

AFSCET
Groupe de Travail : Modélisation des systèmes complexes
Réunion du 18 janvier 2010

Modélisation Mathématique de la Régulation Biologique
par Jacques Lorigny

- Plan :
- I. Naissance de la science de la régulation
 - II. La relation aléatoire
 - III. Modélisation mathématique de la réserve de régulation
 - IV. Modélisation mathématique des cycles existentiels
 - V. Rapprochement avec les postulats de la mécanique quantique
 - VI. Recherche sur le sens de l'évolution universelle

I. Naissance de la science de la régulation

La notion de régulation biologique apparaît déjà dans l'œuvre du physiologiste Claude Bernard, auteur de la célèbre *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), mais ne porte encore que sur les régulations neurovégétatives, et pas sur les régulations hormonales. Il faut attendre le début du siècle pour que ses observations partielles se transforment en une notion plus générale, grâce à Walter Cannon et à son concept d'homéostasie dans *The Wisdom of the Body* (1932). Quant au fameux « article de Norbert Wiener » considéré comme fondateur de la cybernétique [9], il n'arrivera qu'en 1943. C'est avec l'œuvre de Pierre Vendryès que commence à proprement parler la modélisation mathématique de la régulation biologique. Son premier ouvrage théorique *Vie et Probabilité* paraît dès 1942 [10], avec une préface enthousiaste du grand physicien Louis de Broglie.

II. La relation aléatoire

Claude Bernard avait mis en évidence les "conditions déterminées" grâce auxquelles un organisme se rend indépendant des fluctuations extérieures. La formule célèbre qui résumait sa physiologie générale était : « La fixité du milieu intérieur est la condition de la

vie libre et indépendante ». Ensuite, Walter Cannon avait décrit avec précision et exhaustivité les constances physiologiques du sang et du plasma. Pierre Vendryès nous les rappellera d'emblée ([10], p.30) : pour le sang, température de 37°, pH de 7,35, densité de 1,060, concentration en eau de 90%, etc., au total une vingtaine de constantes, toujours entourées de marges de tolérance. Chacun de nous a pu les retrouver sur ses bilans sanguins périodiques. Cette constance du sang fait partie de notre quotidien, mais, avec le recul, c'est une merveille de l'Evolution du vivant.

C'est alors qu'intervient l'idée géniale de Pierre Vendryès, un lundi mémorable d'avril 1937, le lundi 19 à 17H20 pour la petite histoire. « Ce fut l'illumination. La fixité du sang devait s'interpréter par les probabilités. Cette idée s'imposa, d'emblée, avec une force étrange, avec ce *sentiment de certitude absolue* que signale Poincaré » ([10], p.360). La science de la régulation venait d'entrer dans la modélisation mathématique. Vendryès se plongea aussitôt avec ardeur dans l'étude du calcul des probabilités. Il devint même Président de la Société de Statistique de Paris en 1962. En anticipant sur le chapitre V, qui sera consacré au rapprochement avec la mécanique quantique, rappelons que, dans sa préface à l'ouvrage *Vie et Probabilité* de Vendryès, Louis de Broglie s'était avoué séduit par « l'originalité et la profondeur des conceptions » de son auteur. Le grand physicien connaissait déjà par ailleurs, et retrouvait ici chez notre jeune médecin, le rôle fondamental que devait jouer désormais la probabilité en physique fondamentale, avec son rejet du déterminisme classique, et son rejet de l'espace continu.

Notre médecin philosophe devenu probabiliste mettra de nombreuses années avant de parvenir à la forme achevée de son *énoncé fondamental*, tel que nous le connaissons désormais : « En acquérant son autonomie à partir du milieu extérieur et par rapport à lui, l'être vivant acquiert la possibilité d'entrer avec lui en relations aléatoires » ([12], p.25). Il tient d'ailleurs à vérifier expérimentalement sa théorie, et installe un atelier de fortune à Longjumeau afin d'observer, de mesurer, les trajectoires des animaux libres de leurs mouvements (mouches, têtards). Il réalise même une enquête auprès des chauffeurs de taxis sur leurs itinéraires de maraude. Il va, nous racontera son épouse, jusqu'à scruter les déplacements de sa fille évoluant à trottinette dans le salon.

Pierre Vendryès établit ainsi la vraie nature du hasard. Le hasard est relationnel. C'est une interface. Le hasard relationnel réside à la base de la représentation mathématique de la régulation biologique. De même que Platon déclarait « Nul ne peut entrer à l'Académie s'il n'est géomètre », nous dirons dorénavant que Nul ne peut entrer en science de la vie (du vivre) et de l'homme (de l'être humain) s'il n'est probabiliste.

La relation aléatoire crée une double coupure entre l'organisme et son environnement : coupure dans l'espace entre le milieu intérieur et le milieu extérieur, et coupure dans le temps entre l'instant d'avant et l'instant d'après, selon le concept mathématique « d'épreuve aléatoire ». La modélisation mathématique la plus simple de cette double coupure régulatrice est la convolution de la loi de Bernoulli (dans l'espace) et de la loi de Poisson (dans le temps). Rappelons les composantes de cette convolution.

Loi de Bernoulli : On considère une épreuve aléatoire à deux issues : c / non c. On lui associe une variable aléatoire X qui prend la valeur 1 si c se réalise et 0 si (non c) se réalise. La loi de Bernoulli est définie par la donnée de la probabilité p de l'issue c, soit $\Pr(X=1) = p$, et donc $\Pr(X=0) = q = 1-p$. On considère une succession de N variables $\{X_i : i=1 \text{ à } N\}$, indépendantes entre elles et de même loi définie par p, leur somme $Y = \sum_{i=1}^N X_i$ suit la *loi binomiale*, qui prend les valeurs $\{0,1,2,\dots,k,\dots,N\}$, avec les probabilités $C_N^k \cdot p^k \cdot q^{N-k}$, où l'on reconnaît les coefficients du binôme provenant du développement de $[p+q]^N$, d'où son nom.

Processus de Poisson : On s'intéresse à un événement d'un type déterminé mais pouvant se produire à un instant aléatoire t sur l'axe réel (arrivée d'un bateau dans un port, d'un client à un guichet). On suppose que les événements sont indépendants les uns des autres, et l'on en déduit que l'intervalle de temps séparant deux événements successifs doit obéir à une loi de probabilité de type exponentiel, soit : $\Pr\{(t_{i+1}-t_i) < t\} = 1-e^{-mt}$, m étant un paramètre constant, d'ailleurs égal à la fréquence moyenne des événements (ou "densité" des points sur l'axe des temps).

Loi de Poisson : dans un processus de Poisson, le nombre d'événements qui ont lieu sur un intervalle de longueur T de l'axe réel des temps t est une variable aléatoire entière X , prenant les valeurs $\{0, 1, \dots, k, \dots, \infty\}$. On appelle Loi de Poisson la loi de probabilité de X . La probabilité pour que X soit égale à k , entier quelconque, est donnée par la formule : $\Pr(X=k) = (1/k!).e^{-mT} .(mT)^k$, où $k!$ désigne la factorielle de k , c'est-à-dire le produit des nombres entiers de 1 à k .

En convoluant les deux lois qui précèdent, on montre par un calcul élémentaire portant sur les fonctions caractéristiques que l'épreuve aléatoire (c/non c) répétée à des instants eux aussi aléatoires aboutit à deux issues indépendantes en probabilité alors qu'elles étaient strictement dépendantes *a priori*, puisqu'on a : $\Pr(c) + \Pr(\text{non } c) = 1$.

Voici un exemple d'interprétation possible de ce résultat, parmi bien d'autres puisque le phénomène est général, existentiel. C'est l'émergence de « l'indépendance » de nos « repères » familiers ponctuant notre milieu de vie, de nos « choses » meublant notre habitat, dispersés ici et là autour de nous, au sein d'un cosmos que la physique décrit pourtant comme continu et continûment interdépendant. Il décrit la structure de notre monde comme la trace de la répétition de notre rapport aléatoire à ce monde. Par exemple, à l'ère du néolithique, la vie sédentaire, donc « confinée » et répétitive, finit par sélectionner et fixer, ici et là, des sites familiers dans le paysage ambiant. En résumé, l'énoncé fondamental de Vendryès, conforté par la mathématique des probabilités, dévoile la réalité éthologico-cognitive de l'existence vivante.

III. Modélisation mathématique de la réserve de régulation

La régulation biologique nécessite une réserve. C'était déjà un apport décisif de la physiologie générale de Claude Bernard. Mais, en transformant la physiologie générale en une physiologie théorique, donc valable aussi pour l'autonomie motrice, et même pour l'autonomie mentale, Pierre Vendryès a dû développer et approfondir ce concept de réserve. Il ne s'agissait plus de stocks quantitatifs, comme le glycogène du foie ou les réserves en graisse, mais du support du cervelet, pour l'autonomie motrice, et de celui du cortex cérébral, pour l'autonomie mentale. Il donnait finalement la définition théorique de la réserve de régulation :

« C'est un ensemble d'objets qui doivent être simultanément présents pour être simultanément offerts. La simultanéité de leur présence est nécessaire pour que de multiples cas puissent être simultanément possibles » [11].

Il exprimait le jumelage des réserves et des régulations, sous une forme déjà proche de la

mathématique, au sens de la théorie mathématique de l'information. « C'est la réserve qui permettra au régulateur R de répondre à la question : *Si ... , alors ...* » (ibid, p.82).

C'est à ce point précis que prend le relais ma propre contribution à la théorie systémique de l'autonomie. L'ingénieur cognitif associe à cette définition abstraite de la réserve, la structure de « mémoire associative ». Il suffit de compléter le connecteur élémentaire SI...ALORS..., par son complémentaire SINON...ALORS, et de situer le couple à une adresse, ou étiquette, ou label L. L'élément de réserve de régulation devient une table de décision élémentaire, isomorphe à la relation aléatoire.

L : SI situation s ALORS action a
 SI situation NON s ALORS action a'

Plus généralement, la représentation mathématique de la réserve de régulation se compose de tables de décision comportementales généralisées :

L : SI situation s_1 ALORS action a_1 (prob. p_{11}), action a_2 (p_{12}), ..., action a_n (p_{1n})
 SI situation s_2 ALORS action a_1 (p_{21}), action a_2 (p_{22}),...
 ...
 SI situation s_i ALORS action a_1 (p_{i1}), ..., action a_j (p_{ij}), ...
 ...
 SI situation s_m ALORS action a_1 (p_{m1}), ..., action a_j (p_{mj}), ..., action a_n (p_{mn})

Les $\{s_i : i = 1 \text{ à } m\}$ sont les situations *possibles*, c'est-à-dire perçues comme gouvernables par le sujet,

Les $\{a_j : j = 1 \text{ à } n\}$ sont des actions prévues en fonction des situations possibles et selon des probabilités variées. Elles peuvent être des branchements à d'autres tables d'adresse L', L'', ..., en particulier si l'organisation d'ensemble est multicouches.

Prenons l'exemple du comportement de nage de la bactérie, en empruntant à un article du biologiste J.-W. Lengeler [1]. C'est un exemple simple, donc facile à exposer complètement, mais néanmoins fondamental, car on peut extrapoler qu'il était déjà celui de l'archéobactérie, aux origines mêmes de l'Evolution universelle.

Si l'on dépose à l'aide d'une pipette un peu de sucre au centre d'une coupelle, la bactérie tend à s'en rapprocher, grâce à une « savante » nage aléatoire. Elle parcourt une ligne brisée en zigzag, les ruptures de direction étant dues à des *culbutes*, qu'elle effectue en inversant le sens de rotation d'une partie de ses flagelles moteurs, comme si un bateau à deux hélices inversait la rotation d'une seule d'entre elles. Malgré son apparence erratique, d'où le terme nage « aléatoire », ou « brownoïde » aurait dit Vendryès, la trajectoire tend à rapprocher la bactérie de la source de sucre. La raison en est que les segments parcourus entre deux culbutes sont plus courts quand elle s'éloigne de la cible et plus longs quand elle s'en rapproche. En réalité, l'autonomie de la bactérie repose uniquement sur sa capacité à moduler la *fréquence* de ses culbutes en fonction de son environnement constaté, fréquence plus grande si la situation devient plus mauvaise, moins concentrée en sucre, plus faible si elle devient plus favorable, plus concentrée en sucre, le résultat de chaque culbute restant à chaque fois aléatoire dans l'espace.

La « perception » par la bactérie de son milieu environnant repose sur des protéines chimiotactiques logées sur sa membrane et qui offrent deux types de sites d'ancrage des

molécules de substrat ambiant, l'un que l'on peut noter s^+ (substrat favorable à la bactérie), l'autre s^- , substrat défavorable, ou moins favorable. La réalité biochimique est un peu complexe et graduée, mais au total on obtient une distinction binaire. Ensuite, le signal perçu (s^+/s^-) est transmis jusqu'au moteur flagellaire grâce à une *cascade de bascules* de réactions biochimiques *bistables*, qui se propage en un temps très bref, de l'ordre de la seconde, à la façon d'un télescopage de « dominos ». C'est l'archétype de ce que sera, chez les organismes évolués, la transmission d'une onde d'ionisation par le nerf. Lengeler écrivait lui-même : « Les systèmes si élaborés de nos cellules nerveuses pourraient donc n'être que le fruit de l'évolution de ces mécanismes bactériens ? Une idée vraiment étonnante ! » Relevons au passage une différence essentielle, c'est qu'il existe chez la bactérie une procédure de réinitialisation. En quelque sorte, les « dominos » se relèvent d'eux-mêmes. Contrairement à la matière inerte, la matière vivante est cyclique.

Finalement, tout se passe comme si la nage de la bactérie obéissait à une table de décision (inconsciente) :

SI substrat s^- ALORS culbute
SI substrat s^+ ALORS non culbute

Cette table de décision est conservée, en quelque sorte *mémorisée* dans l'organisme (localisé en L) selon un ensemble stationnaire de réactions biochimiques bistables, à la façon d'un logiciel en mémoire active d'ordinateur. Le comportement de la bactérie s'y conforme de façon *déterminée*, constante. Ainsi, la modélisation par les tables de décision constitue simplement une façon nouvelle, désormais plus fondamentale, et plus rigoureuse mathématiquement, de réécrire les fameuses « conditions déterminées » chères à Claude Bernard. En paraphrasant Darwin, qui déclarait dans *La Descendance de l'Homme* en 1871, que l'homme descend du singe, on pourrait dire ici que la pensée humaine descend de la cognition bactérienne.

IV. Modélisation mathématique des cycles existentiels

La représentation mathématique des tables de décision comportementale généralisées se transforme assez naturellement en une représentation matricielle. à base de probabilités. Considérons :

$S(t)$ la matrice-ligne $(1,m)$ des probabilités des situations possibles à l'instant t , soit $\{p_i(t) : i = 1 \text{ à } m\}$,

$A(t)$ la matrice-ligne $(1,n)$ des probabilités des décisions d'action à l'instant t , soit $\{q_j(t) : j = 1 \text{ à } n\}$

On appellera *matrice ontique* (m,n) (du grec *ontos* soi, être) la matrice notée O des probabilités des décisions d'actions conditionnées par les situations possibles, soit $\{O_{ij} : i = 1 \text{ à } m, j = 1 \text{ à } n\}$. Ce sont exactement les probabilités p_{ij} apparues plus haut dans la syntaxe des tables de décision.

On a :
$$A(t) = S(t) \cdot O$$

Examinons maintenant l'effet produit par la régulation biologique sur l'environnement. Elle est, nous l'avons vu, une réaction contre-aléatoire au milieu extérieur. Elle entraîne donc, d'une façon ou d'une autre, la modification de ce milieu. Celle-ci n'est pas forcément

matérielle. Un animal menacé par un agresseur peut, soit réagir par une riposte de défense qui pourra aboutir à la destruction de l'un des deux combattants, soit par un comportement de fuite qui ne modifiera que la position mutuelle des acteurs du scénario. Dans tous les cas, on peut représenter mathématiquement l'effet produit sur l'environnement propre du sujet central, par un changement de sa matrice S des situations possibles. Ces changements eux-mêmes sont affectés de probabilités, chacune résumant statistiquement les effets variés du milieu ambiant dans l'environnement propre du sujet.

On appellera *matrice écotique* (n,m) (du grec *oikos* maison, milieu) la matrice notée E des probabilités des situations possibles à l'instant $(t+1)$ conditionnées par les décisions prises à l'instant t , soit $\{E_{ij} : j = 1 \text{ à } n, i = 1 \text{ à } m\}$. Ce sont des données nouvelles de notre modélisation. On a :

$$S(t+1) = A(t).E$$

On en déduit le cycle existentiel :

$$S(t+1) = S(t).[O.E]$$

Le produit $[O.E]$ est une matrice carrée (m,m) , stochastique. Son terme général (i,i') est la probabilité que la situation du système autonome soit i' à l'instant $t+1$, sachant qu'elle était i à l'instant t . Elle définit une chaîne de Markov, dont on rappelle brièvement la description générale.

Rappel sur les chaînes de Markov

Soit $\{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_j, \dots\}$ l'ensemble des états d'un système,
 $P(0)$ la matrice-ligne des probabilités des états à l'instant 0,
 $P(n)$ la matrice-ligne des probabilités des états à l'instant n ,
 M la matrice des probabilités de changement d'état entre deux instants successifs n et $n+1$. Son terme général M_{ij} est la probabilité pour que l'état soit e_j à l'instant $n+1$ sachant qu'il était e_i à l'instant n .

On a $P(1) = P(0).M$, puis $P(2) = P(1).M = P(0).M^2$, ..., $P(n) = P(0).M^n$,
 On s'intéresse à la situation asymptotique pour $n \rightarrow \infty$. Lorsque $P(n)$ admet une limite $P(\infty)$ et que cette limite est indépendante de l'état initial $P(0)$, on dit que *la chaîne est régulière*.

L'étude peut être menée soit par la méthode algébrique, soit par l'étude du *graphe d'incidence*. Dans la méthode algébrique, on analyse la limite de M^n quand n tend vers l'infini, et la discussion dépend du spectre des valeurs propres de M . Dans la méthode du graphe d'incidence, on le décompose selon ses composantes fortement connexes ordonnées entre elles. La c.n.s. pour que la chaîne soit régulière est qu'elle possède une classe finale unique C_1 et que cette classe finale soit *non périodique*, c'est-à-dire que le p.g.c.d. des longueurs de tous ses *circuits* - chemins revenant à leur point de départ - soit égal à 1.

Remarque : la classe finale C_1 d'une chaîne régulière ne se réduit pas en général à un état unique. Dans l'exemple qui a été donné dans le groupe de travail « Approche systémique des systèmes symboliques » en janvier 2008 [5], elle comprend deux états. On considérait deux biens économiques substituables A et B, $C(0)$ la matrice-ligne de leurs probabilités de consommation à l'instant 0, $C(n)$ la matrice-ligne de leurs probabilités de consommation à l'instant n , et M la matrice de leurs probabilités de changement de consommation entre deux années n et $n+1$:

$$M = \begin{matrix} 1/2 & 1/2 \\ 1 & 0 \end{matrix}$$

La chaîne était régulière, avec comme distribution limite $C(\infty) = \{2/3, 1/3\}$. Celle-ci était bien

indépendante de la distribution initiale, puisque l'on avait :

$$M^{\infty} = \begin{pmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 2/3 & 1/3 \end{pmatrix}$$

ce que chacun peut calculer à 1% près au bout de 6 itérations.

D'où $C(\infty) = C(0) \cdot M^{\infty}$ quel que soit $C(0)$, ce qui exprime la stabilité de la distribution finale.

V. Rapprochement avec les postulats de la mécanique quantique

postulats de la m.q. (systèmes inertes)	systèmes autonomes (systèmes animés)
—————	—————
physicien en observation (matrice de l'observable O)	sujet du système vivant (matrice ontique O)
état <i>a priori</i> indéfini du "système" observé (vecteur fonction d'état Ψ)	occurrence de l'environnement (état du monde propre du sujet)
valeurs possibles de la variable observée (valeurs propres de O)	décisions prévues (matrice A)
états possibles du "système" observé (vecteurs propres de O)	situations possibles (matrice S)
Loi d'évolution du « système »	Loi d'évolution des situations possibles
$i\hbar/2\pi \frac{d\Psi}{dt} = H \Psi$ (H opérateur Hamiltonien)	$\Delta S(t) = S(t) \cdot (O \cdot E - I)$ (E matrice écotique, I matrice unité)

VI. Recherche sur le sens de l'évolution universelle

Pierre Vendryès a retenu trois niveaux croissants d'autonomisation du système vivant :
L'autonomie métabolique, l'autonomie motrice, et l'autonomie mentale. Elles sont reliées par
une structure d'ordre ascendant qui se manifeste de trois façons :

1. Elles correspondent à trois *stades* historiques de l'Evolution.

Chacune d'elle s'est développée à une certaine époque de l'histoire de la Vie et
n'apparaissait pas auparavant, du moins pas de façon visible.

2. Elles sont emboîtées en trois *strates* imbriquées, chacune d'elles utilisant celles qui l'ont précédée après les avoir incorporées, invaginées.

Ainsi, l'autonomie motrice exploite l'autonomie métabolique. Le foie régénère du glucose à partir des déchets rejetés dans le sang par les muscles. De même, l'autonomie mentale utilise l'autonomie motrice [8, p.58], et d'une façon visible, puisque c'est l'acquisition par l'homme (*homo erectus*) de la maîtrise parfaite de la station droite (ou "station debout"), véritable apothéose de l'autonomie motrice, qui libère l'expansion du crâne où logera la réserve intérieure de l'autonomie mentale [2]. Et c'est la même station droite qui rend possible le développement de la main, puis du larynx, qui tous deux élargiront, dans une proportion inouïe, la variété des gestes techniques et des échanges sociaux, sur lesquels va se broder au fil des millénaires l'acquisition de la réserve mentale de l'homme.

3. Enfin, chacune des autonomies conforte celles qui l'ont précédée et qu'elle tient emboîtées dans la hiérarchie systémique. Ainsi, la cellule nerveuse est plus stable, donc plus autonome que les cellules des stades inférieurs. De même, l'individu humain est plus autonome dans une entreprise collective stable et ordonnée, donc autonome, que dans une entreprise instable et sans loi, telle qu'une bande de voyous. C'est d'ailleurs une propriété générale des systèmes autonomes emboîtés. Le milieu extérieur de l'emboîté est dans le milieu intérieur de l'emboîtant. L'emboîté bénéficie donc de la régulation de l'emboîtant. Elle atténue les fluctuations de son milieu extérieur.

Bien entendu, ces trois niveaux principaux découverts par Pierre Vendryès ne sont que des jalons dans la voie d'une recherche plus approfondie sur le sens de l'évolution universelle vers l'autonomie. Je propose pour ma part de compléter le niveau 3 de Vendryès, basé sur la réserve cérébrale individuelle, et donc commun aux vertébrés supérieurs en général, par un niveau 4, réservé en propre à l'être humain très humain possible. Celui-ci est basé sur les foyers domestiques, premiers supports de cette réserve de régulation d'un type nouveau qu'est la culture, c'est-à-dire le langage, la technique, l'art, etc.

Naissance de l'être humain

L'autonomie motrice avait apporté à la « fixité du milieu intérieur », chère à Claude Bernard, une contribution majeure, celle de la maîtrise parfaite de la station debout, caractéristique de *l'homo erectus*, apparue à l'ère du Pléistocène moyen, il y a environ 700 millénaires. Elle libérait la croissance de son cerveau et donc l'éventail de ses situations « possibles », c'est-à-dire reconnues par lui comme gouvernables. L'homme a conservé l'empreinte indélébile de cet acquis décisif. Aujourd'hui encore, la station droite est restée un mythe et conserve une valeur de prestige. Se tenir droit dans la vie... Rester debout devant l'adversité... Autant de formules symboliques grâce auxquelles, à chaque occurrence de leur énonciation, il commémore une des dates les plus marquantes de la longue épopée universelle vers la permanence bien installée du milieu intérieur, la stabilité intérieure.

Cet achèvement triomphal de l'autonomie motrice coïncidait presque aussitôt avec la naissance prodigieuse d'un être nouveau, l'être humain très humain possible, et cela grâce à la conquête du feu.

Les premières traces de foyers sont associées à des restes de *l'homo erectus* : Homme de Java du niveau de Trinil, Homme de Chou-kou-tien près de Pékin, Grotte de l'Escale près d'Aix-en-Provence. Ces différents vestiges sont datés de 700.000 à 600.000 ans. Un peu plus tard, vers 400.000 à 300.000 ans, de nombreux sites de foyers aménagés sont maintenant bien connus et révèlent une maîtrise déjà usuelle de la technique du feu

domestique, à Torre in Pietra en Italie, Verteszöllös en Hongrie, Terra Amata à Nice, ou encore Azych au territoire du Haut-Karabakh en Azerbaïdjan.

La maîtrise du feu décuple la diversité des activités possibles, grâce à la vie au foyer par tous les temps, et la nuit comme le jour. L'habitat devient un milieu intérieur stable. Il en résulte une grande diversification des outils, et probablement des aliments, que l'on sait mieux conserver. La main devient plus adroite et l'esprit plus affûté. L'autonomisation du système vivant vient de franchir un pas de géant.

C'est au sein des foyers domestiques que le larynx est rendu plus libre par le développement du crâne, et se développe pour rendre les propos des veillées enfumées plus variés, plus spirituels. Les travaux du Laboratoire de Phonétique d'Aix-en-Provence montrent que l'homme de cette époque devait déjà prononcer toutes les voyelles et consonnes actuelles. Preuve que l'on commençait à jaser, le soir, au coin du feu, tandis qu'au dehors de la cabane grossière, le vent glacial mugissait dans la steppe. Arrivée au niveau 4, l'autonomie du vivant est devenue d'un type nouveau, culturel.

En vérité, la grande nouveauté de cet être nouveau est qu'il est, d'emblée, à la fois d'horizon cosmique et d'esprit religieux.

Un être d'horizon cosmique

L'être autonome nouveau est d'emblée à vocation cosmique, spatiale : la capture du feu du ciel est la première relation aléatoire (relation d'autonomisation) entre un organisme terrestre et le cosmos. Elle remonte donc à la période que nous étudions, à la naissance de l'être humain véritable, il y a quatre cents millénaires. Pour la première fois dans l'évolution universelle, un système autonome établit une relation aléatoire avec « le Ciel », et ne subira plus jamais, ou plus de façon systématique, son déterminisme imparable.

Un être d'esprit religieux

L'être autonome nouveau est d'emblée d'esprit religieux. Imaginons en toute logique la scène fondatrice. Un primate (humanoïde) s'enhardit jusqu'à s'approcher de l'arbre incendié par la foudre, saisir quelque brandon enflammé et courir le porter dans un abri voisin. Quel fantastique événement ! Quelle angoisse et quelle stupeur pour le troupeau resté blotti dans son trou, terrorisé comme d'habitude et comme tous les animaux par la toute-puissance infinie du Ciel ! Imaginons le héros, porteur de la torche céleste, encore bouleversé par sa témérité inouïe et par la grâce du ciel, officiant dans la caverne au milieu d'une sainte admiration collective. La scène ressemblait déjà comme une sœur à une nuit pascale au monastère de Zagorsk.

L'événement fondateur a pu se répéter des milliers de fois dans mille endroits différents durant des années, mais toujours avec la même émotion sacrée. Il faut s'être trouvé surpris par l'orage en rase campagne pour bien connaître la terreur de la foudre. Les Gaulois, pourtant valeureux guerriers, tremblaient devant "le Ciel qui tombe sur la tête".

C'est ainsi qu'est né le dieu le plus ancien, appelons le déjà Prométhée, en anticipant sur la divinité primitive ancestrale (préolympienne) ainsi nommée par Hésiode. Le sacrement du feu du Ciel traverse les millénaires puisqu'on en trouve la trace dans la plupart des religions anciennes. La science de la nature, telle que nous la connaissons aujourd'hui, plonge ses racines les plus profondes dans les cosmogonies préhistoriques. Transmis par les religions

primitives sous forme de figures divines, les êtres cosmiques, images des premières relations aléatoires entre l'homme et l'univers, se sont progressivement dépouillés de leur fascination magique et terrifiante pour devenir d'abord des cultes, cérémonies de régénération des dieux anciens, puis, au fur et à mesure de la sécurisation de la condition humaine, des concepts rationnels facilitant la compréhension de la nature.

Au moment du passage de la figuration sacrée à la rationalité abstraite, de la religion à la science (science présocratique en Grèce, "cent écoles" en Chine, Upanishads en Inde), le feu constitue d'emblée un élément fondamental de la nature (Héraclite) et deviendra dans la physique moderne, le concept d'énergie (c'est-à-dire la substance unique).

Les sous-niveaux du niveau 4

Le système autonome nouveau est d'emblée culturel, spirituel. Les différents *stades* historiques de son évolution autonomisante, mémorisés dans chaque être humain en *sous-strates* imbriquées et coopérantes, se définiront donc maintenant en termes de savoir-faire (avec la nature), de savoir-vivre-ensemble (en société). Ce serait l'objet de développements qui sortiraient du présent exposé, et qui traiteraient de la modélisation mathématique de l'acquisition cognitive et de la gouvernance répartie (cf. [4], [5], [7]). Nous distinguerions le stade du signe oral (l'homme de la parole), celui du signe linguistique (l'homme des lettres), celui du signe écrit (l'homme des comptes), celui du signe monétaire (l'homme des marchés), enfin celui du signe digital, ou « numérique » comme on dit aujourd'hui (l'homme des écrans).

Loi de Haeckel, ou loi biogénétique

L'ontogenèse est une récapitulation abrégée de la phylogenèse. Cette loi semble vérifiée dans 60% des cas selon les spécialistes, ce qui, compte tenu de la complexité du vivant, est déjà un pourcentage significatif. La même loi s'applique non seulement à l'embryogenèse, genèse des organes, mais aussi à l'éthogenèse, genèse des comportements. L'enfant développe d'abord son autonomie métabolique (dès le stade fœtal), puis son autonomie motrice (maîtrise des gestes, station debout), puis son autonomie mentale (à la maison, à l'école, etc.), puis son autonomie sociale-planétaire (en société, par ses lectures, la télévision, etc.).

Références

- [1] Lengeler J.-W. : « La nage des bactéries », *La Recherche* N°217, Paris, janvier 1990
- [2] Leroi-Gourhan A. : *Mécanique vivante*, Ed. Fayard, 1983
- [3] Lorigny J. : *Les systèmes autonomes, relation aléatoire et sciences de l'esprit*, Coll. AFCET- Systèmes, Préface Bernard Paulré, Ed. Dunod, Paris, 1992, traduit en portugais *Os Sistemas Autonomos, relação aleatoria e ciência da mente*, Ed. Instituto Piaget, Lisbonne, 1996
- [4] Lorigny J. : *Méta-Physique de l'Autodétermination, Arbre Quid et Science de l'Intelligence*, préface de Robert Vallée, Ed. L'Interdisciplinaire, Lyon-Limonest, 1996
- [5] Lorigny J : « L'architecture des systèmes symboliques », in site www.afscet.asso.fr,

- Groupe de travail « Approche systémique des systèmes symboliques », janvier 2008
- [6] Lorigny J., Vallée R., Maugé G. : « Pierre Vendryès, la vie d'un chercheur remarquable, une œuvre majeure pour la science systémique de l'autonomie humaine, in *The Systems Science European Union Congress Proceedings, Human Autonomy and Systemics Workshop, Lisboa, Portugal, 2008*, in site
www.afscet.asso.fr/resSystemica/Lisboa08/vendryesWS1.pdf
- [7] Lorigny J. : « La théorie systémique de l'autonomie humaine, une refondation de la science naturelle de la vie et de l'esprit ? », in *The Systems Science European Union Congress Proceedings, Human Autonomy and Systemics Workshop, Lisboa, Portugal, 2008*, in site
www.afscet.asso.fr/resSystemica/Lisboa08/lorignyWS1.pdf
- [8] Piaget J. : *Biologie et Connaissance. Essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*, Ed. Gallimard, Paris, 1967, Ed. Delachaux et Nestlé, Lausanne, 1992
- [9] Rosenblueth A., Wiener N., Bigelow J. : « Behavior, Purpose and Teleology », *Philosophy of Science*, tome X, pp. 11-24, 1943
- [10] Vendryès P. : *Vie et Probabilité*, Préface de Louis de Broglie, Ed. Albin Michel, Paris, 1942
- [11] Vendryès P. : *Vers la théorie de l'homme*, Préface de Jean Fourastié et Introduction de Raoul Kourilsky, Ed. P.U.F., Paris, 1973
- [12] Vendryès P. : *L'autonomie du vivant*, Ed. Maloine s.a., Paris, 1981