

# Physique et biologie, entre l'espace et le temps<sup>1</sup>

Giuseppe Longo

Centre Cavallès, République des Savoires,  
CNRS et Ecole Normale Supérieure, Paris  
School of Medicine, Tufts University, Boston

**Résumé.** Ce texte reprend des parties du livre (Bailly, Longo, 2006) et les encadre dans des réflexions plus récentes. La diversité des déterminations mathématiques de l'espace-temps dans les différentes théories physiques ouvre la voie à une mise en évidence de la singularité des phénomènes du vivant, à partir de leur rapport au temps. L'autodétermination et les circularités des analyses du vivant nous conduiront vers une réflexion sur les rythmes propres de l'organisme, sur leur autonomie par rapport aux fréquences physiques, voire des leurs corrélations aux phénomènes de protension (intentionnalité) propres au vivant. On terminera en esquissant la toile de fond du temps de l'historicité évolutive des organismes, ainsi qu'un simple structuration mathématique qui permettra de différencier les repérages cognitifs abstraits d'espace et de temps.

## 1 - Introduction

Les théories physiques contemporaines – celles qui sont nées et se sont développées depuis la fin du XIXe siècle – ont conduit à une géométrisation de plus en plus poussée de la physique. En géométrie des systèmes dynamiques, depuis Poincaré, des notions géométriques (bifurcations, trajectoires homoclines – à l'intersection d'espaces stables et instables) rendent intelligible les systèmes déterministes imprédictibles (non-linéaires); en Relativité, la gravitation est comprise en termes géométriques (les trajectoires gravitationnelles sont décrites comme des géodésiques dans des espace-temps à courbure non-nulle, riemanniens); même en physique quantique, la géométrie non-commutative de A. Connes paraît l'instrument plus adéquat pour rendre compte des interactions quantiques et des champs non abéliens (corrélés à la non-commutativité de la mesure). Ce mouvement est aussi une physicalisation de plus en plus affirmée de la géométrie : Riemann et Connes en sont les deux représentants paradigmatiques (Riemann 1854), (Connes, 1994). Dès lors, si l'on considère l'épistémologie de l'espace-temps et que l'on accepte de voir dans les déterminations mathématiques de la géométrie le processus d'objectivation des formes de l'intuition que constituent l'espace et le temps phénoménaux, suivant Kant, on doit aussi accepter d'aller plus loin, c'est-à-dire accepter que ces formes de l'intuition, comme ces déterminations mathématiques, se trouvent elles-mêmes investies, en retour, par les déterminations physiques des théories contemporaines.

Quant aux rapports entre mathématiques et biologie, la différence cruciale que l'on essaiera de mettre en évidence réside tout d'abord dans le rôle "constitutif" des outils mathématiques pour la physique, par contraste avec la situation conceptuelle qui prévaut, jusqu'à présent, en biologie. En effet, en physique, les quelques indices et régularités que l'expérience nous fournit sont transformés en structures mathématiques très riches, beaucoup plus riches que ces "symptômes" que nous saisissons

---

1 Texte "composé" à l'occasion d'un exposé aux **Archives Jean Piaget**, Genève, CH: "La géométrie du temps en biologie vs. l'espace-temps en physique", 5 mars, 2019.

par la mesure de l'inerte et de ses dynamiques, en particulier en relativité et en microphysique. De plus, ces structures, loin d'être seulement descriptives, sont régulatrices, en fait normatives, de la réalité physique (et de son espace) : elles *découpent* et *qualifient*, elles contribuent à déterminer cette réalité, elles la co-constituent. On ne peut rien dire, en relativité, en physique quantique, sur les systèmes dynamiques (au cœur des théories classiques) sans les mathématiques : elles sont le langage qui délimite, voire définit l'objet ainsi que l'espace conceptuel et phénoménal de la physique. Les mathématiques contribuent à concevoir l'instrument de mesure en physique quantique, qui co-constitue l'objet physique, toujours le résultat d'une interaction entre cet instrument et le "réel".

Par contraste, en biologie, le vivant s'impose dans sa richesse phénoménale et toute théorie mathématique n'en saisit que quelques aspects, fractionne l'unité et l'individualité du vivant, son "imbrication" dans l'écosystème. La question de la mesure se pose aussi, mais de façon fort différente, en commençant par la distinction, qui n'a pas de sens en physique, entre *in vivo* et *in vitro*, voire par l'importance, que l'on mentionnera, de la mesure diachronique, celle du passé, pour la compréhension du présent (Longo, 2017).

Si, enfin, l'on veut réfléchir au rôle de la mathématique dans la cognition humaine, il faut d'abord repenser celui de cette discipline en biologie, ce que l'on fera ici, car le vivant est le point de départ de toute réflexion sur l'entendement. Néanmoins, malgré ces différences et la moindre mathématisation de la biologie, on peut constater, dans bien des secteurs de cette discipline, un mouvement semblable vers la "géométrisation". La question de l'espace propre ne s'y pose pas seulement au niveau de la structure macromoléculaire (séquences de bases sur l'ADN et les effets génétiques qui en résultent, par exemple, ou structures spatiales des protéines et prions), mais aussi à celui du développement (effets inducteurs des contiguïtés spatiales dans l'embryogenèse, par exemple), du fonctionnement des organismes (géométries fractales affectant des interfaces membranaires ou des réseaux arborescents engagés dans des fonctions physiologiques et des régulations) ou encore au niveau des populations dans le partage de l'environnement et les dynamiques qui s'y trouvent associées. De même, la question du temps s'y pose aussi bien en ce qui concerne l'articulation entre temps de réponse à des stimuli externes et temps itératif associé aux rythmes internes du temps biologique propre, que pour les synchronies et hétérochronies dans les développements dont la prise en compte a conduit à un enrichissement récent de la théorie de l'évolution elle-même (Gould 2002), (West-Eberhard 2003). Aujourd'hui les différentes échelles temporelles des phénomènes, de reproduction par exemple, leur hétérochronie, en particulier si résultante des perturbations climatiques, modifient le "fine tuning" des interactions interspécifiques, comme celle entre insectes pollinisateurs et plantes (Gross 2006).

Mais, quel lien peut-il y avoir entre les espaces de la physique et ceux du vivant ? Le fait est que cette formidable construction conceptuelle que représente la géométrie humaine et dont le but est de rendre l'espace intelligible, de l'organiser, est enracinée dans ces "actes d'expérience" qui marquent notre présence au monde. Elle trouve son origine dans un couplage fondateur et fécond entre notre "agir dans le monde", en tant qu'êtres vivants et engagés dans l'intersubjectivité (on reprend ici, très librement, des thèses d'Edmund Husserl, 1933), la capacité de symbolisation et d'abstraction dont l'évolution et l'histoire ont doté l'espèce humaine, et le développement de son imaginaire créatif – en même temps que celui de sa rationalité – qui en ont résulté. C'est dans un parcours constitutif – qui va de la phylogenèse, à l'ontogenèse, puis au dialogue entre êtres vivants dans l'histoire, stabilisé dans l'intersubjectivité, dans l'écriture, dans la mémoire historique – qu'il faut trouver le sens même des plus complexes parmi les constructions de la physique-mathématique. Sans le tout premier geste du vivant dans l'espace, avec toute son intentionnalité pourvue de ces dimensions imaginaires et cognitives, il n'y aurait pas l'idée d'une "variété à 10 dimensions", pour élaborer la théorie des "super cordes", en physique quantique (Green et al. 1988).

L'objet de ce texte est donc d'introduire une analyse, esquissée dans le livre avec Bailly, ultérieurement développée dans les références, de certaines des conséquences épistémologiques de ces situations sur les représentations de l'espace et du temps – ainsi que des déterminations théoriques qui régulent ces représentations, telles qu'elles ressortent de ces domaines scientifiques. Il reviendra au lecteur expert dans les travaux de Piaget, mieux saisir des éventuelles assonances et désaccords avec ce grand épistémologue et philosophe, moitié suisse, moitié français, comme il aimait dire lui-même (Campanella 2102).

## 2 - Le temps de la genèse des structures géométriques

Une toute première étape dans la discussion des phénomènes de la vie et de leur rapport aux mathématiques de l'espace et du temps peut se fonder sur l'analyse de la temporalité particulière qui est celle du vivant. Nous avons longuement parlé (Bailly, Longo 2006) de l'irréversibilité du temps au cœur des systèmes de type critique ou dynamiques. Or, il ne fait pas de doute que l'irréversibilité du temps est tout à fait inhérente au vivant. À tout instant, la phylogenèse et l'ontogenèse sont marquées par des "bifurcations" et par une émergence de phénomènes et de structures non prédictibles qui ressemblent aux phénomènes observables dans les systèmes de type critique (e.g. la formation soudaine de nouvelles structures de cohérence, comme ... un flocon de neige), ou les incluent, mais vont bien plus loin qu'eux. Ou, plutôt, tout vivant inclut un grand nombre de systèmes de type critique : dynamiques, thermodynamiques, etc. Cela ne contribue pas seulement à l'irréversibilité du temps de ces systèmes, mais aussi à cette unité qui s'annonce au moins dans certains systèmes dynamiques et que nous évoquions plus haut : les trois corps de Poincaré, dans leur unité très simple, forment une toute primitive "Gestalt" associée à une pure interaction gravitationnelle (deux corps ont un tout autre "comportement", stable et prédictible, que trois : ainsi semble se mettre en place, en passant de deux à trois corps, la plus élémentaire des émergences, cette unité des interrelations non stratifiables).

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

Les phénomènes d'incomplétude mathématique des systèmes logico-formels, basés sur des "règles ou principes de preuve" logiques, gérables en principe de façon automatique, sont dus à une "brèche" (un "écart") entre ces deux types de "principes" : les constructions conceptuelles basées sur les régularités spatio-temporelles ont une autonomie, une indépendance essentielle par rapport aux descriptions formelles. On le voit de près dans (Longo 2011), où une analyse rapprochée est conduite des résultats d'incomplétude récents (1970-80) : on y démontre que des principes de construction (symétrie, bon ordre ...), au cœur de l'invention de structures mathématiques, sont utilisés de façon essentielle et non formalisable même dans des preuves de certains théorèmes de la Théorie Formelle des Nombres. Mais c'est l'invention, chez Euclide, de la *ligne sans épaisseur* (définition beta), qui devient la toute première "structure" mathématique : elle s'ajoute et diffère de la logique rigoureuse de la preuve (Longo 2015). La ligne sans épaisseur organise l'espace, constitue les bords des figures

planes d'Euclide, une invention extraordinaire – qui atteindra le co-bordisme de R. Thom. En fait, tout théorème mathématique important demande l'invention d'un nouveau concept, d'une nouvelle structure. Des principes de symétrie et d'ordre président souvent à sa constitution, mais il peuvent y en avoir d'autres, comme dans les diagramme en Théorie des Catégories (Asperti, Longo, 1991).

Cette distinction – principes de construction géométriques et principes de preuve algébrico-formels – est, pour ma part, un des éléments de cette approche qui souligne également le rôle constitutif de l'espace et du temps (leur "géométrie") dans l'analyse de la cognition. L'enracinement cognitif des gestes spatiaux qui permettent d'inventer la ligne comme pure trajectoire, sans épaisseur, est une *condition de possibilité* du concept à construire. Sans le premier geste du maître qui trace une ligne par sa main, la dessine sur un tableau en la disant “sans épaisseur”, dans le langage, aucun concept mathématique n'en suivrait : ce geste spatial est rendu commun, stable dans l'intersubjectivité, voire dans l'écriture (Husserl 1933).

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

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

Mais cet oubli des mathématiques de l'espace, qui en outre produisent leur propre approche aux processus temporels (c'est à dire, le temps de la genèse des structures), a gravement réduit l'envergure de l'analyse de nos formes de connaissance, une fois que l'approche algébrico-formelle – et ses machines – a été identifié à la cognition humaine. On a ainsi détourné l'attention des processus de connaissance vers les formalismes linguistiques, voire vers des logiques purement formelles. Qui plus est, ce qui ne manque pas d'être un retour historique intéressant, on ne peut même plus aujourd'hui étudier – voire construire – des ordinateurs, sans un regard nouveau sur l'espace et le temps, sur leur structuration géométrique, car les systèmes distribués, concurrents, asynchrones posent d'emblée des problèmes spatio-temporels, tout à fait étrangers aux "machines de Turing" (et au lambda-calcul, aux fonctions récursives...), qui ont dominé la théorie de la calculabilité (et de la programmation), des années 1930 jusqu'aux années 1980 (Aceto et al. 2003).

### **3 - Vers d'autres articulations du temps : rythmes propres et protension/retension**

Voici donc posé le problème du temps de la genèse des structures, de l'histoire des processus de constitution. Ce temps qui implique l'espace, et qui pose donc problème à l'informatique d'aujourd'hui, comme à la physique. Est-ce là aussi l'un des aspects du nouveau rôle de la géométrie dans l'analyse de la cognition ? Est-ce le temps distribué des processus constitutifs ? Que dire, en fait, du vivant, qui n'existe que dans l'espace et le temps ? Des écosystèmes qui s'organisent dynamiquement ? Leur genèse est tout d'abord une genèse de structures, des protéines à la

morphogénèse de l'éléphant... Leur temps est marqué par l'histoire du processus de constitution. Irréversibilité dynamique et évolutive, unité systémique... : que deviennent-elles ces formes de la temporalité chez le vivant, ce vivant qui agit dans l'espace ?

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

La toute première forme, algébrique-formelle, est celle des horloges mécaniques, ces mêmes horloges que l'âge des Lumières nous proposait comme modèle possible pour l'entendement ou qui, plus tard, sera le temps de la machine de Turing. Celle-ci scande le temps par ses mouvements "à droite, à gauche", tic tac, horloge absolue. Rien ne se passe entre un mouvement à droite, un autre à gauche, rien n'est dit de leur "durée" : ils sont la "mesure du temps en soi". C'est le temps proche à celui du mythe, que l'on retrouve dans la poésie grecque. On pourrait à cet égard reprendre une analogie classique : pendant la guerre de Troie, le temps est scandé par les sorties d'Achille de sa tente ; Achille sort de sa tente, quelque chose se passe (la guerre), il rentre dans sa tente, tout s'arrête : le temps s'arrête. Achille sort encore de sa tente..., voilà la scansion du temps : il n'y a pas d'autre mesure, il est l'absolu du temps mythique. Troie et la guerre sont hors du monde, ils sont dans le mythe ; leur temps contribue à un extraordinaire effet poétique. La machine de Turing n'est pas allé plus loin, car le temps des formalismes des années 1930 est le temps algébrique-formel, cet absolu de la machine sans espace, le "calcul en soi", un pas après l'autre, dans le vide. En fait, ce temps est "sécrété" par l'horloge mécanique, voire l'horloge de la machine. Mais la pensée grecque, dans sa profondeur, nous propose aussi une autre forme du temps : Kronos, fils d'Ouranos. Kronos est le temps des processus qui modifient la matière, imprévisibles comme sa survie à la violence de son père et sa vengeance (il va castrer son père qui aurait dû le dévorer), irréversibles comme la mort. Voici donc une deuxième forme possible du temps, celui qui s'insère bien dans l'analyse des systèmes physiques de type critique, scandé par les dynamiques irréversibles et les transitions critiques. Il est un temps dans l'espace où se développe tout processus qui enchaîne des changements des formes. Au cœur de son déroulement, il y a la géométrie des systèmes dynamiques : le temps est scandé par leurs bifurcations, par les passages vers le chaos et par toute structuration spatiale irréversible (la formation d'un ouragan, d'un flocon de neige ... des transitions critiques). Il est le temps de "la genèse des structures", que nous mentionnions plus haut, de l'histoire des processus de constitutions, car une bifurcation, une catastrophe, peut dépendre de tout le temps décollé au cours dans long processus et pas seulement de la situation à un instant donné.

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

physique relativiste, n'a rien à voir avec le temps phénoménal, ce mélange de temps vécu et de temps raisonné, que nous vivons comme irréversible.

Au moins pour ce qui concerne l'irréversibilité, le temps des systèmes de type critique ou dynamiques paraît donc plus adéquat pour s'approcher du vivant que celui de la relativité (et peut-être que celui de la physique quantique). Il est clair, que ce temps n'a de sens que dans l'espace (comme celui de la relativité) : premièrement, les bifurcations, le chaos, les transitions critiques se présentent dans l'espace, deuxièmement, il n'existe pas le temps d'un seul système dynamique isolé, avec une "linéarité" de ses bifurcations, car ce système n'existe pas. La genèse des structures s'opère en parallèle et dans l'interaction d'une pluralité de structures et de systèmes, dans l'espace.

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

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

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

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

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

Tout d'abord, le vivant s'impose dans son unité et ses temps propres, par l'autonomie des horloges biologiques (Chaline 1999). Une autonomie bien plus forte que celle de toute horloge dans le monde physique, car le vivant "nous agresse" par son unité individuelle, il impose activement sa présence, son temps.

Dans le temps physique, la deuxième forme mentionnée plus haut (géométrique, voire dynamique et relationnelle), la situation présente et future d'un système, du réseau interactif des systèmes qui le constitue, dépend "seulement" de la situation passée (l'histoire) du réseau lui-même. Mais la situation se fait encore plus "interactive" chez le vivant. D'une part, il y a des horloges "autonomes" propres à l'organisme : le temps de son métabolisme, en fait, avec ses temps rythmés (battements cardiaques, respiration...). Ils sont en effet des "nombres pures", par delà les espèces, constants pour un phylum très vaste (les mammifères, par exemple, nous y reviendrons). Bien évidemment, ces horloges *internes* sont loin d'être isolées : elles règlent des fonctions en permanent échange avec l'extérieur, leur raison d'être est "l'interaction réglée", si typique du vivant. D'autre part, il y a le temps de l'action dans l'espace de ce même vivant, une action marquée par ses buts, tout au moins celui de la survie. Avant d'y venir, résumons les éléments qui s'ajoutent au temps physique – car le temps physique reste là, bien évidemment, sous-jacent à tout être vivant dans le temps et l'espace (physiques). Nous sommes en train de considérer au moins deux autres composantes du temps :

- le temps local de chaque individu vivant, ses horloges internes, qui se rétablissent même après toute interaction tolérable qui ait pu les affecter ; des horloges aussi qui existent, justement, pour permettre et régler l'interaction (Bailly, Longo 2009) ;

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

Cette seconde composante du temps biologique dépend donc des "attentes" du futur possible. L'intentionnalité marque l'évolution du temps du vivant, une intentionnalité aussi préconsciente, une "protension", comme celle de l'amibe qui va dans une direction pour préserver ou améliorer son métabolisme : ce "geste" dans l'espace et le temps est une des formes les plus élémentaires de "choix" dans la constitution de bifurcations, de parcours possibles, dans l'espace et le temps. Chez les organismes complexes, ce choix se fait sur la base d'une attente explicite (voire consciente) du futur : il dépend donc d'un futur possible ou des possibilités considérées pour le futur (Longo Montévil 2011).

Il doit être clair que l'intentionnalité fait référence ici tout d'abord au "finalisme contingent" propre à la vie, elle est donc une "intentionnalité contingente". Il n'y a pas d'individu vivant, ni d'espèce, sans une finalité implicite, celle de survivre ; mais cette finalité n'est pas métaphysique, elle est immanente et contingente, elle pourrait ne pas être – si elle n'était pas, ni l'individu ni l'espèce en question ne survivraient longtemps. Elle est essentielle à la préservation de l'individu – à partir du métabolisme de la cellule – et de l'espèce et s'organise d'une façon très complexe dans tout individu multicellulaire, où elle impose des formes, des tentatives, de "prédiction" du futur. L'intentionnalité, dans le sens très fort d'Husserl, est plutôt une "conscience de quelque chose", de "visée", elle se dirige consciemment vers un but ; elle est donc le résultat ultime, le point d'arrivée d'un parcours constitutif dans la phylogenèse et l'intersubjectivité humaine, qui commence par le "geste dirigé", mais préconscient, de survie (Longo, Perret 2017).

Nous pouvons prendre comme exemple celui des primates - mais cela peut être valable pour nombre de mammifères au cortex visuel assez proche du nôtre. Cet exemple se situe à mi-chemin entre "l'action" de l'amibe et le geste intentionnel conscient de l'individu social, voire de tout un groupe

social. Quand nous faisons aller le regard d'un point à l'autre du champ visuel, par une saccade oculaire, le champ récepteur des neurones du cortex visuel pariétal se déplace brusquement, avant la saccade, dans la direction du mouvement du regard qui va être effectué (Berthoz 1997). Autrement dit, le cerveau, dans le but de suivre la trajectoire d'un objet ou de précéder le parcours d'un autre animal dont il a compris les "intentions", déplace le champ récepteur et anticipe les conséquences du mouvement. Ce n'est qu'un exemple, parmi tous ceux que nous pourrions donner du rôle de l'anticipation du futur propre au vivant, mais il est de grand intérêt, car elle est une forme d'intentionnalité préconsciente, une "protension" animale, toutefois très proche de nos gestes conscients. En fait, ce phénomène prépare les gestes en changeant la situation biochimique et électrostatique (et donc physique) des neurones, dans l'attente du futur. Une nouvelle situation est imposée à la structure biologique et physique, une situation qui dépendra, en fin de compte, non seulement de la situation présente et passée, mais aussi du futur ou de son attente (la position attendue de l'objet dans le champ visuel). Il apparaît donc que le temps chez le vivant, en tant qu'épiphénomène de l'interaction entre systèmes en évolution, s'enrichit d'une synchronisation et d'une réorganisation de ces phénomènes qui lui sont propres, grâce aux nombreux niveaux, inclus ceux de l'intentionnalité/protension, préconscientes ainsi que conscientes.

Si l'on résume, les rythmes métaboliques ou cardiaques donnent une mesure du temps, plus ou moins régulière, mais locale, propre à l'individu, qui la partage avec son espèce et son espèce avec des phylums plus larges. Bien évidemment, il faut ajouter à cela l'interactivité du vivant : contrairement à la localité "absolue" d'une métrique-courbure de l'espace, si ces horloges locales existent dans un écosystème, leur but (leur finalité contingente) n'est pas d'isoler l'organisme mais de contribuer à sa stabilité, autant que possible, dans un milieu changeant. Elles le synchronisent avec les autres organismes et l'aident à rétablir son équilibre, face à ce qui est "différent" : elles sont au cœur de ce jeu entre autonomie de l'organisme et hétéronomie qui est essentiel à la vie.

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

#### **4 - La dynamique autocostruante du vivant**

Nous avons évoqué souvent une autre image pour saisir la complexité du vivant. L'individu vivant, voire l'espèce, définit une zone de "criticité étendue". Cela paraît un fait impossible en physique où les zones critiques sont éminemment singulières (sur un point) et instables : la formation d'une flamme, d'un ouraga, d'un flocon de neige, la fonte soudaine d'un glaçon ... se fait par le passage d'un point critique, où, localement, tout change – une nouvelle structure de cohérence se forme. Dans la zone critique étendue du vivant, par contre, la structure de cohérence de l'organisme est reconstruite en permanence : nous avons des milliards de reproduction cellulaires par jour, chacune reconstruit localement la matrice tissulaire, les connections intercellulaires ... l'organisme. Ces rythmes, y compris ceux du coeur, de la respiration, du métabolisme (des invariants numériques des espèces, voire de plura entiers), scandent le temps de l'autonomie et réorganisent l'unité face à l'hétéronomie.

Quand on passe à l'espèce, dans son écosystème, le paradigme physique paraît à nouveau insuffisant. Encore une fois, les méthodes des systèmes dynamiques nous donnent des outils



formidables pour une mathématique du vivant qui a beaucoup à nous apprendre, car elle suggère des questions et, parfois, donne des réponses. Toutefois, toute analyse mathématique d'un système évolutif, imprégnée de la force des méthodes développées en physique, voit l'évolution du système dans un champ figé de forces ou, tout au plus, dans un réseau de champs de forces données. C'est-à-dire, l'espace des phases (observables et paramètres pertinents) ne change pas au cours du processus. Soit le plus simple des systèmes classiques : une bille qui roule dans une coupe. Son champ de forces, la gravité, la structure géométrique de la coupe, les frictions, entre autres, "sont déjà là" : l'analyse des oscillations s'ensuit assez facilement. Dans ce cas des systèmes dynamiques plus complexes, leur analyse mathématique peut faire référence à de nombreux champs de forces et rend la plupart des systèmes intrinsèquement imprédictibles (même si ce dernier phénomène apparaît dans des situations qui ne sont pas plus complexes que celle de la bille que nous venons de considérer : un pendule double, par exemple). Toutefois, l'analyse qualitative nous autorise des percées remarquables au sujet des dynamiques possibles de ces systèmes (singularités, bifurcations, attracteurs...). Ce peut être déjà très compliqué, mais dans le cas du vivant un élément s'y rajoute encore : le champ de forces se constitue au cours de l'évolution. Quand les observables et paramètres pertinents sont, comme depuis Darwin, les phénotypes, voire les organismes, et les paramètres qui comptent pour ces observables, on peut passer d'un espace de phases à un autre tout à fait différent. Si l'on considère une espèce dans son écosystème, on observe sans doute que ses interactions avec les aspects physiques de cet écosystème sont déterminées par les champs de forces relatifs à ces aspects (la gravitation, la physique ou chimie de l'eau, de l'air...). Mais, dans un écosystème, il y a aussi les autres êtres vivants. Ils agissent sur l'espèce en question. En fait, ils se co-constituent avec cette espèce, ils se mangent entre eux, par exemple. Et ces autres espèces, et leurs phénotypes, voire les paramètres qui contribuent à les réguler, ne sont pas nécessairement déjà là, ni figées, car leur existence même et leur évolution peut dépendre de l'évolution de l'espèce que l'on considère. Les êtres vivants ne forment pas seulement un champ de forces physiques donné : aucun principe physique de minimalité, aucune "géodésique" ne prédétermine complètement leur évolution. Pour l'évolution darwinienne (et l'on n'a pas de théorie meilleure pour l'instant), elles seront tout au plus "compatibles" avec la situation qui sera donnée et non pas celle qui est donnée (Longo 2017).

Voici donc le jeu qui se met en place et que l'évolution darwinienne essaye de décrire comme explosions de la vie dans "toutes les directions possibles", voire celle qui sont rendues possibles - "enabled" (Longo et al 2012). C'est-à-dire, qu'aucun développement n'est prédéterminé et encore moins prédictible, sauf dans le cas de petits exemples de laboratoire, d'autant plus efficaces quand il ne s'agit que de bactéries. En général, tout développement est seulement compatible avec – et ne peut vivre qu'avec – la situation qu'il contribuera à déterminer.

Dans ce cadre, la nouveauté se constitue certes à partir de la situation donnée (données génétiques incluses, bien évidemment), mais aussi en établissant des interactions qui n'ont pas de sens avant leurs constitutions. Stephen J. Gould rappelle, par exemple, le rôle énorme des "potentiels latents" : la double articulation de la mâchoire de certains reptiles (Gnosostomes) d'il y a plus de deux cents millions d'années, qui devient l'oreille interne de certains vertébrés. Il n'y a aucune "raison a priori" pour qu'il en soit ainsi ; aucun champ de force physique ni aucune donnée génétique chez ces reptiles n'impose cette transformation, elle est seulement possible pour l'écosystème à (co-)constituer – elle est "enabled", disions-nous. Et l'on ne peut le dire qu'a posteriori, car il aurait été impossible de le prédire, si nous avions été là à cette époque.

Les nouveautés possibles modifient donc le champ des forces induit par le vivant, l'écosystème. C'est comme si la coupe, dans laquelle roule la bille de la mécanique rationnelle, se donnait une forme, champ parmi tous les champs physiquement possibles, en même temps que le roulement de la bille. Mais c'est peut-être même plus que cela, car la bille devrait être extrêmement plastique et, en même

temps, chercher à garder son unité et son autonomie, comme le font tout vivant et toute espèce. Bref, au-delà des champs physiques, le champ biologique (l'écosystème) se co-constitue dans le temps : il *dépend* des champs physiques, mais il n'y est pas réductible, ou alors on est encore bien loin de pouvoir le réduire. La réduction, mieux, l'unification, avec la physique reste un but important. Mais il faudra d'abord plus d'unité en physique, car on devra, probablement, rendre compte aussi, chez le vivant, des phénomènes quantiques (Buiatti, Longo 2013) et, surtout, on devra enrichir nos concepts de "détermination", "système", etc., par un regard non préconstitué (ni basé seulement sur la force des outils physico-mathématiques existants) sur l'expérience du vivant. Mais on y arrivera, car l'on a déjà su dépasser la profondeur des mathématiques et des systèmes newtoniens et laplaciens par des idées radicalement nouvelles dans la physique du XXe siècle. Notre but, pour le moment, est une analyse conceptuelle qui nous aide à mettre en évidence les analogies et les différences dans les diverses méthodes, en se focalisant sur leur rapport à l'espace et au temps.

## 5 - Globalité et circularité dans l'espace et le temps

Nous avons vu qu'une des grandes difficultés pour une analyse, en particulier mathématique, du vivant et de son évolution réside dans ces circularités co-constituantes qui en sont le cœur. Nous avons même ajouté à la dialectique individu-écosystème celle du présent-futur, à partir du jeu entre protension et retension. Pour revenir brièvement sur ce point une fois encore, par la notion de protension nous avons donné un sens très élémentaire à la notion d'intentionnalité. L'intentionnalité de la connaissance et de la volonté humaine est l'épiphénomène ultime et non compositionnel, le point d'arrivée, d'une intentionnalité/protension propre à l'être vivant : on faisait en ce sens référence au "geste" de l'amibe qui va dans une direction de l'espace pour préserver ou améliorer son métabolisme. Ce geste implique l'unité du vivant, l'individu avec sa "membrane" si importante pour l'"isoler" en tant qu'unité biologique, condition essentielle à l'autopoïèse et à l'auto-organisation.

C'est bien cette intentionnalité vivante qui suggère une analyse du temps qui sache décrire des "boucles" : des structurations autodéfinissantes de l'écosystème dans l'espace, ainsi que l'attente des situations futures possibles, contribuent à constituer l'évolution du présent, ses bifurcations. L'interaction dans l'écosystème se fait donc dans les trois dimensions spatiales et dans celles du temps : plus précisément, dans les temps locaux ou rythmes internes de l'individu ainsi que dans le temps de l'interaction spatiale. L'unité de l'écosystème est une affaire spatio-temporelle qui entraîne des circularités spatio-temporelles. Or, les mathématiques ont déjà proposé des méthodes qui sont une mathématisation de certaines circularités. La logique mathématique, en particulier, en a mis en évidence quelques-unes : les définitions imprédicatives, les ensembles non-bien-fondés, entre autres (Girard et al 1989), (Forti, Honsell 1983). Un ensemble défini imprédicativement, par exemple, contient des éléments, des parties, dont la définition dépend de l'ensemble lui-même (ou, si l'on veut, le "local dépend du global"). En fait, la topologie, si importante dans les analyses rappelées plus haut, utilise très souvent des notions imprédicatives (intersection sur un ensemble d'ensembles qui contient l'ensemble à définir, etc.). Dans un certain sens, les définitions imprédicatives sont "formellement instables", un peu comme un système dynamique est mathématiquement instable : la structure globale détermine "dynamiquement" ses composantes qui la constituent à leur tour ; un moindre changement local peut induire un grand changement global.

Il n'est pas évident que ces approches puissent nous dire quelque chose sur l'unité du vivant, car ce ne sont que de "petites formes" de circularités capturées par certains langages formels : elles nous disent toutefois quelque chose sur des boucles conceptuelles possibles, dont l'expressivité est justement dans la circularité elle-même. C'est-à-dire, les propriétés exprimables et les fonctions calculables dans ces formalismes sont plus nombreuses que dans leurs versions prédicatives ou stratifiées ou le sont

avec plus de simplicité (Longo 1989). Leur signification dans des structures catégoriques demande une richesse structurelle ou des propriétés de fermeture importantes et complexes (Asperti Longo 1991).

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

Il est évident que les problèmes qui se posent aux analyses mathématiques du vivant sont bien plus profonds ; toutefois, cette exigence de "circularités expressives et constituantes", déjà présente en mathématiques, devrait être enrichie et mieux utilisée. Le besoin qu'éprouve le biologiste de recourir à des arguments ou, au moins, à une terminologie "téléonomiques" devrait nous aider. La finalité, le but sont presque toujours présents dans les descriptions du vivant : la "finalité contingente" de la vie elle-même ou la fonction comme but, par exemple. Après coup, une pudeur héritée du mécanisme pousse à effacer cette téléonomie ; au contraire, l'analyse du rapport "étant et visé" doit être intégrée dans toute analyse scientifique, voire conceptuelle, et ensuite mathématique, du vivant. Notre travail vise en partie à le faire, (Soto Longo 2016).

## 6 - Quelques dualités physiques/biologiques

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

Chez le vivant, on peut distinguer deux types de temporalité dont l'articulation est un enjeu essentiel de survie. Le premier type, qui renvoie au temps physique le plus classique, est celui qui est associé au couplage entre l'organisme et son environnement à travers les processus de stimulus et de réponses. Il se manifeste principalement par des processus de relaxation. Le processus de relaxation le plus simple est le retour à l'équilibre d'un système soumis à une petite perturbation, et dont la vitesse de retour est proportionnelle à l'écart à l'équilibre qu'il a subi (un ressort, une pendule ...). Le second type est de nature très différente. Il est associé aux horloges internes qui rythment le vivant et assurent son fonctionnement et sa perdurance, introduits plus haut.

Soulignons encore une fois que le plus important ne tient peut-être pas à ces formes distinctes du temps, mais bien au fait que la temporalité interne qui en résulte pour l'organisme soit itérative : de fait, les événements temporels pertinents pour cette internalité biologique ne sont plus mesurés par une grandeur dimensionnelle comme en physique (des secondes) mais bien par des *nombres purs* correspondants aux itérations effectuées ou restantes pour un organisme qui n'en dispose que d'un nombre fini et fixé à l'avance selon son appartenance au groupe qui le définit. Ainsi, pour prendre un exemple particulièrement significatif, tous les mammifères se regroupent-ils bien dans une même classe (de la souris à l'éléphant ou à la baleine), classe caractérisée par le nombre de battements de coeur disponibles sur une durée de vie moyenne (environ  $10^9$ ) ou le nombre de respirations

correspondantes (environ  $2.5 \times 10^8$ ). Les variations de fréquences entre espèces ne sont attribuables qu'à des masses différentes des organismes adultes moyens. La masse, qui équivaut à l'énergie, devient donc un paramètre, dans cette dualité qui la voit plutôt un opérateur, en physique (quantique). On peut remarquer au passage que cela tend à conférer une objectivité à des classifications plus ou moins intuitives et abstraites qui ont présidé à la taxinomie du vivant.

Pour accentuer encore l'importance de la temporalité propre des objets biologiques dans l'explication théorique, y compris au niveau évolutif, il faut mentionner les tentatives les plus récentes de repenser la théorie de l'évolution et ses caractéristiques principales à partir des horloges du vivant (Chaline 1999), interprétant bien des transformations en termes de syn- ou de dys-chronies. Cette approche s'adresse donc aussi bien au niveau individuel de l'organisme (développement) qu'à celui de l'espèce (évolution).

Plus haut, nous avons pris en compte un troisième type de temporalité, spécifiquement biologique, associé à ce qu'on a appelé un "finalisme contingent", lui-même caractéristique de ce qu'on désigne comme un germe d'intentionnalité (non réflexive : une « protension »), et qui puisse rendre compte des phénomènes évolutifs et adaptatifs propres au vivant. Ce type de temporalité (que l'on peut qualifier d'anticipatrice, du fait qu'elle couple l'état actuel du vivant à un état futur de son environnement que lui-même, par son comportement, est en train d'induire) serait spécifique d'une existence biologique faisant montre de ce que Jacques Monod appelait une téléonomie. Bien que cette temporalité puisse le cas échéant être lue et modélisée comme couplage entre les rythmes propres scandés par les horloges internes et les processus de stimulus-réponse entre l'organisme et son environnement – moyennant l'introduction de délais, comme dans certains modèles de systèmes dynamiques –, il est sans doute méthodologiquement plus fructueux et conceptuellement plus satisfaisant de la caractériser comme telle et d'en faire en quelque sorte une troisième dimension de la temporalité biologique. D'autant que, contrairement aux deux autres dimensions que nous avons décrites, elle correspond réellement à une problématique très particulière qu'on ne saurait repérer en physique, en ce qu'elle tend à intégrer dans certains facteurs de détermination d'un état de fait actuel des éléments de son propre devenir : l'objectivé d'un geste protensif, l'attente du retour d'un rythme fondamental (battement cardiaque, respiration).

Peut-être est-ce là aussi une des raisons pour lesquelles, on ne saurait définir une "trajectoire" biologique (des évolutions) comme en physique, c'est-à-dire par l'application d'un principe géodésique qui, parmi toutes les virtualités, en extrait et détermine une seule possible, à savoir la trajectoire critique stable. À l'inverse, il semblerait bien que la "logique" biologique fût tout autre : comme le montre le foisonnement des grands plans d'organisation, ultérieurement sélectionnés par des critères externes – dont (Gould 1989) fait état dans son analyse des organismes trouvés dans le schiste de Burgess –, il s'agit dans un premier temps d'une énorme quantité de virtualités qui est mise au jour, on dirait toutes les possibles, comme si le critère désormais n'était plus l'émergence du seul possible mais bien l'élimination des quelques impossibles (Longo et al 2012).

Sans chercher à formuler des conclusions prématurées dans le domaine de la biologie, nous pouvons cependant tirer quelques enseignements de la situation épistémologique de l'espace et du temps telle que nous l'avons examinée à la lumière de certains développements de la biologie théorique. À l'instar de ce qui se passe en physique, mais dans des registres très distincts, nous trouvons la question de l'articulation entre espaces externes et espaces internes, qui, dans le cas biologique, correspond à celle de l'articulation entre autonomie de l'organisme (ses rythmes et la stabilisation homéostatique de ses fonctionnements et de son identité) et hétéronomie (sa dépendance vis-à-vis de l'environnement et la nécessité de s'y adapter). Nous trouvons également l'articulation entre un espace déterminé physiquement dans sa structure (celui de l'extériorité) et un autre, intérieur, déterminé par la fonctionnalité interne de l'organisme et pourvu de ce fait de morphologies complexes, issues tout à la

fois de l'expression génétique et de facteurs épigénétiques dans ses rapports avec l'environnement comme dans ses développements propres.

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

Pour nous résumer, nous avons vu que, en biologie, la temporalité se manifestait sous deux aspects bien distincts : le temps physique externe, du type relaxation, dans le processus stimulus réponse à fonction adaptatrice par rapport à un environnement extérieur, et le temps itératif des nombres purs associé aux horloges biologiques internes à fonction régulatrice des fonctionnements physiologiques. La causalité biologique, à finalité de survie, semble assez étroitement reliée à l'articulation entre ces deux temporalités. Pour articuler les deux, on pourrait observer que l'attente du retour d'un rythme, cardiaque par exemple, est peut-être une toute première instance de cette protension préconsciente qui gouverne aussi notre action dans l'espace.

## 7 - Quelques thèses sur l'historicité du vivant

Les temporalités de l'organisme, dont on vient de parler, se donnent sur le fond du temps propre de l'évolution des espèces, texture temporelle qui rend possible toute individuation de l'objet vivant. Résumons dans ce paragraphe les thèses principales à cet égard, développées dans (Longo 2017).

L'importance de l'histoire dans la compréhension du vivant ouvre une voie d'accès privilégiée vers les méthodes d'analyses propres aux sciences historiques, à commencer par l'importance de la connaissance (et de la mesure) des événements passés. Afin d'enquêter sur le rôle de l'histoire dans une construction de connaissance spécifique, celle des sciences du vivant, mettons en évidence les propriétés suivantes :

- les dynamiques temporelles comportent des changements quant à l'espace des possibles (ou "espace des phases" dans le sens de la physique<sup>2</sup>) ;
- la variabilité et la diversité des observables est une composante à part entière de la stabilité structurelle des objets pertinents et de leur dynamique.

Dans notre analyse, les observables pertinentes sont les phénotypes, en tant que caractéristiques observables des organismes.

Comme conséquence de cette approche à l'historicité nous soutenons que, en biologie :

- les événements rares contribuent de manière cruciale à l'histoire.

Dans cette perspective, une distinction est faite entre :

- le temps des processus et le temps de l'histoire,

en tant que sortes différentes de temps mesurables, quoique dans une même dimension physique.

Pour le dire synthétiquement :

*le temps historique est scandé par les événements rares et par les changements de l'espace des phases.*

2 Rappelons qu'il s'agit là de l'espace de tous les paramètres et observables pertinents, comme quantités mesurables (voir (Longo 2017) pour un approfondissement de cette notion qui, en physique, fournit un cadre précis et mathématique pour l' "espace de toutes les dynamiques possibles").

Notre analyse discute alors, dans (Longo 2017), de la dépendance, dans les systèmes biologiques, des phénomènes présents (et futurs) envers les événements passés. La dépendance historique sera considérée aussi à partir du problème de la mesure, voie d'accès scientifique aux phénomènes, y compris aux phénomènes passés. Bref, les caractéristiques de la mesure émergent d'hypothèses théoriques, tels les choix d'observables et de paramètres, d'instruments et de métriques, et, en biologie, elles dépendent aussi de l'historicité des dynamiques. En termes philosophiques, cette analyse peut être considérée comme épistémique, en référence à la connaissance historique ancrée sur la mesure et, plus particulièrement, en référence à la distinction entre :

- les mesures synchroniques et les mesures diachroniques (en tant que voie d'accès vers le passé).

Enfin, la notion physico-mathématique d'invariance, ainsi que les transformations qui la caractérisent<sup>3</sup>, seront employées, en biologie, dans le sens nouveau d'

- invariance historicisée,

Dans le but d'opérer un transfert conceptuel de la notion d'invariance d'un cadre physico-mathématique vers une science historique, la notion d'autonomie, comme exprimée dans (Montévil Mossio 2015), en fournit l'instance cruciale. Autonomie ne veut pas dire indépendance du contexte : l'invariance historicisée de la reconstruction permanente des composants et fonctions biologiques dans un organisme, voire la clôture ou fermeture par contraintes définie dans (Montévil Mossio 2015), se préserve elle-même au cours des changements auxquels elle s'adapte par ontogenèse et phylogenèse.

En bref, un invariant retenu est historicisé à la fois en tant que trace du passé, constituée dans un contexte, et réinterprétation continue de cette trace, en un sens "sémiotique". Au niveau des processus cognitifs, l'oubli sélectif y joue un rôle crucial. Typiquement, pour mener une action future, on peut utiliser et recombinaison différentes expériences ou traces (aussi pré-conscientes) du passé ; l'usage de l'une ou l'autre, ou d'un mélange des deux, peut dépendre de différences mineures, non-mesurables, dans le présent – une forme de bifurcation grâce aux traces d'histoires passées. Rétention et protension sont conjointement une construction et reconstruction interprétative du passé. Dans notre perspective, ceci peut contribuer crucialement à l'innovation ; faire face à l'incertain en utilisant une expérience retenue vaguement similaire, ou une combinaison nouvelles de ces expériences, permet d'inventer une nouvelle attitude ou réponse. En analogie avec le rôle du passé dans la phylogenèse, et comme le voient (Gould 2003), (West-Eberhard 2006) à ce propos, la nouveauté est souvent le résultat d'une réorganisation des traces (phénotypiques et génétiques) du passé. Une thèse chère aussi à (et peut-être une analogie possible pour) Piaget, pour lequel l'organisme contribue par ses explorations et par une canalisation active, y compris par les traces/mémoire du passé, à la construction des trajectoires phylogénétiques (Campanella 2012).

## **8 - Mathématiques et manifestations sensibles de l'espace et du temps**

Notons tout d'abord que les notions abstraites d'espace et de temps semblent bien renvoyer, au niveau de l'analyse mathématique, aux structures de groupe et de semi-groupe, respectivement.

Les propriétés postulées pour l'espace en tant que "lieu" ou "support" des déplacements en général en font le partenaire nécessaire et exemplaire du groupe : c'est dans l'espace que l'on se déplace et on peut revenir au point de départ par le mouvement inverse. De plus, compte tenu des parentés étroites

---

<sup>3</sup> Un "invariant" est caractérisé par les transformations qui le préservent, en particulier des transformations dans l'espace et dans le temps, comme systèmes de référence, par exemple dans la relativité de Galilée et d'Einstein, ou, en termes mathématiques, par des groupes de transformations ou des isomorphismes dans des catégories opportunes.

entre structure mathématique de groupe et relation logique d'équivalence<sup>4</sup>, nous voyons se constituer une sorte de complexe abstrait qui représente sans doute un des pôles fondamentaux de toute interprétation objective soumise aux démarches de connaissance, à savoir le complexe <espace, groupe, relation d'équivalence>. Parallèlement, les propriétés postulées d'orientation du cours du temps en tant qu'indice de tout changement font fortement penser à la structure abstraite de semi-groupe dont elles semblent reproduire les caractéristiques : dans un semi-groupe le mouvement inverse n'est pas nécessairement possible – une orientation s'établit alors. Cette structure de semi-groupe pouvant, donc, être mise en rapport avec la relation d'ordre, cela conduit à envisager une seconde sorte de complexe de repérage cognitif, celui de <temps, semi-groupe, relation d'ordre>.

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

De ce tableau général quoique encore incomplet, notamment dans le domaine des sciences du vivant, il ressort que les différentes théories actuellement en vigueur nous proposent de l'espace et du temps des représentations pas encore vraiment stabilisées et pas encore vraiment clarifiées : faut-il continuer à distinguer radicalement espace et temps malgré les articulations et mélanges proposés par les théories relativistes ? Faut-il n'en référer qu'à un seul type d'espace malgré les topologies et propriétés variées envisagées dans leurs structures (trou de ver, par exemple) et pour leurs dimensions (compactification, anticommutation, ou encore internalisation – voire fractalisation – de certaines d'entre elles) en physique, espaces environnementaux ou espaces propres de complexification et de fractalisation des formes en biologie ? De même, faut-il s'en tenir à une représentation unique d'un temps paramètre ou le considérer comme observable intrinsèquement irréversible des processus physiques non-linéaire voire loin de l'équilibre ? voire encore distinguer ce dernier, comme nous le faisons plus haut, du temps historique proprement dit de l'évolution biologique ? Et comment articuler ces temps physiques et biologiques avec le temps propre itératif des organismes, avec leurs horloges internes – et cela sans s'en tenir à la formalisation en termes de bifurcations isolées, par exemple, mais en prenant en compte les effets collectifs des syn- et dyschronies correspondantes ?

Une des raisons de cet état de fait très complexe, quoique ces théories variées semblent beaucoup plus proches, dans leurs caractères souvent contre-intuitifs, de la réalité objective que ne l'ont jamais été les perceptions spontanées et intuitives, tient sans doute à ce que les concepts mêmes d'espace et de temps restent relativement problématiques d'un point de vue gnoséologique malgré les catégorisations formelles que nous avons nous-mêmes tenté d'introduire plus haut. Une des difficultés venant manifestement du fait que désormais en physique, à l'image de ce qui se passe depuis longtemps en biologie, nous devons tenir compte d'une articulation inédite entre espaces-temps externes et espaces-temps internes à l'objet scientifique présente en physique quantique (Rovelli 2018), pourvus chacun de propriétés communes et en même temps de différences discriminantes. Il est alors frappant de constater que nous sommes reconduits, mais du côté de l'objet cette fois, à une distinction opérée il y a déjà

4 Les éléments d'un groupe sont équivalents sous la relation "être transformés l'un dans l'autre par les opérations du groupe". Dans ces conditions, à l'axiomatique de la structure de groupe (transitivité de la loi de composition, existence d'un élément neutre, existence d'un inverse à chaque opération) correspond terme à terme l'axiomatique de la relation d'équivalence (transitivité, réflexivité, symétrie).

longtemps par les philosophes – et notamment par Kant – du côté du sujet épistémique, entre l'espace comme forme du sens externe et le temps comme forme du sens interne (Kant 1986). Une telle distinction du côté de l'objet était inacceptable pour le Kant des Critiques du fait que, rompant avec une caractérisation ontologique de l'objet scientifique, toute internalité lui était déniée et que son repérage était considéré comme totalement externe. Pourtant, vers la fin de sa vie, revenant sur les Principia de Newton, il ne pouvait s'empêcher, dans l'Opus postumum, de s'interroger à nouveaux frais sur ce point, relativement à la question de l'énergie, en particulier. Il renouait ce faisant avec certaines des problématiques leibniziennes dont il s'était pourtant largement écarté auparavant et, finalement, il aurait peut-être trouvé dans cette "spatio-temporalisation" interne des objets physiques et biologiques contemporains sinon une réponse au moins une indication pour des investigations nouvelles.

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

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

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

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



formes de la manifestation sensible en biologie serait double : on en trouverait une première réalisation avec la morphogenèse, au cours de l'embryogenèse notamment, et on en trouverait une autre dans la vie organique proprement dite en rapport avec son environnement. Nos analyses les plus récentes visent justement ce dialogue crucial entre (théorie de) l'évolution, voire de l'écosystème, et (théorie) de l'organisme (Soto, Longo 2016).

## 9 - Conclusion

Les statuts conférés à l'espace et au temps n'ont pas seulement des portées théoriques et descriptionnelles. Comme toute contribution à la construction d'objectivité, ils ont une portée gnoséologique et épistémologique et, en ce qui les concerne, à un niveau tellement profond qu'ils ont également des effets sur les statuts de catégories aussi fondamentales que celle de causalité, par exemple, ou de concepts aussi importants que celui de localité. C'est sans doute que ces catégories et ces concepts sont en réalité plus ou moins dérivés des représentations intuitives ou théoriques que l'on se fait de l'espace et du temps, puisque c'est par rapport à ces dimensions que l'on est amené à les élaborer comme facteurs de rationalité explicative.

Dans la mesure où la formalisation mathématique en physique confère aux univers de repérage un statut de plus en plus objectif mais en même temps de plus en plus contre-intuitif, ce sont aussi ces catégories et ces concepts dérivés qui se trouvent de plus en plus objectivement déterminés mais aussi de façon de plus en plus contre-intuitive. Nous en arrivons à un stade où, en même temps que se développent les formalismes mathématiques (ou diagrammatiques, ou symboliques), s'élaborent ce que l'on pourrait appeler des intuitions structurelles, nouvelles intuitions quasiment inhérentes à la générativité de ces formalismes mais aussi de moins en moins empiriques. Le problème qui se pose alors est celui de l'articulation rationnelle entre ces nouveaux types d'intuition et les résultats événementiels qui se présentent dans l'univers usuel des phénomènes naturels (de la physique ou de la biologie). Pour reprendre la vieille distinction des débuts de l'herméneutique, si l'explication progresse, la compréhension a du mal à suivre - ce qui faisait dire à René Thom, dans une de ces boutades qu'il affectionnait, que la mécanique quantique était inintelligible et aussi, dans un ordre d'idée pas si éloigné, que tout ce qui était parfaitement rigoureux était insignifiant. Il est vrai que la question se fait de plus en plus pressante et difficile : quel rapport peut-il subsister entre ces espaces et ces temps de plus en plus abstraits, formellement déterminés et théoriquement construits, et ceux, tout empiriques et immédiats, qui ont présidé aux développements de nos propres capacités cognitives et ont régulé ces dernières ?

La permanence du vocabulaire, si elle constitue un indice de proximité, ne suffit certainement pas à justifier les parentés et c'est sans doute à l'existence de schèmes cognitifs profonds et invariants sous les transformations des représentations mentales qu'il faudrait justifier ultérieurement. Nous avons tenté, toutefois, d'aborder cette question très difficile, par la distinction entre formes locales et globales du temps et de l'espace ainsi que par l'introduction de simples complexes gnoséologiques qui aident à départager espace et temps (<espace, groupe, équivalence> et <temps, semi-groupe, ordre>).

D'autres enjeux se présentent si on essaye de mathématiser ce temps évolutif de la biologie, qui est scandé par les changements de l'espace des possibles et par des événements rares ; cela fait partie d'un travail théorique en cours, esquissé dans la section précédente, reprise de (Longo 2017). Des premières avancées mathématiques dans ce même sens se trouvent dans (Sarti et la 2018).

## Références

- Aceto, L, Longo, G & Victor B (Editors) 2003 *The Difference between Concurrent and Sequential Computations*, Special issue, [Mathematical Structures in Computer Sci.](#), Cambridge U. P., vol.13, n.4 - 5.
- Asperti, A & Longo, G. 1991 *Categories, Types and Structures*. M.I.T. Press.
- Bailly F & Longo G 2006 *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*. Hermann, Paris.
- Bailly F & Longo G 2009 Geometric schemes for biological time. Invited lecture, Conference on "*Episodic memory and time in neurophysiology*", Strasbourg, October 2007 (version française dans "Logique du vivant" (J. Boniface, P.A. Miquel, eds), n. 13, Noesis-Vrin).
- Berthoz A. 1997. *Le Sens du Mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Buiatti M. & Longo G. 2013 Randomness and Multi-level Interactions in Biology. In *Theory in Biosciences*, vol. 132, n. 3:139-158.
- Campanella S. 2012 "*L'ouverture sur les nouveaux possibles*" nell'epistemologia piagetiana, Tesi di Dottorato, Roma, Università La Sapienza.
- Chaline, J. 1999. *Les horloges du vivant : un nouveau stade de la théorie de l'évolution*. Paris: Hachette.
- Connes, A. 1994 *Non-commutative Geometry*, New York: Academic Press.
- Forti M. & Honsell F. 1983 Set theory with free construction principles, *Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa - Classe di Scienze*, Série 4, Tome 10, no. 3, p. 493-522
- Girard, J. Y., Lafont, Y. & Taylor, R. 1989 *Proofs and Types*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Gould S.-J., *Wonderful Life*, Norton & Co., 1989.
- Gould S.-J., *The Structure of Evolutionary Theory*, Harvard U. Press, 2002. Traduction française *La structure de la théorie de l'évolution*, Gallimard, 2006.
- Green, M. B., Schwarz, J. H. & Witten E. 1988. *Superstring theory*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Gross L. 2006 (ed.) Diverse Pollination Networks Key to Ecosystem Sustainability. *PLoS Biol* 4(1): e12. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040012>
- Husserl, E. 1933. *The Origin of Geometry* (Appendix III of *Krisis*) (trad. fran. by Derida J., Paris: PUF, 1962).
- Kant, I. 1986. *Opus postumum*, Paris: PUF.
- Longo G. 1989 "Some aspects of impredicativity: Weyl's philosophy of mathematics and today's Type Theory" in *Logic Colloquium 87* (European Summer Meeting of the A.S.L.), pp. 241--274. Invited Lecture (Ebbinghaus et al., eds). North-Holland
- Longo, G. 2011. Reflections on Concrete Incompleteness. *Philosophia Mathematica*, 19(3): 255-280.
- Longo G., Montévil M. & Kauffman S., 2012, No entailing laws, but enablement in the evolution of the biosphere. Invited Paper, ACM proceedings of the *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, GECCO'12, July 7-11, 2012, Philadelphia (PA, USA).

- Longo G. 2015 [Le conseguenze della filosofia](#). Convegno "A Plea for Balance in Philosophy", Firenze. Atti a cura di R. Lanfredini, ETS, Pisa. ([Le-conseguenze-filosofia.pdf](#)) (A reduced version has been translated for the first issue of [Glass Bead](#), february 2016: [English and Français](#))
- Longo, G 2017 "How Future Depends on Past Histories and Rare Events in Systems of Life", *Foundations of Science*, pp. 1-32 (en français dans *La liberté de l'improbable* (Berthoz, Ossola cur.), Collège de France, Odile Jacob, 2018)
- Longo G. & Montévil M, 2011, "Protention and retention in biological systems", in *Theory in Biosciences*, Vol. 130, Issue 2: 107-117.
- Longo G. & Perret N. 2017 Contributions to a Theory of Biological Time: Anticipation, Protention and Biological Inertia. In *Building Theories, Sciences and Hypotheses* (Ippoliti, ed.), Springer.
- Montévil, M., & Mossio, M. 2015. Biological organisation as closure of constraints. *Journal of Theoretical Biology*, 372, 179 – 191.
- Riemann B. 1854 "On the hypothesis which lie at the basis of Geometry" (English transl. W. Clifford, *Nature*, 1873).
- Rovelli C. 2018 *The Order of Time*, New York: Riverhead Books.
- Sarti, A., Citti G. and Piotrowski, D. 2018. Differential heterogenesis and the emergence of semiotic function", *Semiotica*, in press.
- Soto, AM and Longo, G (guest eds.) 2016 *From the century of the genome to the century of the organism: New theoretical approaches*. Special issue, *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, 122, 1, Pages 1-82
- Weyl H. 1918. *Das Kontinuum* (translated: *The continuum, a critical examination of the foundation of analysis*, Dover, NY, 1987)
- West-Eberhard, MJ 2003 *Developmental plasticity and evolution*. Oxford Univ. Press, New York.