

Rapport d'activité à deux ans, 2009 – 2010

(étendu à une demande de prolongation d'activité)

Nom d'usage : Longo **Prénom :** Giuseppe

Date de naissance : 23/7/47 **Section du Comité national :** 07

Affectation (code et intitulé de l'unité de recherche) : UMR 8548.....LIENS....
Laboratoire d'informatique, Ecole normale supérieure,
Ville : .75005.....PARIS..... Nom du directeur : Jean Vuillemin

- 1 Contributions scientifiques
- 2 Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique
- 3 Transfert technologique, relations industrielles et valorisation
- 4 Encadrement, animation et management de la recherche
- 5 Mobilité
- 6 Objectifs

Curriculum Vitae (un texte complet de 46 pages est téléchargeable de <http://www.di.ens.fr/users/longo/>)

PRINCIPALES ÉTAPES DE LA CARRIÈRE ET AFFECTATIONS SUCCESSIVES

UNIVERSITE DE PISE :

de assistant et prof. "associato" (1973-1987) à Professeur "Ordinario" (≈ 1ère classe) d'Informatique (1987 – 1990)

EN FRANCE :

1. Ecole Normale Supérieure, Paris (Dépt. de Mathématiques et Informatique): **Professeur Invité** (enseignement: I sem.: Langages Fonctionnels ; II sem.: cours de D.E.A.), Octobre 1989 - Mai 1990.
2. Ecole Normale Supérieure, Paris (Laboratoire d'Informatique): **Directeur de Recherches Associé** CNRS, Juin - Août 1990.
3. Ecole Normale Supérieure, Paris (Laboratoire d'Informatique): **Directeur de Recherches** CNRS, 2ème cl. à partir de Nov. 1990; 1ère cl. à partir de Nov. 1994.
4. Dec-Prl (Digital, Paris Research Laboratory): Consultant, de 1991 à 1993, temps partiel.

RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT DANS D'AUTRES PAYS:

(trois ans et quatre mois au total, voir surtout l'année 1987-1988, sur un poste de Invited Full Professor à la Carnegie Mellon University):

1. Utrecht University (Math. Dept.): Visiting Scientist, Nederlandse Z.W.O. grant, Decembre 1978; Visiting Professor, guest of the dept., Septembre et Octobre 1979.
2. Oxford University (Math. Inst.): Visiting Scholar, British Council grant, janvier et février 1980.
3. U.C.Berkeley (Math. Dept.): Research Associate, bourse du Conseil National des Recherches italien (CNR), de Mars à Decembre 1980.
4. M.I.T. (Lab. for Computer Science (LCS)): Research Associate, bourse du CNR et financement du LCS-M.I.T., de Janvier à Octobre 1981.
5. Carnegie Mellon University (Computer Science): **Invited Professor** (enseignement: I sem.: Formal Lang. and Comp.; II sem.: graduate course on Recursion, Categories and Polymorphism), année académique 1987/88. Plus, Juin et Août 1988, research summer salary.
6. Dec-Src (Digital, System Research, Palo Alto, California): Juillet 1988, consultant.

1 – Contributions scientifiques

J'introduirai mon travail par des extraits des deux brèves synthèses qui en ont été faites dans les 'Appréciations générales' de la section 07 du CNRS (avis rendus à l'occasion de la promotion à DRCE, en 2009 et en 2010 - premier classé par la section 07, novembre 2010) :

Novembre 2010 :

Giuseppe Longo est DR1 au LIENS depuis 1994. Anciennement Professeur 'Ordinario' d'Informatique à l'Université de Pise, il a intégré le CNRS en 1990 comme DR2. Giuseppe Longo est une personnalité de niveau mondial dans le domaine de l'informatique théorique et notamment en ce qui concerne le calcul, la logique, les fondements mathématiques de l'informatique, la sémantique, la théorie de la démonstration, etc. Ses contributions dans les années 80 et 90 sont encore aujourd'hui des pierres miliaries du domaine. A ce niveau cela n'aurait aucun sens de compter le nombre de publications.

Novembre 2009 :

... Tout en restant au faîte de ces domaines et en poursuivant des activités importantes d'édition et d'organisation de conférences, il mène depuis une douzaine d'années un programme de recherche très original, novateur et interdisciplinaire car il cherche à développer une théorie de l'information en accord avec les observations biologiques, contrairement aux théories classiques de Shannon ou de Kolmogorov. Ces recherches sont entreprises en interaction étroite avec des biologistes et physiciens (séminaires communs, co-encadrement de thèses, ...), mais impliquent aussi les domaines des sciences cognitives, de la psychologie et de la philosophie des sciences.

Novembre 2010 :

... A part la mobilité géographique (Giuseppe Longo a fait de la recherche théorique et appliquée et de l'enseignement un peu partout dans le monde et notamment dans des centres parmi les plus prestigieux), Giuseppe Longo a fait au moins deux grandes reconversions thématiques, la plus récente étant celle autour des liens entre calculabilité, systèmes morphologiques et sciences du vivant, qui a donné lieu à la création d'un nouveau champ de recherche interdisciplinaire. Cette reconversion l'a aussi amené à s'occuper de questions d'épistémologie et de philosophie des sciences, ce qui engendre une prise de risques importante.

Novembre 2009 :

... La réputation nationale et internationale de Giuseppe Longo est attestée par de nombreuses invitations à des séjours de recherche et des participations à des comités de programme, mais aussi par son activité éditoriale (par exemple de la série "Visions des sciences") et ses interventions tournées vers un public plus large (comme sur France Culture).

... une carrière exceptionnelle sans compter son activité d'animation, de suivi des thèses et de vulgarisation de la science. La Section 7 du Comité National considère Giuseppe Longo comme un fleuron de notre discipline qui contribue au plus haut niveau au rayonnement du CNRS en sciences de l'information.

Pour continuer, on peut établir un passage entre les activités de ma 'première' vie scientifique et l'époque actuelle, basée sur un questionnement épistémologique, par

- une analyse du rôle de la notion de *objet générique*, en logique/informatique et, ensuite, en physique et en biologie,
- une explicitation des *principes de preuves* vs. les *principes de construction conceptuelle* dans les trois disciplines.

(Les citations référencées par [n] sont énumérées dans "Publications 2009 et 2010" ; les autres, par exemple [Longo et al., 2000], se trouvent, plus bas, parmi les "Autres publications plus significatives")

En logique et informatique, l'étude menée au sujet des liens entre paramétrie, soustypage et "héritage" (voir [Castagna et al., 1995]) est à la base de la collaboration avec S. Soloviev (Académie des Sciences, St. Petersburg, puis Univ. Toulouse) et K. Milsted (Digital Research, Paris, et, ensuite, CNET, France Télécom), qui a continué jusqu'en 1999. Dans ce cadre, on a proposé un calcul logique des séquents complet par rapport aux propriétés de la notion de sous-type dans les langages fonctionnels (voir [Longo et al., 2000]). Au cœur de ce travail se trouve l'idée de type et d'objet *génériques* ainsi que de Preuve Prototype, en Théorie de la Preuve (et des Types, [Asperti, Longo, 1991]). Cette idée a son origine dans notre *Genericity Theorem*, [Longo et al., 1993]. Ces notions sont appliquées à une analyse originale du "niveau d'invariance" des preuves ainsi que, plus spécifiquement, des principes utilisés dans les démonstrations de certains théorèmes ("concrets") d'incomplétude récents, [Longo, 2002].

Ces travaux, tout en restant dans le cadre de la Logique (Théorie des Types et de la Preuve) et ses applications, ont ouvert des pistes qui seront au cœur du changement thématique qui suivra : le dialogue avec le physicien Francis Bailly a démarré par une comparaison de la *généricité* de l'objet mathématique en analogie de celle de l'objet physique (ils sont des invariants théoriques et empiriques), ainsi que la *spécificité* des trajectoires classiques/relativistes (ce sont des géodésiques). Ces analyses d'analogies et de différences conceptuelles constituent l'axe principal du livre [1]. En particulier, on y met en évidence, d'une part, l'identité des "*principes de construction*" des concepts en mathématiques, informatique et physique, de l'autre, les différences entre ces disciplines pour ce qui concerne les "*principes de preuve*".

Que dire au sujet de la biologie ? Les anciens intérêts de F. Bailly et mes intérêts plus récents pour cette dernière discipline se sont déployés dans le dialogue entre nous ainsi qu'avec nombreux biologistes (L. Maffei, N. Peyriéras, A. Soto, C. Sonnenschein, M. Buiatti ...) : notre livre, entre philosophie et science, propose certaines idées clés concernant notre approche du vivant qui mèneront à un certain nombre de résultats techniques dont on parlera plus bas.

Démarche philosophique

Depuis 1999 (direction du projet ACI "*Géométrie et Cognition*", 1999-2002, avec J. Petitot et B. Teissier) la construction d'une approche épistémologique cohérente pour les mathématiques et leurs interactions avec les sciences de la nature a motivé aussi mon travail technique. Au cours des dernières années, ces motivations ont trouvé des applications, décrites dans de nombreux articles, grâce au dialogue avec des physiciens, des biologistes et des philosophes. La révision du livre avec F. Bailly, à l'occasion de sa traduction en anglais, [1], a permis de mieux expliciter le projet d'une philosophie de la nature dans lequel le dialogue des disciplines nous a amené à des nouvelles idées techniques ainsi qu'à des synthèses méthodologiques : la cohérence dans l'intelligibilité du monde est une conquête difficile, à supposer même qu'elle est possible, et elle n'est pas réalisée dans les théories à présent disponibles pour traiter l'un ou l'autre des domaines phénoménaux historiquement donnés, la physique en particulier. Nous avons alors essayé de construire cette cohérence et cette unité 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 incompatibilités ou des différenciations théoriques, voire des "dualités conceptuelles" spécifiques, dont on parlera, et, si possible, des changements de regard simultanés dans différents domaines. Des conceptualisations qui se situent à la limite des théories physiques courantes ont été un point de passage préliminaire pour nos propositions théoriques en biologie : la criticité étendue [15], l'anti-entropie [5], le temps propre au vivant [13, 14] constituent des extensions de théories physiques, dans le sens de la logique, et elles ont été d'abord analysées du point de vue conceptuel et philosophique [1]. Bref, ces approches techniques ont été l'application d'un projet épistémologique.

Dans ce cadre, l'outil mathématique nous a aidé, d'une part, à constituer les objets et l'objectivité même de nos explorations scientifiques, car les mathématiques sont le lieu où "la pensée se stabilise" et où elle permet l'engendrement de nouveaux concepts et structures, où l'intelligibilité se concrétise par la quantification et par la comparaison ponctuelle. Du reste, c'est par ce rôle que leur fondement se "mêle" à celui des autres savoirs scientifiques et à leurs dynamiques constitutives : elles les imprègnent et, à leur tour, 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 avons proposée avec certains processus cognitifs élémentaires [6, 12]. Dans ces textes, nous avons fait surtout référence à ces processus qui reflètent des régularités du monde par notre présence active dans ce même monde, en tant qu'êtres vivants (et vivants dans l'intersubjectivité et l'histoire). C'est ainsi que nos analyses des fondements cognitifs des mathématiques ont mis en évidence le rôle de l'action dans l'espace et dans le temps, tout comme l'organisation de ces derniers par des "gestes", comme nous disons, 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 est le nôtre, contiennent une approche de la connaissance de la nature qui en est, à son tour, fortement influencée. Dans nos travaux, nous avons essayé de déceler les conséquences de cette philosophie implicite dans les analyses de la cognition mathématique.

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 [1, 16]. 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 expérimentale à une phénoménalité indépendante, quelque conceptuellement construite qu'elle puisse être.

La spécificité des phénomènes du vivant a donc été l'objet de conceptualisations nouvelles, que nous nous avons proposées à travers un jeu complexe de départage et de synthèse entre physique et biologique [1, 2, 5, 8, 9, 10, 11]. La démarcation théorique est, pour nous, un tout premier pas vers la construction de connaissances scientifiques, surtout face à des phénoménalités si difficilement réductibles l'une à l'autre, le vivant et l'inerte. La physique quantique nous a offert un paradigme très important pour comprendre cette méthode ; dans [1] et [10] nous discutons ce transfert conceptuel et méthodologique, qui est devenu technique dans [5, 13, 14, 15]. La physique quantique, dans l'histoire, 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 sa propre analyse du déterminisme (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 ... [1]). Ensuite, se pose le problème 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 avec les phénomènes physiques.

Dans cette perspective philosophique et technique d'une mise en évidence des différences théoriques et des corrélations fortes, voire d'une unité souhaitable, de nature épistémique, entre physique et biologie, nous avons essayé d'articuler et, si possible, de 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 d'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.

L'incomplétude. Au cours des années précédentes, en collaboration avec deux thésards (soutenances en 2008), j'ai travaillé à des corrélations techniques entre aléatoire physique (systèmes dynamiques ou ergodiques classiques) et aléatoire algorithmique. Ce dernier est une

conséquence de l'indécidabilité/incomplétude gödelienne (il est une forme forte d'indécidabilité), tandis que le premier (Birkhoff) est donné dans des cadres dérivés de l'approche de Poincaré à l'imprédictibilité déterministe. Ma conjecture était que l'on devait pouvoir corrélérer mathématiquement l'imprédictibilité classique et l'indécidabilité (forte), en tant que deux formes de l'aléatoire. Les résultats obtenus démontrent des équivalences mathématiques précises dans des cadres physiquement sensés et ont permis de développer des considérations générales sur le rôle de l'incomplétude théorique, en mathématiques aussi bien qu'en physique, voir [8]. Cet article présente aussi une réflexion philosophique sur l'idée d'incomplétude en mécanique quantique. Plus particulièrement, on y met en évidence la conception de l'espace implicite dans un très célèbre article d'Einstein, Podolsky et Rosen (EPR, 1935), où l'on prétend démontrer la non-complétude de la mécanique quantique, par un argument d'une très grande finesse *logique* (qui permet de reconstruire des suggestions dues au théorème de Gödel). Ce thème de l'incomplétude et des notions associées d'indécidabilité, de non-calculabilité et d'aléatoire est un fil conducteur de nombreux articles, voir par exemple [2, 7, 8, 9]. La thèse forte qui y est soutenue (un peu une "provocation") est que les résultats négatifs (d'imprédictibilité et d'indécidabilité) sont parmi les plus intéressants dans l'interface entre calculabilité et physique ou biologie (par contre, voir [3] pour la calculabilité de quelques dynamiques simples en biologie moléculaire).

Le cadre épistémologique mentionné a trouvé des applications, nombreuses et en cascade, presque simultanées, dans l'importante quantité d'articles publiés au cours des deux dernières années. On en reprend ici, plus spécifiquement, quelques thèmes.

Applications à la théorisation biologique.

La complexité morphologique comme entropie négative (voire comme "anti-entropie"). Nous avons proposé de quantifier la complexité de l'organisation biologique au moyen de la "dimension" physique de l'entropie, mais avec le signe opposé de l'entropie (qui exprime la désorganisation) [5]. Notre nouvelle notion, l'anti-entropie, par son rôle dans une équation de bilan thermodynamique, diffère de l'information comme entropie négative (elle est plutôt une composante de l'énergie libre de Gibbs, ce qui formalise une suggestion de Schrödinger). Elle est en fait une signature du vivant par rapport à l'inerte. Bref, l'anti-entropie est censée pouvoir représenter la mise en place et le maintien de l'organisation propre au vivant. Elle donne une base physico-mathématique à notre idée que la complexité morphologique ne doit être confondue ni avec la complexité algorithmique, ni avec la complexité physique usuelle en ce qu'elle met en jeu notamment la constitution de niveaux d'organisation et des relations fonctionnelles d'intégration et de régulation physiologiques entre eux. Il en résulte que les quantités thermodynamiques que nous considérons, notamment dans le bilan métabolique, représentent des extensions des quantités physiques usuelles. En particulier, l'énergie libre de Gibbs que nous introduisons inclut l'extension à l'anti-entropie que nous venons de discuter et ne se réduit à l'énergie libre physique que pour l'inerte. Dans [5], nous avons alors examiné les systèmes loin de l'équilibre et avons analysé une équation de diffusion de la biomasse sur la complexité phénotypique (ou morphologique), suivant la méthode opérationnelle de Schrödinger en mécanique quantique. Ceci nous a fourni une reconstruction mathématique de cette diffusion, qui correspond aux données paléontologiques présentées par Gould (dans *Full House, 1996*) pour l'évolution des espèces. Une analyse mathématique de l'anti-entropie dans l'ontogenèse est également décrite, grâce à une évaluation quantitative des processus de différenciation chez la *Caenorhabditis Elegans*.

La criticité étendue. En physique, un état critique (lié à un changement de phase et à l'apparition de comportements "de seuil", au cours de ce changement, de certaines grandeurs d'état du système - aimantation, densité, par exemple - ou de certaines caractéristiques particulières comme la longueur de corrélation) est susceptible d'apparaître à l'équilibre (flux nuls) ou hors d'équilibre (flux non nuls). Si, dans le premier cas, le traitement mathématico-physique est satisfaisant (thermodynamique pour l'aspect macroscopique, renormalisation pour l'aspect microscopique), en revanche, dans le second, on est loin de disposer de théories aussi

satisfaisantes dès lors que l'on est loin de l'équilibre. Il est difficile de rassembler sous une seule caractérisation les phénomènes de type critique, mais une signature commune est donnée par la divergence des longueurs de corrélation ; des cas typiques sont donnés par les transitions de phases. Un autre aspect mathématique commun est donné par le fait que l'ensemble des points critiques forme un ensemble de mesure nulle (un ensemble discret de points, des singularités en fait) relativement à l'évolution du (ou des) paramètre(s) (température, par exemple). On remarque que la situation critique, dans le cas à flux nul, apparaît comme a-temporelle, tandis que loin de l'équilibre, du fait des flux (et bien que l'on demeure à l'état stationnaire pour le système) il existe une échelle de temps naturelle.

L'intérêt biologique des transitions critiques (changements de phase), peut commencer à s'entrevoir dans le jeu local/global qui se trouve certainement au coeur de tout processus du vivant. Dans la physique de la criticité, plusieurs caractéristiques manifestent le passage du local au global relativement à la pertinence des objets décrits et de leur interaction: divergence de la longueur de corrélation (portée des interactions), apparition d'un ordre (mesuré par un paramètre d'ordre qui devient non nul), brisure de symétrie, apparition d'exposants critiques associés à des discontinuités ou des divergences (susceptibilités), apparition d'une non-analyticité de l'énergie libre, du point de vue thermodynamique.

Pour nous résumer, aller du local au global, en physique, nécessite le passage par un état critique ; cela est compris comme une divergence mathématique de la longueur d'interaction, donc comme un point au voisinage duquel les variations infinitésimales créent des changements finis (ou, mathématiquement, des variations finies mènent à des changements infinis).

La notion de *transition critique étendue*, une composante essentielle, dans notre approche, de l'intelligibilité du vivant et des processus qui en sont le siège, ne se trouve pas dans les théories physiques, car dans ces dernières les transitions critiques sont en général définies par des valeurs précises des paramètres de contrôle, des points ou des singularités, disions-nous. Dans notre cas, la transition critique que nous considérons [1, 15] demeure aussi longtemps que le vivant en question (un organisme, par exemple) perdure ; elle serait représentable par un volume non nul (voire un sous-espace dense) dans l'espace des paramètres, en ce sens qu'aucun paramètre pertinent ne se réduit à un point, ce qui, intuitivement, correspond aux capacités d'adaptabilité et à la plasticité du vivant. Intuitivement toujours, elle correspond aussi au fait que tout robuste qu'il puisse être relativement à des modifications des paramètres (extension ou intervalle de la criticité ou, encore, espace de viabilité), le vivant est toujours dans une situation critique (pris au sens de fragilité, cette fois) relativement à sa propre survie. Les propriétés de la criticité dont nous faisons état pour le vivant bénéficient, sans s'y réduire, de certaines propriétés de la criticité physique et notamment de la tendance à la divergence des longueurs de corrélation, ce qui nous permet d'envisager un organisme comme un tout, le local étant fortement corrélé au global ; de même les lois de "scaling" dans le vivant peuvent se comparer aux exposants critiques de la physique, comme certains auteurs l'ont déjà envisagé.

Dans [15], nous avons enrichi le cadre conceptuel présenté dans [1] par une analyse fine du rôle des symétries et de leurs brisures dans les transitions critiques étendues. L'idée centrale est que l'ensemble dense des points critiques dans l'intervalle de viabilité est associé à des changements de symétries permanents (brisures de symétries et constitutions de nouvelles). En physique, le passage par un point critique est aussi caractérisé par des changements de symétries, qui se stabilisent toutefois dans le nouvel état. Par contre, l'état vivant de la matière se singularise par le fait d'être continuellement "en transition", ce qui change sans cesse les symétries. Par exemple, dans un multicellulaire, chaque mitose est un changement de symétries : les deux cellules ne sont jamais identiques entre elles (ni à la cellule "mère"), ce qui en plus est essentielle à l'ontogenèse (à partir de la différenciation cellulaire) et à la phylogenèse. Dans [15] cette analyse rend intelligibles les difficultés pour une approche mathématique d'une théorie de l'organisme (notre ambition de fond) : les symétries en physique (dont le rôle est bien compris surtout depuis le théorème de Noether, voir [1]) sont directement liées à la constitution de l'objectivité physique par le biais des équations. Les invariants, en tant que lois de conservation, sont caractérisés exactement par des symétries dans les équations pertinentes. Notre approche justifie la *non-spécificité* des trajectoires évolutives et ontogénétiques (les espèces, les organismes ne suivent pas des "géodésiques" – des parcours optimaux, mais des parcours

“possibles” – *génériques*) ainsi que la *spécificité* de tout individu vivant (il est historique et contingent, résultat d’un parcours évolutif et ontogénétique unique, vu comme suite de changements de symétries). Cette dualité par rapport à la physique, où les objets sont *génériques* (des invariants par rapport à la théorie et à l’expérience) et les trajectoires sont *spécifiques* (des géodésiques – le contraire donc de ce que nous proposons pour la biologie) est un exemple fort de ce que nous disions plus haut au sujet du jeu des passages et des corrélations, voire des contrapositions théoriques et dualités conceptuelles, qui unifie toutefois l’intelligibilité de l’inerte par rapport à celle du vivant. Une réflexion épistémologique sur ce thème est développée dans [10].

Géométrie du temps biologique. L’explicitation d’une philosophie du temps est un enjeu fondamental en *sciences cognitives* et, plus en général, en philosophie de la connaissance. Dans [1], suivant une piste esquissée par H. Weyl (ses “trois formes du temps” ; Weyl est en général notre référence principale pour maints aspects du rapport entre mathématiques et sciences de la nature), nous proposons une “philosophie du temps *biologique*”. Deux articles récents, [13, 14], appliquent ces idées purement philosophiques et font état de cet autre aspect mathématique de la singularité physique du vivant : le temps propre des organismes.

Dans notre approche, nous considérons que le vivant est confronté à deux types distincts de temporalité. Le premier type, qui renvoie au temps physique le plus classique, est associé au couplage entre l’organisme et son environnement à travers les processus de stimulus-réponse. Or, ces activités correspondent, de notre point de vue, à des formes de rétention et de protention, [14]. Nous avons par ce biais essayé de rendre mathématiques également certaines réflexions de Husserl, quoique notre travail fasse référence essentiellement à des activités préconscientes.

Le second type de temporalité est associé à des cycles et aux diverses horloges (externes et internes) qui rythment le vivant et assurent son fonctionnement et sa perdurance (on les représente usuellement sous forme oscillatoire). Par conséquent, nous avons considéré une temporalité de dimension topologique égale à 2, formée par le produit direct entre la partie linéaire et (en fibre sur celle-ci) la partie compactifiée (bref, le produit d’une droite et d’un cercle, un cylindre donc). Cette *temporalité compactifiée* est introduite pour rendre compte, en plus du temps physique usuel, des rythmes internes propres au vivant et indépendants des rythmes externes (circadiens, annuels) d’origine purement physique, a été dotée dans [13] d’une (deuxième) dimension de temps pour maintenir le parallélisme avec la compactification en physique. Elle renvoie en réalité, comme nous le soulignons en relation avec les lois de “scaling”, à des nombres purs correspondant à des *itérations* bien plus qu’à des périodes proprement dites, même si la plupart du temps les mesures portent sur des fréquences physiques, dont on sait qu’elles dépendent de la masse des organismes considérés. Ce sont ces itérations, dont le nombre est le même pour des classes entières d’organismes, qui permettent de concevoir cette seconde dimension temporelle compactifiée en usant de l’image métaphorique du nombre de tour que font les aiguilles d’une horloge pour la mesure du temps physique. Bien entendu, cette dimension itérative compactifiée n’existe que dans l’extension de la zone critique étendue : elle n’a pas de sens dans l’inerte (ou, tout au plus, on trouve des fréquences, qui ont donc la dimension de l’inverse d’un temps). Cette structure de variété bidimensionnelle offre, selon nous, une intelligibilité géométrique nouvelle de la complexité morphologique du temps biologique. Elle permet aussi d’intégrer l’approche théorique avec les données empiriques disponibles, en particulier, sur les rythmes cardiaques des mammifères, et d’en déduire des modélisations informatiques, [13].

Du point de vue épistémologique (et logique), les théories que nous avons proposées, en traitant des observables et quantités particulières propres aux phénomènes du vivant, constituent des *extensions* des théories physiques courantes (la thermodynamique et la théorie de la criticité, en particulier) : elles conservent la même structure mathématique formelle et, si on met à 0 la valeur des observables ou paramètres que nous considérons (valeur de l’anti-entropie, extension de l’intervalle critique, deuxième dimension temporelle), elles nous redonnent les théories de l’inerte. Nos propositions théoriques sont donc compatibles, quoique irréductibles aux “théories physiques existantes”. C’est-à-dire, elles se réduisent à ces théories *seulement* mais *dès lors que*

l'on se situe hors de la zone critique étendue, avec sa propre temporalité et son anti-entropie. On retrouve l'inerte dès que ces quantités spécifiques disparaissent.

PUBLICATIONS 2009 et 2010 (téléchargeables de la page web de GL)

1. Francis Bailly, Giuseppe Longo. **Mathematics and Natural Sciences : the Physical Singularity of Life**, 333 pages, Imperial College Press / World Sci., London, 2011. (Traduction et révision du livre pour Hermann, Paris, 2006. *Après l'envoi à Hermann du manuscrit, GL a été invité à co-diriger une nouvelle collection, pour laquelle il a proposé le nom: Visions des Sciences*).
2. Giuseppe Longo. *Randomness and Determination, from Physics and Computing towards Biology*. Invited Lecture at the **5th International Conference on: Current Trends in Theory and Practice of Computer Science**, Spindleruv mlyn (Czech Republic), January 24-30, 2009, in *Lecture Notes in Computer Science 5404*, 49-62, Springer, 2009.
3. Matteo Mossio, Giuseppe Longo, John Stewart. *Computability of closure to efficient causation*. In, **J. of Theoretical Biology**, 257, 3, pp. 489-498, 2009.
4. Giuseppe Longo, Thierry Paul. *The Mathematics of Computing between Logic and Physics*. Invited paper, "**Computability in Context: Computation and Logic in the Real World**", (Cooper, Sorbi eds) Imperial College Press/World Scientific, 2010
5. Francis Bailly, Giuseppe Longo. *Biological Organization and Anti-Entropy*, **J. Biological Systems**, Vol. 17, No. 1, pp. 63-96, 2009.
6. Giuseppe Longo, Arnaud Viarouge. *Mathematical intuition and the cognitive roots of mathematical concepts*. Invited paper, **Topoi**, Special issue on *Mathematical knowledge: Intuition, visualization, and understanding* (Horsten L., Starikova I., eds), Vol. 29, n. 1, pp. 15-27, 2010.
7. Giuseppe Longo, Catuscia Palamidessi, Thierry Paul. *Some bridging results and challenges in classical, quantum and computational randomness*. In "**Randomness through Computation**", H. Zenil (ed), World Sci., 2010.
8. Giuseppe Longo. *Interfaces de l'incomplétude*, pour "**Les Mathématiques**", Editions du CNRS, 2011 (Originale in italiano per "**La Matematica**", vol. 4, Einaudi, 2010).
9. Giuseppe Longo. *Incomputability in Physics and Biology*. Invited Lecture, Proceedings of **Computability in Europe**, Azores, Pt, June 30 - July 4, LNCS 6158, Springer, 2010 (complete version submitted to MSCS, special issue on "*Computability in Physics*").
10. Giulia Frezza, Giuseppe Longo. *Variations on the theme of invariants: conceptual and mathematical dualities in physics vs biology*. In "**Human Evolution**", vol. 25, n. 3-4, pp. 167-172, 2010. (Versione preliminare in italiano in "**Metafore del vivente**", (a cura di) Gagliasso E. e Frezza G., FrancoAngeli, Milano 2010.)
11. Giuseppe Longo. *La rationalité mathématique et les formes de la connaissance : esquisse d'un projet entre mathématiques et cognition*. In "**Geometria, intuizione, esperienza**", Centro Enriques, Plus Edizioni, Livorno, 2010.
12. Giuseppe Longo. *Theorems as Constructive Visions*. Invited Lecture, Proceedings of **ICMI 19 conference on Proof and Proving**, Taipei, Taiwan, May 10 - 15, 2009, (Hanna, de Villiers eds.) Springer, 2011.
13. Francis Bailly, Giuseppe Longo, Maël Montévil. *A 2-dimensional Geometry for Biological Time*. To appear in **Progress in Biophysics and Molecular Biology**.

14. Giuseppe Longo, Maël Montévil. *Protention and retention in biological systems*. To appear in **Theory of Biosciences**.
15. Giuseppe Longo, Maël Montévil. *From Physics to Biology by Extending Criticality and Symmetry Breakings*. Invited paper, *special issue of Progress in Biophysics and Molecular Biology*.
16. Giuseppe Longo. *The Inert vs. The Living State of Matter: Extended Criticality, Anti-entropy, Geometry of Time*. Text of the invited lecture at the conference **Models of Cognition and Biology**, Rome (It.), May 2010 (proceedings, to appear), revised for seminar talks at **Seoul National University** and **KAIST**, Danjeon, South Korea, Nov., 2010.

AUTRES PUBLICATIONS LES PLUS SIGNIFICATIVES

Andrea Asperti, Giuseppe Longo. **Categories, Types and Structures**. Category Theory for the working computer scientist. M.I.T. Press, 1991 (pp. 1 - 300).

Giuseppe Longo. *Set-theoretical models of lambda-calculus: Theories, expansions, isomorphisms*. **Annals of Pure and Applied Logic**, 24:153–188, 1983.

Giuseppe Longo and Eugenio Moggi. *The Hereditary Partial Recursive Functionals and recursion theory in higher types*. **Journal of Symbolic Logic**, 49(4):1319–1332, 1984.

Giuseppe Longo, Kathleen Milsted, and Sergei Soloviev. *The Genericity Theorem and effective Parametricity in Polymorphic lambda-calculus*. **Theoretical Computer Science**, 121:323–349, 1993.

Giuseppe Castagna, Giorgio Ghelli, and Giuseppe Longo. *A calculus for overloaded functions with subtyping*. **Information and Computation**, 117(1):115–135, February 1995.

Giuseppe Longo. *The Mathematical Continuum, from Intuition to Logic*. In **Naturalizing Phenomenology**. Invited Paper, (Petitot, Varela, Pachoud, Roy eds.) Stanford University Press, 1999.

Giuseppe Longo, Kathleen Milsted, and Sergei Soloviev. *Coherence and Transitivity of Subtyping as Entailment*. **Journal of Logic and Computation**, 10(4):493–526, 2000.

Giuseppe Longo. *Reflections on Incompleteness, or on the proofs of some formally unprovable propositions and Prototype Proofs in Type Theory*. In Z. Luo et al., editor, **Types 2000**, pages 160–180. LNCS vol. 2277, Springer, 2002.

Giuseppe Longo. *Proofs and Programs : Type Theory, an introduction, some reflections*. **Synthese**, vol. 134, nos. 1-2, pp. 85-117, Springer, 2003.

Giuseppe Longo. *Space and Time in the Foundations of Mathematics, or some challenges in the interactions with other sciences*. Invited lecture, **First AMS/SMF meeting**, Lyon, July, 2001. (Traduit en français par J. L. Petit : **Intellectica**, 2003/1-2, n. 36-37).

Francis Bailly, Giuseppe Longo. *Space, time and cognition. From The Standpoint of Mathematics and Natural Science*. Invited paper, **Mind and Causality**, (Peruzzi ed.), Benjamins, Amsterdam, pp. 149-199, 2004. (Traduit en français pour la **Revue de Synthèse**, Presses de la rue d'Ulm, Paris, tome 124, 2003.)

Francis Bailly and Giuseppe Longo. *Randomness and determination in the interplay between the continuum and the discrete*. In T. Paul, editor, **3-bodies, classical-quantum, discrete-continuum**, pages 289–307. Special issue, **MSCS** vol. 17, n.2, Cambridge U. Press, 2007.

Giuseppe Longo. *Mathematical Concepts and Physical Objects, in Rediscovering phenomenology*, (L. Boi, P. Kerszberg, F. Patras eds.), Springer, 2007. (Tradotto in italiano da M. Castellana per il volume “Per una epistemologia dei contenuti” (Castellana ed.), Bari, 2007.)

Giuseppe Longo and P.-E. Tendero. *The differential method and the causal incompleteness of Programming Theory in Molecular Biology*. In **Foundations of Science**, 12:337–366, 2007.

Francis Bailly, Giuseppe Longo. *Phenomenology of Incompleteness: from Formal Deductions to Mathematics and Physics*. In **Deduction, Computation, Experiment** (Lupacchini ed.), Springer, 2008.

Mathieu Hoyrup, Arda Kolcak, and Giuseppe Longo. *Computability and the morphological complexity of some dynamics on continuous domains*. **Theoretical Computer Science**, 398(1-3):170–182, 2008.

2 - Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique

- **Cours ouvert à tous les élèves à l'ENS** sur "L'incomplétude : logique, physique quantique" avec T. Paul (CNRS et DMA, Ens), '07/08 et '08/09 (50 participants). Repris en '09/10, seulement par GL, vidéo enregistré (voir page web de GL).

- **Cours** à l'Université de Rome III (*département de Philosophie*, hôte : M. Abrusci) : mars et avril, 2009.

Thèses en cours :

1. Maël **Montévil** (Master maths-cognition et biologie), Ecole Doctorale Frontières du vivant (P. VI et VII), depuis 2008.
2. Roberto **Cantoni** (Master phys-biologie), Ecole Doctorale Savoirs Scientifiques (P. VI et VII), depuis 2010.
3. Giulia **Frezza** (Master philosophie), thèse en co-direction avec M. Abrusci, Roma III, Ecole Doctorale Philosophie, Roma III, depuis 2008.
4. Nicole **Perret** (Master philosophie), thèse en philosophie, co-directeur M. Bitbol, Crea-CNRS, Ecole Doctorale du Polytechnique, depuis 2009.

2009 et 2010 : **Invited Speaker à 10** conférences internationales en 2 ans:

35th International Conference on: "**Current Trends in Theory and Practice of Computer Science**", *Špindlerův mlýn* (Czech Republic): "Randomness and determination in Computing and Physics. Some reflections on Biology.", January 24-30, 2009.

19 World Conference on: "**Proof and Proving in Mathematics Education**", *Taipei* (Taiwan): "The constructed objectivity of Mathematics and its cognitive roots: the construction of mathematical objects and proofs", May 10-15, 2009.

The 2009 meeting: "**ISHPS Studies in Biology**", *Brisbane* (Australia): "Complexity and Evolution, an analysis in terms of Entropy production", July 12 - 16, 2009.

Second Workshop on: "**Informatic Phenomena** (Information beyond Informatics)", *New Orleans* (USA): "Information in Biology : metaphor or model ? Anti-entropy and a model of phenotypic complexity along Evolution", October 5 - 9, 2009.

Conférence: "**Visualisation et mathématisation**", *Université de Liège*, Be.: "Voir les mathématiques, des fondements aux applications", 3 et 4 décembre, 2009.

Convegno: "**Nature, Selection and Biology**", *Firenze*, It.: "La singolarita' fisica dello stato vivente della materia", 4-8 dicembre, 2009.

Conference in honor of: "**Erwin Engeler's 80th birthday**", the Swiss Logic Society, *Berne*, Switzerland: "From Logic to Randomness and Organization, as Anti-entropy, in Darwin's Evolution", March 4-5, 2010.

Summer School: "**Biology and Cognition**", *San Sebastian*, Spain: "Biological and Cognitive Times", June 22 - 26, 2010.

Conference: "**Computability in Europe**", *Ponta Delgada (Azores)*, Portugal: "Incomputability in Physics and in Biology", June 30 - July 5, 2010.

Conference: "**11th International Symposium on Frontiers of Fundamental Physics**", *Paris*: "Some Mathematics for Biological Theories: Randomness and Organisation, as Anti-entropy, in Darwin's Evolution", July 6-9, 2010.

En 2009 et 2010, **18 invitations** à des workshops, colloques, séminaires... voir <http://www.di.ens.fr/users/longo/exposes-tous.html>

Organisation (ou co-organisation) de Conférences internationales :

- Workshop/journée : "**The physical singularity of life phenomena. Extending concepts and techniques from Physics to Life Science**", *Ens, Paris*, 10 avril, 2009.
- 6th annual Conference on "**Theory and Applications of Models of Computation (TAMC09)**", *Changsha, China*, May 26-30, 2009.
- Workshop : "**Games, Dialogue and Interaction**", *University Paris VII, Paris*, September 28-29, 2009.
- Conference "**CiE 2010: Programs, Proofs, Processes**", *Ponta Delgada (Açores), Portugal*, 25 - 30 June 2010.
- Workshop, "**Logic, Language, Information and Computation**", *Brasilia (Br)*, July 6-9, 2010.
- Workshop, "**Physics and Computation**", *Turku, Finland*, 6-10 June 2011.
- Conference "**Engineering of Complex Computer Systems**", *Las Vegas, USA*, 27-29 April, 2011.

Organization de Conférences nationales : 3 Conférences et Colloquia (voir la page web).

Interviews :

- **Radio** : deux fois une heure, France Culture : "Internet et logique", le 12/3/10 à 11h, et "Alan M. Turing", le 26/12/10 à 17h.
- **Bulletin of European Assoc. Theoretical Comp. Science**, April 2010: Interview by C Calude.

3 - Transfert technologique, relations industrielles et valorisation (participation à des contrats, projets de création d'entreprise, dépôts de brevets, activités de consulting en appréciant l'impact technologique - ou économique - des travaux)

1. **Financement annuel**, 2011, du Réseau Nat. Systèmes Complexes, RNSC (Rythmes et temps biologiques, avec J. Champagnat, biologie, CNRS – Paris Sud, et M. Buiatti, Biologie, Univ. Firenze) dont le but est d'aider à la préparation d'un grand projet pluri-annuel sur ces thèmes. Idée technique à développer : le rôle de l'entropie produite par l'anti-entropie elle-même (en tant que processus de mise en place de l'organisation, irréversible dans le temps) dans le développement des multicellulaires.
2. **Projet IRSES**, financement CE-FP7, consortium extra CE, *quatre ans* à partir de 2011, avec K. Svozil, Physique, U. Vienna, et C. Calude, Informatique, U. Auckland (NZ). Le thème transversal est centré sur l'aléatoire (physique et algorithmique) et l'irréversibilité temporelle en physique.

La version préliminaire d'un autre **projet européen** (FP7), dont GL est l'un des promoteurs, vient d'être soumise à la CE.

4 - Encadrement, animation et management de la recherche (participation à des comités de lecture de revues nationales ou internationales, à des instances collectives (conseil scientifiques, instances d'évaluation, comités de programmes), direction d'équipe ou de laboratoire)

Comités éditoriaux de revues :

- 1 – **Mathematical Structures in Computer Science**, Cambridge Univ. Press
(*Editor - in - Chief*: de loin l'activité éditoriale la plus importante).
- 2 – **Information and Computation**, Academic Press.
- 3 – **Theoretical Informatics and Applications**, EDP Sciences.
- 4 – **European Review** (the journal of Academia Europaea), Cambridge University Press
- 5 – **Journal of Mind Theory**, UPM
- 6 – **La Nuova Critica** (Philosophy of Sciences), Roma.
- 7 – **JUCS**, Springer Electronic Journal in Computer Science.

Edition de livres :

Co-éditeur de la collection “**Visions des sciences**”, Hermann, Paris, depuis 2006.

1. **Gestion du Séminaire** “historique” de l'ENS : *Philosophie et Mathématiques*
2. **Co-direction** du séminaire de *Biologie Théorique* au Crea (géré par M. Mossio).

Direction de l'équipe Complexité et information morphologiques (CIM) du LIENS.

Direction du projet RNSC en 3.1 ci-dessus.

Membres de différents comités d'évaluation de la recherche en Europe.

5 – Mobilité (thématiques, fonctionnelles, apports de ces mobilités et prises de risque)

En 2002, j'ai mis en place une nouvelle équipe de recherche, basée sur un projet “interdisciplinaire exploratoire”, l'équipe **Complexité et information morphologique** (CIM), dont l'activité a représenté pour moi un changement thématique très important. Le nom constituait, en soi, un “risque” : le défi était également de proposer des notions scientifiques adéquates pour ces concepts flous, un des objectifs étant de s'éloigner de (et d'enrichir) la complexité computationnelle et de l'information de Turing/Shannon dans l'analyse des phénomènes naturels. La notion d'anti-entropie pour la complexité phénotypique (morphologique) dans la phylogenèse et dans l'ontogenèse (voir plus haut) constitue une réponse possible à ce que peut être la “complexité morphologique” ou phénotypique en biologie. Le programme de recherche se basait explicitement sur un questionnement épistémologique (voir page web de l'équipe) : le rôle fondationnel des notions de complexité et d'information dans l'interface mathématique, physique et biologie.

L'équipe est composée, depuis 2002, par l'auteur, le seul membre permanent, et par deux ou trois doctorants. Quatre thèses ont été soutenues entre 2006 et 2008, M. Mossio (Cognition), B. Saulnier (Informatique), M. Hoyrup (Informatique) et C. Rojas (Mathématiques). Cette activité a été appuyée par plusieurs collaborations, en physique, en biologie et en philosophie, et par la co-direction de deux autres thèses faites par des étudiants travaillant dans d'autres laboratoires (A. Hazan, Laboratoire Syst. Complexes (LSC), Université d'Evry-Val d'Essonne, thèse soutenue en décembre 2007; A. Viarouge, Unicog, INSERM, soutenance en octobre 2008).

Au cours de ces dernières années, les aspects épistémologiques se sont précisés et ont conduit à des réflexions qui relient et différencient calculabilité/physique/biologie ainsi que, plus spécifiquement, à la philosophie de la biologie (voir plus haut, sect. 1). Cela a débouché sur la co-direction de deux thèses en philosophie.

Ce volet du projet est en grande partie basé au CREA, Polytechnique (séminaires conjoints et collaborations : J. Petitot, J. Lassègue). Les séminaires réguliers (CIM et “Philosophie et Maths” de l'ENS en co-direction avec P. Cartier, J. Petitot, B. Teissier, J-B. Joinet) et les rencontres des groupes fort actifs “Histoire, Philosophie et Sciences” (GHPS à l'ENS, C. Debru) et “Logique et interaction comme géométrie du cognitif” (LIGC, co-fondateur avec J.-Y. Girard) ont constitué d'autres occasions importantes en ce qui concerne ce travail. C. Sini, R. Fabbrichesi (Milan) et

R. Tiestzen (S. José, CA), tous philosophes, sont des collaborateurs réguliers (organisation de colloques conjoints, visites, conférences, etc.).

6 – Objectifs

Nos extensions des théories physiques : les enjeux scientifiques.

Le but d'une grande partie de notre travail n'est pas seulement de reconstruire la complexité physico-mathématique de certains aspects de la biologie, mais de proposer tout d'abord, et surtout, un changement de regard. Nous pensons que la différenciation théorique entre théorie de l'inerte et celles du vivant passe, entre autres, par le changement des paramètres et des observables pertinents. Or, la mathématisation de la physique s'est centrée sur des invariants, dont les grandes constantes (g , c , h), mais aussi ceux des "déterminations objectives" dont on parle longuement dans le livre [1]. A notre avis, il faut s'appuyer sur les rares invariants, dont les constantes et rythmes, par exemple, que l'on trouve dans le temps en biologie, car, au-delà du physico-chimique, la stabilité structurelle du vivant est très peu invariante, physiquement parlant : elle est profondément imprégnée de variabilité. Dans ce dessein, nous avons proposé la notion de "criticité étendue", qui permet de saisir ce jeu entre singularité, spécificité, stabilité et variabilité qui est propre à l'état vivant de la matière. Un tout premier problème mathématique qui se pose maintenant est de transférer, si possible, l'analyse des invariants d'échelle, faite par les techniques de renormalisation en physique de la criticité, à la criticité étendue. La tâche n'est pas évidente car la "singularité" de la criticité physique (un point dans l'espace des paramètres) est essentielle à ces techniques : quid alors sur un intervalle ouvert de criticité ? Maël Montévil (ED frontières du vivant) travaille dans sa thèse aussi à cet aspect de nos approches au vivant.

Dans les articles sur les rythmes et la protention, nous avons construit une géométrie non-triviale du temps biologique, qui n'a pas de sens dans les théories de l'inerte. La collaboration avec des biologistes qui travaillent sur les rythmes (dont J. Champagnat, biologie, CNRS – Paris Sud, projet conjoint financé par le RNSC) vise à appliquer notre cadre mathématique aux principaux rythmes étudiés chez les mammifères, sur la base de la "visibilité géométrique" permise par nos représentations tridimensionnelles de ces rythmes (récemment implémentés par Montévil, voir [13]). Quels sont les enjeux épistémologiques de cet enrichissement mathématique de la structure du temps du vivant ? Que dire plus précisément de son rapport à l'approche intentionnelle de la protention comme attente chez Husserl ?

Du point de vue mathématique, nous nous demandons si le renversement proposé dans [5], qui fait du temps un opérateur et de l'énergie un paramètre (le dual de ce qui se fait en physique, quantique en particulier), permet la transposition d'un fameux théorème de Pauli en physique quantique (la borne inférieure de l'énergie implique la nature paramétrique du temps quantique). Or, le temps biologique est clairement borné inférieurement. Dans un cadre formel pour ce problème, aussi rigoureux qu'en physique quantique (à inventer pour la biologie de l'énergie et du temps), un tel résultat donnerait un sens mathématique profond aux nombreuses lois d'échelle en biologie où l'énergie ou la masse apparaissent comme un paramètre.

De l'information à l'organisation en biologie. Quant à notre analyse quantitative de cet invariant structurel qu'est l'organisation, quantifié comme anti-entropie, avec ses propres équations de bilan, notre travail en biologie vise maintenant à développer des évaluations numériques de la complexité de certains organismes (nous l'avons fait pour le *C. Elegans*, voir ci-dessus). Les énormes bases de données disponibles, par exemple sur le Zebra Fish, peuvent-elles être organisées et mieux saisies théoriquement par notre approche ? (Un point de contact important avec les travaux de N. Peyriéras, CNRS, Gif-sur-Yvette).

Une des idées de base de notre travail a été que la notion d'information en biologie doit être enrichie par celle d'organisation, en tant qu'observable propre. L'information est normalement décrite comme neg-entropie : faut-il se donner une notion propre d'*information morphologique* ? Ou, est-ce que l'anti-entropie (qui en diffère mathématiquement et formalise une autre observable, l'organisation biologique) peut fournir elle-même une *autre notion d'information*, cette fois de type "morphologique" ?

En vue des corrélations bien connues entre (neg-)entropie (information) et aléatoire (classique et algorithmique), le lien serait alors à faire entre ce nouveau concept et l'aléatoire en biologie (voir plus bas).

Une autre hypothèse de travail est la "undefiniteness" intrinsèque de l'"information" contenue dans l'ADN (suivant une piste analogue à celle du théorème de Kochen-Specker en physique quantique – collaboration avec T. Paul, physique CNRS et Polytechnique, et les biologistes A. Soto, C. Sonnenchein, Univ. Tufts et M ; Buiatti, Univ. Firenze ; une référence importante sera le travail de J. Ricard, sur les réseaux métaboliques, voir son livre pour "Visions des sciences"). Si ce regard sur l'incomplétude intrinsèque de l'information moléculaire est fructueux (je rappelle le rôle donné à l'incomplétude théorique dans l'interface des disciplines, [8, 9]), on en comprend facilement les conséquences épistémologiques pour la théorisation en biologie.

L'aléatoire et la détermination. Nous pensons que la biologie nécessite une notion propre d'aléatoire, basée sur l'indétermination ou sur l'imprédictibilité de "l'espace des phases" lui-même, c'est-à-dire des observables pertinentes possibles. Bref, ce qui est aussi imprédictible en biologie est "quels seront les espèces et les phénotypes du "prochain" écosystème". C'est-à-dire et contrairement à l'aléatoire physique, classique et quantique, la "liste des états possibles" n'est pas donnée a priori. Cela est-il dû à l'enchevêtrement intrinsèque de l'aléatoire classique et quantique dans le vivant (les effets morphogénétiques vs. les mutations ou l'aléatoire dans les cascades moléculaires) ? Est-il nécessaire d'y ajouter l'aléatoire des réseaux, qu'il s'agisse de réseaux cellulaires ou encore de réseaux informatiques? (collaborations : T. Paul, Maths-Physique CNRS et C. Calude, Informatique, Nouvelle-Zélande – projet européen IRSES avec la NZ ; M. Buiatti, Biologie, Univ. Firenze – projet RNSC). Dans ce cas, c'est un questionnement sur le "sens" de la notion d'aléatoire, en particulier par rapport à la notion de "probabilité comme mesure" en mathématiques, qui guide notre questionnement scientifique ainsi qu'épistémologique, depuis la mise en place de l'équipe CIM.

D'autres enjeux philosophiques.

Les activités dans les deux groupes interdisciplinaires très actifs "Histoire, Philosophie et Sciences" (GHPS à l'ENS, C. Debru) et "Logique et interaction comme géométrie du cognitif" (LIGC, co-fondateur avec J.-Y. Girard), en plus de l'engagement au CREA, seront ultérieurement renforcées dans le dessein de développer nos objectifs philosophiques.

La collaboration au CREA avec M. Mossio (post-doc ; Master en philosophie, Univ. Turin, thèse en cognition, 2006) est une composante essentielle de ce volet du projet. On interagit sur ce thème aussi avec les philosophes R. Fabbrichesi, R. Ronchi, E. Gagliasso en Italie, P.-A. Miquel à Aix, et E. Fox-Keler aux É.-U..

Deux thèses en philosophie sont en cours, en co-direction avec M. Bitbol et A. Abrusci : N. Perret, G. Frezza (voir plus haut).

Le débat avec des philosophes est en cours sur la question épistémologique du passage des théories physiques aux théories biologiques : les extensions que nous proposons des théories physiques sont-elles nécessaires/suffisantes pour saisir l'état vivant de la matière, en termes conceptuels ? Quel impact épistémologique ont-elles dans l'interface mathématiques/ sciences de la nature ? En particulier, que dire, philosophiquement parlant, de ce jeu nouveau que nous avons proposé entre indécidabilité/aléatoire/imprédictibilité et leur rôle entre calculabilité, physique et biologie ? Chacun des problèmes scientifiques posés plus haut contient un questionnement philosophique fort qui, dans certains cas, en est même à l'origine.

Détaillons de plus près d'autres aspects épistémologiques du projet, ainsi que leurs applications scientifiques.

Fondements cognitifs et philosophie des mathématiques. Dans plusieurs articles publiés au cours des dernières années (téléchargeables, voir aussi [6]), nous avons analysé le rôle de l'action et de la perception dans la constitution des invariants mathématiques. Un article sur le continu mathématique, publié dans *Naturalizing Phenomenology* (édité par J. Petitot et al.,

Stanford U. Press, 1999) a été le point de départ d'une réflexion philosophique sur ce grand enjeu fondationnel en mathématique (voir l'ACI *Géométrie et cognition* mentionnée plus haut, 1999-2002). Un point de contact fort, philosophique et scientifique, s'établit maintenant au CREA sur ce thème grâce à une collaboration avec J. Petitot et A. Sarti. Dans le cadre d'un échange très vaste, qui se base sur plus de dix ans de collaborations et de dialogues, je mentionnerai ici un seul aspect du travail commun envisagé ; il a toutefois tout un éventail de conséquences épistémologiques aussi bien que scientifiques.

Les analyses récentes du cortex primaire développées par leur groupe mettent en évidence le rôle des liens synaptiques intracorticaux dans la construction perceptive des bords d'objets et des trajectoires : les neurones qui détectent des petits segments se prolongeant, approximativement et localement, sur une droite sont plus fortement connectés que les autres. De fait, les neurones qui s'activent pour des lignes parallèles sont aussi plus connectés que les autres ; bref, l'activation d'un neurone stimule ou prépare à l'activation surtout les neurones (presque) alignés avec lui ou qui lui sont (presque) parallèles.

Ce phénomène participe de la rétention d'une ligne, intégrale de ses tangentes : les phénomènes d'inertie d'activation/désactivation des neurones peuvent en être des éléments constitutifs. Mais il y a aussi la rétention des mouvements oculaires voire des saccades, qui suivent un corps en mouvement (un bord) : le phénomène rétentif peut alors se situer au niveau des muscles qui permettent les saccades, voire des neurones qui les gèrent.

Cette activité neuronale est présente aussi dans le cas de la protention : il existe des déplacements protensifs du champ récepteur des neurones du cortex qui *précèdent* les saccades ([Berthoz, 2003]). Le cerveau se prépare, anticipe, un objet en mouvement et suivi par une saccade, un bord parcouru par le regard. Cela est, à notre avis, la clé de voûte de toute activité protensive.

Nous envisageons de travailler à la conjecture suivante, proposé dans [14]. La *rétention* de la trajectoire parcourue, du bord suivi par l'oeil, est "*recollée*" à la protention de cette même trajectoire du bord, par l'unité même de l'activité cérébrale et physiologique globale (le système vestibulaire, par exemple, a sa propre rétention et inertie). Ce serait donc ce recollement – un concept mathématiquement solide (au cœur de la géométrie riemannienne) – qui engendre l'effet cognitif, voire qui *impose* la continuité à la trajectoire et, ensuite, *au* monde : l'image de l'objet et de sa position passée est recollée à celle de l'objet et de sa position attendue. On ose en effet imaginer qu'un animal dépourvu de fovéa (la partie de l'oeil qui permet le suivi continu) et qui prend des instantanés espacés d'un objet en mouvement (l'oeil de la grenouille, par exemple), n'aurait pas l'impression d'un continu, comme nous le "voyons". La structure neuronale mise en évidence par Petitot, Sarti et les chercheurs de ce domaine est-elle une composante essentielle, voire le substrat physiologique, de cette activité de "recollement" ?

La continuité d'une trajectoire, d'un bord... serait alors le résultat d'un recollement spatio-temporel de la rétention et de la protention pertinentes, gérées par l'activité neuronale locale et globale, en présence d'une pluralité d'activités (muscles, système vestibulaire...). Bref, nous attribuons un continu à des phénomènes qui "sont ce qu'ils sont" (et que le lézard voit sûrement de façon bien différente). Ensuite, par un effort conceptuel et mathématique remarquable, qui a demandé des siècles (Euclide n'a pas une géométrie de l'espace), nous arrivons même à théoriser, au-delà des figures et de leurs bords, la continuité de l'espace ambiant, *conséquence*, selon nous, du continu cognitif de la perception, du mouvement et du geste.

La question épistémologique du continu phénoménal est clairement au cœur de ce questionnement, qui a son origine, de mon point de vue, dans la philosophie des mathématiques présentée dans de nombreux articles (dont celui de 1999 cité plus haut) et dans le livre [1].

Pour une épistémologie des mathématiques. Toutefois, le problème épistémologique en mathématiques ne s'arrête pas au seuil des activités pré-conscientes, dont nous parlons aussi dans [6]. Il existe en fait un problème de "constitution historique du sens", en mathématiques (voir "L'origine de la géométrie" de Husserl). Le langage, dans l'intersubjectivité, et puis le dessin, l'acte de tracer une trajectoire par exemple, mais aussi l'écriture, dans ses ramifications alphabétiques et non-alphabétiques, co-constitue et "stabilise", comme dit Husserl, le concept

mathématique. Il y a alors un rapport complexe à une histoire constitutive des “formes symboliques” et de l’intelligibilité du monde, très clair dans le rôle des symétries dans la géométrie et dans la pensée de la Grèce ancienne, [12], ainsi qu’au débat sur l’infini divin, si important dans le passage du Moyen Age à la Renaissance italienne, jusqu’à Newton, Leibniz, Cantor, qui a contribué à façonner la construction mathématique. Les “gestalts” deviennent alors, de perceptives, aussi langagières et conceptuelles. Au Crea, des compétences philosophiques reconnues existent sur ces sujets et le dialogue est déjà en cours avec J. Lassègue et devrait s’étendre, dans la diversité des interactions, à L. Scubla et Y.-M. Visetti.

Direction de mémoires (thèses futures ?).

Aux deux thèses d’interface maths/physique/biologie (M. Montévil et R. Cantoni, voir plus haut, le dernier, E. D. *Savoirs scientifiques*, devra aussi expliciter une composante philosophique de son travail), s’ajouteront, si possible, deux étudiants de Master qui actuellement travaillent à leurs mémoires de stage (N. Bertoldi, *Savoirs scientifiques*, et P. Villoutreix, *Frontières du vivant*).

Le tournant thématique démarré entre 1999 et 2002 trouve maintenant ses débouchés, ses applications, ainsi que des interactions de plus en plus fructueuses au niveau international, en particulier pour son volet philosophique : seulement une vie d’expérience scientifique permet de cerner les problèmes épistémologiques qui se situent à l’interface de différentes disciplines. Pour cette raison, j’espère vivement pouvoir développer ce projet au Crea, dans le cadre d’une “prolongation d’activité” indispensable pour sa réalisation, en particulier grâce à l’animation d’une nouvelle équipe que des chercheurs en poste au CREA m’ont demandé de mettre en place : mon expérience permettrait de rassembler et de faire interagir nos différentes compétences scientifiques et philosophiques ainsi que de relancer une collaboration avec les autres philosophes au CREA.

En septembre 2010, lors de l’attribution de la Médaille d’or à Gérard Férey, 69 ans, le président du CNRS, Alain Fuchs, notait la “*progression extraordinaire*” des résultats de M. Férey vers la fin de sa carrière. “*Si on se débarrassait de nos cadres au même âge qu’un certain nombre d’entreprises, on se priverait de découvertes extraordinaires*”, a-t-il souligné.

Je crois que la France a un problème d’émigration des chercheurs seniors les plus actifs. Ca sera très probablement le cas pour l’auteur de ce rapport, en absence d’une prolongation d’activité.