



HAL
open science

Schèmes géométrique pour le temps biologique

Francis Bailly, Giuseppe Longo

► **To cite this version:**

Francis Bailly, Giuseppe Longo. Schèmes géométrique pour le temps biologique. Noésis, 2008, 14. hal-03319701

HAL Id: hal-03319701

<https://ens.hal.science/hal-03319701>

Submitted on 12 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SCHEMES GEOMETRIQUES POUR LE TEMPS BIOLOGIQUE¹

Francis Bailly

Physique, CNRS, Meudon
bailly@cnrs-bellevue.fr

Giuseppe Longo

LIENS, CNRS – ENS et CREA, Paris
<http://www.di.ens.fr/users/longo>

Introduction

En tant que "singularité physique" le vivant présente des traits caractéristiques et très spécifiques ; parmi ces traits la façon dont s'y manifeste et joue son rôle la temporalité est particulièrement remarquable : développement, rythmes biologiques variés, évolution métabolique, vieillissement ... C'est pourquoi nous pensons que tout essai de conceptualisation du vivant – fût-elle partielle – ne peut éviter d'aborder et de traiter ces aspects temporels qui lui sont propres. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons donc à cette question sous des angles distincts visant finalement à un premier essai de synthèse.

L'approche que nous proposons est de type mathématique et peut-être comprise, dans sa méthode, par analogie avec les pratiques de la physique théorique : un squelette mathématique, initialement minimal, précise des concepts en synthétisant une grande variété de données expérimentales. Pour ce qui concerne le temps, toutes les théories physiques, au moins à partir d'Aristote (« le temps est la mesure du mouvement dans l'espace », selon le Philosophe), se sont développées parallèlement à des conceptualisations et, en fait, à des structurations géométriques du temps. Cela est particulièrement vrai pour les différentes théories de l'époque moderne. La droite absolue du temps newtonien, par exemple, s'est bientôt enrichie de la structure d'ordre des nombres réels à la Cantor, un ensemble ordonné de points, topologiquement complet (dense et sans lacunes). La thermodynamique et les théories des dynamiques irréversibles (transitions de phases, bifurcations, passages au chaos...) ont imposé une "flèche" au temps classique, en ajoutant une orientation à la structure topologique et métrique. Mais c'est avec la relativité et la physique quantique que la théorisation du temps a amené à des réflexions particulièrement audacieuses. Dans le premier cas et pour ne donner qu'un exemple dans le cadre d'un débat richissime, qui va jusqu'à introduire un temps circulaire, proposé par Gödel comme solution possible des équations d'Einstein, rappelons l'espace de Minkowski : par son célèbre cône de la causalité, cet espace explicite, dans le cadre d'une géométrie unifiée de l'espace-temps, la structure de toute corrélation possible entre objets physiques, en relativité restreinte.

En physique quantique la situation est peut-être encore plus complexe ou, en tout cas, moins stable. On passe de cadres essentiellement classiques, à un temps parfois bidimensionnel (en accord avec la structure du corps des complexes, sur lequel se définissent les espaces de Hilbert, lieux théoriques de la description quantique), jusqu'à l'audace des "zig-zag" temporels de Feynmann ([Feynmann, 1998]). Cette dernière approche est un exemple très intéressant d'intelligibilité par le biais d'une restructuration du temps : la création d'antimatière briserait dans TCP (temps, charge, parité) la symétrie au niveau de la charge, en laissant inaltérée la parité. La symétrie globale est alors retrouvée en renversant localement la flèche du temps, dès l'instant de la création d'une paire électron-positron, jusqu'à l'annihilation du positron (anti-matière) lors de la rencontre d'un autre électron. Bref, la création d'antimatière resterait compatible avec un cadre global (les grandes symétries – discrètes, en l'occurrence - de la physique), si on comprend le phénomène grâce à un

¹ Dans *Sciences du vivant et phénoménologie de la vie* (P.-A. Miquel, ed.), n. 14 de *Noesis*, Vrin, automne 2008.

changement de l'orientation du temps. Une autre approche, aux motivations similaires, est celle de la géométrie fractale de l'espace-temps, propre à la "relativité d'échelle" proposée par [Nottale 1993] : le temps y est réorganisé sur une ligne "brisée" (un fractal), continue mais non-dérivable.

Toutefois la physique ne restera qu'une référence de méthode pour notre travail, car l'analyse de la singularité du vivant demande un enrichissement très net des espaces conceptuels et mathématiques par lesquels nous rendons intelligibles la matière inerte. Une des nouveautés que nous introduirons consiste dans l'usage que nous ferons de la "compacification" d'une "droite" temporelle : bref, nous essayerons de comprendre mathématiquement les rythmes et cycles biologiques par l'ajout de "fibres" (une notion mathématique précise, introduite de façon élémentaire plus bas) orthogonales à un temps physique qui reste une droite unidimensionnelle. Cette approche permettra d'intégrer, dans la structure de la causalité du vivant, les circularités causales dues, en particulier, aux phénomènes d'intégration et régulation biologiques (que l'on analysera notamment en termes de "longueurs de corrélation" au sein de l'objet biologique). De notre point de vue, le vivant est un vrai "organisateur" du temps ; par son autonomie et son action, il lui donne une structure infiniment plus complexe que l'ordre algébrique des entiers naturels (le temps du calcul), mais aussi que n'importe quelle organisation que l'on puisse proposer pour le temps de la matière inerte, car le temps du vivant, par ses rythmes propres, s'articule intimement avec celui de la physique, tout en gardant son autonomie. Nous voudrions donc contribuer à rendre mathématiquement intelligible la *complexité morphologique* du temps biologique, en présentant une géométrie possible de sa structure.

Le premier paragraphe introduira le thème des rythmes biologiques, sous l'aspect – que nous avons déjà introduit et discuté par ailleurs [Bailly, Longo, 2006] – de la "situation critique étendue" qu'est censée connaître le vivant et qui le caractérise tout particulièrement ; le deuxième (et troisième) paragraphe soulèvera la question de ce que l'on pourrait appeler "l'inertie biologique" en abordant, toujours sous l'angle temporel, les propriétés de "mémoire" et d'"anticipation", dans le sens que l'on spécifiera de *rétenion* et *protension*, que semble posséder, si rudimentairement soit-il, tout organisme (et plus généralement, dans notre terminologie, tout biolon) ; enfin, dans le paragraphe quatre nous proposerons à la discussion un premier schème abstrait qui pourrait résumer conceptuellement les éléments des discussions précédentes. Une des conséquences de notre approche est la possibilité de donner, par voie mathématique, un sens plus précis et plus pertinent - espérons-nous -, à des notions habituellement très informelles et non reliées entre elles, telles que celles de temps de représentation, temps de rétenion, temps de protension.

Remarques sur la méthode.

Le lecteur pourra être surpris par la ... prétention mathématique et la modestie technique du texte qui suit: on prétend en effet transformer en formules une esquisse de conceptualisation du temps biologique, sans la profondeur habituelle des méthodes mathématiques, si largement utilisées en biologie. Cette notion si difficile, le temps, va nous suggérer des formules très simples, sûrement trop simples par rapport à l'ambition de la thèse (la "singularité physique" du temps du vivant). En fait, le but de ce texte n'est pas de reconstruire la complexité physico-mathématique de certains aspects de la biologie, mais 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 *observables* pertinents. Tant que l'action du vivant, y compris ses performances cognitives, qui sont présentes dès qu'il y a vie (dans ce sens parlerons-nous de protension et rétenion... chez l'amibe), sont analysées dans l'espace-temps physique, le physico-mathématiques prime sur la spécificité du biologique. Par exemple, les formidables mathématiques de la morphogenèse,

de la Phyllotaxie à l'analyse des structures fractales des organes, organisent les résultats d'une friction de la croissance, certes, du vivant, mais façonnée dans un espace-temps physique, selon des géodésiques physiques (la fractalité optimise l'occupation de l'espace physique, l'échange d'énergie par une surface, dans un volume...). Dans tous ces cas, les paramètres et les observables spatio-temporels, énergétiques... permettent une analyse de grand intérêt et, souvent, d'une immense difficulté technique: on cerne la *complexité physique* du vivant, de ses structures matérielles. De même on pourrait dire des analyses des réseaux cellulaires, dont les plus complexes, les réseaux de neurones. L'interaction informationnelle, souvent un gradient de l'énergie, permet de développer une théorie désormais richissime, du point de vue mathématique, de ces réseaux formels dont on envisage des applications de plus en plus importantes pour la construction de machines (enfin) quelque peu intelligentes.

Nos mathématiques, par contre, n'iront pas plus loin de quelques équations qu'on pourrait raconter dans un lycée. Ce qui compte pour nous c'est de traiter le temps biologique dans sa spécificité, en partant de quelques invariants qui nous semblent propres *seulement* au vivant.

Rappelons-nous que la physique, dans son histoire, s'est constitué autour de grandes constantes dimensionnelles (gravitation, vitesse de la lumière, constante de Planck). Ce qui nous paraît sauter aux yeux, en biologie, est la présence de quelques grands invariants *sans dimension*, ceux qui se spécifient dans les rythmes dont on parlera ci-dessous. Or, la mathématisation de la physique s'est centrée sur les invariants, dont les constantes, mais aussi ceux des "déterminations objectives", dont on parle longuement dans [Bailly, Longo, 2006]. À notre avis, il faut partir de ces rares invariants, ces constantes et rythmes, que l'on trouve en biologie, car, au-delà du physico-chimique, la *stabilité structurelle* du vivant est très peu "invariante", physiquement parlant : elle est profondément immiscée de *variabilité*. Cela rend très difficile en extraire, en dehors des espaces de friction *physique* être vivant et monde (morphogénèse), des invariants proprement biologiques: pour qu'il y ait "dérive phylogénétique et ontogénétique", donc évolution et formation de l'individu, la stabilité structurelle ne peut pas être une invariance physique, même approchée, car à tout instant elle doit être brisée par la variabilité constitutive de l'individu. Et sans variabilité et individuation, pas d'ontogénèse, pas d'évolution, pas de vie (et la réduction de ces aspects aux invariants physiques de la biologie moléculaire est loin d'être accompli).

Partons donc de ces invariants, en fait ces constantes qui nous sautent aux yeux et construisons cette esquisse d'une mathématique du temps, même si elle n'a pas (encore) de sens physique.

Avant de développer cette tentative, on brisera un autre tabou du physicalisme en biologie: la causalité renversée qui est propre à la protension. Nous ne ferons pas une théorie physique de la téléonomie, mais prendrons comme donnée l'évidence des comportements protensifs que l'on observe chez n'importe quelle forme vivante. Quand la paramécie, entourée par un cercle de sel, après maintes tentatives, essaye de foncer à travers l'obstacle, au risque de sa vie, et peut-être se sauve, prenons actes de la rétention/mémoire-apprentissage que l'on voit, du geste téléonomique qui en suit (une protension), développons une théorie adéquate. De même, quand on nous raconte que le cerveau, avant une saccade oculaire, prépare par une anticipation évidente le cortex primaire correspondant, apte à recevoir le nouveau signal, il y a certainement un mécanisme physico-chimique sous-jacent qui permettra un jour de saisir le phénomène par une causalité physique (une causalité peut-être à inventer: et s'il s'agissait d'un effet d'intrication quantique, mélangé à du classique? Penrose le conjecture pour d'autres phénomènes cérébraux : une conjecture intéressante, quoique ses motivations soit démontrablement fausses, voir [Bailly, Longo, 2006]). Considérons pour le moment ces phénomènes comme une forme de protension à analyser (corrélér, formaliser...) par une théorie propre du vivant, même si elle n'a pas de correspondant, ni de sens, dans les théories physiques actuelles. Ensuite, envisageons-nous l'unification avec les théories physico-

chimiques qui, justement, ne parlent pas de cela, mais certainement pourront un jour traiter des composantes physico-chimiques sous-jacentes à ces phénomènes. Mais l'unification (*unification* et non pas *réduction*, comme on vise à l'unification des champs relativistes et quantiques et non pas à une réduction de l'un dans la *théorie* de l'autre: les deux théories seront – et sont en train d'être – changées pour qu'elles se parlent) sera possible quand on aura *deux* théories à comparer, aussi mathématisées que possible.

Les mathématiques dans les pages qui suivent, l'on verra, n'iront pas très loin, mais elles nous donnent pleinement l'avantage de la formalisation: elles obligent à préciser les concepts, à les stabiliser de façon maximale (c'est ça les mathématiques). Peut-être tout ce qui suit est faux, mais on pourra le dire par rapport à une formulation précise; il est peut-être à corriger dans des détails ou à balancer entièrement par la fenêtre, suite à l'évidence empirique ou à un ultérieur changement de regard, si possible entièrement de type physique, mais stimulé, espérons-nous, par ces tentatives mathématiquement très simples et, pensons-nous, originales.

1. Un cadre théorique : la “criticité étendue”.

La notion de “situation critique étendue” telle que nous l'avons envisagée et introduite comme élément de conceptualisation en biologie et dont nous résumons ici quelques propriétés, concerne, outre les fonctionnements physiologiques proprement dits, les longueurs pertinentes pour les échanges locaux ou globaux (transports, corrélations) et les temporalités mobilisées pour ces échanges. Elle demande aussi une prise en compte des rythmes biologiques, dont nous parlerons longuement.

1.1. Résumé de quelques caractéristiques.

Pour résumer maintenant certains des aspects proposés et discutés par ailleurs [Bailly, Longo, 2006], la situation critique étendue possède, entre autres, les caractéristiques suivantes :

- un volume spatial enclos dans une membrane semi-perméable,
- des longueurs de corrélation de l'ordre de grandeur de la plus grande longueur de ce volume,
- une activité métabolique hors d'équilibre et irréversible, impliquant échanges d'énergie, de matière, d'entropie avec l'extérieur ainsi que de la production d'entropie (voir équations de bilan métabolique discutées par ailleurs [à paraître]).
- une structuration anatomico-fonctionnelle en niveaux d'organisation, autonomes mais couplés entre eux, susceptibles d'être distingués par l'existence de géométries fractales (membranaires ou arborescentes), ces géométries fractales pouvant être considérées comme la trace de (ou "un modèle" de) passages "effectifs" à la limite infinie d'une grandeur intensive du système (par exemple, les échanges énergétiques locaux²). Ces niveaux d'organisation font alterner biolons et orgons (c'est en ces derniers que se manifestent essentiellement les géométries fractales et qui se présentent en même temps comme le siège privilégié des rythmes endogènes distingués précédemment). Les longueurs de corrélation se manifestent à la fois *dans* et *entre* ces niveaux. De la même façon, les diverses "horloges" biologiques se couplent – et même dans certains cas se synchronisent – aussi dans et entre ces niveaux.

² La dimension fractale de certains organes peut-être calculée comme recherche de l'optimisation d'échanges purement physiques dans la dimension topologique propre au contexte (la maximisation des surfaces pour le poumons, des arborescences pour le système vasculaire, [West et al. 1997]) et soumis à des contraintes stériques et d'homogénéité comme nous le rappelons plus bas.

Dans la perspective de donner une structuration de type mathématique à la temporalité biologique, nous allons considérer deux autres aspects comme propres à la criticité étendue:

- une bidimensionalité temporelle :
 - 1 - l'une classique, paramétrée sur la droite réelle, bornée entre conception et mort, associée à l'évolution bio-physico-chimique de l'organisme en rapport avec un environnement (dont l'évolution temporelle peut être de type relaxation ou de type cyclique)
 - 2 - l'autre compacifiée, et donc paramétrée sur un cercle, associée aux rythmes endogènes physiologiques de l'organisme, se manifestant par des quantités numériques sans dimension.
- un confinement dans un volume non nul d'un espace de paramètres (température, etc.) à n dimensions, dont 5 spatio-temporelles.

1.2. Sur les longueurs de corrélation.

La notion de "temps caractéristique" paraît de grande importance en biologie : elle concerne l'unité de l'individu vivant, car, par exemple, les flux et leur transport donnent des longueurs et, donc, des temps de transport pertinents. Nous parlerons aussi d'un temps caractéristiques pour la rétention et la protension.

Suivant la taille du biolon, il semble y avoir deux types de processus de transport. Pour les grands organismes il s'agirait plus particulièrement du type "propagatif" (vitesse v_p) et la longueur de corrélation typique sera $L_p = v_p \tau$, où τ représente le temps caractéristique. Pour les organismes de petite taille (cellules, par exemple) il s'agirait plutôt du type "diffusif" (coefficient de diffusion D) et la longueur de corrélation typique serait $L_d = (D\tau)^{1/2}$.

On remarque la différence de dépendance en fonction du temps : linéaire dans un cas, en puissance 1/2 dans l'autre.

On fera deux remarques complémentaires :

- La taille de l'organisme joue également dans la mise en place des structures assurant le mode de transport, par exemple pour la fonction respiratoire (transport de l'oxygène) : dans le cas des petits organismes (insectes, par exemple) le transport se fait par des *trachées* (à la limite, des pores), multitude de petits cylindres où l'air diffuse pour alimenter les cellules ; dans le cas des grands organismes (poissons, mammifères) le transport et les échanges se font au moyen de *branchies* ou de *poumons*, structures anatomiques "centralisées" présentant ces géométries fractales, que nous évoquions plus haut et qui permettent ainsi de concilier des contraintes difficilement compatibles (efficacité, limitation stérique, homogénéité) ; le transport, dans ce dernier cas est également beaucoup plus d'un type que l'on peut qualifier de "propagatif" (même si la diffusion joue son rôle, dans les bronchioles notamment).
- Ces considérations valent essentiellement pour des aspects *structurels* différents répondant à des fonctions identiques. L'aspect *fonctionnel* pour sa part répond très généralement à des lois de scaling communes (le métabolisme qui correspond en particulier à la consommation d'oxygène, les rythmicités variées, les temps de relaxation,...). Ainsi il apparaît que les modes de transport associés à des fonctions identiques peuvent être différents et correspondre à des structures anatomiques différentes (trachées, branchies, arbres bronchiques/poumons). C'est une configuration conceptuelle que nous avons déjà rencontrée et que nous avons rapportée à ce que Edelman [2000] nomme "dégénérescence" (dans le cas présent il s'agit bien de plusieurs structures remplissant une même fonction physiologique, la respiration).

Enfin, compte tenu de ces remarques, puisque les temps caractéristiques τ scalent en général comme $W_f^{1/4}$, où W_f est la masse du biolon, il faut s'attendre à ce que les longueurs de corrélation scalent différemment selon les modes de transport : respectivement L_p en $W_f^{1/4}$ et L_d en $W_f^{1/8}$, suite aux définitions ci-dessus de L_p et L_d .

2. Rétention/mémoire et protension/anticipation. L'inertie biologique.

Dans l'introduction, nous avons évoqué, pour la biologie, les concepts de mémoire, de capacité d'anticipation et, en liaison avec eux, le concept de ce que nous avons appelé une inertie biologique. Or, une longue tradition phénoménologique introduit une distinction importante entre mémoire et rétention, d'une part, et anticipation et protension, de l'autre. Bref, la mémoire de l'usage commun paraît être surtout la "reconstruction" d'un vécu (fort bien précisée par Edelmann comme "cerveau qui se remet dans un état vécu") ; l'anticipation serait son opposé temporel – la conscience d'une attente, d'une situation future possible. Mémoire et anticipation n'ont pas, a priori, de *temps caractéristique* biologique, une notion essentielle à notre approche (voir ci-dessous). Par contre, la rétention est à voir comme une extension du présent ; elle est le présent qui est "retenu", au cours d'un bref intervalle (relié à ce qu'on appellera son temps caractéristique) pour le but de l'action (et de la perception), une extension du passé immédiat dans le présent. La durée mentale d'une phrase, en particulier d'une "phrase" musicale, pour la saisie du sens ou d'une mélodie, en est un exemple paradigmatique : il s'agit du présent qui est en train de devenir absent, mais qui reste le temps essentiel à l'action, voire à la conscience. Car, en écoutant un mot, une phrase, on en retient la partie passée pour un temps (caractéristique) nécessaire à la comprendre.

La protension est donnée par une image en miroir temporelle et conceptuelle : elle étend vers l'avant, dans le temps, la rétention – elle est l'attente de la continuation prévue d'une phrase, en particulier musicale ; de même, dans la lecture, l'analyse des saccades oculaires démontre que nous parcourons à l'avance au moins une moitié du mot qui suit celui qu'on est en train de lire. Ce geste protensif participe de la reconstruction du sens : on paraît s'assurer du sens du mot lu par un pari partiel sur celui du mot suivant.

Mais la rétention est, surtout, le *tropisme* inhérent à l'action du tout vivant. Car ce point est au cœur de notre approche : nous convenons ici d'appeler rétention et protension ces aspects particuliers de la mémoire et de l'anticipation propres à tout vivant (sorte de présent étendu dans les deux directions), sans nous restreindre à l'usage phénoménologique de ces mots, qui en limite le sens aux activités conscientes. Nous pensons que cette extension au vivant reste compatible avec (et aide à comprendre) son usage classique, en particulier tel qu'il est décrit par [van Gelder, 1999] et [Varela, 1999], qui développent les concepts d'intentionnalité, de rétention, de protension, introduits et longuement discutés par Husserl, dans son analyse de la conscience humaine.

Dans ce paragraphe, il s'agit alors de tenter de proposer une proto-modélisation de ces notions inévitablement floues, la plus rudimentaire possible, mais pouvant néanmoins servir de support à des discussions qui permettraient de progresser dans leur conceptualisation, voire leur mathématisation de plus en plus approfondie.

Pour ce faire nous allons définir des principes de base et des notions plus spécifiques.

2.1. Principes

Nous considérons donc la *réretention* R en la précisant sous la forme :

$R_k(t, t_0)$ à un instant t d'un "événement" e de nature k , antérieur, pour lequel on posera $e^k_0 = e^k(t_0)$ (où $t_0 \leq t$).

La *protension*, d'un événement de même nature $e^k_1 = e^k(t_1)$ au moment t d'un instant t_1 postérieur ($t \leq t_1$) sera notée $P_k(R_k, t, t_1)$. Elle sera donc considérée comme fonction de la réretention R_k , car, et cela est un principe essentiel de notre approche, en *l'absence de réretention d'un événement de nature k il n'y aura pas de protension possible pour un événement de cette nature* ; on aura donc $P_k(R_k, t, t_1) = 0$, pour $R_k = 0$. De plus, conformément à nos analyses antérieures, on posera que cette protension est une fonction monotone croissante de la réretention en question, soit $\partial P_k / \partial R_k \geq 0$. Ce sont ces "réretention et protension biologiques" que nous faisons correspondre, par une extension conceptuelle et mathématique à la manifestation élémentaire, propre à tout vivant, de l'analyse husserlienne de la temporalité humaine.

2.2. Spécifications

Sur la base de la distinction faite ci-dessus, nous avons donc introduit les notions de réretention et protension, en tant que mémoire et anticipation "immédiates" et "passives" pour exprimer le fait qu'il s'agit de phénomènes ne relevant pas de l'intentionnalité proprement dite associée à l'activité d'un sujet (doté en général d'un système nerveux plus ou moins élaboré), mais de simples processus de réactions/stimuli/réponses biologiques, dont bien des organismes primitifs en rapport avec leur environnement sont le siège. Dans le dessein de développer ce point de vue, nous introduisons maintenant des concepts distincts dont nous proposons de représenter les effets par le jeu de fonctions simples, essentiellement des *fonctions de relaxation*³ et leurs combinaisons.

Pour être plus précis, nous définirons d'abord la fonction de réretention :

$$R(t, t_0) = a_R \exp(t_0 - t) / \tau_R$$

t_0 est le temps de survenue d'un événement qui fait l'objet de la réretention, t est l'instant présent ($t > t_0$) ; τ_R est le temps caractéristique associé à la décroissance de la réretention au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la survenue de l'événement et a_R est un coefficient qui peut être associé à un individu ou à une espèce, par exemple, par comparaison à d'autres dont les facultés en la matière pourraient être plus ou moins développées.

Nous proposons d'utiliser des fonctions de relaxation, car la perte de réretention, en s'éloignant dans le temps du début d'une phrase, voire, plus en général, de toute action (y compris l'écoute), peut être considérée une sorte de "retour à l'équilibre". Un retour nécessaire si on veut saisir le sens de la phrase, de l'action, suivante. Cela, bien évidemment, n'empêche que l'on garde la mémoire d'un passé plus à long terme (toute la partie initiale d'un discours, par exemple) : nous nous limitons à une analyse de l'effet local, préconscient, qui contribue au présent étendu de l'action.

Comment maintenant définir formellement la protension, une propriété qui n'appartient qu'au vivant ? Nous proposons de la rendre mathématiquement intelligible par *symétrie temporelle* par rapport à R (le temps t changera de signe). Nous définissons donc, par une symétrie modifiée par des paramètres différents, a_P et τ_P , une protension, *virtuelle*

³ Les fonctions de relaxation sont parmi les fonctions décroissantes les plus simple permettant la définition d'un temps caractéristique τ ; en physique elles représentent très souvent le modèle de base de retour à l'équilibre f_e d'un système que l'on a initialement écarté de l'équilibre, la vitesse de retour à l'équilibre de la fonction f considérée du système : (df/dt) demeurant proportionnelle à cet écart $df/dt = - |f - f_e| / \tau$.

puisqu'elle fera intervenir le temps t_1 , qui concerne l'événement à anticiper et qui se trouve dans le futur de l'instant présent t ($t_1 > t$), sous la forme de la fonction :

$$P(t, t_1) = a_P \exp(t - t_1) / \tau_P$$

où les différents paramètres, a_P et τ_P , jouent le même rôle *mutatis mutandis* que ceux qui interviennent dans R (cf fig. A).

Enfin, nous définirons la "capacité protensive" $C_P(t, t_0, t_1)$ par le produit RP :

$$C_P(t, t_0, t_1) = R(t, t_0) P(t, t_1) = a_P a_R \exp[(t_0 - t) / \tau_R] \exp[(t - t_1) / \tau_P]$$

en faisant remarquer qu'une telle capacité ne peut exister, phénoménologiquement parlant, que s'il existe, sous une forme ou sous une autre, une sorte de "mémoire" R (la rétention) relative à l'événement dont il s'agit d'anticiper la réitération ou quelque chose qui lui ressemble (nous sommes conscients de faire en cela une hypothèse forte, mais plausible). En qualifiant de "capacité" cette protension, on s'éloigne un peu de la terminologie husserlienne ultérieure, mais nous préférons souligner le caractère spécifique de cette "attente" d'un futur inconnu, qui n'est pas tout à fait symétrique par rapport à la rétention d'un passé connu (du fait que cette protension dépend de la rétention et par sa nature qu'elle demeure "potentielle", une capacité).

Dans le cas où $R = 0$ (absence complète de rétention) la capacité protensive s'annule du fait qu'il n'existe plus de référent qui permette d'anticiper un tant soit peu l'événement pertinent⁴.

Toujours d'un point de vue phénoménologique, on s'attendra qu'en général $\tau_P \ll \tau_R$, c'est-à-dire que le temps caractéristique de la rétention soit plus grand que celui associé à la protension virtuelle P (pour "prévoir" il faut d'abord et encore plus se "souvenir"). Alors la contribution de P dans la définition de C_P (la deuxième exponentielle en $(\tau_P)^{-1}$), évolue bien plus rapidement que celle de la rétention pour une même durée concernée. Et, on aura toujours $C_P \leq a_P R$, comme fonctions du temps t , et ceci pour n'importe quelles valeurs de τ_P et τ_R ($C_P = a_P R$ n'étant réalisée qu'au moment même où le temps à anticiper est le présent exact, c'est-à-dire pour $t = t_1$ et donc $\exp[(t - t_1) / \tau_P] = 1$).

Pour mieux rendre explicite le rôle du paramètre t , par rapport à l'intervalle (t_0, t_1) et aux temps caractéristiques τ_P , τ_R , quelques manipulations algébriques permettent de mettre l'expression de C_P sous la forme du produit d'une fonction de t et d'un coefficient dépendant uniquement de t_0 et t_1 , soit :

$$C_P = a_R a_P \exp[t(\tau_R - \tau_P) / \tau_R \tau_P] \{ \exp[(t_0 \tau_P - t_1 \tau_R) / \tau_R \tau_P] \}$$

On pourra convenir que la deuxième exponentielle correspond à l'expression de ce que nous pouvons appeler une *inertie biologique* $I(t_0, t_1)$ entre les instants t_0 et t_1 : la capacité protensive peut alors être considérée comme fonction du temps t (modulée par des constantes et des temps caractéristiques) et d'une "inertie". Cette dernière est à comprendre comme "traînage par continuité" de la stabilité (structurelle) présente ; sorte de pari du vivant d'une permanence de sa propre structure et de celle du monde sensible, corrélé à la rétention (voir aussi la section suivante).

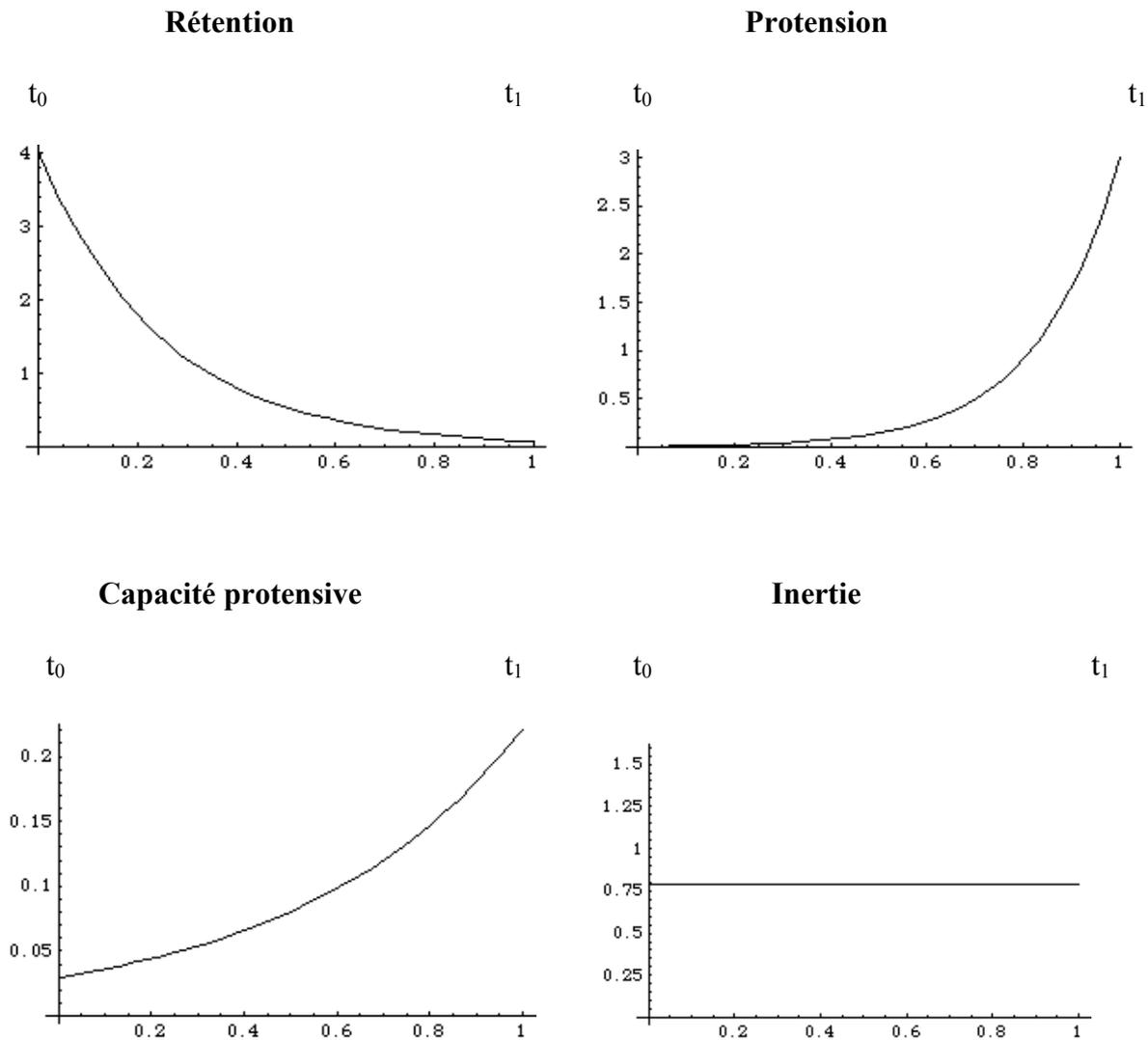
On a alors, pour ce modèle rudimentaire :

$$I(t_0, t_1) = a_R a_P \exp[(t_0 \tau_P - t_1 \tau_R) / \tau_R \tau_P]$$

Cette inertie introduit un facteur indépendant de t et en général très petit devant 1 par rapport à la croissance de C_P en fonction de t et donc contribue de façon essentielle à la décroissance de la capacité protensive avec la distance temporelle.

⁴ After reading a draft of this paper, L. Manning gave us references to empirical evidence confirming the neurophysiological and neuroimaging interest of protention and the dependence of protention on retention [Szpunar et al., 2007 ; Botzung et al., 2007]. Further, more specific experiments would be required in order to quantify the coefficients we introduce here.

Figures ($a_R = 4$; $a_P = 3$; $\tau_R = 1/4$; $\tau_P = 1/6$):



Pour mieux comprendre le sens que nous attribuons à cette “inertie” du vivant, compte tenu de notre remarque précédente sur les ordres de grandeur respectifs des temps caractéristiques, on peut poser $\tau_R = c\tau_P$ ($c > 1$) et on peut réécrire I sous la forme :

$$I(t_0, t_1) = a_R a_P \exp[(t_0 - ct_1)/\tau_R]$$

qui a, en fait, la *forme* d'une "rétention", mais à bien plus long terme que celle associée au moment présent ($t \ll ct_1$) et qui, par conséquent est devenue bien plus petite. A l'inverse, et de façon peut-être encore plus intuitive, l'inertie peut être interprétée (en écrivant $\tau_P = \tau_R/c$ et en éliminant cette fois τ_R) comme une “protension virtuelle” à partir d'un passé beaucoup plus éloigné que le moment présent ($t_0/c \ll t$) et en cela très affaiblie,

$$I(t_0, t_1) = a_R a_P \exp[(t_0/c - t_1)/\tau_P].$$

L'inertie biologique serait donc, à la fois, une rétention et une protension virtuelle étendues et *indépendantes* du temps t de l'action : en fait, elle dépend seulement des instants pertinents à l'événement retenu et ayant eu lieu en t_0 , ou qui est l'objet d'une attente (protension vers t_1). Il s'agit donc d'une inertie, qui “traîne” le vivant de t_0 vers t_1 , par la recherche de la préservation des principes constituant ses structures propres et ses rapports avec son environnement.

Cas $\tau_R = \tau_P$.

On observera que dans le cas où les temps caractéristiques de rétention et de protension sont égaux ($\tau_R = \tau_P = \tau_c$ ou c ci-dessus est égal à 1) la capacité protensive C_P devient $a_{RAP} \exp[(t_0 - t_1)/\tau_c]$ et donc indépendante du temps présent d'observation t . Cela, bien évidemment, dans l'intervalle entre le moment de survenue de l'événement considéré et le moment t_1 où il est à nouveau mobilisé (puisque on a toujours $t_0 < t < t_1$). Mais alors, toujours dans l'hypothèse $c = 1$, $C_P = a_{RAP} \exp[(t_0 - t_1)/\tau_c] = I(t_0, t_1)$ et, dans ce cas, C_P prend sa valeur minimale, si on le considère comme une fonction de la valeur, toujours non-négative, $(\tau_R - \tau_P) \geq 0$: dans la capacité protensive il n'y a donc, pour $(\tau_R = \tau_P)$, qu'une inertie.

On peut aussi gloser cette situation en considérant que si le temps t d'observation est proche de l'instant t_0 de survenue de l'événement (rétention fraîche), alors l'intervalle temporel pour une protension virtuelle, $(t - t_1) \approx (t_0 - t_1)$, grandit ; à l'inverse, si le temps t est loin de t_0 (rétention éloignée) l'intervalle temporel concerné par cette protension virtuelle et dans lequel elle joue son rôle (le futur de l'instant d'observation t) prend une moindre importance, étant bien entendu que la capacité protensive proprement dite C_P demeure indépendante de t (ces remarques pour mettre en évidence le fait que l'intensité C_P de la capacité protensive reste invariante, dans ce cas particulier, alors que la durée sur laquelle s'exerce la protension virtuelle – le futur de t – peut changer de taille : $t_1 - t$). Le fait qu'intensité de la capacité protensive et inertie biologique coïncident dans le cas $c = 1$, se justifie par le fait qu'à temps caractéristiques égaux l'inertie comporte par nature la protension virtuelle (cette dernière en est en tout cas une composante essentielle ; elle s'y réduit quand elle est à son minimum) ; la différence qui demeure, c'est que l'inertie se définit entre les deux instants extrêmes de la durée concernée (t_1, t_0) alors que la protension virtuelle ne se manifeste *comme telle* que relativement au futur de l'instant d'observation t .

3. A propos de l'inertie biologique.

Nous sommes arrivé à proposer une notion mathématique d'inertie biologique par un jeu de symétries et calculs apparemment arbitraire, dont nous souhaitons maintenant mieux expliquer le sens ou au moins les buts. Pour souligner l'importance du concept, mais sans vouloir faire des analogies hors de propos et incontrôlées avec des précédents infiniment illustres, remarquons que la physique moderne a démarré par une bonne analyse de l'inertie : l'inertie galiléenne⁵.

En biologie, on trouve déjà, quoique rarement, cette notion, sous différentes formes. Pour [Vaz, Varela, 1978] « the lymphoid system has an *inertia*, which resists attempts to induce sudden and profound deviations in the course of events ». Une notion faible, donc, d'inertie, proche de la « persistance » de la stabilité structurelle ; de même on pourrait parler d'inertie pour la notion de « dynamic core » dans [Edelman, Tononi, 2000a], car elle aussi fait référence à la continuité/persistance de l'individuation (voir aussi [LeVanQuyen, 2003]). Ce thème est repris par [Varela, 1997] où le terme inertie apparaît à nouveau dans la tentative de saisir la « force », propre à tout organisme, qui permet de « bringing forth of an identity ».

⁵ Sans oublier Giordano Bruno qui avait une notion informelle, mais tout à fait pertinente, d'inertie, quelques années avant Galilée. Bien évidemment, on peut alors se passer de Dieu pour pousser à tout instant les astres dans leur mouvement. Nous voudrions aussi avoir un concept d'inertie pour le vivant sans « élan vital » ni poussée divine.

Dans notre approche, qui s'inspire des méthodes de la physique sans s'y identifier, on définit d'abord la rétention par une fonction de relaxation, une notion physique – qui peut même être considérée adéquate pour décrire la “mémoire” dont on parle souvent en référence à certains alliages physico-chimiques. La protension (virtuelle) est alors donnée par symétrie temporelle, *modulo* des coefficients d'ajustement ; cette notion, qui n'a rien d'analogue en physique, est ainsi, et au moins, la réflexion “en avant” de la rétention. La capacité protensive en suit, en tant que combinaison linéaire de ces deux valeurs, en fonction du temps. Enfin, par un simple jeu algébrique, on sépare la partie contenant la variable temporelle de la définition fonctionnelle : ce qui reste est une constante, fonction de tous les autres paramètres (temps caractéristiques, constantes spécifiques, largeur de l'intervalle). Il est facile de montrer que lorsque la rétention et la protension ont les mêmes temps caractéristiques ($\tau_R = \tau_P$), l'inertie coïncide avec la capacité protensive (voir plus bas, dans ce paragraphe). On dirait alors que l'on se trouve dans les situations les plus simples du point de vue cognitif : le biolon ne sait anticiper que par inertie. En tout cas, la notion d'inertie proposée nous paraît préciser d'une façon bien spécifique l'idée informelle de « bringing forth of an identity », grâce à la référence à la rétention et à la protension.

Mais pourquoi cette inertie ne correspondrait-elle pas simplement au fait de suivre une trajectoire géodésique, comme en physique ? Certains diront que l'amibe, la paramécie etc. suivent un gradient tout comme un objet physique suit la trajectoire dictée par l'hamiltonien. Il peut sembler qu'il en soit ainsi dans des expériences *in vitro*, où, dans un milieu très purifié, on expose l'unicellulaire à un ou deux gradients bien spécifiques (chimiques, de température...). Par contre, *in vivo*, dans les écosystèmes préférés par ces animalcules (très pollués, de notre point de vue), ils doivent “arbitrer” entre stimuli qualitativement différents : plusieurs gradients physico-chimiques, une bactérie comestible proche mais trop grande, une autre plus petite... . Or, la paramécie paraît “apprendre” (voir [Mislin, 2004]), c'est-à-dire elle dispose au moins d'une rétention, qui l'aide dans la protension (et, en lisant Mislin et ses références, on lui accorderait bien $\tau_R > \tau_P$, voire $\tau_R \gg \tau_P$)⁶. Et l'on conçoit mal l'apprentissage sans erreur, voire sans plusieurs tentatives et la mémoire – même ultra-rudimentaire - de ces tentatives (rétention). L'action qui s'ensuit est donc une parmi plusieurs possibles, du point de vue de l'écosystème, car elle dépend aussi de la spécificité de la rétention (expérience) individuelle. Elle suit une trajectoire *compatible* avec l'écosystème parmi de nombreuses trajectoires possibles. Aucun gradient, voire géodésique physique, n'est adéquat pour exprimer cette pluralité des possibles évolutifs, phylogénétiques, ontogénétiques et de l'action, qui dépend aussi de la spécificité, donc de l'histoire, de l'espèce ou de l'individu. Notre modeste tentative inertielle tente de le faire, d'une façon aussi préliminaire que mathématiquement simple.

Mais pourquoi exprimons nous une “complexité” cognitive plus grande par la croissance de $(\tau_R - \tau_P) \geq 0$? On dirait que la capacité protensive, quand $\tau_R \gg \tau_P$, doit tenir compte de plus d’“expérience” pour atteindre le but de l'action, elle dépend de plus d'histoire vécue et retenue, donc de plus de spécificité (individualité) du biolon. Donc elle participe mieux du processus incessant d'individuation, qui est un jeu entre richesse de la rétention et diversité des trajectoires futures possibles.

Nous avons déjà exprimé ces espaces des évolutions possibles, qui n'est pas décrit, à notre avis, par la notion physique de géodésique, grâce une dualité entre théories physiques et une (possible) théorie du biologique, voir [Bailly, Longo, 2006] : en physique, les objets sont *génériques* (un poids galiléen, un électron en tant que solution de l'équation de Dirac... vaut n'importe quel autre, il est générique), mais leurs trajectoires sont *spécifiques* (des

⁶ Une paramécie gère les mouvements d'environ 2000 cils dans des activités de nage très complexes ; certains de ces cils servent aussi à diriger la nourriture vers une “bouche” (ouverture sur la membrane), par des mouvements très articulés.

géodésiques, parfois de simples gradients, parfois plus compliquées, mais toujours "critiques", c'est-à-dire assurant des maximum ou des minimum). En biologie, on ne peut décrire les *objets que comme spécifiques* (la variabilité individuelle du vivant), tandis que les trajectoires, phylogénétiques, ontogénétiques, voire de l'action, sont, elles, *génériques* : ce sont des possibles, disions-nous, des parcours compatibles avec l'écosystème. C'est là, sans doute, une des raisons des explosions du nombre des espèces, dont nous parlent les théories darwiniennes. Dans le cas de l'action, l'"arbitrage" entre trajectoires possibles est le défi de la protension et, *a minima*, de l'inertie biologique. Comme en physique, généralité et spécificité sont corrélées : la généralité des possibles est due à la spécificité, en tant qu'histoire (rétention-mémoire), de l'individu-espèce vivant (le biolon).

Dans la formation d'une histoire, les tentatives explorées, même sans succès, participent de la rétention et l'on ne dira jamais assez que le rôle que joue l'erreur, tout comme l'expérience de la pathologie, départage très nettement une possible théorie du vivant de toute théorie physique, où ces notions n'ont aucun sens. En fait, sans généralité des trajectoires il n'y aurait pas d'évolution darwinienne, donc de phylogenèse, ni d'ontogenèse (en tant qu'individuation). C'est cette généralité qui ne permet pas d'exclure les pathologies de l'analyse du vivant, tout comme l'erreur dans l'action : une "pathologie" peut-être à l'origine d'un nouveau parcours évolutif, une erreur au cours de l'apprentissage-rétention peut précéder une tentative utile à l'action, par le biais de la protension. Encore une fois, ces notions sont à exclure des théories de l'inerte, mais elles doivent être présentes dans toute théorie du vivant, même lorsque l'on essaye de les mathématiser. Et l'explicitation mathématique peut au moins servir à relancer le débat d'une façon peut-être plus rigoureuse, car elle force la conceptualisation à s'engager dans une notation précise. Tel est, au bout du compte, notre but principal.

Bien évidemment, tentative est purement phénoménale et l'absence de toute référence aux inévitables processus physico-chimiques sous-jacents correspond à la pratique historique de la physique, qui a su décrire, d'une façon très efficace, la chute des graves sans référence aucune aux quantons dont ces graves étaient composés même à l'époque de Galilée. Encore aujourd'hui les champs gravitationnels (relativistes) et quantiques ne sont pas unifiés. Leur distinction, soulignons-nous, a été, tout d'abord, au cœur de l'intelligibilité de la microphysique et, ensuite, le point de départ d'une unification à construire sur des bases scientifiques, en faisant dialoguer *deux théories bien construites*.

Intermezzo. De la trajectoire à l'espace: la continuité comme phénomène cognitif.

La continuité de l'espace-temps, celle que nous proposons et structurons d'une façon remarquable par nos mathématiques, suit - et ne précède pas - la continuité d'une figure, voire d'un contour, d'une trajectoire. La géométrie d'Euclide n'est pas une géométrie de l'espace, elle est une géométrie des figures, aux bords continus, construite par une règle et un compas abstraits et soumises à des déformations, voire à des translations et rotations ; bref, elle est une géométrie du geste et des trajectoires. C'est avec Descartes (et quelques prédécesseurs : les idées ont toujours une histoire) que la géométrie trouve son milieu constitutif dans un espace abstrait, sous-jacent et indépendant des figures qui y évoluent. La reconstruction analytique de la géométrie euclidienne s'en suivra, grâce justement à ce cadre idéal, ce continu algébrique-géométrique, que nous donnent les repères cartésiens.

Essayons maintenant de saisir un parcours constitutif possible, voire un ancrage cognitif, de ce continu qui est l'outil privilégié, conceptuel et mathématique, de l'intelligibilité de l'espace, sur la base de notre analyse de la rétention et de la protension.

Les analyses récentes du cortex primaire (voir [Petitot, 2003]) mettent en évidence le rôle des liens synaptiques intracorticaux dans la construction perceptive des bords et des trajectoires : les neurones qui se prolongent, approximativement et localement, sur une droite sont plus fortement connectés que les autres. Nous “détectons” la continuité d’un bord par recollement des tangentes qui se déplacent continûment, en tant qu’activation de neurones qui se structurent et se lient de façon continue, localement presque parallèlement. 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 des tangentes localement presque droites : 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 rétif peut alors se situer au niveau des muscles qui permettent les saccades, voire des neurones qui les gèrent.

Cette activité neuronale est certainement présente dans le cas de la protension : 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.

Or, nous proposons à l’attention du lecteur la conjecture suivante. La *rétention* de la trajectoire parcourue, du bord suivi par l’œil, est “*recollée*” à la *protension* 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 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’œil qui permet le suivi continu) et qui prend des instantanés espacés d’un objet en mouvement, n’aurait pas l’impression d’un continu, comme nous le “voyons”.

La continuité donc d’une trajectoire, d’un bord... serait le résultat d’un recollement spatio-temporel de la rétention et de la protension pertinentes, gérées par l’activité neuronale globale, en présence d’une pluralité d’activités de ce type (muscles, système vestibulaire... mais aussi le continu différentiable du geste, de la caresse y participe par son propre jeu de rétention/protension). 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, 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 du mouvement et du geste (car la continuité d’un bord serait aussi celle d’un mouvement : celui de la saccade qui le parcourt, de la main qui le suit).

Remarquons, en conclusion de cette brève pause dans un article sur la spatialisation du temps du vivant - une spatialisation qui quoique schématique devrait aider à son intelligibilité - que nous avons procédé ici à la démarche inverse : une sorte de temporalisation de l’espace ou, au moins, de sa continuité.

4. Proposition de schème abstrait pour la temporalité biologique.

Prémisse : les rythmes et une origine possible de la capacité protensive du vivant.

Ce que nous proposons, dans le but de mathématiser une structure conceptuelle pour le temps, est hautement spéculatif, mais il pourrait aussi proposer une piste "explicatrice" de cette capacité anticipatrice qui n'appartient qu'au vivant (à l'exclusion du purement physique inerte, bien que ce soit la même "matière" qui soit en jeu). Cela revient, dans le modèle que nous avons vu plus haut, à nous interroger sur la nature de ce temps t_1 qui n'est pas encore advenu au temps présent t et qui figure néanmoins dans les équations.

Nous avons essayé au paragraphe 1 de rappeler quelques caractéristiques de la "situation critique étendue" qui serait propre au vivant ; pour ce faire et parmi certaines de ses spécifications, nous avons introduit une deuxième dimension de temps, associée principalement aux rythmes internes endogènes des biolons (cellules, organismes, espèces), dimension de temps que nous avons présentée comme compacifiée (topologie S_1). Or on sait que plusieurs tentatives ont été faites en physique pour introduire une deuxième dimension temporelle. Certaines ont pu être retenues, mais celle qui faisait intervenir seulement un temps compacifié a été rejetée comme "non physique" du fait qu'elle pouvait remettre en cause la causalité classique en permettant une sorte de "causalité rétrograde". Peut-être n'est-il pas absurde de considérer que c'est précisément cette propriété associée à notre dimension temporelle compacifiée qui autoriserait la prise en compte limitée d'un temps ultérieur au présent ($t_1 > t$) et serait ainsi à la racine d'une capacité anticipatrice, en un certain sens, des biolons. Le rôle de la protension est justement, pensons-nous, celui d'avoir une *influence causale* sur l'activité présente du biolon : un événement (possible) au futur contribue, par son anticipation, à la détermination des processus en cours.

Nous noterons par θ ce temps compacifié dont on peut se le représenter comme une sorte de "cercle" de "rayon" ρ (où ρ est un temps) : ce cercle exprime la circularité temporelle, la composante itérative en fait, propres aux rythmes internes. Il n'est alors pas absurde de considérer que t_1 est en relation avec le "périmètre" de ce cercle à parcourir, soit $2\pi\rho$. En effet, si ce "rayon" est nul (ce qui revient à considérer qu'il n'y a pas de seconde dimension de temps par rapport au temps usuel t), alors le temps associé à la protension (t_1) est également nul (il n'y a pas de protension, comme c'est le cas en physique). Pour nous résumer, c'est l'aspect itératif des rythmes internes qui impose au vivant une inertie et une "attente" d'une sorte d'itération des événements futurs, si variables soient-ils (la protension P) ; une attente qui dépend aussi de ce qui est retenu, voire du vécu (la rétention R apparaît dans la définition de P).

4.1. A propos des rythmes biologiques

4.1.1. On distinguera deux types de rythmes biologiques, renvoyant chacun à une dimension temporelle distincte (plus bas on les notera respectivement t et θ) :

(Ext) les rythmes "externes", *pilotés par* des phénomènes extérieurs à l'organisme, d'origine physique ou physico-chimique et qui s'imposent physiquement à l'organisme. Ces rythmes sont donc les mêmes pour de nombreuses espèces, indépendamment de leur taille. Ils s'expriment en termes de périodes ou de fréquences physiques, donc dimensionnelles (s, Hz) et les invariants sont dimensionnels ; on les décrit par rapport à la dimension du temps physique (en $\exp(i\omega t)$). Exemples : les rythmes saisonniers, le rythme circadien et tous leurs harmoniques et sous-harmoniques, les rythmes de réactions chimiques oscillantes à la température donnée, etc.

(Int) les rythmes "internes", d'origine endogène, *propres à des fonctions physiologiques* de l'organisme, dépendant donc de spécifications fonctionnelles purement biologiques. Ces rythmes sont caractérisés par des périodes qui scalent comme la puissance $1/4$ de la masse de l'organisme et, rapportés à la durée de vie de l'organisme qui scale de la

même façon, ils s'expriment donc par des nombres purs (ils n'ont pas de dimensionnalité physique). Les invariants sont donc numériques. On propose de les décrire par rapport à une nouvelle dimension "temporelle" θ compacifiée, de tout petit rayon, les valeurs numériques correspondant alors à un "nombre de tours" indépendamment de l'extension temporelle physique effective. (On a donné des exemples : battements de cœur, respirations, fréquences cérébrales, etc.).

Essayons d'être plus explicites et précis (même si on doit être un peu répétitif).

Les cycles biologiques endogènes en (Int) (qui ne dépendent donc pas directement de rythmes physiques externes qui s'imposent) sont ceux qui :

- sont déterminés moins par des grandeurs dimensionnelles comme en physique (secondes, Hertz,...) que par des nombres purs (nombre de respirations ou de battements de cœur au cours d'une vie, par exemple).
- scalent avec la taille de l'organisme (fréquences en puissance $-1/4$ de la masse, périodes en puissance $1/4$), ce qui n'est en général pas le cas des rythmes externes contraignants qui s'imposent à tous (circadien, par exemple).
- peuvent en cela se rapporter à une dimension "temporelle" supplémentaire compacifiée (un angle, en fait, comme dans une horloge)⁷, par contraste avec la dimension temporelle usuelle, non compacte et pourvue de dimensionnalité.

Comme par ailleurs ces rythmes endogènes s'inscrivent aussi dans le temps usuel, on est conduit à considérer pour ces rythmes et temporalités intrinsèques à l'organisme une temporalité de dimension topologique égale à 2, formée par le *produit direct* entre la partie non compacte, la droite réelle de variable t , et (en fibre sur celle-ci) la partie compacifiée, un cercle S_1 , dont la variable est θ .

De ce point de vue, ce que nous avons caractérisé comme "situation critique étendue" (correspondant au caractère auto-référentiel et individué de l'organisme) et sur laquelle nous revenons au paragraphe suivant, présente une *temporalité topologique* de type $\mathbf{R} \times S_1$, alors que l'externalité de l'organisme (et la façon dont cette externalité réagit avec l'organisme) conserve sa topologie temporelle usuelle, la droite \mathbf{R} . Ainsi, du point de vue du temps, cette fois, la situation critique étendue serait caractérisée par cette bidimensionalité, faisant couple avec, du point de vue spatial, des longueurs de corrélation "quasi-infinies" (à l'échelle de l'organisme entier) et la clôture organisationnelle conjugueraient ces aspects spatio-temporels particuliers qui se manifesteraient comme autopoïèse. La situation critique étendue délimiterait donc, du point de vue de l'espace-temps (en laissant ici de côté l'extension à tous les autres paramètres pertinents tels la température, la pression, la quantité de nutriments ou d'oxygène,...), une boule de rayon spatial L par exemple, où les longueurs de corrélation des interactions seraient de l'ordre de L , et de "rayon temporel" $\tau_v \times \theta$, où τ_v correspond à durée de vie dans t et θ à des cycles variés, tels ceux qui gouvernent les rythmes respiratoires ou cardiaques par exemple.

Sans changer au fond de la question, on peut présenter une façon de voir un peu différente : pour un organisme vivant, la situation critique étendue occuperait un volume dans un "espace" à n dimensions, l'espace des paramètres pertinents. Parmi ces n dimensions on distinguerait trois dimensions d'espace proprement dit (topologie \mathbf{R}^3) et deux dimensions de temps (topologie $\mathbf{R} \times S_1$) dont la dimension compacifiée prend un rayon nul hors de ce volume, les $n-5$ dimensions restantes correspondant aux valeurs compatibles des paramètres vitaux (températures entre T_1 et T_2 , métabolismes entre R_1 et R_2 , etc.). Les métriques d'espace du volume correspondraient en gros aux longueurs de corrélation et les métriques de

⁷ Le cercle est la *compacification* de la droite réelle, par l'ajout d'un point et son repliement.

temps correspondraient maximalement aux durées de vie (pour \mathbf{R}) et aux nombres purs maximaux (fréquences maximales endogènes) pour \mathbf{S}_1 .

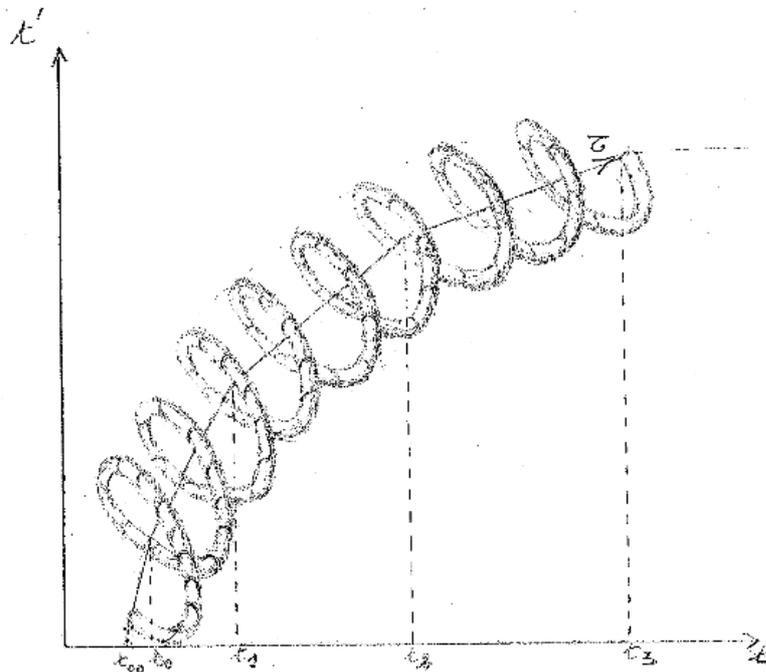
On remarquera que les rythmicités et cyclicités endogènes sont moins des rythmes ou des cycles proprement dits que des *itérations* dont le nombre total est fixé quelle que soit la durée de vie empirique.

4.1.2. Si nous essayons d'être plus précis encore en distinguant les niveaux d'organisation eux-mêmes pour tenter de les mettre en relation avec les rythmes que nous avons mentionnés, il apparaît que les rythmes exogènes s'imposent principalement aux niveaux bioloniques (individus, espèces), alors que les rythmes internes trouvent leur siège principalement aux niveaux des orgons (organes, populations). Ainsi, les processus intégratifs et régulateurs s'exercent principalement sur les rythmes internes, propres au biolon considéré, alors que ces biolons eux-mêmes se trouvent dépendre des conditions environnementales auxquelles ils peuvent être soumis et qui, le plus souvent, leur échappe. Ainsi, la relative autonomie des biolons peut-elle être mise en rapport avec le caractère interne des rythmes affectant les orgons - dont les propriétés de scaling temporel sont effectivement dépendantes de la taille des biolons comme tels -, tandis que leur dépendance environnementale peut être rattachée à la nécessité dans laquelle ils se trouvent de s'adapter aux rythmes physico-chimiques externes.

Par les schémas abstraits que nous présenterons ici, il ne s'agit évidemment pas de proposer une sorte de "dernier mot mathématique" quant aux questions de temporalités pour le vivant, mais plutôt de franchir un niveau d'abstraction qui nous permette de rassembler et résumer certaines des discussions que nous venons de présenter précédemment. Nous soulignons donc fortement le fait que dans tout ce qui suit il s'agit évidemment d'un schème qualitatif et générique et non d'une représentation réaliste, quantitative et spécifique. Bref, ce ne sont pas les valeurs numériques qui comptent dans notre dessin et approche, mais la structure topologique globale. Son but est celui d'une organisation géométrique possible du temps du vivant, qui, par la générativité propre aux structures mathématiques, nous permette aussi de *dériver* un sens et *corrélér mathématiquement* des notions diverses.

Le texte constitue lui-même le commentaire et l'approfondissement du schéma suivant qui est censé "visualiser" la bi-dimensionalité que nous proposons pour le temps du vivant. Dans cette version préliminaire, il s'agit d'un schéma très approximatif, voire imprécis : il ne devrait pas y avoir inversement du temps par rapport au temps thermodynamique ! Mais les difficultés du dessin nous obligent à des inexactitudes pour exprimer qualitativement une dynamique complexe du temps en peu d'espace.

L'image est constituée par ce que nous pourrions nommer une "hélice du second ordre", c'est-à-dire une hélice s'enroulant autour d'un petit cylindre hélicoïdal, qui, à son tour, s'enroule autour d'un grand cylindre, dont l'axe est la ligne brisée τ . Précisons.



4.1.3. Le cadre de référence (t,t')

Comme référentiel de base on choisit des coordonnées cartésiennes orthogonales. En abscisse t , en ordonnée t' . Les axes t et t' sont orientées comme d'habitude (t vers la droite et t' vers le haut). On propose d'interpréter l'abscisse t comme correspondant au temps physique objectif, orienté comme tout temps thermodynamique et qui permet la caractérisation des instants et la mesure des durées.

On réserve la proposition d'interprétation de t' : elle sera discutée à la fin du paragraphe (de simples calculs algébriques engendreront un sens possible de cette coordonnée temporelle adjonctive).

4.2. L'axe d'évolution τ , ses angles avec l'horizontale $\varphi(t)$ et ses pentes $\text{tg}\varphi(t)$

La ligne centrale τ , la "résultante" des différentes composantes (temps physique et rythmes externes et internes), est censé renvoyer à un temps "physiologique" associé à l'évolution de l'organisme au cours de sa vie (il est, lui aussi orienté, vers la droite et vers le haut). Il forme un "axe" composé de parties segmentaires distinctes, caractérisées chacune par leur angle φ par rapport à l'axe des abscisses, raccordées par des zones à courbure rapide (l'angle φ considéré est alors celui de la tangente) autour de moments particuliers ($t_0, t_1, t_2 \dots$). On distinguera ainsi cinq parties (de longueurs inégales).

- a) Autour de t_{00} (qui correspondrait à la fécondation de l'œuf appelé à former l'organisme, ou la mutation engendrant une nouvelle espèce) commence un segment

d'angle très élevé (80° par exemple) et donc de pente très élevée. Ce segment est appelé à correspondre à l'*embryogenèse*.

- b) Autour de t_0 a lieu une première courbure rapide de l'axe pour initier un segment dont l'angle (et la pente) restent néanmoins élevés (à 60° , par exemple). Le temps t_0 correspondrait à la naissance⁸ et le segment qui suit à la *croissance* (le développement).
- c) Autour de t_1 , nouvelle courbure rapide engendrant un segment d'angle moyen (45° par exemple) et de pente proche de 1. t_1 correspondrait à l'apparition de la faculté de reproduction (âge de la puberté⁹) et à l'entrée dans la *maturité adulte*.
- d) Autour de t_2 , nouvelle courbure rapide à l'origine d'un segment d'angle faible (30° par exemple) et de pente faible ; t_2 correspondrait à la période de perte de la fécondité (ménopause, éventuellement andropause)¹⁰ et au début du *vieillesse* proprement dit.
- e) Autour de t_3 l'axe devient horizontal ($\varphi = 0$, $\text{tg}\varphi = 0$) et s'interrompt définitivement ; t_3 est le moment de la *mort*.

Concernant les différentes durées (et notamment la durée de vie, $t_3 - t_0$) on sait, par les lois d'échelle très généralement rencontrées en biologie, que ces durées scalent suivant les organismes à peu près en $W_f^{1/4}$, où W_f est la masse adulte de l'organisme.

Si maintenant nous considérons $v_t = \text{tg}\varphi(t)$ comme la "vitesse" d'évolution du temps physiologique τ par rapport au temps physique t , alors on fera les remarques qualitatives suivantes, qui motivent les différentes pentes de τ :

- entre t_{00} et t_0 cette vitesse est très élevée : divisions cellulaires initiales, morphogenèse, mise en place des premières fonctionnalités ;
- entre t_0 et t_1 , la vitesse est encore élevée ; elle correspond à la croissance, au développement, à l'achèvement de la mise en place des fonctionnalités, à un métabolisme élevé ;
- entre t_1 et t_2 la vitesse est moyenne ; elle correspond à la régularité des réactions métaboliques, des renouvellements cellulaires, etc., caractéristique de l'âge adulte ;
- entre t_2 et t_3 , la vitesse est faible : ralentissement du métabolisme, du renouvellement cellulaire, des activités ; c'est le vieillissement ;
- après t_3 la vitesse est nulle : c'est la mort de l'organisme.

4.3. Le cylindre de révolution "hélicoïdal" ; son pas p_e ; son rayon r

Il s'agit donc d'un cylindre de révolution, de rayon r , qui s'enroule en hélice de pas p_e autour de l'axe τ , sans toucher cet axe mais suivant fidèlement ses changements de direction.

Le pas p_e de ce cylindre hélicoïdal est assimilable à une période ; il correspond aux rythmes cycliques *externes* imposés à l'organisme par son environnement (cycles annuels, lunaires, circadiens, ..., voir §.4.1.1(Ext)), rythmes physico-chimiques indépendants que nous avons pris en compte au premier paragraphe ; ils sont donc essentiellement d'origine physique et s'imposent à tous les organismes qui y sont exposés. Le cas où $r = 0$ sera évoqué plus bas.

4.4. L'hélice circulaire sur le cylindre et son pas p_i

⁸ A la germination, pour une plante.

⁹ A la capacité de floraison ou de fructification pour une plante.

¹⁰ A l'arrêt de la production pour une plante.

Cette hélice circulaire, de pas p_i , s'enroule sur la surface du cylindre (c'est une "hélice du second ordre" car son cylindre d'enroulement est à son tour hélicoïdal). On considérera que le pas de cette hélice (qui est aussi une période) renvoie au un temps compacifié θ (le cercle générateur du cylindre)¹¹ introduit plus haut et associé aux cycles biologiques *internes* de l'organisme et qui sont indépendants (ou presque) de l'environnement ; c'est le cas, rappelons-le, par exemple, de rythmes cardiaques, respiratoires, des cascades biochimiques cycliques, ... (voir §.1.1.(Int)). On rappelle aussi que la période associée à ces cycles scale également en $W_f^{1/4}$, au moins à partir de t_1 (et pratiquement à partir de t_0).

Pour résumer, on a donc d'un point de vue biologique, et en plus du temps physique objectif t (évidemment toujours présent et pertinent) :

- une temporalité générale d'évolution biologique τ (l'axe)
- une temporalité associée aux rythmes externes (le cylindre hélicoïdal s'enroulant, à distance, autour de cet axe) caractérisées par le pas p_e .
- une temporalité associée aux rythmes internes et faisant intervenir une compaction du temps : l'hélice de pas p_i à la surface du cylindre.

C'est l'occasion de noter que si le rayon r du cylindre hélicoïdal devient nul, celui-ci se réduit à une hélice autour de τ et la cyclicité interne tend à disparaître comme telle (il ne reste que les rythmes externes, de type physique). Si l'on peut considérer que le schème général que nous avons présenté prend principalement en compte les propriétés du règne animal, ce dernier cas, $r = 0$, concernerait principalement le règne végétal. En ce sens la non nullité de r , c'est-à-dire la bidimensionalité de la surface cylindrique, serait à associer à la plus grande autonomie – les rythmes des grands systèmes centraux, typiquement - et à la capacité de motricité autonome de l'animal par rapport au végétal, les deux étant corrélées bien évidemment. En fait, les rythmes (métaboliques, chlorophylliens, d'action – ouverture d'organes...) des plantes sont très souvent complètement subordonnés aux grands rythmes physiques externes.

Bien évidemment, il n'y a pas de transition nette, de frontière précise entre animaux et plantes (on pense en particulier à la flore/faune marine). Pour cette raison nous trouvons adéquate la représentation du passage de l'un à l'autre par un continu : la contraction continue du cylindre hélicoïdal qui tend à en une hélice, qui est un ligne. La non-observabilité de la différence entre animal et plante, dans certain cas de "transition", correspondrait à un intervalle de la mesure biologiquement possible, sans transition de phase (de règne) nette, discontinue. Une fois que la limite est atteinte, à savoir la ligne hélicoïdale, même l'espace de plongement tridimensionnel peut être collapsé sur les deux dimensions : le rythme devient l'oscillation d'une mesure (de l'activité chlorophyllienne, par exemple) par rapport à l'axe du temps physique orienté (la spirale s'aplatit en une sinusoïde, par exemple), comme dans maints processus physique périodiques.

4.5. Sur l'interprétation de l'ordonnée t'

Revenons maintenant à nos interrogations sur l'interprétation que l'on peut donner à l'ordonnée t' . Dans un certain sens, elle est *engendrée* par la fibre compacifiée des rythmes temporels propres du vivant. Plus précisément, elle est mathématiquement nécessaire en tant que composante de l'espace de plongement des hélices produites par le produit directe du temps physique t et du temps compacifié θ , qui sont, dans nos hypothèses, deux dimensions indépendantes. Cet espace de plongement possède en fait trois dimensions (l'espace dont le

¹¹ Rappelons que nous avons discuté par ailleurs la possibilité et la pertinence de cette dimension compacifiée du temps (voir livre).

schéma ci-dessus est une projection bidimensionnelle), mais la variété temporelle (l'espace du temps) en a deux : elle est la surface d'un cylindre (hélicoïdal) et, donc, seulement deux nombres suffisent à déterminer une position dans le temps. A quoi donc cette ordonnée t' peut-elle correspondre, du point de vue biologique?

Si l'on définit une vitesse d'écoulement du temps τ par rapport à t' de façon similaire à la définition de $v_t = \operatorname{tg}\varphi(t)$, on aura : $v_t = \operatorname{cotg}\varphi(t)$; à l'inverse de v_t (on a $v_t v_t = 1$) cette vitesse est d'abord petite puis ne cesse de s'accroître quand t (ou τ) croît.

Dans le cas où l'organisme considéré est l'être humain, une interprétation vient tout de suite à l'esprit : la vitesse v_t correspondrait au *ressenti subjectif* de la vitesse d'écoulement du temps "propre" ou physiologique τ (d'abord très lente, puis de plus en plus rapide avec le vieillissement). Dans ce cas t' serait l'équivalent d'un *temps subjectif*. On remarquera alors que, du point de vue quantitatif, si entre t_1 et t_2 (la zone de l'âge adulte) on donne à φ la valeur de 45° environ, comme on l'a déjà indiqué plus haut, la vitesse d'écoulement de τ par rapport au temps physique objectif (v_t) coïncide à peu près avec le sentiment subjectif de cette vitesse d'écoulement (v_t) (en fait, $\operatorname{tg}\varphi \approx \operatorname{cotg}\varphi \approx 1$). Laissons au lecteur toute réflexion au sujet du ressenti subjectif du temps au cours de la jeunesse et de la vieillesse : nous imaginons que ses considérations coïncident avec les nôtres (le temps qui passe lentement et, puis, très vite, malheureusement).

En ce qui concerne les autres organismes que l'être humain, dont on ne sait s'ils ont ou non un ressenti subjectif de la vitesse d'écoulement du temps physiologique τ , il est plus difficile assigner un statut clair à cette dimension t' (bien que certaines espèces relativement évoluées semblent susceptibles de manifester de l'impatience, par exemple, ou encore de se construire une représentation temporelle abstraite en exerçant des facultés de rétention et surtout de protension, facultés que nous avons déjà considérées plus longuement au paragraphe précédent). Cette dimension ne commencerait-elle donc à acquérir une réalité vécue qu'avec l'apparition et le développement d'un système nerveux évolué (système nerveux central, cerveau) ? Mais dans ce cas qu'en serait-il pour la bactérie, l'amibe, la paramécie, ... ?

En fait, peut-être est-il possible d'objectiver un peu l'approche en avançant une hypothèse plausible sur le caractère général de t' : on pourrait considérer qu'il s'agit d'une "temporalité" associée à la dimension de la "représentation". Expliquons-nous.

Si une telle assertion ne pose pas de problème lorsqu'il s'agit de l'être humain et du ressenti de son temps subjectif, comme nous venons de l'envisager, comment trouve-t-elle un écho dans les autres cas ? S'agissant d'organismes possédant peu ou prou ces capacités de rétention et de protension que nous venons de rappeler nous proposons (provisoirement) de nous appuyer sur l'argument qualitatif suivant : l'élément de temps physiologique $d\tau$ est relié à l'élément de temps physique dt et à dt' par la relation évidente $d\tau^2 = dt^2 + dt'^2$; il en résulte que dt'^2 peut s'écrire $dt'^2 = d\tau^2 - dt^2$ ou encore

$$dt'^2 = (d\tau - dt)(d\tau + dt).$$

Il est alors tentant de voir dans le premier facteur l'expression minimale d'un élément de "rétention" (pour le temps physiologique relativement au temps physique) et dans le second l'expression correspondante d'un élément "de protension", le produit des deux engendrant l'élément de temporalité d'une "représentation" prenant en compte du "passé" et du "futur" pour se constituer. Comme tous les organismes vivants semblent dotés à la fois d'une rétention – si rudimentaire soit-elle – et d'une faculté de protension (encore plus rudimentaire peut-être), la généralité de la dimension t' serait préservée et la capacité "représentative" (au moins en ce sens élémentaire) apparaîtrait comme une propriété du vivant. Cette propriété pour le conscient, pourrait donc même s'étendre à une subjectivité, en accord, dans le cas spécifique de l'homme, avec l'analyse phénoménologique de laquelle nous sommes parti

parti : dt^2 serait une forme, élémentaire ainsi qu'infinitésimale, du "présent étendu" décrit par d'autres analyses (comme couplage d'oscillateurs, par exemple) dans [Varela, 1999].

Et finalement ce serait la bidimensionalité txt' – (temps physique)x(temps de la représentation) - qui permettrait de *baliser* la temporalité du vivant, qui se présente par ailleurs de façon si complexe comme nous l'avons discuté plus haut.

Références

(Des versions préliminaires ou revues des articles de Longo sont "downloadable" de <http://www.di.ens.fr/users/longo> ou Google: search : Giuseppe Longo).

- Ameisen J.C., **La sculpture du vivant. Le suicide cellulaire ou la mort créatrice**. Paris, Seuil 1999.
- Bailly F., "L'anneau des disciplines", **Rev. Int. Syst.**, **5**, n°3, 1991.
- Bailly F., F. Gaill et R. Mosseri, "La fractalité en biologie : ses relations avec les notions de fonction et d'organisation", in : **Biologie théorique** (Y. Bouligand Ed.), Ed. CNRS, 1989.
- Bailly F., F. Gaill et R. Mosseri, "Orgons and Biolons" in *Theoretical Biology : phenomenological analysis and quantum analogies*, **Acta Biotheor.**, **41**, p.3, 17, 1993.
- Bailly F., Longo G. "Objective and Epistemic Complexity in Biology". Invited lecture, Proceedings of the International Conference on **Theoretical Neurobiology**, (N. D. Singh, ed.), National Brain Research Centre, New Delhi, INDIA, pp. 62 - 79, 2003.
- Bailly F., Longo G. **Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant**. Hermann, Paris, 2006.
- Bak P., C. Tang C. and Wiesenfeld K. "Self-organized criticality". **Physical Review A** 38: 364--374, 1988.
- Bernard-Weil E., **Stratégies paradoxales en bio-médecine et sciences humaines**, Paris, L'Harmattan 2002.
- Bourgine P., Stewart J. "Autopoiesis and Cognition", **Artificial Life**, 10,3, 2004.
- Botzung A., Denkova E., Manning L. "Experiencing and future personal events: Functional neuroimaging on the neural bases of mental time travel", **Brain and Cognition**, to appear, 2007.
- Chaline J., **Les horloges du vivant**, Hachette, 1999.
- Edelman G. M., Tononi G. **A Universe of Consciousness**. How Matter Becomes Imagination, Basic Books, 2000.
- Edelman G. M., Tononi G., "Reentry and the dynamic core : neural correlates of conscious experience" in (Metzinger, ed.) **Neural correlates of Consciousness**, M.I.T. Press, 2000a.
- Feynmann R., **La nature de la physique**, Seuil, 1998.
- van Gelde T. "Wooden Iron? Husserlian Phenomenology meets Cognitive Sciences", in : **Naturalizing Phenomenology** (J. Petitot, F. Varela, B. Pachoud, J-M. Roy, Eds.) Stanford University Press 1999
- Gould S.J., **L'éventail du vivant**, Paris, Seuil 1997
- Horsfield K., "Morphology of branching trees related to entropy", **Respir. Physiol.**, 29, p.179, 1977
- Lecointre G., Le Guyader H., **Classification phylogénétique du vivant**, Paris, Belin 2001.
- LeVanQuyen M. "Disentangling the dynamic core : a research program for a neurodynamics at the large-scale" **Biol. Res.**, 36, pp. 67-88, 2003.
- Lesne A. **Approches multi-échelles en physique et en biologie**, Habilitation à diriger la recherche, Univ. Paris VI, 30/6/2003.
- Nottale L. **Fractal Space-Time and Microphysics : Towards a Theory of Scale Relativity**, World Scientific 1993
- Peters R. H. **The ecological implication of body size**, Cambridge U.P., 1983.
- Petitot J. "The neurogeometry of pinwheels as a sub-riemannian contact structure", **Neurogeometry and Visual Perception**, Journal of Physiology-Paris, 97, 2-3, 265-309, 2003.
- Rosen R., **Life itself!: A comprehensive Enquire into the Nature, Origin and Fabrication of Life**, New York, Columbia University Press, 1991.
- Schmidt-Nielsen K. **Scaling**, Cambridge U.P., 1984.

- Stewart, J. "La modélisation en biologie", in **Enquête sur le concept de modèle**, (Nouvel P., ed.), Presses Universitaire de France, 2002.
- Szpunar K., Watson J., McDermott K. "Neural substrates of envisioning the future", **PNAS**, vol 104, n. 2, 643-647, Jan. 2007.
- Varela F., **Autonomie et connaissance**, Seuil, Paris, 1989.
- Varela F. "Patterns of life : Intertwining identity and cognition". **Brain and Cognition**, 34, pp. 72-87, 1997.
- Varela F. "The Specious Present: A Neurophenomenology of Time Consciousness", in : **Naturalizing Phenomenology** (J. Petitot, F. Varela, B. Pachoud, J-M. Roy, Eds.) Stanford University Press 1999.
- Vaz N., Varela F. "Self and non-sense : an organism centered approach to immunology", **Medical Hypothesis**, 4, pp. 231-267, 1978.
- Waddington C.H., "Stabilization of Systems, Chreods and Epigenetic Landscapes", **Futures**, 9(2), p.139, , 18, 1977.
- West G., Brown J., Enquist B., "A general model for the origin of allometric scaling laws in biology", **Science**, CCLXXVI, p.122, 1997.