peut se distinguer des régimes locaux. D'autre part, le fait qu'il existe généralement plusieurs façons de parvenir à assurer une même régulation permet une adaptation de celle-ci à l'environnement, adaptation qui peut aller jusqu'à modifier la notion même d'environnement pour une espèce donnée (comme c'est le cas quand la mâchoire d'un reptile devient l'oreille interne d'un oiseau, selon l'exemple déjà cité, emprunté à S. J. Gould). La notion de *finalité contingente* permet précisément de rendre compte de l'adaptation de la régulation spécifique au vivant et ce, à tous les niveaux d'organisation (cellule, organisme, espèce). Les auteurs proposent alors, pour la rendre intelligible, une schématisation dynamique composée de trois types d'éléments : des domaines-sources, qui représentent les organes mobilisables en vue d'un but ; des domaines-cibles qui sont les buts à remplir et des flèches qui représentent les modes de fonctionnement des organes en vue des buts assignés. Les domaines-cibles, autrement dit les buts, sont par exemple l'apport de nutriments locaux, l'oxygénation ou le métabolisme, auxquels correspondent des domaines-sources tels que, respectivement, les systèmes vasculaire, respiratoire ou digestif, les flèches correspondant à la circulation, la respiration et la digestion. Le schéma général topologico-métrique décrit un ensemble-cible composé de domaines-cibles, tous atteints par une flèche au moins, et un ensemble-source composé de domaines-sources d'où partent au moins une flèche vers un ou plusieurs domaines-cibles (le terme d'« ensemble » n'a pas ici de signification technique pas plus que celui de « flèche », qui ne représente pas une fonction au sens mathématique du terme). Plusieurs domaines-sources peuvent contribuer à un même domaine-cible au moyen de flèches assurant des transferts ; par exemple, les deux métabolismes, oxygène et glucose, assurent la régulation du tissu musculaire du cœur par des moyens de transport différenciés, plus important dans le cas du transfert d'oxygène que dans celui du glucose (outre le nombre et la direction des flèches, leur épaisseur peut donc varier pour un même domaine-cible). Un même domaine-source peut aussi contribuer à plusieurs domaines-cibles, comme dans le cas des cellules-souches et plus généralement, dans tous les cas où des potentialités vont finir par s'exprimer au cours du développement.

La notion de finalité contingente peut alors être représentée comme une structure abstraite, composée d'un triplet (domaines-source, flèches, domaines-cible), munie d'une mesure indexée sur les nombres réels (rendant compte de l'épaisseur relative des flèches) et assurant une stabilité structurelle des domaines-cible (c'est-à-dire pour lesquels l'épaisseur des flèches est non nulle). Le schéma peut alors servir à décrire les grands processus

dynamiques du vivant, en particulier le régime de « développement » et le régime « stationnaire » : le début du développement se caractérise par la prévalence des flèches partant d'un domaine-source vers plusieurs domaines-cible qu'elles contribuent à créer (comme dans le cas de la différenciation des tissus, ou des systèmes anatomique et physiologique) ; ces flèches maigrissent au fur et à mesure du développement tandis que commencent à prendre de l'importance les flèches partant de plusieurs domaines-source pour aboutir à un domaine-cible (établissement des fonctions). Une fois la maturité atteinte, c'est-à-dire une fois une topologie stabilisée, le vieillissement se manifeste de façon métrique par la variation de l'épaisseur des flèches. On remarque alors que les flux allant dans le sens source-cible ont principalement un caractère énergétique (transferts de matière ou d'énergie), tandis que les flux allant dans le sens cible-source ont un caractère d'information (gradients, différence de pression) rétroagissant sur la source, la direction des flèches permettant de représenter cette différence de sens.

La causalité dans le domaine du vivant possède donc une parenté avec la physique et même avec l'informatique : les causalités matérielles, efficaces et formelles y sont présentes, sans avoir le caractère rigide qu'elles ont en physique ou en informatique du fait de leur plasticité et de leur adaptabilité. De façon plus profonde encore, on commence seulement à décrire certaines déterminations objectives essentielles au vivant, comme les brisures de symétrie au cours du développement ou les invariants numériques « purs » dans ses rythmes internes. En revanche, les dimensions d'auto-régulation et de finalité prennent en biologie un tour tout à fait spécifique, inconnu en physique et en informatique, à tel point que les auteurs, risquant une explicitation finaliste de la finalité, se demandent si « l'introduction de ces facteurs de téléonomie / anticipation » (p. 224) ne serait pas une contrainte nécessaire pour *assurer une durée* à la stabilité structurelle si fragile, parce que si complexe, du vivant.

4. Le vivant comme criticité étendue (autour du chapitre 6)

L'hypothèse d'une *criticité spatialement et temporellement étendue* ne vise pas à décrire l'origine du vivant mais seulement à rendre compte de sa permanence dans l'espace-temps en permettant une comparaison avec la physique des états critiques. Alors qu'en physique, l'état critique, qui change radicalement les paramètres permettant de décrire un système en corrélant les éléments locaux à la structure globale, est transitoire (et même *infinitésimalement* transitoire), comme lors d'une transition de phase entre états liquide, solide ou gazeux dans un système physique, ce n'est pas le cas de l'organisme vivant : l'état dans

lequel l'organisme vivant se trouve est *qualitativement* différent de celui des transitions de phase de la physique, dans la mesure où tout élément local est intégré à une structure globale pendant une *durée* : « Ainsi, en termes physiques, la mesure de la complexité objective de la moindre unité vivante [...] a une valeur infinie, dans un sens mathématique précis » (p. 235). Un organisme occupe ainsi une zone de criticité étendue dans laquelle il doit à la fois maintenir, au moyen d'adaptations et de régulations spécifiques, une autonomie spatio-temporelle propre, tout en dépendant étroitement des échanges énergétiques qu'il a avec son environnement. Tout organisme vivant en situation critique étendue possède alors au moins les caractéristiques suivantes : il s'agit d'un volume spatial clos par une membrane semi-perméable, dans lequel les transferts énergétiques et d'information s'effectuent en interne sur le mode de la propagation ou de la diffusion, possédant une activité métabolique hors équilibre et irréversible, articulant des niveaux d'organisation spécifique couplés entre eux (du global au local comme régulation et du local au global comme intégration), et possédant enfin une tridimensionnalité spatiale et une bidimensionnalité temporelle (l'une bornée par l'intervalle conception-mort et l'autre par des rythmes internes souvent trans-spécifiques). Cette zone de criticité étendue doit de plus rendre compte du fait que l'interaction permanente avec l'environnement peut modifier radicalement, et de façon imprévisible, la nature même de cette interaction et corrélativement, ce qui fait « environnement » pour un organisme donné.

On peut alors préciser la nature de la comparaison entre physique et biologie : alors que les trajectoires décrivant l'évolution d'un système physique sont *spécifiques* dans la mesure où elles sont régies par le principe géodésique et que les points critiques de ces trajectoires sont *locaux*, elles sont en revanche *génériques* dans le cas d'un système vivant, dans la mesure où toutes les trajectoires qui restent compatibles avec leur perdurance au moyen d'un régime *étendu* de criticité (dans des conditions aux limites qui peuvent être changeantes) continuent de s'exprimer sans que l'on puisse délimiter à l'avance l'espace complet des possibles. Ainsi, alors que l'évolution d'un système physique serait décrite par les notions de trajectoire et d'optimalité, celle d'un système vivant serait décrite par celles d'attracteur et de compatibilité.

5. Conclusion (autour du chapitre 7)

Le parcours proposé par les auteurs a consisté, en partant d'un nouvel examen des fondements des mathématiques, de l'informatique et de la physique, à essayer de circonscrire pour le cas de la biologie la spécificité de son régime de connaissance. Comme en physique et mathématiques à la fin du 19^{ème} siècle et dans les années 30 du siècle dernier, où des

théorèmes d'impossibilité ont permis de faire profondément évoluer l'intelligibilité d'un certain nombre de concepts, au premier rang desquels il faut situer la notion de preuve d'une part et celle de localité de l'autre, les auteurs appellent de leurs vœux une démarche analogue en biologie. Le but poursuivi est donc avant tout *philosophique* et même si une certaine place a été accordée à la technicité mathématique, le projet général ne lui est pas assujéti. Les auteurs rappellent opportunément à ce propos que la géométrie des épicycles de Ptolémée fut considérablement sophistiquée au fil des siècles au point d'occuper des volumes entiers de calculs ardues mais qu'elle n'en sombra pas moins définitivement dans l'oubli quand des savants révolutionnaires osèrent déplacer le centre de l'univers de la Terre au Soleil... Que les notions de finalité contingente ou d'état critique étendu n'aient pas encore d'expression mathématique achevée ne devraient cependant pas les condamner si elles contribuent ou rendent possible une réforme de l'entendement dans les sciences du vivant. Aussi cette enquête n'a-t-elle pas visé à proposer une théorie générale du vivant mais seulement à faire évoluer l'intelligibilité concernant un certain nombre de points sur lesquels les auteurs ont de bonnes raisons de penser que se situent les enjeux profonds de la biologie.

Le livre de Francis Bailly et de Giuseppe Longo a le rare mérite de travailler simultanément sur deux fronts.

Premièrement, et au premier chef, à partir d'une réflexion qui corrèle les fondements des mathématiques et ceux de la physique, il propose un *cadre conceptuel nouveau* pour penser la biologie et émet à l'intention de la communauté scientifique un certain nombre de *propositions théoriques* sur la nature du temps, de l'espace, de l'optimalité, de la causalité et de la détermination en biologie. Ces propositions relèvent de *la science en train de se faire* et elles seront, en tant que telles, soumises à discussion, réélaboration et critique, comme toutes les propositions conceptuelles nouvelles dans le cadre de l'élaboration scientifique. Sans préjuger de leur destin qui appartient à la communauté en question, ce travail de commentaire a eu pour but de participer à leur mise en circulation.

Deuxièmement, le point de vue directement scientifique adopté par les auteurs est couplé à une interprétation *philosophique* : retrouvant ici une tradition qui, de Poincaré à Hermann Weyl en passant par René Thom, n'a jamais conçu le travail scientifique comme séparé ou même séparable de la philosophie, les auteurs ont pris le risque, fort mal porté dans l'ambiance de cloisonnement disciplinaire d'aujourd'hui, de s'aliéner et les scientifiques et les philosophes. Ce n'est pas leur moindre mérite d'avoir assumé ce risque et d'avoir, par le fait même, renouer les fils de cette tradition.

Jean Lassègue
CNRS
CREA-École polytechnique