

# Aux horizons du vivant

Du report d'optimalité au jeu de l'apprenabilité

Robert Borodkine

robert.borodkine@wanadoo.fr

**Résumé :** Pour le vivant, le temps compte. Temps subi ? Temps mis à profit ? Les deux en général ! A travers les grandes étapes de la vie d'un organisme comme à chacun des instants de son existence, le temps rythme le vivant. Ceci vaut aussi bien au sein du système complexe qu'est un organisme vivant, que pour la dynamique dans laquelle s'inscrivent ses interactions avec l'environnement. Le vivant adopte une extrême variété de solutions dans de nombreux domaines, mais il est pour lui couramment question d'optimisation – d'une optimisation qui se situe dans une perspective temporelle et dont une caractéristique est la possibilité de privilégier une optimalité reportée plutôt qu'immédiate. Dans cette optique, cet article s'intéresse à la façon dont le vivant accommode les notions d'optimisation et de temporalité, à la manière dont il organise la cohabitation d'entités aux logiques temporelles différentes de par leurs natures et leurs échelles à l'intérieur d'organismes – pouvant être vus comme des écosystèmes – plongés dans des environnements avec lesquels ils entretiennent des rapports diversement marqués par la temporalité. Nous sommes amené à examiner comment un organisme joue d'une manière ou d'une autre sur une information relative aux aspects temporels des phénomènes auxquels il est confronté, et en quoi la temporalité constitue une entrée privilégiée pour appréhender la façon dont le vivant est susceptible de mettre à profit tout type d'information. Nous en venons à envisager comment les informations utilisées dans la description et la construction de l'organisme s'appuient sur le temps, et comment ce dernier autorise l'élaboration de ces informations comme de celles qui sont utiles à l'organisme pour son fonctionnement et son interaction avec le monde extérieur – qu'elles aient ou non un caractère temporel. Il apparaît que le vivant est essentiellement tributaire de l'apprenabilité de propriétés du monde – aux différentes échelles temporelles. Cette perspective n'est pas sans conséquence quant à la manière dont il convient de poser un certain nombre de questions telles que celles ayant trait aux conditions favorables à la vie, aux impacts de modifications de l'environnement, à la biodiversité, à différents problèmes de santé publique, et plus généralement à ce que peuvent être les directions prises par diverses lignées ou biocénoses.

**Mots-clés :** Adaptation, affordance, apprentissage, développement, écosystème, environnement, évolution, horizon temporel, identité, intéressement individuel et collectif, optimisation, organisme, profondeur de Bennet, soi et non-soi, système complexe, temps, théorie algorithmique de l'information.

## 1. L'optimalité reportée

Définir en quoi consiste pour un organisme vivant le fait de se bien porter ne va pas de soi, mais il est certainement question de pérennité, de maintien dans un domaine acceptable d'un certain nombre de paramètres – au premier rang desquels des paramètres physiologiques – et plus précisément de maintien d'un système dans une dynamique qui soit sous contrôle. On peut considérer qu'un organisme tend à maintenir la valeur d'une fonction correspondant à sa bien-portance au plus haut et, bien que la formulation d'une telle fonction soit généralement hors de portée, il est possible de s'intéresser à des facteurs y contribuant (parmi lesquels figurent notamment l'énergie et les matériaux stockés), à leurs variations, et aux processus d'optimisation associés.

Un être vivant s'efforce de suivre une trajectoire (dans un sens non uniquement spatial, une trajectoire de vie) conforme à ses intérêts, mais cette trajectoire n'est pas partout (le long de l'axe du temps) localement optimale : plutôt que d'aller immédiatement le mieux possible, il vaut mieux pour lui aller suffisamment bien mais au-delà de l'instant. Ainsi la vie a-t-elle par exemple besoin d'énergie, la variation la plus favorable de son niveau à court terme est le plus souvent obtenue en ne faisant rien : la recherche de nourriture, sa mise à disposition et jusqu'à son assimilation peuvent représenter des opérations coûteuses qui impliquent une chute du niveau d'énergie disponible alors que le fait de rester au repos n'entraîne que sa lente décroissance. S'il peut sembler évident de préférer une optimisation durable à une optimisation satisfaisant à des critères de localité, il est nettement moins évident de déterminer ce en quoi elle doit consister (encore ne nous préoccupons-nous pas à ce stade de la manière de la mener à bien). Si l'on s'intéresse à une durée plus étendue que le très court terme, que vaut-il mieux : aller très bien quitte à devoir attendre ? aller constamment plutôt bien ? ou aller très bien par intermittence ?

On pourrait peut-être s'en tenir à la survie, le fait de se bien porter revenant alors à avoir une grande espérance de vie. Dans cette perspective, un être vivant doit donc disposer non seulement de l'information relative aux valeurs de paramètres physiologiques idéaux, mais aussi d'une information indiquant jusqu'où il peut - sans risquer la détérioration de son système ou de sa dynamique - s'en écarter, et selon quelles rythmiques et durées.

## 2. Un éventail d'horizons temporels

Le temps est compté, différemment selon les espèces. Ce qui vient fréquemment à l'esprit en la matière est la durée de vie et celle du développement. La diversité vaut aussi pour l'éventail des horizons temporels par rapport auxquels l'optimalité peut être reportée, que ce soit entre espèces pour une même nécessité physiologique ou entre ces nécessités pour une même espèce. On peut examiner ceci à travers quelques grandes fonctions vitales : respirer, boire, se nourrir, absorber des matériaux, excréter, se reposer, et à travers quelques conditions ambiantes : température, pression, humidité, accélération, environnement chimique, environnement radiatif, environnement biologique. Un être humain peut se passer de respirer pendant quelques minutes, de boire ou dormir pendant quelques jours, de manger pendant quelques semaines, d'ingérer des matériaux utilisés dans des opérations de renouvellement ou dont la présence est requise pour le bon déroulement de processus chimiques pendant des durées variables selon les cas. Toujours chez l'homme, le froid peut être enduré de quelques minutes à quelques heures selon son intensité, la surexposition au Soleil pose des problèmes en quelques heures alors que la sous-exposition n'a de conséquences qu'après un temps vraiment plus long. Nous n'entreprendrons pas de comparaison systématique avec l'ensemble du monde vivant, remarquons tout de même quelques différences parfois radicales. Nombre d'animaux sont connus pour pouvoir se passer de respirer, boire, ou manger pendant beaucoup plus longtemps que nous, mais pour d'autres il n'est pas question de jeûner ne serait-ce que quelques jours, pas plus que de se passer de lumière pour les végétaux opérant la photosynthèse.

S'il est clair que l'optimalité de l'état d'un être vivant est liée à des facteurs divers, la question de l'énergie mérite néanmoins une attention particulière. Ce que consent un être vivant est largement tourné vers la quête d'énergie, directement ou indirectement (c'est-à-dire aussi quand elle provient de la matière), et il lui faut la dépenser à bon escient. Les investissements en énergie et les gains ont donc lieu selon une temporalité pour partie périodique et pour partie stochastique, car leur rentabilité peut être soumise d'une part à l'alternance du jour et de la nuit, des phases de la lune, et des saisons, et d'autre part à l'opportunité d'une capture de proie. Des différences de rythmiques sont par ailleurs liées au fait qu'un être vivant soit un autotrophe, un consommateur d'organismes disponibles « en continu » (herbe ; proies à la fois faciles, petites, et en nombre), un prédateur ayant à répéter des tentatives de captures ponctuelles et parfois couronnées de succès, ou un éleveur. Il faut ajouter à cette variété d'horizons temporels (correspondant à la combinatoire de couples espèces-fonctions vitales), qui se réfère à un individu pris comme un tout, la variété qui tient à la richesse de l'écosystème qui constitue l'individu (dans le cas d'organismes suffisamment complexes) ; on se retrouve avec des perspectives temporelles qui diffèrent d'un élément constitutif à l'autre, qui diffèrent de celle du tout, et qui doivent pourtant être compatibles.

### 3. Perspectives communes

Pour une partie des organismes hébergés, le parallèle avec des temporalités liées à des fonctions vitales « visibles » au niveau de l'organisme dans son ensemble est immédiat. Pour d'autres qui sont pourtant en prise directe avec de telles fonctions, le rapport entre les temporalités des fonctions et celles des populations internes concernées peut être plus ténu ou moins évident. D'autres encore sont des éléments qui contribuent à la dynamique du système sans forcément se rattacher à une fonction vitale, et sont concernés par des temporalités dépendant de leur positionnement dans l'écosystème interne. D'autres, bien qu'en prise directe avec de telles fonctions, obéissent à des temporalités sans rapport simple avec celles-ci.

A l'intérieur d'un organisme vivant comme l'être humain, il y a des cellules qui ont en permanence besoin d'eau et d'énergie. Nourriture et boisson permettent de répondre à de tels besoins, mais les perspectives temporelles de l'individu pris dans son ensemble et celles des cellules concernées diffèrent en plusieurs points – et doivent être conciliables. Il y a à la fois des décalages et des transformations de continu en intermittent (ou l'inverse, suivant que l'on se place du point de vue de l'individu ou de la cellule). Lors d'une prise alimentaire, la mise à disposition d'énergie sous une forme utilisable par la cellule prend un temps tel que l'absorption des aliments doit être stoppée avant d'être profitable, le phénomène de satiété intervient ainsi au fur et à mesure de la prise alimentaire en se basant sur des éléments précoces comme des informations viscéroceptives (et même sur l'arrivée d'aliments dans la cavité buccale) ; de manière analogue, la faim doit intervenir en anticipant sur l'épuisement des réserves de la cellule. Le délai de fourniture d'énergie impose à lui seul l'existence d'un tampon, mais le stockage permet également de passer d'un besoin cellulaire continu à une activité sporadique de l'individu – avec des bénéfices évidents en termes de libération de plages temporelles (et d'extension consécutive de l'éventail comportemental envisageable). Si le stockage autorise une relative souplesse temporelle dans la prise de nourriture (d'autant plus qu'il se fait à travers des formes adaptées au court et au long terme, avec par exemple respectivement le glycogène et la graisse), c'est le tandem faim-satiété qui permet de la mettre à profit : il tolère des heures fixes, des opportunités de plus grande absorption, ainsi que des restrictions provisoires.

Vis à vis de la respiration, les temps de la cellule et de l'individu aérobique sont assez semblables : c'est la continuité de l'approvisionnement en comburant qui est la règle (même si l'on peut nuancer pour tenir compte des mammifères marins), de sorte que le besoin de respirer est rapidement ressenti par l'individu. Au contraire, le cas des matériaux servant à la construction, ou au bon déroulement de processus biochimiques, fait à nouveau intervenir des temporalités différentes entre l'individu et ses constituants. De tels matériaux peuvent être ingérés ponctuellement et servir longtemps. Ainsi, les vitamines sont utilisées en continu. Il en va de même par

exemple du calcium qui sert à une construction osseuse (phases de croissance, réparations) qui se fait de manière progressive.

Il y a enfin la distorsion entre le temps de la vie d'un individu et celui des vies des organismes dont il se compose. Hématies, leucocytes, etc. sont sans cesse renouvelés. Ils forment avec les micro-organismes qui participent à la digestion (et en profitent) et quelques autres un écosystème où l'on croît, mange, se multiplie, meurt, et dont la durabilité correspond à la survie de l'organisme tout entier.

#### **4. L'optimalité à crédit**

Les exemples présentés dans les parties qui précèdent n'offrent qu'une vue très partielle de la manière dont la temporalité intervient dans le vivant, il n'est pas question d'en tirer immédiatement des lois faisant correspondre aux espèces, fonctions vitales et niveaux d'organisation des schémas et valeurs temporels. Il est par contre utile de remarquer qu'une certaine capacité descriptive est requise pour rendre compte de tels schémas qui combinent le périodique, le non périodique, le ponctuel, le continu, le synchrone, l'asynchrone, la simultanéité, le décalage, le déterministe, le stochastique... Il faut également souligner le rapport qui existe entre certains « partis pris » temporels – comme les horizons de privation / bénéficiaires acceptables de ressources – d'un représentant d'une espèce et des propriétés de son environnement : le délai au bout duquel un individu a de très fortes chances de se procurer de la nourriture doit être inférieur à celui au bout duquel l'absence de nourriture le met en péril, la durée acceptable d'un manque de comburant peut être quasi nulle si l'on est un aérobie vivant dans une atmosphère qui contient en permanence de l'oxygène, etc. ; plus généralement : reporter l'optimalité c'est faire des placements à terme en s'appuyant sur une « connaissance » mettant en rapport sa manière d'interagir avec l'environnement et ce que ce dernier peut apporter au-delà de l'instant.

Les propriétés de l'environnement ayant une forte dimension temporelle ne manquent pas et permettent d'apprécier certains aspects des capacités adaptatives du vivant. Parallèlement à des rythmes relativement simples liés à la mécanique céleste, des motifs temporels plus sophistiqués peuvent être mis à profit par l'évolution, comme le montrent divers produits de co-évolutions. Ainsi, la douve du foie pilote son hôte intermédiaire en fonction d'un timing évitant à la fourmi de périr aux heures chaudes (ce qui compromettrait l'ingestion par l'hôte définitif), tel parasite transmettant la bilharziose part à la rencontre de l'homme préférentiellement aux heures auxquelles les populations locales sont actives et exposées (travaillant dans l'eau), tel parasite affectant les racines du maïs allonge d'un an son cycle reproductif en réponse à la rotation des cultures (pour ne citer que ces quelques exemples). Aussi est-il tentant d'accorder au vivant une capacité très générale à traquer les séries temporelles. La temporalité simple peut également être instructive : lorsque des

conditions même « extrêmes » (température, chimie,...) sont fournies avec une grande constance, il arrive que la vie soit présente.

**Tout ceci nous conduit à proposer que la vie n'est pas limitée à un ensemble restreint de formes que peuvent prendre la matière, l'énergie, les phénomènes spatiaux et / ou temporels ; ce que l'on tient pour des exigences du vivant doivent être revues à la baisse avec en point de mire des conditions de non totale aléatoire du milieu.**

⇒ **Autrement dit : les frontières du vivant sont celles de l'apprenabilité.**

Ce n'est pas anodin car, si l'idée que le vivant met à profit des aspects structurés et des aspects probabilistes du monde n'est pas nouvelle (cf. [2], [20]), aller au bout de cette idée en envisageant que la vie peut être en mesure de s'appuyer sur tout type de non-aléatoire et en plaçant l'apprenabilité au cœur même de la dynamique du vivant permet d'entrevoir pour cette dernière un immense champ des possibles et de la revisiter d'une manière systématique (si l'on accorde au vivant la capacité à jouer sur une notion de non-aléatoire vue à travers son acception théorique la plus large, à travers les notions de compressibilité et de complexité de Chaïtin-Kolmogorov (cf. [3], [12], [15], [16], [18], [19])). Précisons que l'évolution correspond à un apprentissage des propriétés du monde, de fait, dans la mesure où elle fait s'étendre des populations d'individus compatibles avec elles.

Ces propriétés conditionnent :

- les interactions avec l'extérieur, il est question d'affordances (cf. [6], [7] ; possibilités d'utiliser des structures présentes dans l'environnement) ; l'extérieur étant une entité non définie par l'individu, sur lequel connaissance et influence sont partiels et avec lequel il faut gérer une temporalité largement événementielle ;
- le fonctionnement intérieur, il est question de ce que l'on appelle parfois le bricolage de l'évolution (cf. [11] ; structures utilisables en interne) ; l'intérieur étant une entité largement définie par les génome, bien « connue » et sous contrôle, sur laquelle l'influence de l'environnement est limitée, et pour laquelle la gestion de la temporalité plus planifiée (certains aspects événementiels sont amortis).

Au cours du processus de développement, le programme génétique instaure les conditions favorables à l'émergence d'une dynamique acceptable et (progressivement) à la formation d'un corps complet. La probabilité d'obtenir au cours de l'évolution des programmes si remarquables peut sembler faible (compte tenu de ce que ceci sous-entend en termes d'information définissant les interactions au sein de cet écosystème), aussi peut-on préférer considérer que la phase de développement comporte elle-même un processus basé sur une forme de sélection naturelle (cf. [14], [17]) permettant de conserver des entités ayant des bonnes propriétés (répartissant ainsi la difficulté entre deux échelles temporelles) plutôt que de les définir de toutes pièces... mais c'est tout de même une manière de les définir :

il est toujours question de programmation (cf. [8], [10], [13]) mais elle est évolutionnaire (ceci peut aider à considérer l'influence de l'environnement pendant le développement non comme un abandon de souveraineté de la part du programme génétique mais comme un signe de la capacité de ce dernier à générer plusieurs versions d'individus adaptées à des nuances environnementales).

Les propriétés du monde évoquées plus haut peuvent être des types de dynamiques. Compte tenu de ce que sont les organismes vivants, l'évolution naturelle implique une sélection de systèmes complexes aptes à une croissance et à une certaine stabilité – qui sont dans leurs cas des propriétés émergentes. Il faut donc qu'il y ait induction de jeux de conditions initiales propres à conduire à l'émergence de telles propriétés, et que les dynamiques en question soient telles qu'une précision imparfaite dans la définition de leurs conditions initiales ne les modifie pas radicalement. Il y a donc induction de jeux de paramètres générant des dynamiques à la fois robustes vis-à-vis d'eux et aptes à la croissance et à la stabilité. Dans le cas d'organismes suffisamment complexes, il n'est pas étonnant que les dynamiques puissent être celles d'écosystèmes, si l'on songe au fait que le type d'interactions à l'œuvre dans de pareils systèmes (à l'échelle macroscopique) est à même de conduire à des dynamiques relativement stables, pourvues de forces de rappel, et à des dynamiques dont la stabilité peut croître avec la complexité.

Dans ces conditions, on peut – quand on affine à des organismes qui sont des écosystèmes – préférer envisager les choses à travers les types de relations qui y prévalent habituellement plutôt qu'à travers une conception en termes de signaux (avec les paradoxes altruistes associés) ; tout ne devient pas simple pour autant : le programme génétique doit mettre en place un environnement tel que les intérêts individuels de ses occupants non concertés et non écocitoyens n'amènent pas le système dans une situation critique. Par ailleurs, il se trouve qu'information et communication jouent un rôle dans les interactions entre éléments d'un écosystème (cf. [1]). Des processus de reconnaissance interviennent dans nombre de mécanismes de prédation et dans la manière d'utiliser différentes propriétés d'un environnement, à l'échelle microscopique le fait qu'il existe un gradient de nutriments peut représenter une information utilisable. L'apparence est également utilisée côté « émetteurs », y compris dans des rapports proie-prédateur, et elle est largement impliquée dans divers scénarii coévolutifs (liés à la prédation, au parasitisme, et au mutualisme). Enfin, des mécanismes s'apparentant à de la communication existent dans de nombreuses espèces animales et végétales (espèces se situant à des niveaux de complexité variés) ; ils sont notamment utiles pour accéder à des ressources (que ce soit avec une relative indépendance ou une véritable coordination). Les préoccupations trophiques, l'information et la communication ne sont donc pas à opposer.

Si la proposition selon laquelle la vie ne connaît pas d'autre limite que celle de l'apprenabilité – y compris dans la dynamique de son évolution génétique – est valable, il en découle un certain nombre de conséquences.

On ne décime pas des espèces en les privant d'énergie, de matière ou d'espace (il en demeure généralement), mais en allant à l'encontre de leurs certitudes physiologiques en faisant intervenir des types et / ou des rythmes de transformations de leur environnement que leur apprentissage ne pouvait laisser prévoir ; ceci renvoie aussi à la question de la biodiversité que l'on peut résumer dans l'optique d'apprentissages à travers la métaphore d'un dilemme du bandit à deux bras : explorer ou exploiter ?

La diffusion technique et culturelle (qu'elle se fasse en des courts-circuits ou par percolation) conduit à l'apparition et à la disparition de propriétés de l'environnement sur de vastes territoires : de telles propriétés même à première vue insignifiantes (non humainement détectées, et difficiles à hiérarchiser) peuvent compter pour une partie du monde vivant. Qu'il s'agisse de pratiques sociales, spatiales et / ou temporelles, de comportements individuels (mais généraux), qu'il s'agisse de formes d'agencements du territoire ou d'infrastructures (à différentes échelles) : tout ceci revient à des possibilités (en plus et en moins) pour beaucoup d'organismes de se déplacer, se fixer, être approvisionné en matière et en énergie, métaboliser, se multiplier.

A défaut d'étudier dès à présent systématiquement le territoire comme regorgeant de non-aléatorités, on peut remarquer des propriétés comme la généralisation de dispositifs de ventilation, climatisation, conduite d'eau chaude (et leur maillage du territoire). On peut aussi remarquer qu'il existe des zones où des humains sont à la fois très concentrés et où leur organisme est moins agressif face aux intrusions, ou encore que des points éloignés du territoire sont néanmoins connectés.

Alors que le phénomène de résistance aux antibiotiques est désormais notoire (face auquel quelques dispositions applicables sont connues qui relèvent pour ainsi dire du bon sens), que deviennent les options envisageables si l'on pose explicitement les choses en termes de processus d'apprentissage ? Que l'on alterne les traitements ou les cultures : jusqu'où les organismes importuns suivront-ils si l'on complique les patterns temporels ?

Plus généralement, qu'il s'agisse de la préservation de la diversité biologique, d'espèces, d'écosystèmes, ou de la lutte contre les parasites ou les organismes pathogènes : à quand un observatoire de l'apprenabilité ?



## Conclusion

Lorsque l'on se penche sur le fait que le vivant est en mesure d'opérer des optimisations relatives à des horizons temporels plutôt qu'immédiates, des questions se posent ayant trait à l'information entrant en jeu dans un tel phénomène, à la diversité des rapports que nourrissent la vie et la temporalité, à des problèmes de coordination, et à la façon même de caractériser une propriété temporelle.

Nous sommes amené à postuler que les contraintes primordiales pour le vivant, ainsi que son unité, ne tiennent pas à la matière ou à l'énergie, mais à l'information : à l'apprenabilité de propriétés du monde. Cette manière de concevoir le vivant éclaire notamment – mais pas exclusivement – la question de son rapport à la temporalité.

Ces idées semblent trouver des points d'application dans différents domaines, mais pour leur conférer un statut véritablement opératoire, voire les situer au cœur de processus d'expertise, il est nécessaire de surmonter un certain nombre d'obstacles. Certaines difficultés proviennent des durées nécessaires à l'observation de phénomènes évolutifs ; on peut dans une certaine mesure s'en affranchir en s'intéressant à divers micro-organismes (dont les cycles reproductifs peuvent être suffisamment courts) pour étudier par exemple la possibilité d'apparition de lignées qui s'accommoderaient de différentes rythmiques affectant leur environnement. D'autres difficultés sont liées à des exigences d'interdisciplinarité, d'autres encore relèvent d'aspects théoriques et pratiques de la recherche de non-aléatoirités.

## Références

- [1] BOUVET J.-F. (2000), *La stratégie du caméléon : De la simulation dans le monde vivant*, Ed. Seuil.
- [2] BRUNSWIK E. (1956), *Perception and Representative Design of Psychological Experiments* Berkeley: University of California Press
- [3] CHAITIN G. J. (1975), A theory of program size formally identical to information theory, *Journal Association Computing Machinery*, n° 22, p. 329340.
- [4] DAMASIO A. R. (1995), *L'erreur de Descartes. La raison des émotions*, Traduit de l'anglais, 1994, par M. Blanc, Ed. Odile Jacob, Paris.
- [5] DANCHIN A. (1998), *La barque de Delphes : ce que révèle le texte des génomes*, Paris, Editions Odile Jacob.
- [6] GIBSON J. J. (1977). The theory of affordance. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting, and knowing*. Hillsdale, NJ: Lawrence.
- [7] GIBSON J. J. (1979), *The ecological approach to visual perception*, Boston, Editions Houghton Mifflin.
- [8] GOLDBERG D.E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, Mass.: Addison--Wesley.

- [9] GOULD S. J. (1997), L'éventail du vivant. Le mythe du progrès, 1996, trad. de C. Jeanmougin, Paris, Seuil.
- [10] HOLLAND J.H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- [11] JACOB F. (1997), *La Souris, la Mouche et l'Homme*, Ed. Odile Jacob, Paris.
- [12] KOLMOGOROV A. N. (1965), Three approaches to the quantitative definition of information, *Problems of Information Transmission* , n°6, p. 1-17.
- [13] KOZA J.R. (1992). *Genetic Programming: On Programming Computers by Means of Natural Selection and Genetics*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- [14] KUPIEC J.-J., SONIGO P. (2000), *Ni Dieu ni gène. Pour une autre théorie de l'hérédité*, Paris, Editions du Seuil.
- [15] LI M., VITANYI P.M. (1993). *An introduction to Kolmogorov Complexity and its Application*. Berlin: Springer--Verlag.
- [16] SOLOMONOFF R. J. (1964). A formal theory of inductive inference. *Information and Control* 7:1--22,224--54.
- [17] SONIGO P., STENGERS I. (2003), *L'évolution*, Editions EDP sciences.
- [18] TURING A.M. (1992), Solvable and unsolvable problems, *Science News* 31, Penguin, 1954, pp. 7-23. [Reprinted in (two volumes of) A.M. Turing, *Collected Works*.
- [19] VITANYI P.M.B., Randomness. In: *Matematica, Logica, Informatica*, Volume 12 of the *Storia del XX Secolo*, Istituto della Enciclopedia Italiana (Eds.).
- [20] WERTHEIMER M. (1958), *Untersuchungen zur lehre von der gestalt ii*, translated as: " principles of perceptual organization ". In *Readings in Perception*, pages 115--135. Princeton, N.J.