

Visions des sciences

**Mathématiques
et
sciences de la nature**

La singularité physique du vivant

Francis Bailly
Giuseppe Longo



Hermann

Disponible vers le 10 juin 2006, 26 euros

AVANT-PROPOS

Ce livre vise à dégager un cadre conceptuel unitaire, qui s'appuie sur la situation contemporaine des sciences de la nature - essentiellement physique et biologie -. La réflexion se développera dans un rapport étroit, mais non subordonné, aux analyses des fondements des mathématiques et de la modélisation informatique. Comme partie intégrante du cadre proposé, nous explicitons quelques principes fondamentaux pour une philosophie moderne de la nature et nous essayons de développer une approche théorique de certains aspects de la biologie. Cette approche, tout en s'inspirant des pratiques et de la conceptualisation physico-mathématiques, se démarquera nettement des théories physiques courantes dans la spécification des phénomènes du vivant.

La réflexion sur l'épistémologie des mathématiques interviendra massivement dans nos analyses, car le questionnement sur la "vérité", le "comment raisonne-t-on", le rôle de la "théorisation/formalisation mathématique" ou le "comment accède-t-on à la connaissance", sont fortement corrélés aux questions sur les fondements des mathématiques. En ne se référant qu'à l'histoire, il en est ainsi chez Platon, Descartes et Kant, Husserl et Wittgenstein. Mais pourquoi les mathématiques seraient-elles un des piliers de l'intelligibilité du monde, pourquoi toute philosophie de la connaissance, voire de la nature, y ferait-elle référence, alors que la majorité des analyses fondationnelles les posent explicitement "hors du monde" ?

Selon l'analyse que nous développons dans ce texte, les mathématiques aident, d'une part, à constituer les objets et l'objectivité même des sciences exactes, car elles sont le lieu où "la pensée se stabilise" ; par ce biais, leur fondement se "mêle" à celui des autres savoirs et à leurs dynamiques constitutives : elles sont le résultat même de nos pratiques de connaissance. D'autre part, la stabilité conceptuelle des mathématiques, leur relative simplicité (elles savent être profondes tout en partant de principes élémentaires, parfois très simples) est au cœur de la connexion que nous esquisserons avec certains processus cognitifs élémentaires. Nous ferons surtout référence à ceux qui reflètent des régularités du monde dans notre présence active dans ce même monde, en tant qu'êtres vivants (et vivants dans l'intersubjectivité et l'histoire). En particulier, il s'agira de saisir le rôle de l'action dans l'espace et dans le temps, ainsi que l'organisation de ces derniers par des "gestes", comme l'on dira, et des concepts, riches d'histoire et de langage, qui sont, tous deux, et dès leur origine, des gestes et des concepts éminemment mathématiques. C'est pour ces raisons, à notre avis, que toutes les théories de la connaissance ont abordé, d'une façon ou d'une autre, les questions des fondements des mathématiques, ce savoir "purifié", mystérieux et simple à la fois, où l'analyse du raisonnement est posée avec une extrême clarté et la construction des concepts s'enracine sur des praxis originaires de notre humanité.

Symétriquement, une épistémologie sensée des mathématiques doit essayer d'explicitier une philosophie de la nature. Elle lui est en tout cas implicite, car les grands choix sur les fondements des mathématiques, logicisme, formalisme, platonisme et constructivisme de différentes sortes, y compris ce regard "géométrique" qui sera le nôtre, contiennent une approche de la connaissance de la nature qui en est, à son tour, fortement influencée. On essaiera justement de déceler les conséquences de cette philosophie implicite dans les analyses de la cognition humaine.

Quant à la physique et la biologie, en contraste avec les paradigmes très abstraits encore dominants dans les fondements des mathématiques, elles se constituent respectivement autour des concepts de *matière* et de *vie*, à l'apparence si concrets, bien qu'eux-mêmes indéfinissables (si ce n'est négativement) dans le cadre interne de ces disciplines. Mais elles présentent aussi la difficulté de recourir sans cesse et de façon essentielle à la fois aux exigences de cohérence rationnelle, largement mathématisée en physique, et aux nécessités d'adéquation, par

l'expérience, avec une phénoménalité indépendante, quelque conceptuellement construite qu'elle puisse être.

La spécificité des phénomènes du vivant sera l'objet d'une conceptualisation relativement nouvelle, que nous proposons à l'attention du lecteur par un jeu complexe de départage et synthèse entre physique et biologique. La démarcation théorique est, pour nous, un tout premier pas pour la construction de connaissance scientifique, surtout face à des phénoménalités si difficilement réductibles l'une à l'autre, le vivant et l'inerte. La physique quantique nous offre un paradigme très important pour comprendre cette méthode : dans son histoire, on a tout d'abord constitué les bases d'une théorie et d'une objectivité autonomes et bien différentes des grandes structures causales de la physique classique (et relativiste), avec leurs propres analyses de la détermination (l'indétermination intrinsèque de la mesure simultanée de la position et de l'impulsion ; la non-localité et non-séparabilité de certains objets quantiques ; l'absence de trajectoires proprement dites dans l'espace-temps classique...). Ensuite, le problème est posé de l'unification, voire au moins de la construction de passerelles conceptuelles, de rapports par dualités et symétries d'objets et de théories. De même, à notre avis, l'autonomie théorique des analyses du vivant doit précéder toute tentative, si importante puisse-t-elle être, d'unification/corrélation aux phénoménalités physiques.

Dans cette perspective d'une mise en évidence des différences théoriques ainsi que des corrélations fortes, voire d'une unité souhaitable, de nature épistémique, entre physique et biologie, il faut en particulier parvenir à articuler et, si possible, à faire se correspondre "loi de la pensée" et loi d'objet, formalisation abstraite et expérience, dans la spécificité de leurs différents rôles dans ces disciplines. Or, il semble bien que ce soit une des exigences premières de toute "philosophie naturelle" que d'éclairer et interpréter, en termes de théorie de la connaissance, cette articulation problématique et, pour ce faire, de dégager les principes fondamentaux qui en assurent la synthèse au sein même de ces sciences.

Notre point de départ sera une analyse comparative de la construction de l'objectivité en mathématique et en physique, deux disciplines qui se sont constituées dans un entrelacement fort, à l'origine même de la science moderne. Cette détermination réciproque date au moins de Galilée, mais en fait elle a son origine dans la science grecque et se poursuit jusqu'à la géométrisation de la physique, qui a marqué le grand tournant du XXe siècle, avec le mouvement correspondant de physicalisation de la géométrie. On reconnaîtra, dans ce processus, la géométrie riemannienne et la relativité, la géométrie des systèmes dynamiques et, aujourd'hui, la géométrisation de la physique quantique.

Dans ce but, notre réflexion introduit une distinction entre "principes de preuve" et "principe de construction", que nous développons en parallèle entre fondements des mathématiques et de la physique ainsi qu'à l'intérieur de ces disciplines. On comprendra alors les grands théorèmes d'incomplétude des systèmes formels comme un décalage entre preuve et construction et on discutera de la prétendue incomplétude de la physique quantique pour en souligner les analogies et les différences avec l'incomplétude mathématique. Cette approche se situe tout à fait en dehors du débat qui a trop longtemps dominé les analyses des fondements des mathématiques, un jeu entre platonisme et formalisme, qui s'est éloigné de tout rapport à la physique. En particulier, on fera référence aux fondements cognitifs des mathématiques, dont l'analyse constitue pour nous un lien primaire aux autres formes de connaissance, par le biais de l'action dans l'espace et le temps physiques et du vivant.

Les raisons d'une centralité du rapport à l'espace et au temps, de l'"accès actif au monde" qui accompagne toute forme de connaissance, seront souvent soulignées. C'est ainsi que, dans notre approche, la constitution du savoir scientifique sera fondée sur ces formes relativisantes propres à la physique moderne : l'explicitation d'un système de référence et d'une mesure, dans le sens le plus vaste, est, pour nous, le point de départ de toute construction d'objectivité

scientifique. La modélisation digitale, et par là l'intelligibilité par l'informatique, dont l'apport est aujourd'hui essentiel mais n'est point neutre par rapport à cette construction, seront aussi au cœur de nos analyses.

Dans cet esprit, un des points de vue que nous défendrons ici, à partir de la physique, consiste à voir dans le "principe géodésique" (qui concernera l'"action" dans des espaces physiques ou conceptuels) un de ces grands principes constitutifs de la connaissance. Ces principes ne se limitent pas à déterminer de façon très forte les objectivités physiques, mais semblent aussi répondre à des exigences cognitives profondes pour toute connaissance. La façon dont le principe géodésique est appelé à opérer dans les grandes théories de la physique nous conduira alors à nous interroger, plus généralement encore, sur les rôles qu'y jouent les symétries et brisures de symétrie, invariances et variabilités. On examinera de près, en particulier, les symétries proposées et les brisures opérées par l'ordinateur, en tant que machine à états discrets : par ce biais, selon nous, la force du cadre logique et de calcul de cette dernière marque l'intelligibilité du monde, en lui imposant sa propre structure causale.

Les symétries, les invariances et leurs brisures non seulement se manifestent dans la phénoménalité physique, mais semblent bien en régir l'objectivité, à un niveau plus profond encore de détermination abstraite et peut-être même de régulation cognitive. C'est justement dans ce cadre que nous examinerons les rapports que tels grands principes, qui contribuent à construire et déterminer des objectivités scientifiques, peuvent entretenir avec leurs sources cognitives. Des rapports qui constituent la science moderne de façon apparemment contradictoire : d'une part, il peut s'agir de la retranscription mathématique, adaptée aux disciplines plus ou moins formalisées, de structures mentales communes de la cognition humaine elle-même, de sorte que les géodésiques, voire les symétries du vivant et de l'action pourraient être corrélées à leurs grandes formulations mathématiques ; de l'autre, à l'inverse pourrait-on dire, il s'agit de constructions forcées, le plus souvent contre-intuitives, qui doivent rompre avec des représentations cognitives spontanées, telles que l'empiricité tend à les développer dans le cadre restreint des expériences quotidiennes.

Nous tenterons ensuite d'aborder la pertinence de ces questions d'invariances générales dans le domaine de la biologie et de dégager la façon dont elles semblent s'y manifester dans l'état actuel de certaines de ses sous-disciplines. La situation est en fait particulièrement complexe en biologie, où la "réduction" à l'une ou l'autre des théories physico-mathématiques courantes est loin d'être accomplie (pour autant qu'elle soit possible ou souhaitable !). Une des difficultés pour ce faire réside, à notre avis, tout autant dans les spécificités des régimes causaux des théories physiques - qui, de plus, diffèrent entre eux - que dans la richesse propre des dynamiques du vivant. On pense ici à l'enchevêtrement et au couplage des niveaux d'organisation, aux phénomènes d'autorganisation et de corrélation causale (globale et locale) que l'on trouve dans la phénoménalité biologique.

On analysera alors ces aspects comme se trouvant dans une situation "limite" pour la physique. La "singularité physique du vivant" se rapporte aux difficultés, à notre avis intrinsèques pour les théories physiques courantes, à saisir ces phénomènes qui permettent de maintenir des états matériels, comme ceux du vivant, dans une "criticité" étendue dans l'espace et le temps, dans un sens physique bien précis. C'est la physique donc qui permettra de parler d'états, des singularités dans un sens mathématique à clarifier, qui ne sont pas proprement physiques, ou, mieux, pas (encore ?) traités par des théories physiques. Bref, pour nous, le biologique est à analyser comme une "situation physique limite", une limite externe aux théories physiques contemporaines.

Cette discussion sera conduite tout en essayant d'explicitier les effets théoriques et conceptuels de nos approches sur la caractérisation - voire la recatégorisation - de concepts aussi fondamentaux que ceux d'*espace* et de *temps* tels qu'ils se trouvent traités dans le cadre contemporain des sciences de la nature.

Pour conclure et nous résumer, dans ce livre nous essayerons de dégager des concepts organisateurs de certains phénomènes physiques et biologiques, en passant par une analyse des fondements des mathématiques, dans le dessein d'unifier des "faits", voire de faire dialoguer des univers conceptuels différents. L'analyse de l'"ordre" et des symétries dans les fondements des mathématiques et de la physique sera reliée aux grands invariants et principes, dont le principe géodésique, qui régissent et donnent unité aux différentes théories physiques. On essaiera de comprendre, en particulier, les structures causales, un élément central de l'intelligibilité physique, en termes de symétries et leurs brisures. L'importance de l'outil mathématique sera aussi mise en évidence, ce qui nous permettra de saisir les différences dans les modèles pour la physique et la biologie qui nous sont proposés par les mathématiques du continu et celles du discret, dont les simulations computationnelles.

Dans le cas, particulièrement difficile et théoriquement moins creusé de la biologie, on proposera une "unification par concepts", une tentative qui devrait toujours précéder la mathématisation. Une esquisse d'unification qui se basera aussi sur la mise en évidence de différences conceptuelles, de points de passages complexes, d'irréductibilités techniques d'un domaine à l'autre. Car un point de vue moniste, comme le nôtre, ne devrait pas nous rendre aveugle : il n'y a aucun doute, pour nous, que la "matière physique" est unique et qu'il n'y a rien d'autre au-delà de cela dans le monde. Pourtant les outils de connaissance que l'homme a construits, dans son histoire, afin de rendre intelligibles les phénomènes naturels ne sont pas unifiés, pour de bonnes raisons, pertinentes pour l'efficacité même de la construction de l'objet et de l'objectivité scientifique. Et nous ne pouvons pas prétendre les unifier par un monisme méthodologique et technique forcé, selon lequel telle méthode mathématique ou théorie physique, construite autour d'une phénoménalité bien précise, pourrait tout nous faire comprendre. Même la physique, en tant que construction théorique, est loin d'être unifiée : la Mécanique Quantique et la Théorie de la Relativité Générale ne le sont pas - encore - (les notions de champ quantique et relativiste différent). Et, comme l'on disait plus haut, les physiciens visent à l'unification, non pas à la réduction, c'est-à-dire ils visent à une nouvelle notion de champ (ou d'objet physique ou d'espace-temps) qui les unifiera, en remettant en perspective si nécessaire les deux théories. Il en est ainsi, par exemple, avec la théorie des supercordes, qui propose des nouveaux "objets" quantiques, ou avec ce changement radical des concepts même d'espace et de temps, envisagé par la géométrie non-commutative. Et, comme depuis Copernic et Galilée, Leibniz et Newton, voire depuis toujours en science, ces théories pour la microphysique construisent leurs propres cadres conceptuels révolutionnaires, en fait contre-intuitifs, ainsi que, ensuite, leurs propres outils mathématiques.

En bref, nous sommes monistes pour la "matière", puisque l'unité est, supposons-nous, dans cette matière qui fait friction et s'oppose à nos expériences ; mais l'unité n'est pas nécessairement dans les *théories* existantes, au sein desquelles elle doit être construite. Le dialogue des disciplines vise à nous mener à de nouvelles idées et synthèses méthodologiques : la cohérence dans l'intelligibilité du monde est une conquête difficile, si elle est possible, et elle n'est pas dans la prétendue unicité des théories à présent disponibles pour traiter l'un ou l'autre des domaines phénoménaux historiquement donnés. Et elle se construit, à notre avis, au moyen de ponts conceptuels, parfois de réductions ponctuelles, pouvant aider à mettre en évidence des points de "contact" ou de "friction", mais aussi par des différenciations théoriques et, si possible, des changements de regard simultanés dans différents domaines. Des conceptualisations qui se posent à la limite des théories physiques courantes sont au cœur de nos tentatives en biologie.

TABLE DES MATIÈRES

1. Un premier dialogue sur des rapports entre fondements des mathématiques et de la physique.

Introduction : principes de construction et principes de preuve.

I. Sur les fondements des mathématiques. Un premier questionnement.

1. Questions de terminologie ?
2. Sur la genèse des structures mathématiques, de leurs rapports et sur quelques analogies conceptuelles avec la physique.
3. Formalisation, calcul, signification, subjectivité.
4. Entre cognition et histoire : vers de nouvelles structures de l'intelligibilité.
 - 4.1 Mémoire et oubli en mathématiques.

II. Concepts mathématiques et objets physiques.

1. Logicisme, formalisme et "généalogies de concepts".
2. A propos du "transcendant" en physique et en mathématiques.
 - 2.1 Transcendance vs. constitution transcendantale : Gödel vs. Husserl
3. Lois, structures et fondements.
4. Sujet et objectivité.
5. De l'intuitionnisme à un constructivisme renouvelé.

III. A propos des concepts mathématiques et des objets physiques

1. La "friction" et la détermination des objets physiques
2. A propos d'absolu et de relatif en mathématiques et en physique.
3. Sur les deux fonctions de la langue dans le processus d'objectivation et la construction de modèles mathématiques en physique.
4. De la relativité aux univers de repérages à celle de ces univers eux-mêmes comme génératrice des invariances physiques.
5. Causalité physique et symétrie mathématique.
6. Vers le "sujet cognitif".

2. Incomplétude et incertitude en mathématiques et en physique.

Introduction

I. Le geste dans la preuve : l'incomplétude mathématique des formalismes et les fondements cognitifs des mathématiques.

1. Les machines, le corps et la rationalité.
 2. L'amibe, la motricité et la signification
 3. L'abstrait et le symbolique ; la rigueur
 4. De la réaction platonicienne au "geste"
 5. Le continu d'une ligne
 6. Quelques gestes chez Châtelet et la ligne numérique
- Intermezzo: le petit Gauss et l'induction
7. L'incomplétude mathématique des formalismes
 8. Fermetures à l'horizon et itérations
 9. L'intuition
 10. Les gestes du corps et le "cogito".

II. Incomplétude, incertitude et infini : différences et similitudes entre physique et mathématiques.

1. Incomplétude en physique quantique et incomplétude logique.
 - 1.2 Complétude/incomplétude et théories physiques.

- 1.3 Incomplétude vs indétermination en physique quantique.
- 2. Fini/infini en mathématiques et en physique.
 - 2.1 Quelques passages à la limite en physique.
 - 2.2 Constitutions d'objectivité. Comparaisons conceptuelles entre mathématiques et physique.

3. De l'espace et du temps des théories physiques aux déterminations spatio-temporelles en biologie.

Introduction

- I. Au sujet de l'espace et du temps en physique.
 - 1. Trois types de théories physiques : relativité restreinte et générale, physique quantique et physique des systèmes de type critique.
- II. L'espace et le temps : de la physique vers la biologie. Le champ du vivant.
 - 1. Trois formes du temps.
 - 2. La dynamicité "auto-constituante" du vivant
 - Intermezzo: Galilée, les femmes et les marées
 - 3. Morphogenèse
 - 4. Information et structure géométrique.
 - 5. Globalité et circularité dans l'espace et le temps.
- III. Quelques remarques sur les déterminations spatio-temporelles en biologie et leurs aspects gnoséologiques.
 - 1. Aspects biologiques.
 - 1.1. Espace : lois d'échelle et criticité ; géométrie et fonctions biologiques.
 - 1.2. Temporalités biologiques.
 - 2. Aspects gnoséologiques et déterminations mathématiques des univers de repérage.

4. Invariances, symétries et brisures de symétries.

- 1. Un grand principe structurant de la physique : le principe géodésique.
- 2. Le rôle des symétries et de leurs brisures : de la description à la détermination.
 - 2.1. Symétries, brisures de symétries et logique.
 - 2.2. Symétries, brisures de symétries et détermination du réel physique.
- 3. Quelques remarques sur les invariances et variabilités en biologie.
 - 3.1. De quelques invariances abstraites en biologie : homologie, analogie, allométrie.
 - 3.2. Commentaires sur les rapports entre invariances et conditions de possibilité du vivant.
- 4. Sur les recatégorisations possibles des notions d'espace et de temps à partir de l'état contemporain des sciences de la nature.

5. Causalités et symétries. Le continu et le discret mathématiques. Certains invariants de réduction causale en biologie.

Introduction

- 1. Structures causales et symétries, en physique.
 - 1.1 Les symétries comme point de départ de l'intelligibilité.
 - 1.2 Temps et causalité en physique
 - 1.3 Brisures de symétries et tissus d'interactions.

- Intermezzo : Remarques, commentaires techniques et références pour la physique.
Inter.1 : Symétries et brisures de symétrie dans la physique contemporaine.
Inter.2 : A partir du théorème de Noether et des lois de conservation physiques.
2. Du continu au discret.
 - 2.1 L'informatique et la philosophie de l'arithmétique.
 - 2.2 Laplace, l'arrondi digital et l'itération.
 - 2.3 L'itération et la prédiction
 - 2.4 La loi et l'algorithme.
 3. Causalités en biologie.
 - 3.1 Représentation de base.
 - 3.2 Sur la finalité contingente.
 - 3.3 Dynamique "causale" : développement, maturité, vieillissement, mort.
 - 3.4 Invariants de réduction causale en biologie.
 - 3.5 Quelques commentaires et comparaisons avec la physique.
 4. Synthèse et conclusion

6. Situations critiques étendues : la singularité physique du vivant.

Introduction

1. Sur les singularités et la criticité en général.
 - 1.1 Du gaz au cristal.
 - 1.2 Du local au global.
2. Le vivant en tant que "situation critique étendue".
 - 2.1 Situations critiques étendues : approches générales.
 - 2.2. La situation critique étendue : quelques précisions et compléments.
 - 2.3. Résumé de caractéristiques de la situation critique étendue.
3. Les régimes d'intégration, de régulation et causaux.
4. Les espaces de phases et les trajectoires.
 - 4.1 Un aléatoire proprement biologique ?
5. Un autre regard sur la stabilité et la variabilité.
 - 5.1 Les biolons comme attracteurs et trajectoire individuelle

7. En guise de conclusion : unification et séparation de théories, ou de l'importance des résultats négatifs.

Appendice : aléas et détermination, entre connaissance et objectivité. Sur les indéterminations, leurs sources et leurs limites.

1. Chaos déterministe et aléatoire mathématique : le cas de la physique classique.
2. L'objectivité de l'aléatoire quantique.
 - 2.1 Séparabilité vs. non-séparabilité.
 - 2.2 Des objections possibles à notre approche.
3. La détermination et le continu.

Bibliographie