



Journées de Rochebrune 95

Haute-Savoie

Evolution et Organisation

Hasard et Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives

Texte des contributions

organisation :

Guy Theraulaz

Jean-louis Dessalles

Thierry Fuhs

John Stewart

comité de programme :

Eric Bonabeau (CNET Lannion)

Paul Bourguin (CEMAGREF Antony)

Raymond Campan (CNRS Toulouse)

Claude Delaye (LAFORIA Paris)

Jean-louis Dessalles (TELECOM-Paris)

Jean-jacques Ducret (Univ. Genève)

Wolf Eberwein (WZB-FIB Berlin)

Thierry Fuhs (INSEE Paris)

Jacques Gervet (CNRS Toulouse)

Charles Lenay (UTC Compiègne)

John Stewart (UTC Compiègne)

Guy Theraulaz (CNRS Toulouse)

Bernard Victorri (CNRS Caen)

Yves-Marie Visetti (CNRS Paris)

Avec le soutien d'ECAL et de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

Sous le patronage du Comité Technique Vie Artificielle - AFCET

ENST 95-S-001

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

46 rue Barrault - 75634 Paris Cedex 13



Journées de Rochebrune 95

Evolution et Organisation

Hasard et Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives

Ces quatrièmes journées de Rochebrune ont réuni, du 20 au 24 mars 1995, des chercheurs de disciplines très diverses (biologie, sociologie, Intelligence Artificielle, Sciences physiques, etc.) tous concernés par le même problème qu'il jugent fondamental : quelle est la part respective du hasard et de la nécessité dans la genèse des organisations que nous pouvons voir fonctionner ? Peut-on trouver des lois universelles qui limitent l'ensemble des formes organisées qu'une collectivité peut prendre, ou doit-on se contenter d'expliquer chaque type d'organisation par son histoire évolutive ?

Peut-être peut-on considérer *organisation* et *évolution* comme deux aspects d'une seule et même dynamique. Prenons un exemple de la Biologie (on pourrait tout aussi bien imaginer un exemple analogue dans le domaine des Sciences Sociales ou de la Vie Artificielle) :

1. On peut tenter d'expliquer un comportement animal collectif par des procédures néodarwiniennes élémentaires : variation génotypique et sélection des phénotypes par reproduction différentielle. Le comportement apparaît alors un peu comme le fruit du *hasard* : il résulte d'une accumulation historique de variations aléatoires ayant conféré localement un avantage reproductif à leurs porteurs.
2. A l'inverse, ce même comportement de la société animale pourrait être considéré comme le fait objectif d'un environnement qui impose des biais évolutifs universels à toutes les espèces qu'il abrite. Dans ce cas, il apparaît comme le résultat nécessaire de *contraintes* externes.

Dans de nombreux cas, aucune de ces explications n'est correcte. Par exemple, la prise en compte des seuls processus évolutifs ou historiques ne permet pas de comprendre le phénomène de convergence : comment des organisations fortement ressemblantes pourraient-elles apparaître indépendamment ? Inversement, les seules contraintes de l'environnement (bidimensionnalité, climat, etc.) ne sauraient suffire à déterminer, même indirectement, l'infinie diversité des formes collectives que l'on peut observer.

En revanche, si l'on se place dans une perspective *dynamique*, on peut parfois comprendre comment, à une époque donnée, l'organisation existante contribue au contexte dans lequel une nouvelle organisation va apparaître. L'ensemble des contraintes environnementales et des contraintes créées par la forme collective elle-même détermine fortement la forme collective de l'époque suivante, laissant moins de place aux « accidents » historiques.

Une telle façon d'aborder le problème se situe dans la continuité des travaux précurseurs de D'Arcy Thompson, Waddington, Turing, Thom, ou plus récemment ceux de Stuart Kauffman. Il s'agit d'examiner si des modèles généraux (par ex. ceux de la théorie des systèmes dynamiques complexes) peuvent fournir un cadre naturel pour comprendre le déterminisme qui limite le caractère arbitraire de formes collectives comme les organismes, les sociétés naturelles ou artificielles, les comportements collectifs, etc.

Les Journées de Rochebrune 1995 ont eu comme objectif de spécifier, illustrer, critiquer le schéma problématique exposé ci-dessus, sans restriction de champ disciplinaire (Biologie, Ethologie, Sciences Cognitives, Sociales ou Physiques) et dans ses divers aspects scientifiques (observation, théories, modèles, épistémologie). Les questions abordées sont plus précisément :

- a. quelle est l'importance du couplage dynamique évolution—organisation dans les modèles de génèse de formes collectives ;*
- b. existe-t-il des lois générales qui s'appliquent dans des champs disciplinaires différents ;*
- c. peut-t-on espérer construire des modèles d'évolution « pluralistes » au sens des diagrammes de phase de la physique, où l'on obtient, en faisant varier des paramètres, un répertoire d'options disponibles pour un faisceau de trajectoires évolutives.*

Sommaire

Hughes Bersini

Locality and oddity in the connectivity of biological networks 9

J. Biondi, O. Michel

Evolution de structures neuronales. Application a un robot
mobile autonome 23

François Bourdon

L'identité relationnelle, une composante évolutionniste
essentielle pour la genèse des formes collectives 29

Renaud Cazoulat, Frédéric Petit-Singeot

Théorie des jeux et réseaux de neurones 37

Collectif S.M.I.

L'adéquation fonctionnelle comme limite des systèmes auto-
organiseurs 57

Pierre Corradini

Hasard et contrainte dans la genèse de l'architecture et de la
forme des colonies de *Polytrics* 69

R. Cozien, J. Tisseau, P. Alas, F. Harrouet

Simulation multi-agents flous d'une colonie d'insectes 87

Eric Dedieu

Le rôle de la conception, du développement et de
l'apprentissage pour la robotique autonome 91

Geoffroy De Schutter

Collective intelligence in birds : first evidences from gull
roosts 101

Jean-Louis Dessalles

Contraintes sur l'évolution naturelle de la communication 113

Wolf-Dieter Eberwein, Pierre Saurel

La genèse d'un mouvement révolutionnaire. La R.D.A. en
1989 119

Charles Lenay

Origines et définitions du hasard en biologie 127

<i>Dominique Snyers, Pascale Kuntz, Paul Bourguine</i> Emergence de modèles de représentations sensori-motrices et coviabilité : l'exemple d'un jeu d'imitation	143
<i>John Stewart</i> La mémoire de l'espèce en biologie	153
<i>Guy Theraulaz, Eric Bonabeau</i> Essaims sur réseau et modélisation des processus de construction collective chez les insectes sociaux	165
<i>Claude Touzet</i> Khepera: un outil pour l'étude du hasard et des contraintes dans la genèse des formes collectives	179
<i>Elpida Tzafestas</i> Variation et auto-organisation a l'intérieur du robot : le cas d'un modèle de fréquences propres	181

LOCALITY AND ODDITY IN THE CONNECTIVITY OF BIOLOGICAL NETWORKS

Hugues Bersini
IRIDIA- CP 194/6
Universite Libre de Bruxelles
50, av. Franklin Roosevelt - 1050 Bruxelles
Belgique

email: bersini@ulb.ac.be

phone: (322)-650-27-33 fax: (322)-650-27-15

Abstract

Researches in Alife often call upon computer simulations of biological network to understand and mimic the natural dynamics exhibited by the units of these networks in reality. Among the most famous networks are: ecosystems, Hopfield nets, Boolean nets, networks of oscillators, coupled map lattice and immune networks. Despite different mathematical characterization, two salient structural aspects of these networks: the degree of connectivity and the presence of odd loops, seem to influence the dynamical regimes of all these networks in a same way. Odd loops or frustrated connectivity is responsible for de-stabilizing the network and provoking "wavering" among equivalent configurations. Below a certain threshold, local connectivity reinforces homeostasis, enlarges diversity and generates richer collective computations. All along the paper a qualitative and shallow overview of these biological networks modeling will be undertaken in an attempt to spot similar form of dynamical sensitivity to these two structural aspects.

Keywords: Biological networks, Boolean network, Hopfield network, ecological network, immune network, coupled map lattice, local connectivity, frustration, oscillations, chaos, homeostasis.

1. INTRODUCTION

If anything new ALife serves as a regular and convenient forum for researchers interested in theoretical biology and in the functionalist nature of life to exchange their views and to realize how similar some of their models appear to be. One very popular structure appearing in a large part of ALife developments is a network of units indexed by i , varying with time $a_i(t)$, and interconnected by means of a connectivity or affinity matrix m_{ij} where m_{ij} indicates the strength of the connection between units i and j . In general the evolution in time of this network is given by means of a system of differential equations: $da_i/dt = F(m_{ij}, a_j)$ or, in a discrete form: $a_i(t+1) = F(m_{ij}, a_j(t))$, where F captures how the units interact among themselves. This interaction can take very different mathematical forms, from the simplest: a linear sum $\sum_j m_{ij} a_j$ to more complicated non-linear forms including multiplicative, quadratic, polynomial or sinusoidal type of relationship. Among the most famous instances of these biological networks one can find:

- Ecological Networks: They have been first discussed by Gardner and Ashby [11] and then by May [21] in their linear version, but they have also been the object of deep investigations in their non-linear version like in the Lotka-Volterra type of networks [26]. m_{ij} describes the effect of the j -th species upon the i -th one.

- Boolean networks: Thomas [25] and Kauffman [17] have basically conceived them in a qualitative way: with relation among the units of a logical type, binary interaction: i is yes or not connected to j ($m_{ij} = [0,1]$), and binary state: the units are yes or not active. Regulatory genetic network is the type of biological reality that these models aim at better grasping in this simple and qualitative way.

- Hopfield Neural Networks [14] [1]: They are well known for their brain-like architecture and brain-like synaptic learning mechanism. But they also interest cognitive scientists by their capability to reproduce content-addressable or associative type of memory. m_{ij} is the weight of the synapse connecting neuron i and j and it is subject to Hebbian learning.

- Coupled map lattice [15] [16]: When Kaneko first introduced this structure the main motivation was the study of spatiotemporal chaos. The units, showing intrinsic chaotic activity, are situated on a lattice and interact with a suitably chosen set of other units. m_{ij} is here again binary depending on whether unit j is part or not of unit i spatial neighborhood. These models can be of interest for the modeling of neural activities and ecosystems. The spatial aspect, besides making possible the determination of the agents which mutually interact, allows (in the 2 dimensional case) a visualization essential at a better characterization of the dynamic collective (or emergent) phenomena like the spontaneous formation of clusters.

- Network of oscillators [33] [28]: Limit-cycle oscillators can also be interconnected in a network structure where m_{ij} just indicates the coupling strength. Their most remarkable feature is that, for important coupling strength, they exhibit macroscopic mutual entrainment which reminds a variety of rhythmic behaviour observed in biological clocks, in many physiological organisms and in the synchronization of insects collective behaviour.

- Immune idiotypic network [3] [5] [8] [9] [23] [27] [31] [32]: In this network a unit (a clone in immunological terms) is representative of two different immune actors: the antibody f_i and its associate producer the B lymphocyte b_i . Antibody-antibody and

antibody-B lymphocyte interactions are determined by the matrix m_{ij} which is symmetric. An entry m_{ij} is called the affinity between immune clones i and j .

When simulating such biological networks a lot of similar features have already been detected as for instance the behavioural sensitivity of any unit with respect to the way the network is updated at each time step: synchronously or asynchronously [4] [19]. Intuitively the structural aspects of a network should also be responsible of common behavioural characteristics whatever particular network under study. Since one mission of ALife is to detect similar functionalities in distinct branches of theoretical biology, pointing out the common structural/behavioral characteristics among some of the networks briefly presented above is a necessary endeavor. Is it possible to point out similar structural influences in these biological networks despite their different mathematical natures? This paper is a preliminary attempt in that direction. As a rule any network presents, among other structural properties, two salient ones: first the degree of interconnectivity i.e. the average number of units with which one unit taken randomly interact (the quantity of non-null entries in the connectivity matrix), secondly the presence and the nature of feedback loops in the network.

Regarding the degree of connectivity, a local type of connectivity (as opposed to a global one) is representative of networks where units are poorly connected, interacting with few others. For instance, the brain is well known for presenting weak interconnectivity: more or less several thousand synapses per neuron. In ecosystems, species do not interact with all others and restrict their interaction to a very small subset. Immune cells are very specific and this specificity causes the cells to exhibit again very restrictive affinity with other cells. In the majority of network computer simulations, this weaker interactivity is the cause of more stable, robust, diverse and interesting collective phenomena. For instance in Kauffman's Boolean networks, this local interactivity entails the formation of active clusters which exhibit their oscillatory dynamics together but in different parts of the network. These cluster behaviours are uncoupled and separated by "neutralizing" zones which limit their mutual influence. The behaviour of the network taken as a whole presents then a sufficient diversity obtained by multiplying all local diversities and a greater stability or robustness due to the limited propagation of perturbation.

Three common features are observed in all networks: 1) there is always a threshold in the degree of connectivity which marks a sharp transition into the dynamics of the network, and this threshold is always characterized by a strong locality or weak interconnectivity 2) with the locality/globality issue the stability of the network is always at stake 3) a local type of connectivity seems to computationally enrich the collective dynamics of the network. In addition complex regimes residing at a phase transition and giving rise to critical phenomena are generally obtained by both keeping the connectivity local and slowly tuning an additional parameter to its critical value. Section three will discuss how and why local or weak degree or interconnectivity allows the more interesting collective dynamical behaviour to be observed in biological networks, and section four will show that this is true to the extent that even some of these networks like ecosystems and immune systems are able to self-select in an autonomous way this weak interconnectivity.

Now suppose a network of interconnected Boolean units and that this network is further constrained such that two units being connected means that unit 1 in one state can only co-exist with unit 2 in the anti-state. A two unit networks can only settle in two possible configurations. Then take a three unit network and connect these units in an open chain fashion: unit 1 is connected only to unit 2 which in turn is connected only to unit 3. Here again two configurations are possible with the 1-2 couple as well as the 2-3 couple containing each two units settled in reverse states. Each couple per se complies with the local effect of the connection: the state/anti-state pairing. The problem gains interest by closing the chain, then getting a odd loop, connecting unit 3 back to unit 1 (see fig.1) . We now have three couples which must each independently complies with the

imposed constraint: the state/anti-state pairing. As a matter of fact no global configuration turns out to be possible: the couples mutually compete for reaching their state/anti-state configuration. In the modeling of spin glasses, this well-known phenomenon designated by the term frustration [30] is responsible for preventing spin glasses from relaxing to their minimal energy level, but equally for enlarging the set of intermediary solutions among which the network can choose to settle.

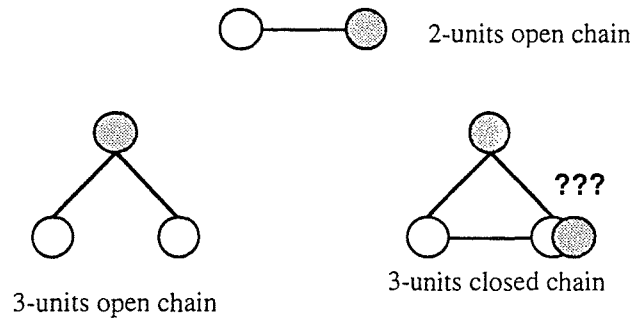


Fig.1: The frustration phenomenon

In fact a frustrated network generates two types of phenomenon: first an enlargement of the repertoire of possible equilibrium configurations and then, in some further cases, the network wanders around all these possible configurations without stopping in one of them. The next section will show how in some of these networks, odd feedback loops are indeed responsible for bringing forth instability. More precisely the frustrated network dynamical regime always increments its degree of complexity with respect to the non-frustrated one: from monostability to bistability, from fixed point to oscillations and from oscillations to chaos. So here again the presence of frustration can be a precious addition in any biological network because it increases the diversity of stationary regimes to be self-selected by the network, and offers this same network the possibility to present a large repertoire of potential responses to external interactions.

2. ODDITY IN BIOLOGICAL NETWORKS: A SOURCE OF DIVERSITY AND INSTABILITY

2.1 Thomas' asynchronous biological networks [29]

Let's take the simplest case of a network containing three units connected in a loop: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ and turn all connections to be negative i.e. 1 inhibits 2 which inhibits 3 which in turn inhibits 1. One unit inhibits another one when it forces it to settle in the reverse state. It is easy to see that when updating its units in an asynchronous way such a network will eventually oscillate while the presence of an even number of negative interactions would force the network to relax in a stable configuration among others. This is the simplest case of a frustrated network. Thomas has shown how the presence of loop in a network, provided it contains an odd number of inhibitory connections, is responsible for triggering oscillations. The network passes through all the possible configurations in a sequential way and cannot stop in any of them. This is a first illustration of the unstability, from fixed point to oscillations, coming from frustrating a network.

2.2 Classical Hopfield networks [14] [1]

In its original definition, Hopfield network dynamics relaxes to fixed points. They are minima of an energy function which decreases as the network evolves in time. The

energy function is given by: $E = \sum_j m_{ij} a_i a_j$. Frustration was first discovered and discussed by Toulouse [30] in the context of spin glasses in which unit settles in one of the two states so as to decrease the energy function. Spin glasses and Hopfield networks share the same energy function and consequently some authors [1] [25] have tried to rely on statistical physics results obtained in the field of spin glasses to better characterize the capacities of Hopfield network. In a frustrated network there is no spin configuration which collectively minimizes the energy of all bounds. All couples of units are unable to simultaneously settle in the state/anti-state pairing so as to globally minimize the quadratic energy function. Frustration raises the minimum energy and increases the degeneracy of the ground state. According to Amit [1] and Sherrington [25], both physicist and expert in the physics of spin glasses, for a Hopfield network to store many patterns it is essential that there be many available fixed points namely an energy function with a lot of equivalent minima, a situation typically arising in frustrated networks. This claim is somewhat disputable since the value of the synaptic weights in a Hopfield network is obtained by means of an Hebbian learning which depends, in the first place, on the nature of the patterns to encode in the network.

What is well known is that the more uncorrelated the patterns to encode are the more of them will actually finish as fixed point of the network. Therefore in order to make such a claim on the benefic effect of frustration as a possible way to enlarge the size of the memory, it is necessary to show that the encoding or learning of uncorrelated patterns is likely to increase the probability of frustration in the network. So far such a connection between the nature, correlated or not, of the patterns to encode and the presence of frustrations has not been clearly established.

2.3 Hopfield networks presenting delays

More interesting for understanding the effect of frustration is the study of the same Hopfield network but now in presence of delays. The new network dynamics, in its continuous version, is given by:

$$\frac{da_i}{dt} = \frac{-a_i}{\tau_i} + \sum_j m_{ij} f_j(a_j(t - \tau_{ij})) + I_i \quad (1)$$

f_j has the classical sigmoid profile

Hirsch [13], Atiya and Baldi [2] and Marcus et al. [20] have shown that in presence of odd inhibitory loops, the Hopfield network will oscillate. Only three synaptic weights: m_{12} , m_{23} and m_{31} must be different from zero for getting frustration. The connection matrix turns out to be asymmetric and there is no longer stability proof. Besides with the presence of delays in the network, we are not so far from the Thomas' asynchrony Boolean networks since delays introduce a form of asynchrony in the updating of the units. So not surprisingly the same periodic regime as in the Boolean networks is found again. Atiya and Baldi have studied in depth the behaviour of Hopfield network structured as a ring containing an odd number of inhibitory connections and in presence of delays. One motivation for forcing oscillations in Hopfield network relates to the recent interest for oscillations in the brain, which not only appear to be a neurophysiological reality, but additionally are able by synchronization to reflect significant relationship or binding between different segments of the global information encoded in different parts of the network.

In discrete Hopfield network, it is not necessary to introduce delays to obtain periodic behaviour. Just relaxing the synaptic symmetry assumption is fair enough (we will discuss again the behaviour of asymmetric discrete Hopfield network in Section 3.3). A symmetric network can't be frustrated since the number of inhibitory connections will be even by definition. In contrast, in asymmetric networks, loops containing an odd

number of inhibitory connections are very likely, and an oscillation generated somewhere in the network easily propagates and invades the full network. As a consequence, when varying randomly the asymmetric connectivity matrix, oscillations turn out to be much more probable than fixed points.

2.4 Network of oscillators

In general networks of oscillators evolve in time according to the following system of differential equations:

$$\frac{da_i}{dt} = \Omega_i + (2\pi)^{-1} \sum_j m_{ij} \sin 2\pi(a_j - a_i + \alpha_{ij}) \quad (2)$$

In presence of a pair of interconnected oscillators a_1 and a_2 the phase difference will asymptotically tends to $(\alpha_{21} - \alpha_{12})$. Now, as Daido [7] and Omata et al. [22] have investigated, suppose three interconnected oscillators, every pair of which has a similar coupling as above. It is easy to see that the phase difference produced by the coupling cannot come true for all the pairs, leading to a competition among interactions, or frustration. Omata et al. have shown that in the three oscillators case, frustration causes an increase of a number of steady state periodic regimes. So like for spin glasses, frustrated networks of oscillators see their number of steady state regimes multiplied due to the competition among each pair of oscillators. Daido has carried on such study by enlarging the number of coupled oscillators in the network, still in presence of frustration, and has explored new type of emergent ordered network behavior.

2.5 Immune idiotypic networks

As discussed before the responsibility of odd loops for bringing forth instability in networks with desired homeostatic properties, like Boolean, Hopfield net and even version of immune network with fixed point dynamics [12], has already been the object of numerous studies. So far this instability has been restricted to the appearance of oscillation (which in fact is just another type of stable regime). However what happens when the system to be frustrated presents no longer fixed points but a basic periodic dynamics? Carrying on with the generic network of Boolean units presented in the introduction, imagine that the normal dynamics of a couple of units is indeed oscillatory with the first unit oscillating in counterphase with the second one. Here again there is no difficulty to anticipate the global behaviour of a network composed of three units interconnected in an open chain. Unit 1 and unit 3 will oscillate together in counterphase with unit 2. No competition occurs since unit 2 is the only one to be connected twice.

Now frustrated the system just as before and close the chain by connecting back unit 3 to unit 1. What is the resulting dynamics? The very regular oscillations observed in the open chain situation are substituted by a chaotic regime. Competition now makes an appearance among the three pairs. The network behaves as if aiming to match the open chain situation but with the two units association characterizing the regular behavior of the open chain continuously changing in a seemingly random way the units it is composed of. The system of differential equations showing this frustration induced chaos phenomenon was originally meant to study the dynamics of one particular immune idiotypic network first proposed by Varela and Coutinho [32], Stewart and Varela [27] but also investigated in [8] [9] [23]. The integral impact of the whole network on a

specific clone i is measured by a value σ_i which is called the field: $\sigma_i = \sum_{j=1}^{j=n} m_{ij} f_j$

$$\frac{df_i}{dt} = -k_1 \sigma_i f_i - k_2 f_i + k_3 \text{mat}(\sigma_i) b_i \quad (3)$$

$$\frac{db_i}{dt} = -k_4 b_i + k_5 \text{prol}(\sigma_i) b_i + k_6 \quad (4)$$

f_i and b_i are respectively concentration of antibodies and their producers, the B lymphocytes. The connectivity matrix (called affinity matrix in this particular context, for the biological motivations underlying this system of equations see [31] [32]) is symmetric and prol and mat are lognormal functions. Like for the frustrated Hopfield network, but we now are in presence of 6 equations, the frustrated immune network is obtained with $m_{12}=m_{23}=m_{31}=1$.

The main characteristic of this chaotic regime is the perfect equivalence among the three clones and their concentration. They are perfectly interchangeable due to the homogeneity of the network structure and the odd loop connectivity. No other system displaying chaotic behaviour shows this variable homogeneity, and in [3] it is explained why this property is the key reason behind the original chaotic dynamics shown by the network. Furthermore in [5] it is shown how, when coupled to an auto-antigen, the chaotic attractor degenerates into one of the three periodic regimes and how the network realizes then a form of tolerant response to this auto-antigen. The presence of the auto-antigen stops the frustration by making the concentration of the clone with which it presents affinity to vanish. This is a very simple illustration of a particular idiotypic network showing tolerance towards auto-antigen without the need for ad hoc mechanisms that prevent an immune response.

3. LOCALITY IN BIOLOGICAL NETWORKS AND ITS INFLUENCE ON STABILITY, COMPLEXITY AND DIVERSITY

3.1 Linear Ecosystems

20 years ago, Gardner and Ashby [11] followed by May [21], all three interested in the behaviour and the stability of large ecosystems, have accomplished a seminal preliminary investigation simply by analyzing the stability conditions of a linear network:

$$\frac{da_i}{dt} = \sum_j m_{ij} a_j \quad (5)$$

In general the stability of all systems of differential equation can be studied by restricting this study to the behaviour of the linearized system at an equilibrium point. This appears as a further motivation for studying the effect of the connectivity structure on the dynamics of the linear network. The three authors reached the same non obvious conclusion that large networks with randomly fixed connection matrix are stable up to a certain degree of connectivity. Beyond this degree there is a sharp transition and divergent dynamics characterize the network behaviour. In brief, local networks i.e. when the degree of connectivity (for a given interconnectivity strength) is below a well-defined threshold are stable while global ones are unstable. In his paper, May makes the following claim "Applied in an ecological context, this ensemble of very general mathematical models of multi-species communities, in which the population of each species would by itself be stable ($m_{ii} = -1$ in his modeling), displays the property that too rich a web connectance or too large an average interaction strength leads to instability. The larger the number of species, the more pronounced the effect".

3.2 Classical Hopfield networks

In general when Hopfield networks are used as associative memory, the network is fully connected and the synaptic weights are learned by Hebbian learning. Since the

information to be stored are global information concerning all units, full or global connectivity is preferable in terms of pure performance (this will be further motivated in the next section); the number of patterns to encode (the memory capacity), their stability and the size of their basin of attraction (a very crucial criteria upon which good generalization depends). Nevertheless nothing prevents to use a weaker or more local type of connectivity still learning by Hebbian learning. Mother nature herself seems to have favored local type of connectivity in the brain. Although there is a slight degradation in performance (the capacity and the generalization capability suffers progressive deterioration), a fantastic computational economy can be reached both during the learning and the retrieval phases.

If the storage capacity of the network is defined as the ratio of the maximal number of patterns to the average connectivity of the network then the storage capacity of a weakly connected network is higher than the storage capacity of a fully connected one. If interested in a compromise between computational expenses and memory performances, local or intermediary type of connectivity can become a better option. As shown in [1] an extremely randomly diluted Hopfield network can perform at least as well as the standard fully connected symmetric network. All told, it might be preferable to use for equivalent performances a bigger network with local connectivity than a smaller network with global connectivity. Notice that the number of units can exceed the number required for encoding the pattern information. The difference will be due to the addition of hidden units whose presence can improve the memory capacity by artificially reinforcing the decorrelation among the patterns.

3.3 Oscillatory Hopfield Networks

Asymmetric Hopfield network in which units have no self-connection ($m_{ii} = 0$) presents a high probability to oscillate when their synaptic values are fixed randomly. Although the analysis done by Gardner, Ashby and May and discussed above seems to suggest that any network with local connectivity should stabilize instead, one important difference here with the network they considered is the lack of self-inhibition. This should explain why periodic behaviours prevail whatever degree of connectivity. Nevertheless the experiments have shown that, in agreement with the linear system results, the probability of getting fixed points (although inferior to the one of obtaining cycles) is higher when the network is globally interconnected. The agreement with the linear system analysis comes from the fact that a positive eigenvalue (more easier to obtain with global network) would be responsible for a fixed point in Hopfield net:

If $\lambda a_i = \sum_j m_{ij} a_j$ with λ the eigenvalue, then $\lambda a_i^2 = \sum_j m_{ij} a_j a_i$ and since a fixed point

implies $\sum_j m_{ij} a_j a_i \geq 0$, the fact that $\lambda \geq 0$ has higher probability for global network

implies also a greater probability of fixed point for global connectivity.

We have performed an empirical analysis to correlate the number and the period of cycles with the degree of interconnectivity. Synaptic weights are given values randomly selected in the interval $[-1,1]$. It is a NK analysis (N = the number of neurons; K = the number of local neighbors with which one neuron is connected: $m_{ij} \neq 0$ for $j = i+1$ to $i+K$ and for $j = i-1$ to $i-K$, see fig.2) completely inspired from the NK analysis performed by Kauffman when studying the behaviour of Boolean networks. As the next section will discuss, although the two networks are different, the empirical results present similarities with the ones described by Kauffman. The main result is the existence of a lower threshold for K (for instance 1 or 2 for net of 8 to 10 units) below which the networks present a large number of different cycles characterized by very short period. When K exceeds this low threshold and whatever value it takes above this threshold (3 to 7 in the 8 units case) the results are the same: the quantity of cycles sharply decreases and these new cycles present longer period in average. The correlation between the number of

cycles and their period namely the shorter the cycles the more they are, should need no explanation.

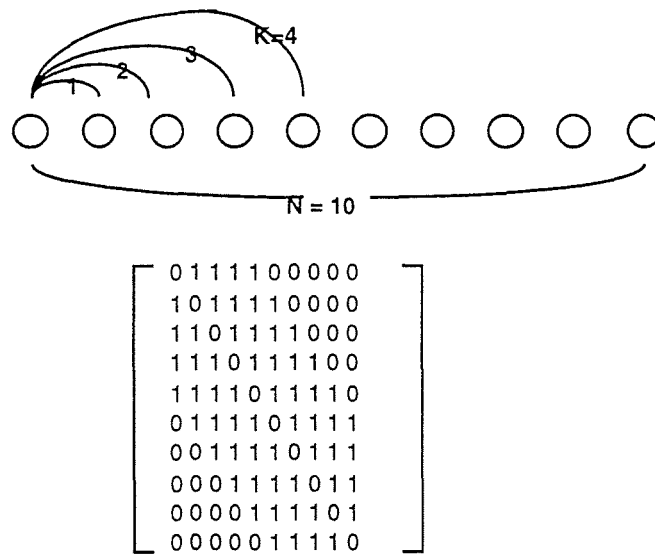


Fig.2 : A NK (10-4) oscillatory asymmetric Hopfield Network

We then find again but not surprisingly, due to the presence of an underlying common mathematical structure (the linear network), a very low threshold effect in the connectivity ($K=1$ for the 8 units network). Moreover, in a sense, shorter cycles should be more stable than longer one. As a matter of fact an extremely long cycle can be assimilated to a chaotic behaviour since the periodicity is very long to appear and perturbing a unit has completely unpredictable consequence. Finally local connectivity offers a more diverse regime showing a larger variety of cycles (cycles whose probability is greater than in global network). The network is then liable to realize richer information processing like variable binding or image processing (so popular today in the neurophysiological and neuropsychological communities).

3.4 Kauffman's Boolean networks

Kauffman has largely popularized his NK random Boolean networks where N is the number of binary units and K the number of units with which any unit is interconnected [17]. K reflects the local or global nature of the network. The state transition of any unit is randomly extracted from the 2^{2^K} possible transitions. The dynamics of these Boolean nets is well known and I will briefly remind the essential points by borrowing here and there pieces of Kauffman's own literature. Two strongly different regimes have to be stressed: one for very local network ($K=2$) and one for fully connected network ($K=N$). Here again a sharp transition between these two regimes seems to occur at low connectivity. In global network, the regime can be characterized as maximally disordered even chaotic (although this can't be a real chaos due to the finite nature of the network). There are N/e number of cycles. The length of the cycles grows exponentially with K . The global network shows extreme sensitivity to initial conditions (a key feature of chaotic regime) because the successor to any state is essentially random and that almost any perturbation that flips one element will sharply change the network subsequent trajectory.

When K drops to 2, so in presence of very local type of connectivity, the properties of the Boolean net change abruptly. The number of cycles is now given by \sqrt{N} . It must be noted that in contrast with oscillatory Hopfield net there are less cycles than in the global case but a possible explanation will be given later. On the other hand, and now similarly to what we observe for oscillatory Hopfield net, the length of the

cycles, also given by \sqrt{N} , is much smaller than for the global case. The reason why, despite their small number, these cycles keep a short period is due to the fact that the system is partitioned into an unchanging frozen core (this core contains unvarying units) which isolates islands of oscillatory units. This core has several effects: first it blocks the propagation of cyclic behaviour favoring then small cycles, secondly it makes each cyclic attractor stable to most minimal perturbations and endows the local network with precious homeostatic quality. In [17], it is explained how the properties of the network is highly dependent on the probability of appearance of the frozen core and how for low connectivity a lot of transitory rules are akin to identity rules, while for $K=4$ and higher the proportion of identity rules falls abruptly. In asymmetric and oscillatory Hopfield nets, the opposite situation occurs i.e. the probability of identity transition is much higher in case of full connectivity. This can explain why, despite the length of the cycles shows a similar tendency in both networks (longer for global network), their number not.

According to Kauffman, random Boolean nets with $K=2$ provide examples of unexpected and powerful collective spontaneous order. Further biological motivations conduct him (like Thomas [29]) to identify his Boolean nets with genetic regulatory net and each small cyclic attractor with one possible cell type. Finally by finely tuning an additional probabilistic parameter but still keeping a low value for K , a phase transition, where the most complex regime is likely to supervene, appears for a critical value of this parameter. The frozen cores melt, and damage spreading from minor perturbations seems to create avalanches on all length scales with a power-law distribution. This new regime has been described as lying somewhere between order and chaos and recently has been endowed with a lot of wonderful qualities (high computational complexity, better adaptive capacity, scale invariance ..), although it is still under large investigation and the object of a vivid debate.

3.5 Coupled Map Lattice

Coupled Map Lattices (CML) have been designed for allowing the study of spatiotemporal chaos [15] [16]. Logistic map units (parametrized in their chaotic regime) are disposed on a lattice, and each unit interacts with the units occupying its neighborhood. One typical example of CML presented and discussed by Chaté and Manneville in [6] is the following:

$$a_i(t+1) = \frac{1}{N} \sum_{j \in V} r a_j(t) (1 - a_j(t)) \quad (6)$$

with N the number of sites and V the isotropic neighborhood.

Since every unit is installed on a spatial structure, the degree of connectivity of the network is directly related to the size of the neighborhood V (the same for all units). When this neighborhood is large and, in the extreme case, when all units are interconnected together, they all synchronize their behaviour. The average activity $\langle a_i(t) \rangle$ shows the same logistic chaos as the units alone. This is not a very interesting behaviour since getting all units together brings nothing new in the resulting network phenomenology. It is discussed in [6] why local connectivity is an essential requirement for obtaining non-trivial collective behaviour. For nearest neighbor type of connectivity (so a local connectivity) all units behave chaotically and exhibit on average the same dynamics but with this difference that they never synchronize. Moreover $\langle a_i(t) \rangle$ frequently behaves as a noisy cycle. Therefore in this case a new functionality, absent in all units (indeed by averaging the units the chaos disappears), really emerges out of the chaotic network. Emergent original non-trivial behaviour is observed in CML with local connectivity. A low level connectivity threshold once again sharply separates non-synchronized complicate regime from the synchronized simpler one.

Finally by varying the logistic parameter r a phase diagram can be drawn in which a transition regime is obtained for a critical value. This phase transition is characterized by clusters of connected synchronized units which will eventually invade the whole system.

4. LOCALITY IS SO BENEFIC FOR NATURE AS TO AUTOMOUSLY SELF-SELECT FOR IT

4.1 Non-linear Ecosystems

The works of Gardner, Ashby and May discussed above seem to suggest that a biological ecosystem in order to be stable must be organized into a set of separated subnetworks where species in one subnetwork are insulated from interactions with species in another subnetwork. In certain biological networks the degree of interconnectivity can then appear as an emergent property regulated by the network itself on the road to its equilibrium states. Compartmentalization of species communities into independent clusters were experimentally validated by Stuart Pimm [24] [18] and seems to be characteristic of animal communities. Moreover this spontaneously self-asserted stability is such as to provide all clusters with homeostatic qualities and the interactions among the species in the community to create "an invisible protective network" that tend to repel potential invaders [18]. A spontaneous choice for very specific and "socially-selective" species results then from the time evolution of the whole network. Non-specificity is discouraged by dynamics elimination and such elimination can slowly have consequences at the genetic level. The genome will progressively adapt and code for specificity so as to avoid these phenotypic eliminations.

A CML computer simulation of this connectivity self-selection in ecosystems was realized by Solé et al. in [26] where the ecosystem time evolution (closed to Lotka-Volterra form of interactions) is given by:

$$a_i^k(t+1) = \mu_i a_i^k(t) \left[1 - \sum_j m_{ij} a_j^k \right] + D_i \nabla^2 a_i^k \quad (7)$$

where i label the species and k the spatial site.

The second part represents the diffusive coupling which takes benefit of the spatialization on a lattice of the full system. The authors found that the ecosystem spontaneously complies with the stability criterion of Gardner, Ashby and May. In its natural quest for stability the ecological network tunes autonomously its connectivity to low threshold value.

4.2 Immune idiotypic networks

A similar phenomenon has been observed in immune idiotypic network simulations both by De Boer and Perelson [8] and Detours et al [10]. During its time evolution the idiotypic network given by the system of equations (3,4) spontaneously tunes its connectivity to low value. It is known that the embryonnary idiotypic network shows larger connectivity that the adult one. This is found also in simulations together with a reinforcement of the selectivity of the new clones to be recruited in the network. Recently Detours et al. [10] have performed a NK analysis of (3,4) and observed the emergence of clustering phenomena where the network separates into a set of small clusters of 2 or 3 interacting clones. The 3-clone clusters are only open chain structure so not giving rise to any frustration. As a matter of fact, all sources of frustration are eliminated. The clones which should guarantee the connections among the clusters see their concentration to vanish. In general the clustering is so as to separate the clusters by a number of inactive clones equal to K .

Thus here again and exactly like for ecosystems we attend a structural self-shaping of the network privileging low degree of connectivity. In a nutshell the network self-shaping aims at eliminating all possible sources of instability such as global or frustrated types of connectivity. The unstable dynamics shows suicidal tendency since it appears responsible for the disappearance of its own structural causes.

5. CONCLUSIONS

The main motivation of this paper was a qualitative and shallow overview of various biological networks modeling in an attempt to spot similar form of dynamical sensitivity to structural aspects. These biological networks are as diverse as linear and non-linear ecosystems, Boolean networks, Hopfield associative memory and oscillatory networks, coupled map lattice, network of oscillators and immune idiotypic network. The two structural influences to be observed in the major part of these networks are the great sensitivity the network dynamics presents to frustrated connectivity and the preference for local form of connectivity. Frustrated connectivity is, in few cases, responsible for enlarging the diversity of equilibrium regimes but, more generally, for provoking instability in network: fixed points turn into oscillation while oscillation turns into chaos. This instability is due to the "wavering" of the network unable to settle into one of the equally possible and challenging configurations. As a benefic outcome of frustration, the network is able to recurrently propose a large repertoire of potential behaviors which can be triggered in response to future external interaction. We have seen in [3] [5] that the idiotypic network is autonomously trying by the suppression of some units to escape from the frustration induced chaos. It is a further indication of its possible functioning between a chaotic regime when needed (by just recruiting a new unit) and an oscillatory regime (by suppressing the disturbance) for making sense of any external interaction (in our specific case tolerance to the presence of auto-antigen).

The locality/globality issue in the network connectivity is more subtle but in general local connectivity entails more stability and homeostasis, and gives rise to the emergence of more interesting collective dynamics. These attractive regimes resulting from local connectivity are only possible when this connectivity is maintained below a certain threshold. The existence of such a threshold seems to be a further similitude to be pointed out among all networks. At last, the appearance of phase transition whose intermediary position between order and chaos endows the network with better computational capacities seems to be easier to obtain in case of a dilute form of connectivity. Locality induces stability and the network dynamics is often able without the need for external intervention to regulate its connectivity. The dynamics of an unstable network will in general aim at modifying the structure of this network so as to bring back stability. The dynamic spontaneous elimination of frustration in immune idiotypic network as well as the self-regulation of local connectivity in Lokta-Volterra type of ecosystems are two nice illustrations of such a tendency.

If biological networks can take profit from the presence of stability, robustness, and rich computational abilities, all this in a simpler structure and at a low computational price, then, on the whole, locality and weak interconnectivity should be legion in nature. As a matter of fact, so far as our knowledge of natural networks go, locality appears to be the rule in nature.

REFERENCES

- [1] Amit, D.J. 1989: *Modelling Brain Function: The World of Attractor Neural Networks* - Cambridge University Press - Cambridge
- [2] Atiya, A. and P. Baldi. 1989: *Oscillations and Synchronization in Neural Networks: An exploration of the Labeling Hypothesis* - *International Journal of Neural Systems* - Vol.1, No 2 - pp. 103-124 (1989)

- [3] Bersini, H. and V. Calenbuhr. Frustration Induced Chaos in a System of Coupled ODE's - *Chaos, Solitons and Fractals* - in press.
- [4] Bersini, H. and V. Detours. 1994: Asynchrony induces stability in Cellular Automata Based Models - In *Artificial Life IV* - Eds Brooks R. and P. Maes - MIT Press - pp. 382-387.
- [5] Calenbuhr, V., Bersini, H., Stewart, J. and F.J. Varela. 1995: Natural Tolerance in a Simple Immune Network - Submitted to *J. Theoretical Biology*.
- [6] Chaté H. and P. Manneville. 1992: Collective behaviors in coupled map lattices with local and non local connections - *CHAOS* 2 (3) - pp.307 - 313
- [7] Daido H. 1992: Quasientrainment and Slow Relaxation in a Population of Oscillators with Random and Frustrated Interactions - *Physical Review Letters* - VOL. 68, No 7 - pp. 1073-1076
- [8] De Boer, R.J. and A. Perelson. 1991: Size and Connectivity as Emergent Properties of a Developing Immune Network - In *J. Theoretical Biology* - 149 -pp. 381-424.
- [9] De Boer, R.J., A. S. Perelson and I. G. Kevrekidis. 1993: Immune Network Behaviour - I. From Stationary States to Limit Cycle Oscillations - *Bulletin of Mathematical Biology* , Vol. 55, No 4, pp. 745-780.
- [10] Detours, V., Calenbuhr, V. and H. Bersins. 1995: Clustering phenomena in idiotypic network - *IRIDIA Internal Technical Report*.
- [11] Gardner, M.R. and W.R. Ashby. 1970: Connectance of Large Dynamic (Cybernetic) Systems: Critical Values for Stability - *Nature* Vol. 228 - p.784.
- [12] Hiernaux, J. 1977: Some Remarks on the Stability of Idiotypic Network - *Immunochemistry*, Vol. 14 - pp. 733-739. Pergamon Press.
- [13] Hirsch, M.W. 1987: Convergence in neural networks - in *Proc. 1987 Int. Conf. Neural Networks*, San Diego, CA.
- [14] Hopfield J.J. 1982: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities - In *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* - vol. 79 - pp. 2554 - 2558.
- [15] Kaneko, K. 1989: Pattern Dynamics in Spatiotemporal Chaos - *Physica D* 34 - pp. 1-41.
- [16] Kaneko, K. 1992: Overview of coupled map lattices - *CHAOS* 2 (3) - pp. 279-282.
- [17] Kauffman S.A. 1989: Principles of Adaptation in Complex Systems - *Lectures in the Sciences of Complexity* - *SFI Studies in the Sciences of Complexity* - Ed. D. Stein - Addison-Wesley - pp. 619-712.
- [18] Keley, K. 1994: *Out of Control. The rise of neo-biological civilization* - Addison Wesley.
- [19] Lumer, E.D. and G. Nicolis 1993: Synchronous versus asynchronous dynamics in spatially distributed systems - to appear in *Physica D*.
- [20] Marcus, C.M., F.R. Waugh and R.M. Westervelt. 1991: Nonlinear dynamics and stability of analog neural networks - in *Physica D* 51 - pp. 234-247.
- [21] May, R.M. 1972: Will a Large Complex System be Stable? - *Nature* Vol. 238 - pp. 413- 414
- [22] Omata, S. and Y. Yamaguchi. 1988. Entrainment among coupled limit cycle oscillators with frustration - *Physica D* 31 - pp. 397-408.
- [23] Perelson, A.S. 1990: Theoretical Immunology - In *Lectures in Complex Systems* - *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, Lect. Vol. II, Edited by Erica Jen, Addison-Wesley.
- [24] Pimm Stuart. 1991. *The Balance of Nature* - University of Chicago Press.
- [25] Sherrington, D. 1990: Complexity Due to Disorder and Frustration - *Lectures in the Sciences of Complexity* - *SFI Studies in the Sciences of Complexity* - Lect. Vol. II, Ed. Erica Jen - Addison-Wesley - pp. 415-455.
- [26] Solé, R.V., Bascompte, J. and J. Valls. 1992: Nonequilibrium dynamics in lattice ecosystems: Chaotic stability and dissipative structures - in *CHAOS* 2 (3) -pp.387-395.
- [27] Stewart, J. and F. Varela. Dynamics of a class of immune networks. II. Oscillatory activity of cellular and humoral components. *Journal of Theoretical Biology*. 144, pp. 103-115 (1990).
- [28] Strogatz, S.H., Mirollo, R.E. and P.C. Matthews. 1992: Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators - in *SIAM Journal on Applied Mathematics* - vol. 50, No 6, pp. 1645-1662.
- [29] Thomas, R. 1991: Regulatory Networks Seen as Asynchronous Automata: A Logical Description - *J. Theor. Biol.* 153 - pp. 1-23.
- [30] Toulouse, G. 1977: *Commun. Phys.* 2 - 115.
- [31] Varela, F.J., Coutinho, A., Dupire, B. and N.N. Vaz 1988. Cognitive networks: immune, neural and otherwise - In *Theoretical Immunology, Part Two*, edited by A.S. Perelson. *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, vol. 3, Reading, MA: Addison-Wesley, 377-401.
- [32] Varela, F.J. and A. Coutinho. 1991: Second Generation Immune Network - in *Immunology Today* - Vol. 12 No 5.
- [33] Winfree, A. T. 1987: *The Timing of Biological Clocks* - Scientific American Library.

Evolution de structures neuronales Application à un robot mobile autonome

J. Biondi O. Michel
jb@mimosas.unice.fr om@alto.unice.fr
Laboratoire I3S-CNRS
Université de Nice-Sophia Antipolis

1 Introduction

Pour essayer de modéliser certaines formes d'organisation en particulier celles liées aux fonctions d'adaptation et/ou aux fonctions cognitives observables chez l'être vivant, on peut imaginer plusieurs scénarios :

- étudier et comprendre comment les cerveaux biologiques fonctionnent en espérant pouvoir reproduire ces fonctionnalités...
- reproduire la structure exacte d'un cerveau en connaissant la dynamique de chaque neurone et synapse, sans pouvoir espérer que cette machine puisse un jour fonctionner si elle pouvait être réalisée...
- utiliser les mécanismes évolutionnistes pour tenter de faire apparaître des processus que l'on peut qualifier d'intelligents. Le problème est alors le temps qu'il faut pour générer un cerveau artificiel et les moyens pour y arriver. Comment réaliser une morphogenèse artificielle ? Quels processus mettre en jeu pour simuler l'évolution ? Comment modéliser les contraintes de l'environnement ? sa variabilité ? C'est cette troisième approche que nous avons choisie d'étudier.

2 Morphogenèse et évolution

2.1 L'activation des gènes

Le processus que nous présentons s'inspire de la biologie moléculaire et plus particulièrement de la synthèse des protéines. Des gènes particuliers s'expriment aux divers stades du développement ou lorsque l'organisme détecte des signaux de l'environnement. L'expression des gènes est commandée par des protéines de régulation qui se fixent sur des sites particuliers de l'ADN. Ces protéines sont soit des activateurs qui augmentent la transcription du gène soit des inhibiteurs qui la diminuent, quelques rares protéines remplissent les deux fonctions. En simplifiant le fonctionnement, on peut dire que si un inhibiteur est présent, il se fixe sur le codon de départ d'un certain gène de telle sorte que l'ARN polymérase, responsable de la transcription du gène en ARN messager, ne

puisse plus transcrire le gène. Ce système est récurrent dans la mesure où une protéine synthétisée peut être un inhibiteur pour un autre gène. Le mécanisme concernant les activateurs est évidemment l'inverse de celui concernant les inhibiteurs. Une molécule activatrice est nécessaire pour initier le processus de transcription de l'ADN en ARNm à un locus spécifié et donc pour initier la synthèse des protéines.

2.2 La morphogenèse artificielle

Les mécanismes décrits précédemment peuvent être vus comme un système de production dans lequel les inhibiteurs et les activateurs sont des conditions pour la production de protéines. Nous avons donc modélisé un chromosome comme une suite variable de règles de production. Une règle est composée de trois chaînes binaires : les deux premières constituent la partie condition et la troisième est la partie action. Le point de départ du processus est une cellule unique contenant un chromosome et une liste de messages (cf. figure 1). La liste de message correspond à l'ensemble des protéines disponibles dans la cellule biologique ; initialement un seul message est présent.

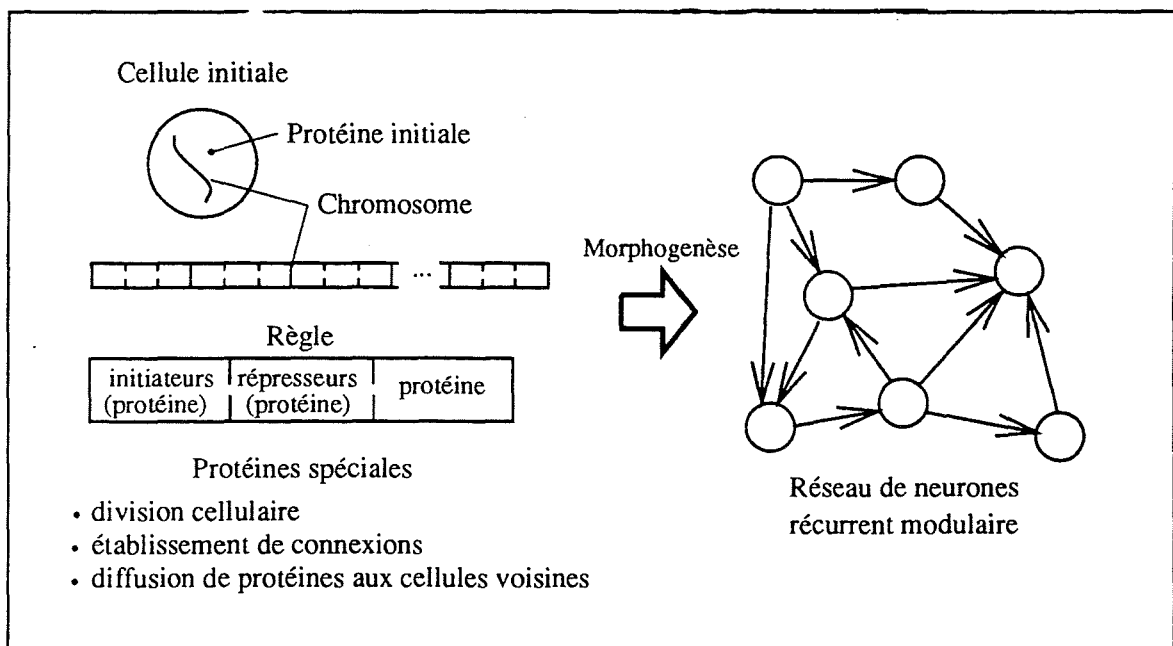


figure 1 : le processus de morphogenèse

Les parties conditions d'une règle correspondent d'une part à l'ensemble des messages dont l'absence dans la liste des messages de la cellule est nécessaire pour que la règle soit activée (correspondant aux inhibiteurs biologiques), d'autre part à l'ensemble des messages dont la présence est nécessaire dans la liste des messages pour que la règle soit activée (correspondant aux activateurs biologiques). La partie action correspond à des messages qui seront ajoutés à la

liste des messages de la cellule lorsque la règle est activée (correspondant aux protéines biologiques synthétisées). Certains messages peuvent être interprétés comme des actions qui seront exécutées par la cellule.

Voulant modéliser le processus de morphogenèse, une cellule est un neurone artificiel et les actions sont par exemple, se dupliquer, établir une fonction de transfert, établir des liens avec d'autres cellules... L'interprétation d'un chromosome est déterministe. Toutes les règles activables sont activées en parallèle (pas de résolution de conflits). La liste de message est supposée infinie et la présence et/ou l'absence de certains messages dans la liste permet l'activation ou non des règles. Les messages ayant été utilisés lors de l'activation de règles disparaissent de la liste des messages et d'autres sont donc produits par ces mêmes activations. Il faut noter que l'interprétation du chromosome ne dépend pas de la position des règles dans le chromosome. De plus, le processus de morphogenèse étant déterministe, deux chromosomes identiques produiront le même réseau de neurones. Le processus de morphogenèse s'arrête lorsqu'aucune règle n'est activable ou lorsqu'aucune action de morphogenèse n'apparaît ; en cas de non finitude, le processus est stoppé automatiquement (dégénérescence).

Ce processus de morphogenèse artificiel est théoriquement capable de construire tout type de réseaux de neurones. Il permet des connections récurrentes, différents types de neurones avec différentes fonctions de transfert, plusieurs types de liens caractérisés par des poids donnés et éventuellement des règles d'apprentissage (actuellement, cette possibilité n'est pas encore exploitée).

2.3 Evolution et apprentissage

La génétique joue un rôle fondamental dans le processus d'évolution. On peut penser que les mutations furent probablement la première forme de processus agissant sur des structures vivantes, permettant une exploration de l'espace des structures possibles. Les structures nouvelles pouvaient être capables quelquefois de se reproduire ou bien disparaissaient comme une conséquence de la sélection naturelle. Ultérieurement, d'autres agents génétiques tels que le croisement, ou la reproduction sexuelle apparaîtront et seront plus efficaces que de simples mutations. Les structures devenant de plus en plus différentes influencent leur environnement et créent des niches écologiques. L'émergence de l'adaptation dans les formes vivantes est un processus incrémental qui se situe tout au long du processus d'évolution. Le résultat de ce processus est un comportement de systèmes vivants bien adaptés à la survie dans leur environnement. Ce comportement n'est pas appris par le système ; il est écrit dans les gènes de l'espèce et peut être considéré comme la première forme de réflexe. Aucun but n'est donné au système, des buts apparents pourraient vraisemblablement être observés mais ils sont une conséquence des principes de vie et sont apparus pendant l'évolution.

L'adaptativité ontogénétique permet au système de s'adapter pendant sa vie à un problème particulier. Contrairement à l'adaptation phylogénétique, l'apprentissage est le moteur de cette adaptativité. Cette potentialité est inhérente à la structure du système, vraisemblablement au niveau de l'organisation neuronale.

2.4 Algorithmes génétiques

De nombreux travaux ont été réalisés pour faire évoluer les réseaux de neurones artificiels en particulier ceux basés sur les algorithmes génétiques utilisant des chromosomes linéaires [3, 5], matriciels [7], arborescents [4]. Certains utilisent des chromosomes de longueur variable [6, 2]. Les travaux les plus récents restent pour le moment restreints à des réseaux modulaires feedforwards [4] ou non modulaires et récurrents [2]. La morphogenèse proposée permet des réseaux modulaires et récurrents. Un processus d'évolution est nécessaire pour qu'ils soient adaptés à ce qu'on attend d'eux.

Afin de modéliser l'adaptation phylogénétique, nous avons utilisé les algorithmes génétiques sur une population de 100 chromosomes de longueurs variables et initialisés de façon aléatoire. En plus des opérateurs classiques (sélection, mutation, croisement), un opérateur particulier est utilisé. Il permet d'ajouter ou d'enlever aléatoirement un élément dans une des trois parties d'une règle ou d'ajouter ou d'enlever une règle dans un chromosome. Ceci permet l'obtention de règles de longueur variable nécessaire pour une augmentation de la complexité du réseau. Le croisement est fait à la frontière des règles. La sélection naturelle utilise, dans une première approche, une fitness binaire (vie ou mort). L'objectif est de trouver les chromosomes permettant la morphogenèse d'un réseau de neurones pilotant un robot mobile autonome.

3 Application à un robot mobile autonome

Afin de tester la validité de notre approche, nous avons choisi de faire évoluer des chromosomes qui génèrent des réseaux de neurones capables de commander un robot mobile simulé avec les caractéristiques de Khepera [8, 9]. Ce robot miniature ressemble aux véhicules de Braitenberg [1]. Il a deux moteurs, chacun d'eux contrôlant une roue et 8 capteurs de proximité infra-rouge capables de déceler les obstacles situés à quelques centimètres.

Dans un premier temps, nous simulons un environnement très simple. La recherche de nourriture a été choisie comme but. Une sorte de métabolisme est introduit : l'énergie interne du robot. Chaque robot a initialement la même quantité d'énergie. Cette quantité est augmentée à chaque fois que le robot trouve de la nourriture et diminuée lorsque le robot bouge ou même diminuée très légèrement s'il reste immobile. Si l'énergie tombe à 0 au bout d'un temps

donné le chromosome correspondant est éliminé de la population. Ceux qui ont survécu vont subir croisement et mutation. La taille de la population, initialement égale à 100, oscille ensuite autour de cette valeur ; en effet, l'environnement varie de manière à réguler le nombre de chromosomes. Lorsque la population diminue, l'environnement est plus favorable (moins de contrainte pour trouver de la nourriture), la durée de vie des robots augmente et ils se reproduisent de façon plus importante. Lorsque la population augmente, l'environnement devient plus hostile (manque de nourriture) et les robots les moins performants disparaissent rapidement. Après 200 générations, nous obtenons des réseaux valides qui ont le nombre de neurones d'entrée et de sortie égal à celui de Khepera. Les 300 générations suivantes montrent l'évolution du comportement des robots (cf. figure 2) : au début, quelques uns se déplacent en suivant différentes trajectoires (des lignes, des cercles) ignorant apparemment la nourriture puis la population s'homogénéise et les robots sont attirés par la nourriture.

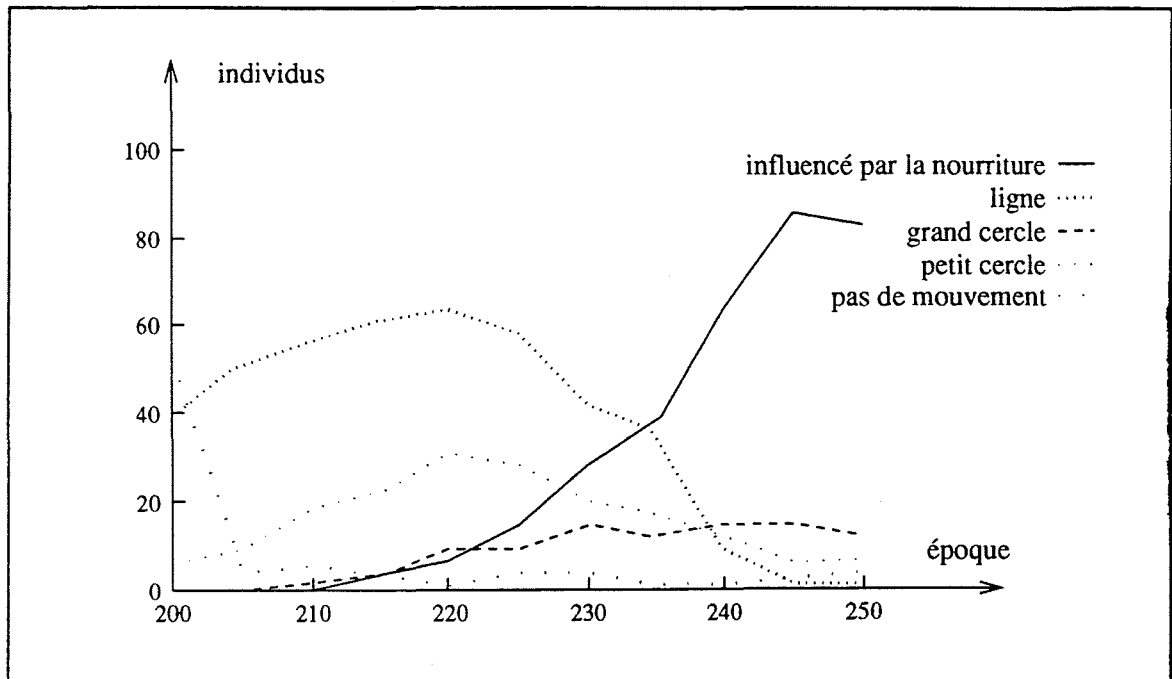


figure 2 : Evolution du comportement des robots

4 Conclusion

Nous avons présenté une nouvelle approche pour modéliser l'évolution des systèmes adaptatifs, basée sur la biologie. Nous pensons que cette méthodologie nécessite un environnement dynamique qui conduise l'évolution en contraignant progressivement le système afin que celui-ci devienne de plus en plus performant. La complexification de l'environnement doit être incrémentale pour

que les structures aient une certaine pérennité et que l'évolution soit possible. Nous nous sommes limités jusqu'à présent à un environnement et une fonction de performance du système très simples, aussi les comportements le sont également et peuvent être comparés aux plus simples des véhicules de Braitenberg. Cependant, ces premiers résultats utilisant conjointement le processus de morphogenèse et les mécanismes d'évolution sont très encourageants et doivent être confirmés sur des problèmes plus difficiles (éviter d'obstacles, labyrinthe). L'utilisation d'une fonction de performance à valeur continue ainsi que la mise en œuvre d'opérateurs génétiques plus puissants est actuellement en cours. Enfin, l'utilisation de règles d'apprentissage associées aux liens doit permettre des comportements plus "intelligents" dans une perspective d'apprentissage ontogénétique. L'étape finale est le transfert du simulateur vers le robot réel.

Bibliographie

- [1] V. Braitenberg. *Vehicles : Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press, Cambridge, 1984.
- [2] Dave Cliff, Inman Harvey and Phil Husband. Exploration in evolutionary robotics. *Adaptive Behavior*, 2(1): 73-110, 1993.
- [3] B. Fullmer and R. Miikkulainen. Using marker-based genetic encoding of neural networks to evolve finite-state behaviour. In F. Varela and P. Bourgine, editors, *Towards a practice of Autonomous Systems, Proceedings of the First International Conference on Artificial Life*, Paris. MIT Press, 1992.
- [4] F. Gruau and D. Whitley. *The cellular developmental of neural networks : the interaction of learning and evolution*. Technical report, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 46, Allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07, France, 1993.
- [5] S. Harp and T. Samad. Genetic synthesis of neural network architecture. In Lawrence Davis, editor, *Handbook of Genetic Algorithms*, chapter 15, pages 202-221. Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [6] Inman Harvey. Species adaptation genetic algorithms: A basis for a continuing SAGA. In F. Varela and P. Bourgine, editors, *Towards a practice of Autonomous Systems, Proceedings of the First International Conference on Artificial Life*, Paris. MIT Press, 1992.
- [7] G.F. Miller, P.M. Todd and S.U. Hedge. Designing neural networks using genetic algorithms. In Schaffer J. D., editor, *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pages 379-384, Morgan Kaufmann, 1989.
- [8] F. Mondada, E. Franzi, and P. Jenne. Mobile robot miniaturisation: A tool for investigation in control algorithms. In *Third International Symposium on Experimental Robotics*, Kyoto, Japan, 1993.
- [9] F. Mondada and C. Touzet. Quelques comportements adaptatifs pour le robot miniature Khepera. In *Annales du Groupe CARNAC, EPFL, Lausanne, Suisse, 1993*.

JOURNÉES DE ROCHEBRUNE 95

20-24 mars 1995

(Haute-Savoie)

Évolution et Organisation

Hasard et Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives

Il existe au moins deux pistes pour expliquer la formation/existence des formes collectives :

* Les processus évolutifs ou historiques (reproduction différentielle/hasard) ; cette piste pose le problème de la convergence (apparition simultanée de formes semblables).

* Les contraintes environnementales/externes ; cette seconde voie pose le problème de l'infinie diversité des formes collectives observées dans la nature.

Une perspective dynamique pourrait reposer sur le fait qu'une organisation collective existante contribuerait à l'évolution du contexte vers un nouveau contexte dans lequel apparaîtrait de nouvelles formes collectives ou organisations. Dans cette perspective l'ensemble des contraintes contextuelles et des contraintes créées par la forme collective, détermine fortement la forme collective de l'époque suivante ; d'où une importance moindre des "accidents" historiques.

L'identité relationnelle, une composante évolutionniste essentielle pour la genèse des formes collectives.

François Bourdon

SEPT, SCE/ACS

42, rue des coutures B.P. 6243

14066 CAEN Cedex

tél. 31 75 91 19

fax 31 75 06 31

e-mail bourdon@sept.fr

Avant-propos

Voici quelques réflexions concernant des travaux que je mène au SEPT depuis quelques années et qui abordent le problème des conditions d'émergence de formes collectives. L'année passée à Rochebrune j'ai présenté factuellement, c'est-à-dire au travers d'une application particulière, ce que j'appelle le modèle relationnel. J'ai développé ce modèle dans le cadre d'un travail de thèse (juillet 92). Tout en essayant de consolider ce modèle en introduisant des outils mathématiques rigoureux (théorie des catégories), j'ai exploré un domaine d'application réel, c'est-à-dire extrêmement contraint, auquel je pense appliquer ce modèle dans le but de le valider partiellement. Il s'agit du placement automatique d'objets sur systèmes répartis à objets (SRO). De tels systèmes intègrent très intimement les notions de communication, d'exécution et de partage de ressources à travers le réseau. Certains comme celui (Cool/Chorus) sur lequel je travaille offrent en plus la possibilité de migrer des objets/ressources à travers le réseau. J'étudie donc comment appliquer le modèle relationnel aux objets applicatifs (clients/serveurs) qui interagissent sur le réseau, afin d'ajuster "continûment" (par période) l'organisation de ces objets sur les machines à travers le réseau. L'objectif de cet ajustement est de minimiser des coûts de fonctionnement liés aux infrastructures utilisées. Le recours aux caractéristiques relationnelles (dynamique d'évolution) permet d'explicitier des grandes tendances et donc différencier ce qui relève d'épiphénomènes ou de fractures vis-à-vis de ces tendances. Il s'agit d'éviter des phénomènes de va-et-vient dans les migrations liées à la restructuration automatique. Actuellement je travaille en collaboration avec une équipe de l'université de Besançon sur ce problème précis. Notre objectif est de valider partiellement l'approche proposée sur un système réel (COOL-v2/Chorus), en réalisant une maquette qui est en cours de définition. Ce travail s'inscrit dans une réflexion plus large dont le propos de cette contribution est d'en donner un aperçu, afin de provoquer des discussions.

Objectifs/Hypothèses

J'ai commencé l'exploration de ces idées dans le domaine de la gestion du système d'information des entreprises, où il fallait gérer des informations dont les sources de production, de stockage et d'exploitation sont très largement réparties. Cela pose des problèmes de recherche intelligente (cf. Internet et les serveurs WWW), d'archivage, d'élimination, de structuration dynamique ... d'informations sur les réseaux. Ceci m'a conduit à réfléchir sur la définition d'une identité qui caractériserait au mieux les objets manipulés, en l'occurrence les Clients/Serveurs. Fallait-il se cantonner à une description intrinsèque des choses, c'est-à-dire *a priori*, par exemple à partir d'une sémantique ? Ou fallait-il regarder un peu plus loin pour enrichir cette première description *a priori* ? C'est l'option qui a été prise en s'intéressant aux interactions de chaque objet avec leur monde extérieur et en tentant d'en intégrer une trace "évolutionniste" à leur propre carte d'identité.

Toute entité dans un milieu donné dispose de moyens divers pour interagir avec son "monde extérieur" ; certains sont explicites (interaction directe entre) d'autres sont implicites (interaction via un élément tiers). Pour les gens qui travaillent sur les fondements du travail coopératif assisté par ordinateur (CSCW en anglais), une forme d'interaction implicite est ce qu'ils appellent la "communication implicite" ; on cite souvent la situation où deux personnes essayent péniblement de passer une table par une porte ; dans une telle situation le langage n'est plus suffisant, la table joue le rôle de médium implicite de communication entre les personnes. En effet l'action de l'un sur la table est immédiatement perçue par l'autre.

Ces notions d'interaction explicite et d'interaction implicite nécessitent de clarifier ce que l'on entend par "milieu extérieur" à une entité donnée. Il faut d'ailleurs préalablement définir le type d'entités que l'on vise ici. D'où le questionnement légitime sur la nécessité ou non d'une séparation typologique entre des entités qui seraient "vivantes" ou autonomes ou encore intelligentes et des entités qui seraient leur contraire, c'est-à-dire "contextuelles", non-autonomes et "bêtes". Cela reviendrait pour une entité "vivante" donnée, à dissocier dans son contexte la partie passive regroupant des composants "inertes", de la partie "active" regroupant des entités "vivantes" comme elle. On peut ajouter à cela qu'une entité dite "active" possède dans sa propre représentation une partie que l'on pourrait qualifier de "passive".

Ces questions ne sont pas plus évidentes lorsque l'on considère un système informatique. En effet quel est le statut d'un serveur, d'un programme, d'un processus ou d'une "thread" (granularité d'exécution la plus fine) ; quand, ou à partir de quelles définitions de telles entités, peut-on parler d'autonomie ... pour opérer la catégorisation actif/passif introduite ?

Nous abordons ces questions en n'intégrant au modèle relationnel que les interactions explicites entre des composants de même nature (client/serveur). Pour comprendre cette apparente simplification conceptuelle, il faut développer les autres hypothèses qui sous-tendent ces réflexions et reviennent sur la notion de prise en compte du contexte ou de ce que l'on pourrait appeler la partie "passive" des choses.

L'individu existe aussi et surtout à travers le rôle qu'il joue au sein de collectivités. Ce rôle souvent complexe et subtil se manifeste par toutes sortes d'interactions (implicites/explicites) avec le milieu (au sens large). Sa propre image qui lui est renvoyée par les collectivités (spécularité) au travers de ses interactions, lui permet de prendre effectivement conscience de ce qu'il est et donc du rôle qu'il joue dans ce contexte. Ces interactions et les différents contextes qui les ont nourries, deviennent naturellement une partie de lui-même ; c'est pourquoi nous cherchons à étendre l'identité d'une entité en y incluant cette dimension interactionnelle ; nous obtenons ainsi ce que l'on appelle l'identité relationnelle.

Nous envisageons cette identité relationnelle comme un continuum ou une dynamique d'évolution, qui possède dans sa propre description des informations sur l'évolution antérieure de cette description : ce qu'elle est et d'où elle vient (périodes d'évolution stable ou des cassures/accidents). Autrement dit la dimension relationnelle au temps "t" d'une entité donnée, décrit non seulement sa situation à "t", mais aussi dans une certaine mesure ses situations antérieures. Cela traduit une prise en compte de l'évolution des liens (dynamique historique) dans leur propre définition ; et caractérise des contraintes historiques et évolutionnistes qui déterminent partiellement (influence, conditionne) le comportement courant et à venir de l'entité dans le milieu. Cette carte d'identité propre à chaque entité, renseigne non seulement au temps présent sur l'existence de liens relationnels (interactions) entre des entités données, mais aussi sur l'évolution (renforcement, affaiblissement ...) qui a conduit à ces liens.

Elle permet également de comparer/classifier/filtrer/extraire ... des entités entre elles, à partir de cette nouvelle sémantique interactionnelle.

A la question centrale posée dans le cadre de ces journées, sur l'existence de contraintes éventuelles participant à la genèse des formes collectives, je fais l'hypothèse selon laquelle des entités ne peuvent participer à l'émergence de formes collectives que si des pré-requis de nature interactionnelle/relationnelle existent entre ces entités. Cette perspective sous-entend que l'environnement est intégré en partie dans les interactions réellement faites, dans la mesure où elles sont le résultat de décisions qui ont tenu compte de cet environnement.

Cette dualité relationnel/réel (décision/effet) montre d'une certaine façon qu'une entité existe ou évolue simultanément dans plusieurs mondes (espaces), dont certains pourraient être qualifiés de "matériels" et d'autres d'"immatériels" (à ne pas confondre avec "virtuels"). Mon travail consiste à ne considérer par

simplification, que deux espaces que sont celui des interactions (immatériel) et celui du fonctionnement (matériel) dans lequel on sait définir des coûts.

Chaque entité doit pouvoir être définie précisément dans chacun de ces espaces ; or en admettant que l'ubiquité n'est pas possible pour ces entités, le problème est alors d'étudier les liens potentiels d'influence et de coopération qu'il doit exister entre les différentes représentations de chaque entité dans ces différents espaces. Par exemple on doit regarder si des actions sur l'espace fonctionnel (réel) peuvent avoir des conséquences dans l'espace relationnel et réciproquement.

A partir de là on peut faire effectivement l'hypothèse selon laquelle la notion de hasard peut être une action qui modifie de façon indéterministe car externe au milieu, la structure de l'espace réel dans lequel évoluent ces entités observées ; et en déduire certaines conséquences sur le comportement observé dans l'espace relationnel, de ces entités.

Cette approche me conduit à réfléchir sur la genèse des formes collectives toutes particulières qui sont celles liées à "l'esthétisme artistique". On peut se demander quelles sont les caractéristiques qui font que telle phrase musicale est "agréable" ou que telle composition de formes picturales est harmonieuse. On sait très bien qu'une explication structurelle (grammaire de composition) n'est pas suffisante, car on peut faire des phrases/compositions bien formées qui sont vides de sens ou dont il ne se dégage aucune "vibration" (terme difficile à préciser dans ce contexte !). Rapporté aux questions posées ici, cela amène à s'interroger sur les facteurs ou les caractéristiques qui font que cette forme artistique émerge. Peut-on parler dans pareil cas de formes collectives ?

Définitions de départ

Pour parler de formes collectives il faut préalablement avoir balisé le cadre qui permet effectivement de les voir évoluer.

Les entités individuelles sont celles qui se composent d'une partie décisionnelle/réactive et d'une partie opérationnelle. Elles évoluent dans un milieu ou contexte, composé lui-même d'entités individuelles de types multiples et d'éléments composant son infrastructure.

Les entités individuelles évoluent en interagissant entre elles directement ou via l'infrastructure offerte par le milieu. Chacune d'elles possède donc ce que l'on peut appeler un mode de fonctionnement sensori-moteur, dans la mesure où elle possède des capteurs lui permettant de connaître son environnement et un moteur lui permettant d'agir en conséquence sur cet environnement. D'où l'émergence potentielle de formes collectives issues de l'interaction d'entités individuelles à travers le milieu, qui joue ici le rôle de substrat. Ce dernier correspond à une certaine forme de réalité objective du monde.

De ces définitions apparaît la dualité fondamentale du couple individu/collectivité que l'on retrouve partout. Chaque individu est immergé dans une ou plusieurs collectivités. De par son action sur lui-même et avec d'autres individus à travers le substrat, il participe à l'évolution de lui-même, des autres individus et du substrat. On retrouvera cette vision gestaltiste dans le modèle de la dérive des connaissances, au travers de la définition de certains paramètres relationnels comme la densité. Ce paramètre permet de définir une forme relationnelle à partir de la définition de chacune de ses parties ; réciproquement il permet de définir chacune des parties de cette forme vis-à-vis de cette forme.

Chaque individu possède sa vision du milieu (autres individus et éléments d'infrastructures) dans lequel il opère. Cette vision, qui évolue dans le temps, est duale dans la mesure où elle se compose à la fois d'une projection du milieu (espace réel) et d'une projection des relations entre individus dans ce milieu. Chaque individu possède alors son propre espace relationnel dans lequel il voit évoluer son milieu. Nous parlons dans ce cas de formes relationnelles individuelles ou ego-centriques. C'est la vision subjective du monde, le point de vue individuel.

Pour parler de formes collectives relationnelles il faut considérer l'hyperespace relationnel dans lequel on combine ou compose des formes relationnelles individuelles afin d'obtenir des formes relationnelles collectives. Cet hyperespace n'est pas l'apanage d'une entité supérieure, mais le cadre structurel immatériel dans lequel on observe les formes collectives. Il est inaccessible aux individus car issu de plans relationnels inclus dans chaque individu ; c'est un modèle absolument réparti. Par contre les effets de ces formes collectives immatérielles peuvent se concrétiser dans le monde réel à l'image de l'effet des formes relationnelles individuelles.

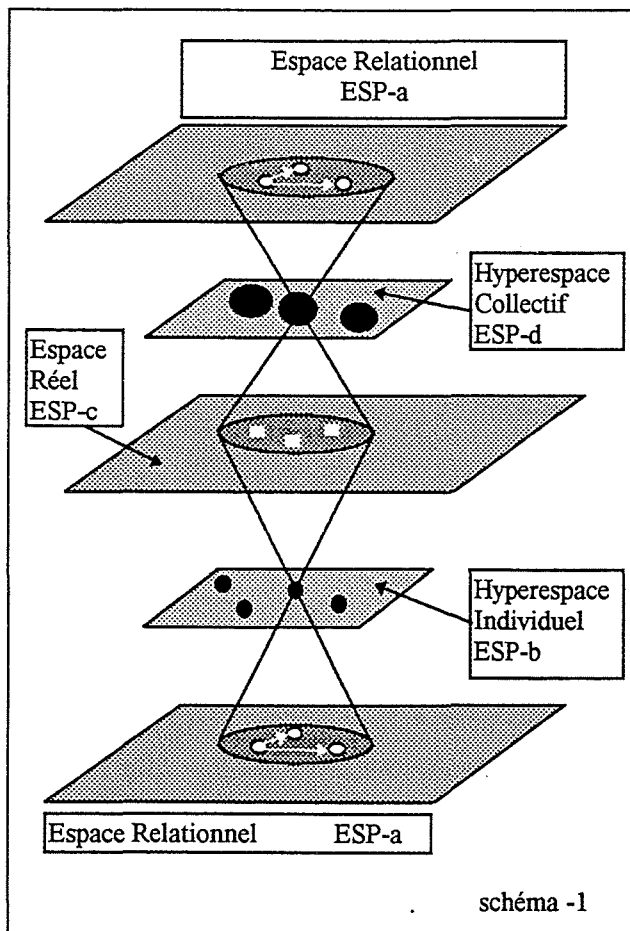
Ces formes relationnelles collectives, observables directement dans l'hyperespace, traduisent l'existence de lois implicites qui régulent leur pérennité et à travers elles, celle des individus. Ces lois permettent l'arbitrage entre des entités aux comportements autonomes. L'étude de l'évolution de ces formes dans un milieu naturel peut conduire à mieux comprendre ces lois ; dans un système artificiel, l'imposition *a priori* de certaines lois de ce type peut à l'inverse produire des formes relationnelles collectives dont l'évolution est prévisible. Dans ce cas l'observation de l'évolution de ces formes peut aider le contrôle du fonctionnement global du système et la détection par anticipation de ruptures ou d'accidents dans son évolution, dont les causes pourraient être externes au milieu.

Dans un système artificiel comme le placement d'objets informatiques sur les machines à travers les réseaux, on peut effectivement ériger des lois globales au niveau de l'hyperespace relationnel. C'est le cas du non-encombrement des machines et des réseaux par des ressources inutilisées, ou encore la recherche d'un coût global de fonctionnement, minimal, mais aussi un temps de réponse optimal etc. Ce sont des fonctions d'optimisation qui intègrent des notions comme la répartition géographique et le partage de ressources. Elles dépendent évidemment des contraintes imposées par l'espace réel représenté dans ce cas par les machines et les réseaux (matériels et logiciels) ; on trouve le coût des communications distantes, celui d'une migration ou encore d'une duplication de serveurs avec maintien de la cohérence. Suivant ces fonctions collectives, on établit les critères de mesure qui permettront de valider objectivement les résultats obtenus dans l'espace réel.

Une dynamique évolutionniste

Nous avons parlé d'une première dualité qui met en opposition ou en complémentarité les individus et les collectivités. Nous avons également introduit la différence très importante entre un monde réel, où les acteurs sont décrits de façon objective et un monde relationnel, qui renseigne ou décrit la nature des interactions entre les acteurs dans le temps. Ce deuxième univers pourrait correspondre à la vision subjective des choses, en tous les cas il représente des connaissances immatérielles mais qui jouent un rôle important dans les processus de décision.

En fait il semble, comme nous allons le voir, que c'est dans cet univers relationnel que l'on va trouver les éléments indispensables à l'émergence et l'évolution de formes collectives. Pour cela nous allons présenter sans trop de détails sur les schémas suivants, les différents composants de ces univers (réel et relationnel). Nous expliquerons ensuite le rôle de chacun d'eux et les modes d'interaction. On verra comment la théorie des catégories devrait y jouer un rôle important ; on verra également comment le mécanisme d'invariance « perceptive » pourrait expliquer certains aspects importants dans la dynamique de ce modèle. Enfin on discutera au vu de ces résultats des conditions qui semblent être nécessaires pour l'émergence de formes collectives. Nous discuterons aussi de l'intérêt d'un tel modèle à la fois dans la compréhension de systèmes naturels et dans l'élaboration de systèmes artificiels. C'est dans ce sens que la description de ce modèle sera émaillé de projections faites dans le cas artificiel du placement d'objets.



Sur le schéma-1 nous avons représenté les différents espaces proposés. L'espace ESP-c représente l'espace réel où évoluent les entités que nous observons. C'est dans cet espace que l'on définit et mesure des coûts de fonctionnement. Dans le cas du placement d'objets c'est dans cet espace que nous modifions la structure contextuelle des objets ; il peut s'agir de déplacer un serveur vers un groupe de clients ou dupliquer ce serveur ou au contraire dupliquer ou déplacer un client, mais aussi de regrouper des entités dans des unités structurantes comme les clusters qui, dans COOL v2 sont les unités de migration et de persistance.

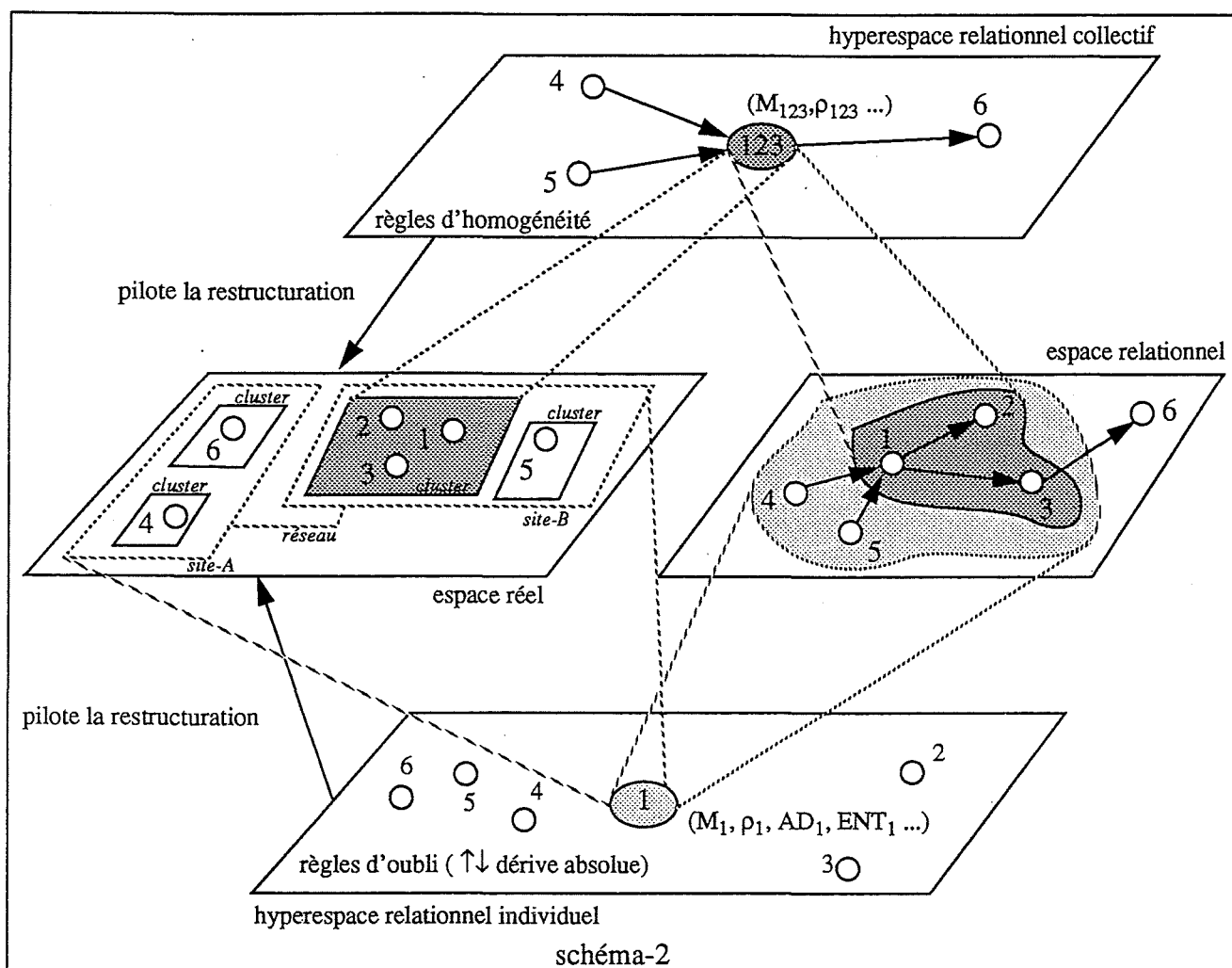
ESP-a est l'espace relationnel ; c'est là que l'on observe toutes les interactions entre les entités du système. Cet espace immatériel est le pendant de l'espace réel dans la dimension interactionnelle, puisqu'on voit dans cet espace toutes les interactions en cours et réalisées dans le passé.

Nous avons avec ces deux espaces les bases de la dualité matériel/immatériel dont nous avons parlé plus haut. Dans le cas du placement c'est dans l'espace réel que l'on va mettre les dispositifs permettant de capturer continuellement et automatiquement les informations nécessaires à l'espace relationnel pour mémoriser les interactions effectuées. On voit sur cet exemple le premier lien existant entre ces deux espaces.

Cependant l'univers relationnel ne se cantonne pas à cet espace relationnel (ESP-a) ; nous

proposons deux hyperespaces relationnels qui apportent une vision individuelle (subjective) des interactions,

c'est l'hyperespace relationnel individuel (ESP-b), et une vision collective de ces interactions ; c'est l'hyperespace relationnel collectif (ESP-d). On retrouve avec ces deux hyperespaces relationnels la dualité



fondamentale individu/collectivité présentée auparavant.

Sur le schéma-1 chaque individu du système voit à travers (petit rond noir) l'hyperespace relationnel individuel (ESP-b) une projection de l'espace réel (ESP-c) dans l'espace relationnel (ESP-a). De la même façon pour chaque forme collective (grand rond noir) dans l'hyperespace relationnel collectif (ESP-d), on voit à travers elle une autre projection de l'espace réel dans l'espace relationnel.

Sur le schéma-2 nous allons détailler un peu ces espaces et leurs rôles respectifs isolément et entre eux. Tout d'abord il faut rappeler que tous ces espaces de représentation des connaissances fonctionnent continûment, c'est-à-dire que les informations qu'ils recèlent, évoluent sans cesse pour suivre au mieux la réalité des interactions dans le substrat.

Sans trop détailler le statut exact de chaque espace nous allons en préciser quelque peu les contours.

Le modèle relationnel décrit en détail dans [Bourdon 92], définit les référentiels locaux d'accessibilité qui permettent de mesurer pour chaque entité l'influence relationnelle qu'elle joue avec son environnement à travers le substrat. Cette mesure subjective ou ego-centrique est représentée par un ensemble de paramètres relationnels locaux (masse relationnelle, densité, AD, ENT, vitesse de contraction moyenne, accélération ...). On voit bien dans le calcul de la masse relationnelle d'une entité quelconque que cette dernière se fait à partir de la simple « visibilité » que possède cette entité dans le substrat ; en effet les calculs utilisent toujours les parties constantes des masses relationnelles des entités qu'elle voit ou qui la voient. Ce détail que je ne vais pas développer ici est tout-à-fait fondamental dans l'équilibre général du modèle ; on retrouvera cette notion en développant le mécanisme « d'invariance perceptive » qui y fait conceptuellement appel.

Toujours dans le modèle relationnel on décrit les lois qui régissent la dynamique d'évolution de ces paramètres. Cette dynamique naît de la conjonction d'une force attractive due aux activations des interactions et d'une force répulsive s'opposant à la première, et dont le rôle est de distendre continuellement les liens relationnels afin

d'éviter des situations d'agréations définitives ; cette force répulsive appelée *entropie*, permet de modéliser un certain désordre ambiant, générateur potentiel d'ordre.

Ce détour par le modèle relationnel décrit dans [bourdon 92] est une bonne occasion pour parler du rôle de chacun des espaces présentés. En fait chacun d'eux possède des paramètres qui caractérisent les entités qu'ils représentent. Ces paramètres sont autant de dimensions pour l'espace en question. Dans cette approche évolutionniste, chaque espace possède également ses propres lois qui décrivent justement cette dynamique qui va permettre de faire évoluer ces paramètres en fonctions des événements réalisés dans le substrat. C'est ainsi que dans l'hyperespace relationnel local on retrouve les lois concernant les calculs de l'entropie globale (ENT) et de l'altitude dérivationnelle (AD) en fonction de la masse relationnelle.

L'espace réel possède aussi ses propres lois qui lui permettent de définir ses modalités de coût de fonctionnement et de restructuration dans l'exemple du placement d'objets. C'est grâce à la combinaison de lois de l'hyperespace relationnel local et de lois de l'espace réel que l'on va pouvoir construire des stratégies opérationnelles. Dans le cas du placement d'objets on peut prendre l'exemple d'une stratégie d'oubli ; elle consisterait à éliminer les entités dont les masses relationnelles sont en deçà d'un certain seuil minima. La destruction pourrait correspondre à un stockage dans une mémoire très périphérique.

L'hyperespace relationnel collectif va permettre de mettre en évidence les formes relationnelles collectives et par conséquent les formes collectives tout court, c'est-à-dire celles qui seraient observables dans l'espace réel. Avant de décrire son rôle et son fonctionnement vis-à-vis des autres espaces, nous allons parler un instant du mécanisme d'invariance « perceptive » qui joue un rôle important dans le comportement des individus au sein de la dualité individu/collectivité.

Chaque individu possède sa vision du substrat dans l'espace réel. Il possède également dans l'hyperespace relationnel individuel, sa vision de ses congénères via ses interactions avec eux, dans l'espace relationnel. Puisque ces visions sont subjectives, par extension de cette hypothèse chaque individu ne peut accéder à l'hyperespace relationnel collectif, qui est censé représenter une vision objective des interactions.

On peut décrire chaque individu comme une entité qui possède un couple sensori-moteur lui permettant d'interagir avec son monde extérieur (le substrat et ses congénères). Il existe plusieurs espaces moteurs. Celui qui nous intéresse ici est celui défini par la notion d'activation de liens relationnels entre individus ; il s'agit donc d'une projection de l'espace relationnel.

L'invariance perceptive consiste pour une entité donnée à différencier les modifications qu'elle observe dans le substrat et qui sont dues à sa propre action de celles qui dépendent d'actions effectuées par des entités tiers. La perception de ces changements a lieu dans la variété différentielle représentée par certains paramètres (paramètres locaux déjà cités) de l'hyperespace relationnel individuel. Dans l'exemple du placement, lorsqu'un client sollicite un serveur, il active le lien relationnel correspondant dans l'espace moteur (au sens sensori-moteur) via l'espace réel ; en effet il y a un déclenchement de méthode sur le serveur par le client à travers le réseau ... Le client voit sa propre vision du serveur changer dans l'espace relationnel ; c'est l'intensité relationnelle (IR) qui concrétise ce changement et permet de mettre-à-jour des paramètres locaux comme la vitesse moyenne de contraction relationnelle correspondante dans le client. En fait le client utilise un serveur et s'en construit une image subjective ; c'est comme si le client était le seul individu à faire appel aux services du serveur. En fait le serveur possède sa propre trajectoire « existentielle » qui se définit en termes relationnels, très précisément dans l'hyperespace relationnel individuel, par les paramètres locaux comme la masse, la densité ... Consécutivement à l'activation d'un lien entre ces deux entités, le serveur peut renvoyer au client l'image de son déplacement dans l'hyperespace relationnel individuel. C'est une position propre au serveur, mais qui intègre toutes ses actions y compris celles avec le client. La valeur de cette nouvelle position n'a pas de signification quantitative pour le client, par contre elle est extrêmement riche qualitativement, puisqu'elle renseigne sur l'évolution du serveur. C'est là que l'on pourrait parler d'orbites dans l'espace sensoriel du client sur lesquelles le client prévoit l'évolution du serveur en fonction des interactions qu'il opère avec ce dernier dans l'espace moteur (celui des interactions). Autrement dit pour des interactions types, le client connaît le comportement type associé du serveur sans pour autant être capable de donner un sens à ce comportement ; cette connaissance est suffisamment précise pour que le client reconnaisse le serveur parmi plusieurs rien qu'en confrontant ses réactions à des interactions aux orbites décrites dans son espace sensoriel.

Sans s'engager trop vers des chemins spéculatifs, on pourrait penser que des entités autonomes (comportements propres et évolutifs) qui ne se sont jamais rencontrées jusqu'alors, puissent se composer entre elles, par interactions interposées, pour former ce que l'on pourrait appeler une forme collective, si le comportement de l'une correspond en terme d'orbite précédemment introduite, au comportement attendu par l'autre. Cette question n'empêche pas d'imaginer que des entités autonomes puissent évoluer par leur propre expérience. En effet la notion d'apprentissage pourrait consister pour une entité donnée, à construire vis-à-vis d'une entité cible, c'est-à-dire en interaction avec la première, l'orbite comportementale qui caractériserait à ses yeux cette entité cible. L'apprentissage consisterait donc à être capable de caractériser la chose à apprendre, donc nécessairement perçue préalablement dans son espace sensoriel. Cette caractérisation serait la trace mnésique essentielle (basic) à construire pour mémoriser cette entité.

Revenons à la description de nos espaces, et plus particulièrement à celui que l'on appelle l'hyperespace relationnel collectif, grâce auquel les formes devraient pouvoir être observées.

Nous avons vu jusqu'ici que chaque individu possède sa propre vision/perception du milieu dans lequel il se développe. Cette vision ego-centrique qu'ils partagent tous avec eux-mêmes, n'empêche pas la réalité d'oeuvrer. En fait c'est dans cette réalité qu'existe une ou plusieurs collectivités. Les référentiels locaux d'accessibilité décrits dans le modèle relationnel rendent bien compte de cette vision nombriliste du monde ; notion qui est déjà exploitable en tant que tel moyennant quelques règles adhoc dans l'hyperespace relationnel individuel et l'espace réel. Un exemple simple est celui de l'élimination en mémoire secondaire sur un serveur d'archivage lointain d'un serveur qui n'aurait plus de clients (masse relationnelle infiniment petite). Mais ces référentiels locaux d'accessibilité sont incapables de décrire un phénomène collectif, c'est-à-dire qui touche dans une relation de type causale, plusieurs individus.

C'est dans cette perspective que nous étudions la théorie des catégories, dont le but ici serait de décrire ce que l'on appelle des chemins d'excitations. Un chemin d'excitation est l'ensemble des individus qui ont été activés entre eux consécutivement à une excitation initiale par l'un deux. Sans détailler cette approche ici, ce chemin d'excitation serait représenté par un pattern catégoriel dont son représentant (limite) posséderait un certain nombre de caractéristiques et serait défini dans l'hyperespace relationnel collectif. Grâce aux propriétés de commutativité et de compositionnalité offerts par les catégories, cet hyperespace permettrait donc de représenter un nouveau partitionnement du graphe relationnel, dont les éléments de base ne seraient plus les référentiels locaux d'accessibilité comme ce fût le cas dans l'hyperespace relationnel individuel, mais ce que l'on appelle des formes relationnelles. Ces formes représentent des combinaisons de parties de référentiels locaux d'accessibilité. La puissance de la théorie des catégories nous permet de décrire une certaine forme de recompositionnalité des entités décrites dans l'espace relationnel de base. En effet on peut créer des liens entre limites, pour cela il faut montrer qu'il existe bien une gerbe entre les patterns correspondants ; et par conséquent on peut identifier des limites de limites.

On imagine bien l'utilité primordiale de cet hyperespace dont le rôle majeur est de servir d'intermédiaire entre l'espace relationnel et l'espace réel, en intégrant un point de vue collectif. Alors que dans l'espace relationnel corésident des points de vues subjectifs sur le milieu, cet hyperespace cristallise une relecture collective et donc objective de ces visions individuelles. Cet hyperespace n'échappe pas à la règle *de fait* qui consiste à ce que tout espace possède ses propres règles de fonctionnement/évolution. L'une des règles importantes identifiée à ce jour dans le cas particulier du placement est celle du principe d'évolution homogène. Pour qu'un pattern catégoriel perdure (existe) il faut que le chemin d'excitation correspondant possède une évolution relationnelle homogène dans le temps. D'autres règles vont alors décrire à partir de quand cette homogénéité n'est plus observée (rupture/accident) ; pour cela on utilisera des paramètres relationnels comme la densité relationnelle d'une forme. Cela signifie qu'une forme peut se déformer dans certaines conditions sans pour autant qu'elle soit considérée comme une autre forme. Pour réaliser efficacement les mécanismes de détection des ruptures d'homogénéité on peut recourir aux mécanismes d'invariance sensorielle ; ici le contexte n'est plus le même que dans le cas des hyperespaces relationnels individuels ; mais l'application de ces mécanismes est symétrique de celle vue précédemment, dans la mesure où c'est l'entité collective qui joue le rôle de l'individu ; en effet l'espace sensoriel ne se limite pas à la vision subjective d'un individu sur le milieu mais à celle de l'ensemble de la forme collective qui peut par nature recouvrir une combinaison de sous-ensembles de points de vue individuels.

Nous avons dit que cet hyperespace fait le lien avec l'espace réel dans une perspective collective. Dans le cas du placement nous cherchons à minimiser les coûts de fonctionnement des serveurs sur les réseaux dans la mesure où les serveurs sont répartis et potentiellement partageables par des clients eux-mêmes répartis. Sur le système que nous étudions l'unité structurante de base pour la persistance et la migration d'objets est le cluster. Un cluster possède un nombre variable d'objets. Il permet de regrouper des objets fortement liés entre-eux, afin d'optimiser le stockage sur disque et la migration. Si l'on a besoin de l'un des objets du cluster, on aura probablement besoin aussi des autres objets du cluster, donc la migration se fait sur tout le cluster même si elle n'a été explicitement sollicitée que sur l'objet initial. Dans cet exemple extrêmement concret et contraint, c'est la règle d'évolution homogène de l'hyperespace relationnel collectif appliquée à la gestion des clusters (règle de l'espace réel) qui va permettre de piloter les actions à mener dans l'espace réel pour favoriser son évolution dans la direction d'une minimisation des coûts de fonctionnement globaux. Dans l'exemple du placement d'objet, si nous n'avions pas cet hyperespace relationnel collectif, et par conséquent les règles associées (évolution homogène ...) qui vont avec, il n'émergerait jamais de formes collectives capables de gérer dynamiquement les clusters en fonction de ce qui arriverait dans le système. De tels mécanismes pourraient conduire entre autre à des migrations d'objets, oscillatoires entre sites (va-et-vient). En fait la restructuration serait toujours envisagée dans une perspective subjective conduisant probablement dans les minima locaux correspondants.

Dans cette perspective il nous semble important pour que des formes collectives puissent émerger (systèmes artificiels) ou être explicitées (systèmes naturels) dans une organisation collective quelconque, que l'on soit capable de définir l'hyperespace relationnel collectif correspondant. Cette définition signifie avant tout une description des lois qui régissent l'évolution des entités dans cet hyperespace et la correspondance avec les lois de l'espace réel ; ceci permettrait donc d'expliquer le passage de la collectivité immatérielle (processus décisionnels) à la réalité (mise en oeuvre).

Bibliographie

[Bourdon 92] François Bourdon, "Un modèle de dérive des connaissances. Application en bureautique." Thèse de Doctorat de l'université du Maine, spécialité Informatique/Intelligence Artificielle. 15 juillet 1992, Le Mans.

[Bourdon 94] François Bourdon, "The Automatic Positioning of Objects in COOL v2", 14th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-14), juin 1994, Poznan.

[Rodger 93] Rodger Lea, Christian Jacquemot, Eric Pillevesse, "COOL : Systeme support for distributed programming", Communication of the ACM, Sept. 93, Vol. 36 n°9.

Théorie des Jeux et Réseaux de Neurones

Renaud CAZOULAT

LAIAC
Université de Caen,
Esplanade de la Paix
14032 CAEN Cedex - France
e-mail: Renaud.Cazoulat@info.unicaen.fr

Frédéric PETIT-SINGEOT

Division PEAN / ELAN,
CEMAGREF d'Anthony,
Parc de Tourvoie,
92185 ANTONY Cedex - France
e-mail: Frederic.info.unicaen.fr

1 Introduction

Le comportement d'agents impliqués dans un processus d'interactions décisionnelles est une branche complexe des sciences cognitives. La difficulté est liée à la dynamique des interactions et à la dynamique de réplication. Il faut étudier comment un agent peut modifier son comportement en fonction des variations de l'environnement, afin de se maintenir dans son domaine de viabilité : l'agent doit notamment posséder des capacités d'apprentissage et d'adaptation. Ces capacités résultent de la nécessité, pour l'agent, d'adapter son comportement face aux perturbations de l'environnement. La difficulté principale de cette étude provient de l'interdépendance du comportement et de l'environnement : toute modification de comportement influence l'environnement, qui provoque une modification du comportement de l'agent. De plus, le mécanisme de réplication introduit une dynamique supplémentaire qui complique encore l'étude du système.

La Théorie des jeux peut difficilement rendre compte de la complexité qui résulte de l'interaction entre de nombreux agents. Néanmoins, elle propose un cadre formel intéressant pour l'étude des interactions entre agents autonomes [35].

Les techniques empruntées à la Vie Artificielle permettent, grâce à l'élaboration de simulations informatiques, de vérifier les hypothèses émises par les travaux issus de la Théorie des jeux. Ces simulations peuvent être assimilées à de véritables expérimentations dont il est possible de remettre en cause l'ensemble des paramètres initiaux. Grâce à l'emploi d'une représentation adéquate, il devient possible d'observer la dynamique d'évolution d'un système multi-agent. Notre thème actuel de recherche est le développement d'une méthodologie d'étude des interactions et des mécanismes d'adaptation au sein d'un groupe d'agents.

Dans ce contexte, nous nous proposons d'étudier un exemple connu : le *dilemme du prisonnier*. Basée sur les paradigmes de l'autonomie et de la réplication, la réalisation informatique que nous présentons simule les interactions entre des agents possédant une plasticité entre perceptions et actions. Ce

type d'étude rejoint les préoccupations de l'Economie Artificielle qui veut, entre autres, étudier les processus de négociations.

Après avoir présenté le dilemme du prisonnier dans le contexte de la Théorie des jeux, nous verrons comment exprimer ce problème dans un formalisme différent : celui de la Vie Artificielle. A partir d'une réalisation informatique, nous décrirons les résultats obtenus. Enfin, nous essaierons de décrire les possibilités de cette méthode.

2 Théorie des jeux, Dilemme du prisonnier et Vie Artificielle

2.1 Théorie des jeux

La Théorie des jeux a pour objectif l'étude et l'analyse des processus décisionnels et des interactions stratégiques dans un environnement multi-agents. L'objectif à terme est la résolution de la situation conflictuelle étudiée. La formalisation d'un jeu consiste notamment à spécifier :

- le nombre de joueurs,
- l'espace des stratégies induites par les règles du jeu,
- la fonction d'utilité qui permet de déterminer le gain acquis par un joueur dans une situation donnée, et donc le gagnant.

L'objectif de cette modélisation est d'arriver à déterminer l'existence et les propriétés des points d'équilibre vers lesquels des joueurs rationnels sont supposés se déplacer pour parvenir à un accord. Le but principal des fondateurs de la Théorie de jeux était de donner une définition précise au concept de rationalité afin de caractériser les équilibres résultants des interactions individuelles [34].

Néanmoins, un certain nombre de facteurs ne sont pas pris en compte pour la détermination de ces équilibres, notamment :

- la dynamique d'apprentissage,
- la rationalité limitée,
- la spatialisation.

C'est pourquoi, il est difficile de retrouver les états stables prédits par les modélisations dans les expériences économiques. C'est dans cette optique qu'un certain nombre de travaux [29] se sont orientés vers l'étude de la temporalité et de la dynamique d'apprentissage liées aux interactions entre joueurs. La tendance actuelle est plutôt de considérer les interactions entre agents durant un jeu comme un processus dynamique et d'étudier les convergences des stratégies vers un éventuel équilibre.

	Coopérer	Trahir
Coopérer	(R,R)	(S,T)
Trahir	(T,S)	(P,P)

Fig 1 Matrice des gains

	Coopérer	Trahir
Coopérer	(2,2)	(0,3)
Trahir	(3,0)	(1,1)

Fig 2 Matrice des gains utilisée pour les simulations

2.2 Le dilemme du prisonnier

Le dilemme du prisonnier est un jeu bilatéral qui permet l'étude de l'auto-organisation d'une communauté d'agents. Celle-ci peut s'effectuer notamment par l'analyse des processus de coopération et des comportements altruistes privilégiant l'intérêt collectif (Pareto-optimales). Le dilemme du prisonnier tel qu'il est énoncé par Flood [14] est le suivant :

"Two prisoners, separately interrogated, who may confess to a moderate crime in common, or accuse each other of a heavy crime, an accuser going free unless himself accused, the accused one or ones receiving heavy sentence."

Chaque joueur doit choisir une des deux actions possibles : Coopérer (C) ou Trahir (T). Les gains acquis par chacun des joueurs sont déterminés en comparant les actions choisies simultanément par les deux joueurs et en fonction de la matrice de gains définie à la figure 2. Bien évidemment, le jeu n'a d'intérêt que s'il est répété plusieurs fois, avec les deux mêmes joueurs ou avec plusieurs joueurs différents.

Le gain R (resp. P) représente la récompense (resp. la Punition) attribuée aux deux joueurs lorsqu'ils cooptent pour la coopération (resp. la Désertion). Le gain T correspond à la tentation de Trahir devant un joueur choisissant la stratégie Coopérer. Ces gains doivent de plus obéir aux relations suivantes : $T > R > P > S$ et $2R > T + S$. La matrice de la figure 3 est un exemple vérifiant ces relations, et servira pour les simulations ultérieures.

Le dilemme ne repose pas sur la valeur absolue des gains mais sur les *relations* qui existent entre eux. En effet cette matrice est composée de telle sorte qu'un joueur rationnel choisisse la trahison (avec un gain possible de 1 ou 3, soit 1.5 en moyenne si le jeu adverse est équiprobable). Inversement, si la tactique est la coopération complète, le gain est de 0 ou 2, soit 1 en moyenne. Entre ces deux extrêmes, il existe de nombreuses tactiques qui doivent permettre d'optimiser globalement les gains.

	Trahison	Aléatoire	Coopération
Trahison	1 \ 1	2 \ 0.5	3 \ 0
Aléatoire	0.5 \ 2	1.5 \ 1.5	2.5 \ 1
Coopération	0 \ 3	1 \ 2.5	2 \ 2

Fig 3 Gains moyens par joueurs

	Trahison	Aléatoire	Coopération
Trahison	1	1.25	1.5
Aléatoire	1.25	1.5	1.75
Coopération	1.5	1.75	2

Fig 4 Gains moyens par stratégies

Le jeu n'est pas à somme nulle. Ce fait est important car il indique que les gains ne sont pas compensés par les pertes mais qu'une certaine somme est distribuée à chaque tour de jeu. La valeur de cette somme dépend du choix des deux joueurs. Il est facile de calculer le gain moyen par joueurs pour quelques tactiques de base : coopération pure, trahison pure et l'aléatoire.

La matrice des gains moyens (figure 5) du mini-système composé des deux joueurs permet de constater que le gain est maximisé pour la coopération bilatérale, et qu'il est minimisé pour la trahison bilatérale. L'aléatoire se positionne entre ces deux dernières tactiques.

Si les itérations ont lieu entre deux mêmes joueurs, ces derniers peuvent utiliser des tactiques prenant en compte l'historique. Ce qui permet d'établir des stratégies basées sur la confiance ou la méfiance, le pardon, la revanche, ...

Une stratégie particulière mérite un peu d'attention : Le *Tit-For-Tat*. Cette stratégie a reçu ce nom car elle consiste à d'abord coopérer, puis à imiter le comportement précédent de l'adversaire.

Cette stratégie a été plus particulièrement étudiée par Axelrod [3] qui, en employant des simulations informatiques, a montré que le tit-for-tat était une bonne stratégie. Avec Hamilton, il a tenté d'expliquer l'évolution de la coopération dans le cadre des interactions biologiques grâce au mécanisme de réciprocité. Cette approche s'est révélée très fructueuse et si elle ne constitue pas l'unique paradigme, elle est certainement la plus répandue [21].

On peut facilement voir qu'il existe deux points fixes dans cet *espace des stratégies* : la coopération pure (*CP*) et la trahison pure (*TP*).

- Le point *TP* est attracteur et correspond à un équilibre de Nash (qui privilégie l'intérêt individuel). Le gain moyen est *minimal*.
- Le point *CP* est instable car tout traître dans un système composé de coopérant va rapidement se développer. Ce point correspond à un équilibre de Paréto (qui privilégie l'intérêt collectif). Le gain est *maximal*.

Entre ces deux stratégies extrêmes, il existe toutes les stratégies intermédiaires dont le gain moyen est compris entre le minimum et le maximum. Il est fortement probable que ces stratégies intermédiaires peuvent elles aussi conduire à des équilibres. Les difficultés de l'étude mathématique de ces systèmes rendent celle-ci rédibitoire. L'unique possibilité reste l'expérimentation via des simulations.

Plus récemment des travaux ont été réalisés sur la *spatialisation* du Dilemme du Prisonnier. Cette version du jeu consiste à répartir une population de joueurs sur une surface et à faire jouer les agents avec leurs voisins immédiats. On peut alors étudier l'influence de l'environnement sur l'auto-organisation de la communauté des agents et l'influence de la spatialisation sur la co-évolution d'espèces de stratégies.

Parmi ces travaux, Nowak et May [25] ont présenté un ensemble de résultats surprenants concernant l'évolution de la coopération dans le cas d'un environnement composé de joueurs au comportement déterministe simple ; ces joueurs étant répartis sur un espace à deux dimensions. A chaque tour du jeu, chaque élément joue avec l'ensemble de ses voisins immédiats : le gain total de chacun des joueurs correspond à la somme des gains élémentaires obtenus avec les voisins. Une dynamique de réplication est alors appliquée pour obtenir une nouvelle génération sur l'espace : une sélection naturelle est appliquée sur la population en choisissant pour fonction d'utilité la maximisation du gain obtenu. La réplication des plus aptes se fait alors aux dépens des plus faibles.

Dans le cas d'une dynamique synchrone de réplication, cet environnement simple donne lieu à des mécanismes d'oscillations entre les deux espèces de stratégies pures C et T : les deux populations de stratégies coexistent indéfiniment dans des proportions constantes et entraînent l'apparition d'attracteurs étranges. Les simulations sur ordinateurs permettent d'observer des phénomènes d'auto-organisation tout à fait surprenants¹. Néanmoins, les hypothèses émises sur l'aspect territorial et sur l'universalité de l'émergence de la coopération sont remises en cause dans le cas d'une dynamique asynchrone [17], la stratégie dominante étant la stratégie T .

Bien que le comportement global de ce système soit intéressant, il semble prématuré de parler de réel comportement stratégique. En effet, un joueur se borne à imiter le comportement du plus fort à un instant donné. Il serait intéressant de doter ces joueurs simulés de la possibilité d'adopter une vraie stratégie.

3 La simulation

La simulation² qui va être décrite utilise sur un générateur de programme développé au L.A.I.A.C.. Ce générateur permet de créer des simulations basées

1. La représentation graphique des comportements stratégiques permet de voir apparaître des motifs graphiques caractéristiques [24].

2. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre des objectifs de l'association ARVA (Association pour la Recherche en Vie Artificielle, E-mail : ARVA@univ-caen.fr). Cette association loi 1901 a été créée afin de favoriser la promotion de la Vie Artificielle en France et tout particulièrement les échanges inter-laboratoires pour les aspects liés à la programmation [5].

sur des agents à partir d'une description de ceux-ci. Le langage qui permet de décrire ces agents est inspiré des techniques de la Vie Artificielle et permet la déclaration et l'utilisation de modules perceptifs, de variables internes et de mécanismes de réplication avec différenciation, etc... Les agents évoluent sur un damier dont les bords se rejoignent (c'est à dire un tore). Le contrôle de la simulation est assuré via une interface graphique qui permet également d'avoir une représentation visuelle de l'état et de la dynamique du système.

3.1 Composantes de la simulation

Le principe employé est l'autonomie. Chaque joueur est un agent indépendant qui interagit avec les autres agents. Le langage de description utilisé permet de décrire facilement de tels agents. Un traducteur transforme cette description en programme exécutable doté d'une interface graphique qui permet de placer des agents sur le terrain et de les activer. Il suffit de définir la composition et le fonctionnement des agents, puis de les décrire avec le langage.

Les agents sont donc disposés sur un tore et jouent avec chacun de leurs 8 voisins. Une *itération* est la phase qui consiste à utiliser une des deux tactiques avec chaque voisin avec cumul des gains obtenus. Un *cycle* est composé de N itérations et d'une phase de réplication mimétique des agents les plus performants : un agent adopte la stratégie du voisin dont le gain est supérieur au sien. Si l'ensemble de ses voisins ont obtenu un gain inférieur, il conserve la stratégie qu'il a adopté durant cette phase de jeu. Lors de la réplication, la stratégie d'un agent est susceptible de subir des modifications.

Chaque agent doit percevoir l'état des ces voisins, c'est à dire :

- leur gain courant, que l'on peut assimiler à la grosseur de l'agent,
- la stratégie qu'ils ont utilisé lors du dernier cycle, que l'on peut assimiler à leur attitude, agressive (trahison) ou amicale (coopération).

Plusieurs variables internes sont nécessaires. Celles-ci sont principalement :

- le gain courant de l'agent,
- la dernière stratégie jouée avec chaque voisin.

Le comportement stratégique de l'agent est déterminé par un réseau de neurones à couche cachée. Le choix d'utiliser un réseau de neurones a été motivé par plusieurs raisons :

- Il est facile de lui appliquer des opérateurs issus des algorithmes génétiques [15]. En effet, les poids des connexions d'un réseau suffisent (pour une architecture donnée) à décrire complètement ce réseau [9] [30]. Cette liste de poids fait alors office de génotype.
- La dynamique des réponses du réseau semble être suffisamment riche pour permettre à l'agent de réagir aux perturbations de l'environnement en adoptant un comportement adéquat.

- Il est facile d'introduire une récurrence dans le fonctionnement du réseau en lui ré-injectant sa dernière valeur en sortie dans un des neurones d'entrée.
- le nombre des possibilités en entrée est suffisamment grand pour rendre prohibitif l'utilisation d'une table d'états.

Le réseau de chaque agent va posséder les entrées suivantes :

- Le gain de l'adversaire,
- le gain de l'agent,
- la dernière action de l'adversaire,
- la dernière action de l'agent avec cet adversaire.

La sortie du réseau détermine la nouvelle stratégie à employer, un calcul de réseau est nécessaire pour chaque voisin.

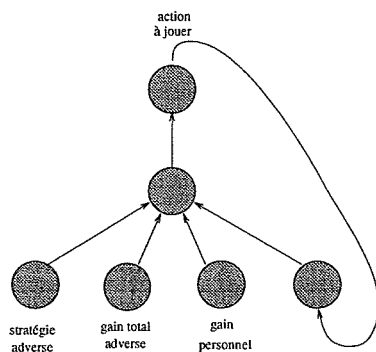


Fig 5 Architecture du réseau à couches

Lors de la duplication, le clone hérite d'un réseau identique à celui de son père, avec éventuellement une *mutation*, qui consiste à modifier aléatoirement la valeur d'un des poids choisi lui aussi aléatoirement. Associée au mécanisme de remplacement, cette modification va entraîner la sélection de type particulier de réseaux. Le problème le plus difficile est d'analyser ces réseaux afin de comprendre pourquoi ils se sont ainsi diffusés ou tout du moins perpétués.

Les réseaux de neurones peuvent être vus comme des répliqueurs plus ou moins semblables et dont la diffusion sur le tore peut difficilement être modélisée, en raison de la complexité de leur dynamique de fonctionnement. C'est pourquoi, nous allons utiliser ces répliqueurs afin d'étudier la répartition des différents réseaux.

3.2 Représentation graphique des actions

Afin d'avoir une idée globale des actions effectuées par les agents, nous avons représenté chaque agent par un groupe de neuf petits carrés. Les huit carrés des

bords représentent, via un codage des couleurs, les deux dernières actions avec le joueur se trouvant dans la même direction.

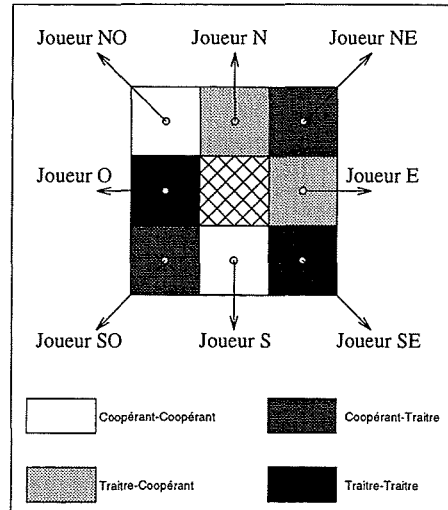


Fig 6 Représentation d'un agent

Le petit carré central sert à représenter le gain cumulé de l'agent au fur et à mesure des itérations par un dégradé du noir (gain nul) au blanc (gain maximum).

Cette représentation à l'avantage de permettre de suivre les diverses zones d'influence entre les agents en "temps réel" et de voir instantanément l'état du système.

3.3 Espace génotypique et espace phénotypique

Les agents avec leur réseaux peuvent être considérés comme des répliqueurs. L'étude des systèmes de répliqueurs, bien que simples dans cette simulation pose déjà des difficultés mathématiques importantes. La difficulté principale provient de la nécessité de décrire l'évolution des différentes espèces de répliqueurs. Cette étude demande tout d'abord de connaître les différentes espèces présentes, en utilisant un espace de représentation pertinent.

On se propose d'utiliser l'espace défini par le codage des poids des réseaux, caractéristique de l'espèce d'agents étudiée. Notre choix porte sur l'utilisation d'une distance [13], au lieu d'une valeur (comme le gain cumulé de chaque agent). Cette solution nous paraît plus adaptée au problème abordé.

Le génotype, représenté par des caractères, peut être vu comme un mot dans un alphabet donné. L'ensemble des mots g qui peuvent être exprimés correspond à un espace des génotypes, noté G . La chaîne pouvant être lue de manière aléatoire, l'énumération de telles séquences peut être vue comme une bijection entre les séquences de gènes et les entiers positifs.

On a donc : $G = g_0, g_1, \dots, g_n$ avec $g_k = (z_1^k, z_2^k, \dots, z_v^k)$ où z_i^k est la lettre à la i ème position de la séquence $g_k \in G$ et v la longueur de la chaîne. Comme

l'espace G est un espace métrique, une distance peut être définie entre deux éléments.

Dans ce but, on utilise une distance de Hamming généralisée de la manière suivante :

$$d(g_k, g_l) = \min_j \sum_i \delta(z_i^k, z_{i+j}^l)$$

avec $\delta(a, b)$ la fonction de Kronecker.

Cette distance représente alors le nombre minimal de non-coïncidences entre les deux séquences en question. Cette distance remplit les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} d(g_k, g_l) &= 0 \text{ si } g_k = g_l, \\ d(g_k, g_l) &\leq d(g_k, g_j) + d(g_j, g_l), \\ d(g_k, g_l) &= d(g_l, g_k) \end{aligned}$$

On peut introduire ainsi la notion de paysage évolutif à partir de l'espace génotypique.

3.4 Représentation de la dynamique de réplication

La différence entre chaque agent concernant uniquement les poids de leur réseau, la topologie des connexions étant fixe. Pour caractériser graphiquement un réseau, il faut utiliser une représentation permettant de passer d'un espace à n dimensions, dans lequel chaque dimension représente un poids du réseau, à un espace à une dimension caractérisant globalement le réseau. Pour cela nous allons utiliser une méthode qui va conserver la proximité chromatique en fonction de la continuité génotypique. Ainsi, il est possible d'afficher une carte bidimensionnelle où chaque point caractérise le réseau. La représentation choisie est basée sur la distance de Hamming associée à une gamme chromatique correspondant à une variation des couleurs dans un repère H.S.L.³. En effet, cette distance permet de quantifier la somme des différences de poids entre deux réseaux. L'algorithme prend la forme suivante :

- Phase initiale : A chaque nouveau réseau dont les poids sont initialisés aléatoirement, on associe arbitrairement une couleur dans la gamme chromatique.
- Phase de réplication : A chaque nouveau réseau dont les poids sont déterminés par la dynamique de réplication moyennant un facteur de diffusion, on associe la couleur de l'agent parental décalé d'un facteur, fonction de la distance de Hamming.

Il devient possible d'observer des espaces topographiques colorés qui reflètent des espaces génotypiques similaires. Cette méthode a malheureusement quelques désavantages :

- Elle ne permet pas de différencier deux nouvelles *souches* lorsqu'elles sont équidistantes (au sens de Hamming) de leur parent.

3. H.S.L. : Hue Saturation Lighness

- Elle ne permet pas de différencier deux agents créés avec une couleur différente lors de la phase initiale mais possédant deux réseaux similaires.

Au départ, la carte est constituée de points de couleurs aléatoires; au cours des phases de réplication, on peut voir apparaître des zones de couleurs homogènes, caractérisant la diffusion topographique d'un réseau. De plus, à cause des mutations sur les poids des réseaux, des points de couleurs proches vont apparaître dans ces zones. Ces variations caractérisent l'apparition de nouveaux réseaux au comportement proche. Ce mécanisme permet de suivre les phases de différenciation, de diffusion et de régression de la population des réseaux.

4 Paramètres des expérimentations

Les résultats des expérimentations dépendent de plusieurs facteurs dont nous allons essayer de dégager l'influence sur le comportement global de la simulation :

- Les conditions d'initialisation de chaque nouvel agent, en particulier sa dernière stratégie, qu'il n'a bien évidemment pas pu produire.
- La taille de la simulation, c'est à dire le nombre d'agents.
- Le type de réseau de neurones.
- Le taux des mutations.
- L'action dont a besoin le réseau pour sa récurrence lors de la toute première itération.

Pour observer la dynamique de la simulation nous disposons de quelques critères objectifs :

- Le gain moyen de chaque agent entre deux phases de réplifications. Il peut évoluer entre deux valeurs: 8 (8×1) (trahison totale) et 16 (8×2) (coopération totale).
- Le nombre de remplacements lors de chaque phase de réplication.
- La carte chromatique du paysage *génétique* de la population d'agents.
- La représentation des huit actions de l'agent à chaque itération par une matrice carrée de dimension 3.
- Un panneau de contrôle qui récapitule toutes les caractéristiques d'un agent et à partir duquel n'importe quel agent peut être inspecté, modifié ou sauvegardé.

4.1 Taille de la simulation

Nous avons constaté que l'influence de la taille de l'environnement est peu significative pour des dimensions supérieures à 10×10 . En dessous de cette taille, le nombre d'agent est un peu trop faible pour observer des phénomènes complexes d'interactions. Il est intéressant de constater une certaine invariance de comportement devant le nombre d'agents, qui peut s'expliquer par le caractère local des interactions. Pour des raisons de rapidité d'exécution, nous nous sommes limités à une dimension de 20×20 pour la majorité des expérimentations.

4.2 L'initialisation

Le calcul d'une itération dépendant des poids du réseau et des activations précédentes, il se pose un problème lors de la création d'un agent puisque celui-ci n'a jamais été activé. Il est alors nécessaire d'initialiser le réseau comme si l'agent avait joué la fois précédente avec une action A_0 choisie arbitrairement. Nous avons expérimenté quatre sortes d'initialisations :

Amicale : A_0 a comme valeur la coopération.

Agressive : A_0 a comme valeur la trahison.

Génétique : au départ la valeur de A_0 est aléatoire, puis le choix est laissé aux aléas de la pression évolutive.

Aléatoire : la valeur de A_0 est tirée aléatoirement à chaque création.

4.3 Le réseau de neurones

Le type de réseau utilisé est un réseau à couches. Le nombre des entrées est fixé par les informations que l'on veut donner au réseau (c'est-à-dire les 4 données décrites précédemment). La sortie donne l'action que va faire l'agent avec son voisin. Le choix du nombre de neurones cachés se base sur le nombre d'hyperplans que l'on pense créer dans l'espace des stratégies. Un neurone caché peut construire deux hyperplans et doit générer des stratégies assez simples.

La normalisation des entrées est extrêmement importante car elle conditionne le fonctionnement du réseau, en particulier il est préférable d'étaler au maximum les stratégies. L'entrée d'un réseau est comprise entre -1 et 1 , ce qui impose un changement d'échelle entre le gain cumulé g et l'entrée associée e suivant le nombre d'itérations dans une phase de jeu. Sachant que le gain maximum avec la matrice définie ci-avant, on obtient pour n itérations : $e = \frac{g \times 2}{n \times 24} - 1$. Comme le gain peut s'exprimer comme n fois un gain moyen, le résultat est relativement indépendant du nombre d'itérations, si ce n'est pour la précision du calcul et le nombre minimum d'itérations dont le système a besoin pour se stabiliser. Ainsi, il n'est pas utile de choisir un nombre d'itérations élevé, une valeur d'environ trente est suffisante.

Il est possible d'effectuer des mutations sur les poids du réseau, mais la mutation n'est pas un facteur primordiale pour cette simulation, mais elle permet de "figurer" les agents et l'amélioration n'est perceptible qu'au travers du

gain moyen. De plus, la dynamique est telle que si le système est stabilisé sans mutations, la mise en place du mécanisme des mutations ne permet plus de faire évoluer le système. Il est donc primordial d'utiliser les mutations dès le lancement de la simulation. Nous nous sommes arrêté sur une valeur de $1/100$ pour le taux de mutation. Cette valeur est un bon compromis entre un taux de mutation trop important qui empêche toute convergence et un taux trop faible empêchant de sortir d'un état stable non optimal.

5 Résultats

Il est possible d'observer la simulation suivant plusieurs critères : la répartition topologique des tactiques, les actions locales entre les agents, le gain moyen par agent et le nombre de reproduction par cycle. Les observations effectuées sont différentes suivant la valeur de la première action A_0 , mais quelques résultats observables sont constants :

- Le nombre de réplication par cycle est d'environ 75%. Sauf pour un système composé de traîtres purs.
- Les stratégies construites par le réseau sont indépendantes du nombre de neurones cachés (les tests ont portés sur des réseaux ayant de un à quatre neurones cachés).
- Le taux des mutations n'influe pas notablement sur le gain moyen s'il reste dans une fourchette convenable (entre $\frac{1}{1000}$ et $\frac{5}{100}$). Il n'influe plus du tout une fois que le système a atteint un point d'équilibre.

Nous allons maintenant décrire les différents comportement du système en fonction de l'initialisation de A_0 .

5.1 Initialisation agressive

L'observation des résultats est sans équivoques : le système converge rapidement vers le point TP où tous les joueurs trahissent leurs voisins. Comme chaque joueur a un gain identique à son voisin, le système ne peut plus évoluer. Cette initialisation est donc d'un intérêt assez faible.

5.2 Initialisation amicale

La dynamique, dans ce cas, est très particulière et conduit à l'observation d'une organisation à l'intérieur du système.

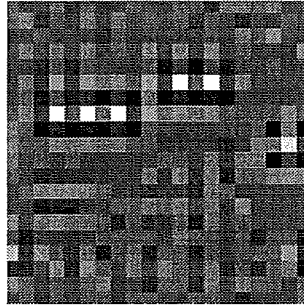


Fig 7 répartition du gain en fin de cycle

5.2.1 Topologie de l'organisation

Le premier résultat observable est l'apparition de plusieurs zones de types différents, après le premier cycle de jeu. Ce premier cycle va éliminer la plus grande partie des réseaux les plus faibles (du point de vue du gain). Il est possible de dégager quatre types principaux, par ordre d'importance en nombre d'agents :

- Le premier type de zone est composé d'agents dont la stratégie est la plus simple possible : la trahison pure. Ce type est de loin le plus répandu. Cela s'explique facilement par le fait que ce type de stratégie correspond à un équilibre de Nash.
- Le deuxième type de zone est composé d'agents dont la stratégie est également simple : le "tit-for-tat". Cette stratégie se caractérise par l'alternance des couleurs jaune et bleu. Les actions, pour un agent donné, ne sont pas forcément isotropes, mais l'alternance est constante.
- Le troisième type de zone est composé d'agent dont l'action est relativement stable au cours du cycle, mélange de coopération et de trahison. Ce type de stratégie s'avère néanmoins intéressant, malgré son coté statique.
- Le quatrième type n'apparaît qu'en début ou fin de cycle : des agents qui étaient traitres purs se mettent à coopérer avec certains de leurs voisins, en adoptant la stratégie de la deuxième ou de la troisième zone. Cette stratégie fait apparaître la notion de seuil. En effet le moment de cette apparition est indépendant du nombre d'itérations choisies pour le cycle, à cause du renormage des entrées du réseau. Ce type de stratégie accélère la dynamique du système complet en permettant l'expansion des zones stables.

Tout au long des cycles, l'organisation des agents va se mettre en place. A la fin du premier cycle, il ne reste que des traitres purs avec quelques îlots

d'agents de type 2 et 3. Le gain moyen est alors proche de 8. Les agents de type 3 vont se reproduire de façon à remplacer les espaces importants (en superficie) de traitres purs.

5.2.2 Les zones stables

La principale caractéristique de la dynamique de fonctionnement du système est l'apparition de motifs stables qui vont jouer le rôle de points de contrôle. Il est donc primordial de s'attarder sur ces motifs formant des états d'équilibre locaux. Dans tous les cas on peut observer le phénomène suivant : un agent exploite ses huit voisins (qui coopèrent systématiquement) en adoptant la stratégie de trahison. Si ce groupe de neuf agents est entouré d'agents traitres, le gain maximal est obtenu par l'agent *A* qui va donc se dupliquer à la place de ses 8 voisins. Il est intéressant de constater que les clones vont adopter un comportement différent de leur père. Cette forme est particulièrement robuste aux mutations car les mutants sont systématiquement remplacés lors de la phase suivante de réplication.

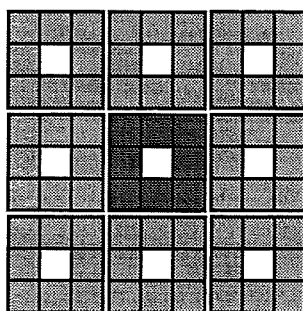


Fig 8 Le motif stable de base. Gris clair: Cooperation. Gris foncé: Trahison

Ce motif est la base de tout un ensemble de motifs qui construisent ainsi l'organisation complète du système. Les motifs plus complexes sont des extensions du motif de base, qui s'est propagé. Cette propagation est généralement linéaire, le premier motif servant de base stable pour le développement des suivants. Ainsi un motif 3×3 devient un motif 3×5 puis 3×7 , etc ... Un niveau plus complexe d'organisation apparaît dans ces motifs rectangulaires avec une dichotomie dans le comportement des agents suivant leur position spatiale. Les agents du centre vont trahir leurs voisins situés à l'extérieur mais vont coopérer avec leurs voisins de la périphérie. Un calcul tout simple montre qu'ainsi le gain des agents centraux est optimisé, c'est la somme des gains de trahison ($6 \times 3 = 18$) plus les gains de coopération ($2 \times 2 = 4$) ce qui donne un total de

22 sur un maximum de 24.

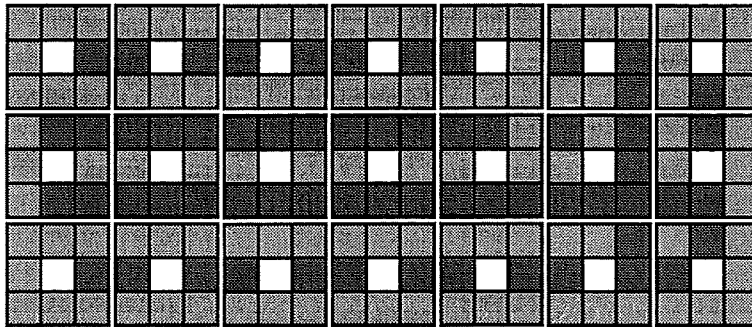


Fig 9 Un motif composé

5.2.3 La convergence

Dans les applications biologiques de la Théorie des jeux, l'idée consiste à déterminer des stratégies qui soient stables du point de vue de l'évolution, appelée em ESS⁴. Une stratégie est une ESS [22] face à un ensemble de stratégies alternatives lorsque la majorité d'une population adopte cette stratégie, et que celle ci résiste à l'invasion de comportements stratégiques mutants: la sélection naturelle est supposée ne jamais retenir une mutation qui serait favorable au groupe mais défavorable ou neutre pour l'individu. La Théorie des jeux permet en effet de montrer qu'une stratégie stable du point de vue de l'évolution peut correspondre à un équilibre sous-optimal.

La question est de savoir s'il est possible de retrouver un tel équilibre dans les simulations. Si toutes ces théories sont valident, et comme le phénomène de coopération est rare dans la nature, il est probable qu'il n'apparaisse que très rarement dans les simulations.

En fait, le système ne peut évoluer vers un état dans lequel tous les agents coopèrent systématiquement à cause des zones stables et des zones d'influences qu'elles induisent. En effet ces zones sont tellement stables que le système tombent dans un état correspondant à un maximum local dans l'espaces des stratégies. Le gain moyen est d'environ 9.5 avec un écart-type très faible (à peu près 0.2). Ce chiffre correspond à la moyenne des gains moyens d'une centaine d'expérimentations. Le point le plus remarquable est que ce chiffre est quasiment indépendant du taux de mutation, les mutants étant éliminés par les zones stables.

Ce chiffre de 9.5 est faible même comparé à la tactique aléatoire. mais cela s'explique très facilement car un traître pur va obtenir un gain supérieur à celui du joueur à stratégie aléatoire et va donc le remplacer. L'initialisation amicale n'est donc pas le moyen d'obtenir un système dont le gain moyen se rapproche de celui d'une ESS.

4. Evolutionary Stable Strategy

	adversaire coopérant	Adversaire traître
Joueur traître	traîtrise	traîtrise
Joueur coopérant	traîtrise	coopération

Fig 10 Tableau résumant la stratégie avec A_0 aléatoire

5.3 Initialisation génétique

Chaque agent lors de la toute première phase de création va tirer aléatoirement sa valeur de A_0 . Lors des phases de duplications, le clone va hériter du A_0 de son ancêtre. La topologie de l'organisation dépend fortement de l'initialisation des réseaux lors de la création des tous premiers joueurs. Deux cas peuvent se produire :

- une majorité de traîtres survivent après le premier cycle. On observe quelques îlots (composés par un motif stable) de coopérants (avec $A_0 =$ Coopération), entourés de traîtres (avec $A_0 =$ Trahison). Ce cas est très proche de celui avec tous les A_0 à Trahison.
- une majorité de coopérants survivent après le premier cycle. On observe la même topologie que dans le cas où tous les A_0 sont coopération. La seule différence réside dans le A_0 des traîtres entourant les îlots qui est à Trahison, tous les autres joueurs ayant un A_0 à Coopération.

Ce mode d'initialisation n'apporte pas un changement fondamental mais apporte une plus grande cohérence entre la tactique et la valeur de A_0 . Le gain du système est donc légèrement supérieur au cas avec $A_0 =$ Coopération, mais de très peu (environ +0.5, soit 10).

5.4 Initialisation aléatoire

Dans ce dernier cas, la valeur de A_0 est choisie aléatoirement. Bien que de nature stochastique, cette initialisation donne le plus fort gain moyen (en moyenne 11.5).

La stratégie principale d'un agent survivant est d'adopter l'action en concordance avec son A_0 et celui de l'adversaire. La figure 11 résume les cas possibles :

Si l'on analyse plus finement les stratégies, il est possible de distinguer trois catégories en fonction des actions produites par les joueurs :

- stratégie uniforme. L'agent adopte la même action avec ses huit voisins. Cette action est strictement identique à son A_0 .
- stratégie positive. L'agent coopère avec ses voisins qui ont leur A_0 à coopération et trahit sinon. Cette coopération peut intervenir à partir d'un certain seuil de gain.
- stratégie négative. L'agent trahit ses voisins qui ont leur A_0 à coopération et coopère sinon.

Trahison	Coopération	Génétique	Aléatoire
8	9.5	10	11.5

Fig 13 gains moyens suivant l'action initiale

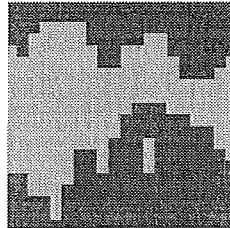


Fig 11 lutte entre deux types d'agents

Lors des premières itérations, les différents types d'agents s'affrontent jusqu'à la victoire d'un seul type. C'est uniquement dans cette phase de compétition que les mutations peuvent jouer un rôle quelconque car une fois qu'un type d'agent a pris possession du terrain, les mutants sont rapidement éliminés. Tous les mutants ne sont pas éliminés pour autant car une petite modification d'un poids du réseau peut ne pas modifier radicalement sa réponse et l'agent n'est pas éliminé. Il peut même, profitant des aléas de la dynamique de répllication, se diffuser dans tout l'espace. Ce phénomène est observable grâce aux cartes génotypiques colorées. Le gain moyen n'est pas affecté par ces mutations mais elles pourraient s'avérer utiles en cas d'intrusion d'un autre type d'agent.

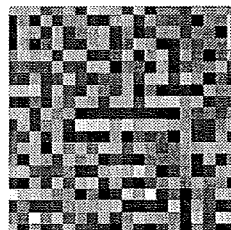


Fig 12 répartition du gain en fin de cycle

6 Conclusions

La méthodologie décrite dans cet article est basée sur la définition d'un protocole expérimental. Les simulations ainsi réalisées sur la spatialisation du dilemme du prisonnier itéré ont permis de caractériser l'influence des différents paramètres et d'observer quelques résultats intéressants, notamment sur le gain moyen.

La principale conclusion que l'on peut tirer de cette étude est la difficulté pour un système multi-agent de synchroniser les interactions de manière à privilégier l'intérêt collectif plutôt que l'intérêt individuel. Ainsi il apparait que les

jeux du type dilemme du prisonnier ne sont peut-être pas le paradigme idéal pour modéliser les processus de coopération dans les espèces naturelles. Aux vues de ces résultats, les voies possibles pour continuer l'étude de ce genre de systèmes sont :

- la caractérisation du fonctionnement des réseaux (en utilisant l'extraction de règles floues par exemple).
- l'étude des conflits entre deux espaces topologiques stabilisés contenant chacun un type d'agent différent.
- l'ajout d'une récurrence sur la tactique de l'adversaire.
- l'utilisation d'un autre mécanisme que les réseaux de neurones pour coder la stratégie.
- la prise en compte de la distance de Hamming dans la stratégie lors des phases de conflits entre espèces d'agents.

Ce type d'interactions, bien que n'ayant apparemment que peu d'intérêt pratique, est certainement à la base des mécanismes de coopération dans les sociétés (au sens large) animales. Malheureusement l'environnement du dilemme du prisonnier est trop rigide et il faut donc appliquer la même méthodologie (en s'appuyant sur les résultats obtenus) à des systèmes d'agents plus complexes. Ce genre d'études permettraient, nous le pensons en tous cas, de caractériser les conditions d'émergence et la dynamique de fonctionnement des sociétés animales, et pourquoi pas humaines.

Références

- [1] R. J. AUMANN, S. HART, 1992, *Handbook of Game Theory*, Volume 1, North Holland.
- [2] R. AXEROLD, W.D. HAMILTON, 1981, *The evolution of Cooperation*, *Science* 211, p 1390-1396.
- [3] R. AXEROLD, 1984, *The evolution of Cooperation*, New York Basic Book.
- [4] P. BOURGINE, T. FUHS, 1993, *Economie Artificielle*, in *Workshop on Artificial Economic*, International Joint Conference on Artificial Intelligence 93, Chambéry.
- [5] S. BURA, C. DELAYE, G. DUMORTIER, M. GIRARD et Al, 1994, *La norme PLAGE (Plateforme générique d'expérimentations et de simulations)*, in *Evolution Artificielle 1994*.
- [6] R. CAZOULAT, B. VICTORRI, 1994, *Comment une société d'agents autonomes peut-elle s'organiser?*, in *Autonomie et Interactions fonctionnelles*, Actes des journées de Rochebrune 94.
- [7] R. CAZOULAT, B. VICTORRI, 1994, *Etude de la dynamique des populations par simulation*, in *Chaos and Society* 94.
- [8] M. CROZIER, E. FRIEDBERG, 1977, *L'acteur et le système*, Le Seuil Paris.
- [9] DAVALO, NAIM, *les reseaux de neurones*, Eyrolles
- [10] R. DAWKINS, 1980, *Good Strategy or Evolutionarily Stable Strategy*, *Sociobiologie : Beyond Nature / Nurture*, eds. Barlow Silverberg, Boulder Colorado : Westview Press pp 331-67.
- [11] J.P. DUPUY, *Introduction aux Sciences Sociales, Logique des phénomènes collectifs*, Collection X Ecole Polytechnique, Edition ELLIPSE.
- [12] J. L. ELMANN, 1988, *Finding Structure in Time*, Technical Report.
- [13] R. FESTEL, W. EBELING, 1989, *Evolution of Complex Systems, Self organization, Entropy and Development*, Kluwer Academic Publication.

- [14] M.M. FLOOD, 1952, Some experimental games, Report RM-789-1, Santa Monica, CA : The rand Corporation.
- [15] J. HOLLAND, 1975, Adaptation in Natural and Artificial Systems, MIT press..
- [16] D.E. GOLDBERG, 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley.
- [17] B.A. HUBERMAN, N.S. GLANCE, 1993, Evolutionary games and computer simulations, Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 90 pp. 7716-7718.
- [18] J. LANGTON et Al, 1991, Artificial Life II, Massachusetts Institute of Technology Adisson-Wesley.
- [19] K. LINDGREN, M.G. NORDAHL, 1994, Cooperation and Community Structure in Artificial Ecosystems, Artificial Life 1 pp.15-37, Massachusetts Institute of Technology Adisson-Wesley.
- [20] H. MATURANA, F. VARELA, 1980, Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living, Dordrecht Reidel.
- [21] R.M. MAY, 1988, How many species are there on the earth?, Science, 241, pp. 1441-1449.
- [22] J. MAYNARD-SMITH, 1982, Evolution and the theory of games, Cambridge University Press.
- [23] J.H. MILLER, 1989, The coevolution of automata in the repeated Prisoner's Dilemma, Santa Fe Institute working paper 89-003.
- [24] M.A. NOWAK / R.M. MAY, 1992, Evolutionary games and spatial chaos, Nature vol; 359 pp 826-829 Evolutionary games and spatial chaos, Nature vol 359 pp 826-829.
- [25] M.A. NOWAK, 1993, Evolutionary and spatial dynamics of the prisoner'sdilemma, in From simple rules to global complexity in European Conference on Artificial Life pp 863-870.
- [26] F. PETIT-SINGEOT / N. MEULAU, 1994, Emergence de la coopération dans un modèle Darwinnien, in Autonomie et Interactions fonctionnelles, Actes des journées de Rochebrune 1994.
- [27] F. PETIT-SINGEOT / T. FUHS / Ph. JANNOT / D. CAIROL, 1994, Negociation in a multi-agent environment: an agricultural application, in Cognitive Science in Industry 1994.
- [28] F. PETIT-SINGEOT / T. FUHS / Ph. JANNOT, 1994, Modeling Negotiation Process between Farmers, paper 943527 in building our futur through engineering and technology, ASAE Atlanta 1994.
- [29] A. RUBINSTEIN, 1980, A Bargaining Model with Incomplete Information about Time Preference, Econometrica, 53, 5, p.1133-1150
- [30] D.E. RUMELHART / J. MAC CLELLAND, 1986, Parralel and Distributed Processing, MIT Press
- [31] H.A. SIMON, 1981, The Sciences of Artificial, Afcet Systèmes.
- [32] F.J. VARELA, 1989, Autonomie et connaissance, Essai sur le vivant, La couleur des idées, SEUIL.
- [33] B. VICTORRI / R. CAZOULAT, 1993, Auto-Organisation et émergence du symbole, in Actes du Colloque Symbolliconnexionniste 1993.
- [34] J. VON NEUMANN / O. MORGENSTEIN, 1944, Theory of Games and Economic Behaviour, Priceton University Press.
- [35] G. ZLOTKIN / J.S. ROSENSCHEIN, 1989, Negotiation and task Sharing Among Autonomous Agents in Cooperative Domains, in Proceedings IJCAI 89

L'ADÉQUATION FONCTIONNELLE COMME LIMITE DES SYSTÈMES AUTO-ORGANISATEURS

Auteurs : Collectif S.M.I*
Adresse : IRIT - Université Paul Sabatier
118, Route de Narbonne - 31062, Toulouse Cedex
Tel : 61 55 82 95 Email : glize@irit.fr

1 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE COLLECTIVE

Ces quinze dernières années plusieurs manières de simuler l'intelligence de façon collective sur un ordinateur sont apparues : les réseaux neuronaux, l'intelligence artificielle distribuée et la vie artificielle. Ces domaines étudient des conditions "d'émergence" d'un comportement intelligent issu de l'agrégation d'entités plus simples qui ne soit pas directement "programmé" dans chacune d'elles.

1.1 Le modèle collectif neuronal

Donald Hebb a émis l'hypothèse en 1949 que les facultés d'apprentissage des réseaux biologiques sont dues à l'auto-organisation de leurs connexions sous l'effet des stimuli qu'ils reçoivent. Un modèle connexionniste est caractérisé par trois **constituants de base** : **un réseau, une règle d'activation et une règle d'apprentissage**. Le réseau est composé par un ensemble d'unités connectées. La règle d'activation d'un modèle connexionniste est une procédure locale que chaque noeud suit en mettant à jour son niveau d'activation en fonction du contexte d'activation des noeuds voisins. La règle d'apprentissage est une procédure locale qui décrit comment les poids des connexions varient en fonction du temps (Bourret,91). Il en résulte que le réseau possède deux dynamiques : celle de l'activité de ses neurones et celle des poids de ses liens.

Chaque neurone formel actualise périodiquement son état. Pour cela, il calcule la somme des signaux qu'il reçoit des autres neurones, chaque signal étant auparavant pondéré par un coefficient propre à chaque synapse. Cette pondération, appelée poids synaptique, est positive ou négative selon que la synapse est excitatrice ou inhibitrice. La somme pondérée est ensuite comparée à un seuil caractéristique du neurone formel. Si la somme est supérieure au seuil, alors le neurone se met dans son état actif. Dans le cas contraire, il se met dans son état inactif.

Un réseau neuromimétique est un graphe dirigé et pondéré dont les noeuds sont les neurones (automates simples). L'architecture du réseau joue un rôle important dans son comportement. Les différents modèles se distinguent par les contraintes de connectivité qu'ils supposent et les valeurs des poids synaptiques des connexions. Dans le modèle de Hopfield,

* V.Camps, B.Carpuat, M.P.Gleizes, P.Glize, A.Machonin, C.Piquemal, J.Pezet, C.Régis, S.Trouilhet

chaque neurone reçoit les informations de tous les autres neurones et envoie son résultat à tous les autres. Dans le modèle le plus classique, les neurones formels sont organisés en couches successives. Chacun des neurones reçoit les signaux de la couche précédente et transmet le résultat de ses traitements aux neurones de la couche suivante. La première couche reçoit ses "entrées" du milieu extérieur au réseau et la couche de "sortie" fournit la réponse du réseau.

Une des limitations importantes réside dans leur incapacité à reconnaître les formes translattées, tournées ou agrandies. De telles modifications de la forme affectent un grand nombre de points, ce qui défie les réseaux actuels. Une autre limite réside dans leur capacité de mémorisation. Dès que l'on dépasse un certain seuil, le système perd littéralement la mémoire. Aucune des formes mémorisées précédemment n'est reconnue et les nouvelles formes présentées ne le sont pas non plus. En quelque sorte, les formes se recouvrent mutuellement jusqu'à ce que plus une seule ne soit discernable.

Malgré les grandes possibilités d'auto-organisation de ces réseaux, le câblage est généralement prédonné par le concepteur (nombre de couches, nombre de cellules par couche). La totale connexité revient à avoir une **connaissance complète de l'ensemble des membres d'une société.**

1.2 Le modèle collectif génétique

Le principe des algorithmes génétiques est omniprésent dans la majorité des travaux sur la vie artificielle dès qu'il y a nécessité de simuler l'évolution. Un modèle génétique repose sur **l'évolution d'une population dans un environnement** selon des critères de survie préfixés. Le principe général de l'algorithme génétique est simple. La stratégie de l'algorithme repose sur un processus continu qui remplace les individus les moins adaptés par les "enfants" issus de la reproduction de "parents" choisis aléatoirement parmi les plus adaptés (Heudin,94). Parmi les individus qui ont survécu au bout d'un certain temps, le système opère des croisements selon un algorithme centralisé prédonné par le concepteur. Après de nombreuses générations, les individus restants (s'il en existe) sont ceux qui répondent à la tâche recherchée.

La **reproduction** est l'une des trois opérations de base d'un algorithme génétique. Elle repose sur la sélection d'individus qui vont ensuite se reproduire. Dans sa version la plus simple, la sélection d'un individu au sein d'une population est effectuée en tirant au hasard l'un d'entre eux.

Avec la reproduction, les **opérateurs de croisement et de mutation** forment la base d'un algorithme génétique. Ils doivent faire évoluer la population et converger vers un optimum global tout en effectuant une bonne exploration de l'espace de recherche. Le croisement et la mutation sont les deux opérateurs qui agissent au niveau des "allèles" du "codage chromosomique".

L'opérateur de mutation effectue une perturbation d'un chromosome pour permettre à l'algorithme génétique d'explorer d'autres régions de l'espace de recherche. Il limite ainsi les risques de convergence prématurée due au principe de sélection élitiste pouvant favoriser la domination d'un "super-individu" dès le début de l'évolution. Cependant rien n'assure que cet individu représente véritablement un optimum global.

A l'inverse de la mutation, le croisement fait partie du mécanisme de convergence d'un algorithme génétique. Il est appliqué en fonction d'une probabilité déterminée expérimentalement, qui dépend principalement de la fonction d'évaluation de l'adaptation. En général, cette valeur se situe entre 0,5 et 0,9. La performance d'un algorithme génétique dépend en grande partie de cet opérateur, dont l'efficacité est fortement liée au codage choisi. L'opérateur de croisement comporte quatre arguments : deux "parents" et deux "enfants". Il faut calculer la valeur d'adaptation ("fitness") qui dépend du problème à traiter.

Tout le fonctionnement est fondé sur un **contrôle centralisé** et sur une connaissance parfaite de l'ensemble de la population. En contrepartie, les individus ont un degré d'autonomie totalement inexistant.

1.3 Le modèle collectif social

Malgré la diversité des architectures multi-agents, il ressort très généralement qu'un agent est constitué de deux paquets de connaissances, que nous notons savoirs et croyances :

- les savoirs sont les connaissances sur tout ce que l'agent suppose être véritable dans le monde,
- les croyances sont les connaissances sur ce qu'il suppose du savoir des autres. Parce que l'agent a une connaissance incomplète de son environnement, ses croyances sont partielles, voire partiales.

Cette distinction ne préjuge en rien la manière dont elles sont acquises et représentées, permettant ainsi d'englober les agents "réactifs et cognitifs". L'important est que le comportement de l'agent dépende bien entendu de ses savoirs (là où les techniques de l'IA classique sont opératoires), mais il sera modulé/adapté en fonction de ses croyances. L'activité collective complexe est la résultante de traitements individuels plus simples réalisés de manière **autonome chez les agents**. Le surplus d'intelligence est issu de l'aptitude de l'agent individuel à raisonner avec et sur ses croyances (et donc sur ses interactions), pour acquérir de nouveaux savoirs et transformer l'organisation de la société d'agents.

Un observateur extérieur peut **expliquer certaines activités d'un agent par la présence de connaissances particulières : les croyances** sur le monde, qui se distinguent de ses compétences. Une situation perçue par un agent réactif va déclencher un comportement réflexe aboutissant immédiatement à une action sur son environnement. A l'autre bout de la chaîne, la perception d'un agent cognitif va entraîner un raisonnement dont la conséquence sera une transformation de l'acte réflexe en un acte a priori plus adapté -de son point de vue- aux caractéristiques de son environnement.

Comme le souligne Ferber "il existe en effet toute une **gradation entre l'agent réactif pur, qui ne réagit qu'aux stimuli, et l'agent cognitif total** qui possède un modèle symbolique du monde qu'il met continuellement à jour et à partir duquel il planifie toutes ses actions" (Ferber,94). Pour nous, la gradation réactif-cognitif ne provient pas de l'emploi d'une représentation symbolique du monde, mais de la proportion chez l'agent entre ses comportements dictés exclusivement par des réflexes et ceux auxquels sont associés des raisonnements sur la modélisation de son environnement. Un agent peut ainsi avoir simultanément des comportements réactifs et des comportements cognitifs selon la situation à laquelle il est confronté.

L'existence de croyances chez l'agent justifie aussi le **besoin d'agir directement vers d'autres agents** particuliers qui sont distingués dans le monde. L'action directe pour influencer autrui est réalisée par un langage qui se décline en IAD dans l'étude des communications. Si autrui possède des croyances similaires, cela aboutit à la notion d'interaction (Cohen,88). Plus les croyances sont élaborées et plus les capacités langagières doivent le devenir, ce qui permet la métaphore avec les actes de langage humains (Searle,85), (Brassac,93). Les effets des actes de langage dépendent de la manière dont les agents décident de répondre au message. Ces processus sont fortement non monotones et ne seront bien compris qu'avec des théories de révision de croyances et de révision d'intentions, qui sont encore insuffisamment développés (Singh,94).

1.4 Analyse

Contrairement à l'IA dite classique, l'Intelligence Artificielle Collective présuppose que l'intelligence peut être issue de l'agrégation de compétences simples. Dans le connexionnisme, un neurone n'a pas de tâche précisément assignée et n'a d'importance que dans la collectivité, hormis les neurones des couches d'entrée et de sortie. En vie artificielle, la population n'est là que pour faire émerger, après plusieurs générations, quelques individus mieux adaptés aux contraintes de l'environnement spécifié. En IAD, le rôle assigné à chaque agent et la tâche collective sont d'égal intérêt, ce qui n'est pas le cas dans les autres approches collectives.

Dans la vie artificielle et les réseaux neuronaux le contrôle de l'organisation collective est strict. L'autonomie individuelle étant des plus réduite, les entités élémentaires n'ont pas la nécessité de raisonner sur autrui : le traitement social est inexistant dans ces méthodes. Des notions telles que l'autonomie, les conflits et la négociation, l'ambiguïté sémantique, couramment employées en intelligence artificielle distribuée sont totalement absentes de ces domaines. Cela provient du fait que les entités individuelles de ces systèmes sont dans l'incapacité de posséder et de raisonner sur des croyances. En contrepartie, la diversité des comportements individuels des agents est préjudiciable à la démonstration de propriétés collectives qui sont fréquentes dans les réseaux neuronaux.

Question plus générale : quelles sont les propriétés recherchées dans ces systèmes ?

Par exemple, le parallélisme qui est sous-jacent lorsque l'on dit qu'une société est composée d'entités autonomes ne permet rien d'autre que d'accroître la rapidité de traitement. En effet, aucune propriété nouvelle n'est exhibée dans des machines de Turing parallèles : on peut toujours se ramener à une machine de Turing universelle. Depuis les années 30, avec Church, Turing, Gödel, ce sont en effet les critères de calculabilité qui ont suscité l'intérêt des informaticiens ; la manière dont une fonction calculable donnée pouvait être calculée était laissée au soin des développeurs.

Le point commun de ces systèmes est l'aptitude à l'auto-organisation ; à savoir celle de réorganiser ses parties sans contrôle extérieur. De ces constatations, nous concluons que la thématique commune de ces travaux est la recherche de **théories, méthodes et modèles du calcul émergent**. Nous montrons dans cet article des propriétés de base des systèmes auto-organisateurs, puis nous en développons quelques conséquences dans la dernière partie.

2 L'AUTO-ORGANISATION ET L'ADÉQUATION FONCTIONNELLE

Nous considérons un système plongé dans un tout qu'on peut appeler "univers". Dans cet univers, on distingue une partie que l'on décrit plus en détail : le système étudié ; le reste sera appelé "environnement" ou extérieur du système. Mais toute partie de l'univers ne constitue pas un système. Pour qu'il en soit ainsi, il faut qu'elle ait une certaine permanence dans un intervalle de temps important relativement à l'échantillonnage, qu'elle soit reconnaissable malgré les transformations qu'elle subit et qu'elle ait une autonomie d'évolution à une certaine approximation. Le lien entre le système et son environnement est toujours décrit sommairement mais certaines approximations peuvent être utilisées. Quand on distingue un système dans un tout, on établit une situation artificielle par la coupure système-environnement (Destouches, 90). Nous supposons aussi pour les besoins de notre présentation, que le système étudié est lui-même composé de parties en interactions. Ces parties peuvent être des entités physiques ou abstraites.

2.1 Définitions

Dans ce cadre, un système est **fonctionnellement adéquat** avec son milieu si et seulement si il fournit des réponses correctes dans un temps fini à un ensemble test. L'ensemble test est choisi pour évaluer l'éventail des réponses possibles. Cet ensemble doit être fini pour garantir que la réponse à la question "le système est-il fonctionnellement adéquat ?" puisse être donnée dans un temps fini.

Un système est dans un **état stable** s'il existe un instant T et si pour tout instant $t > T$ les sorties de toutes les parties du système sont identiques aux sorties à l'instant $t-1$.

Nous dirons aussi que l'organisation d'un système est **coopérative** si :

- toute entrée d'une partie produit des conséquences logiques en son sein conduisant à une sortie de celle-ci,
- toute réponse d'une partie est une entrée d'au moins une autre partie ou un élément de réponse du système global vers son environnement.

De nombreuses définitions de la coopération ont été énoncées, telle celle de Schmidt "dans beaucoup de domaines de la sociologie, en particulier les sciences politiques, l'économie et la théorie des organisations, le terme "coopération" a été largement employé pour désigner la formation de coalitions entre acteurs qui ont des intérêts et des motivations partiellement divergents (Schmidt, 94)". Mais elles ont toutes l'inconvénient de faire appel à la notion de poursuite d'un "objectif individuel" qui impose la présence d'un observateur extérieur au système et qui est non pertinent si l'on souhaite faire abstraction du degré d'"intelligence" du système.

Un système sera dit **auto-organisateur** s'il peut, à partir de ses interactions avec son environnement, détecter toutes les situations non coopératives entre ses parties et tenter de les supprimer en se réorganisant. Un système auto-organisateur est typiquement capable de manière autonome de :

- créer, supprimer, modifier des parties en son sein,
- changer l'organisation (les relations inter-individuelles).

2.2 L'adéquation fonctionnelle en monde clos

Dans un monde clos, la totalité des interactions est prévisible et les réponses à apporter pour une perception sont connaissables.

Théorème 1 : Tout système auto-organisateur coopératif et stable pour l'ensemble test est fonctionnellement adéquat.

Ce théorème reste vrai même si le système n'est pas auto-organisateur, mais il faut alors un observateur extérieur qui soit apte à détecter toutes les situations potentiellement non coopératives entre les parties. Mais le système devient de fait contrôlé de l'extérieur et perd son aspect le plus intéressant : l'autonomie.

L'intérêt de ce théorème est de démontrer que tout système auto-organisateur tendra vers un état coopératif stable (s'il peut exister) et donc vers l'adéquation fonctionnelle dans son milieu. Cela permet de remplacer l'adéquation fonctionnelle qui est une notion sémantique et donc liée à un observateur, par la réalisation d'interactions coopératives qui est une notion strictement syntaxique. C'est pour cela qu'il est possible d'automatiser la seconde notion, mais pas la première.

Mais la difficulté évidente de ce théorème est d'arriver à faire converger le système vers des situations coopératives et vers la stabilité. Pour cela, le système doit de manière évidente

posséder en son sein toutes les parties indispensables, pour qu'un agencement particulier puisse réaliser la fonction calculable vérifiée par l'ensemble test. D'où l'utilité du théorème 2.

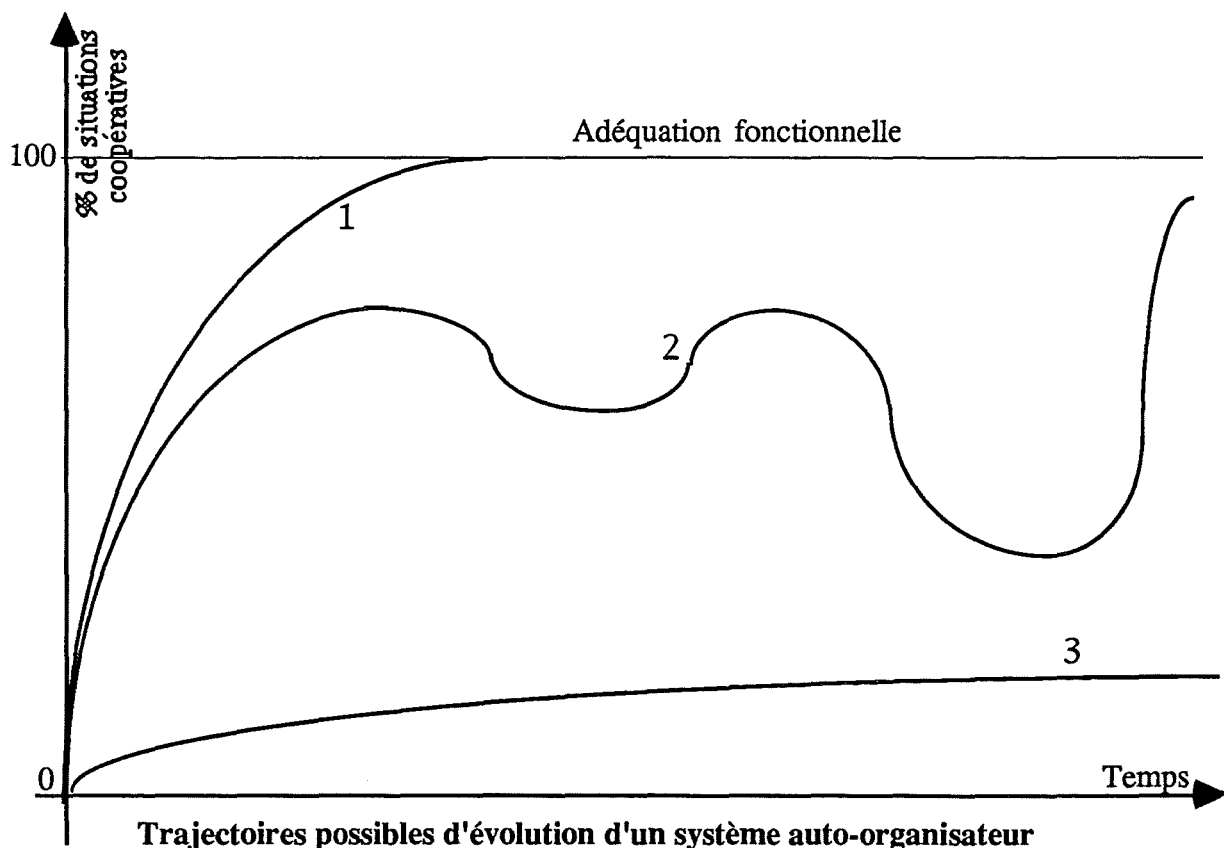
Théorème 2 : Tout système récursivement auto-organisateur converge vers une organisation coopérative et la stabilité ; donc vers l'adéquation fonctionnelle.

Le théorème 1 indique implicitement que chaque partie d'un système fonctionnellement adéquat est aussi fonctionnellement adéquate avec les autres, parcequ'elle est en situation de coopération avec toutes les autres. Cette remarque nous incite intuitivement à penser que la récursivité est un moyen simple de concevoir un système auto-organisateur.

Ce théorème est beaucoup plus général que le théorème 1, puisqu'il ne présuppose plus l'existence de parties complémentaires prédonnées au système auto-organisateur. Le principe est que chaque partie est auto-construite par ses interactions avec son milieu (notamment les autres parties en interaction), car elles sont elles aussi des systèmes auto-organisateurs. Non seulement l'organisation des parties émerge, mais aussi la manière dont ses parties sont constituées.

2.3 L'adéquation fonctionnelle en monde ouvert

En monde clos toutes les interactions sont finalisées, mais nous pouvons réaliser le même genre d'expérience dans un environnement ouvert où les interactions n'ont pas de but a priori. Si cet environnement n'est pas totalement aléatoire, nous devrions voir émerger une organisation qui est asymptotiquement stable : si de nombreuses interactions sont adéquates fonctionnellement, une partie importante peut remettre en cause l'organisation coopérative du logiciel.



Le propre d'un monde ouvert est d'être incapable de préconnaître exhaustivement les comportements adéquats. Il est donc illusoire de parler d'adéquation fonctionnelle en tant

qu'élément de mesure ; il est néanmoins possible de juger du comportement d'un système auto-organisateur. Nous dirons qu'un système auto-organisateur est d'autant plus en adéquation fonctionnelle avec son milieu que son organisation se stabilise au fur et à mesure de ses interactions. L'adéquation fonctionnelle devient ainsi une limite vers laquelle doivent tendre les systèmes réels, en sachant qu'une situation permanente d'interaction coopérative (surtout en monde ouvert) est rarement obtenue. On peut donc définir un degré de stabilité d'un système auto-organisateur en fonction des perceptions qui ont entraîné des réorganisations dans le temps.

Ce graphique montre différentes possibilités d'évolution d'un système à travers ses interactions avec l'environnement. L'abscisse représente l'écoulement du temps durant lequel s'effectuent des échanges avec l'environnement. L'ordonnée indique le pourcentage de situations coopératives qui ont lieu durant les N (constant) derniers échanges. Il faut remarquer que la limite sur la courbe est l'adéquation fonctionnelle du système (notion sémantique), tandis que ce qui est évalué est la situation interne du système (notion syntaxique).

La courbe 1 est proche de l'idéal car elle aboutit rapidement à une totale adéquation fonctionnelle. Cette situation ne pourrait survenir que dans un monde clos, car au delà d'un certain nombre d'interactions toutes les réponses sont adéquates ce qui implique certainement que l'éventail des interactions système-environnement est limité.

La courbe 2 indique des oscillations du système plus ou moins brutales, selon les variations de l'environnement. Dans ce cas le système a des difficultés à s'adapter. Cette courbe est certainement plus proche de systèmes réels dans un monde ouvert.

La courbe 3 indique que le système converge vers un attracteur local qui est loin de l'adéquation fonctionnelle.

3 ANALYSE D'UN SYSTÈME AUTO-ORGANISATEUR

3.1 Situations de transformation de l'organisation

Les théorèmes précédents présupposent une auto-organisation abstraite. L'aptitude d'un système à être véritablement auto-organisateur dépendra de sa capacité à détecter des situations anormales et à agir de manière pertinente. La vitesse de convergence vers des situations stables est probablement un des axes principaux d'études de ces systèmes auto-organisateurs. Plus un système réel sera restreint dans ses possibilités auto-organisatrices et moins il aura de chances d'atteindre l'adéquation fonctionnelle. Nous présentons ci-dessous quelques conditions de détections et d'actions sur des situations qui perturbent une organisation en état d'équilibre. Compte-tenu du théorème 2 sur l'organisation récursive, ces traitements doivent être distribués dans toutes les parties.

☞ Incompréhension : réception d'un message dont le contenu est non pertinent pour la partie. Chaque partie devant tendre vers des interactions coopératives, tout message devrait a priori être clairement interprété par le récepteur. La partie réceptrice peut donc tenter de réexpédier ce signal vers d'autres parties mieux apte à l'interpréter ou sinon à le retourner à l'expéditeur.

☞ Ambiguïté : un message pourrait être interprété de plusieurs manières. La partie réceptrice peut donc tenter de réexpédier ce signal vers d'autres parties mieux apte à l'interpréter ou sinon de retourner à l'expéditeur ses interprétations.

☞ Conflit : le contenu d'un signal est contradictoire avec les propres informations que possède la partie réceptrice et elle pense que l'émetteur a une parfaite connaissance de ses données. Elle peut accepter les conditions, générer un sous-conflit vers autrui ou le retourner à l'expéditeur.

☞ Concurrence : une partie détecte qu'un objectif qu'elle poursuit/a atteint est aussi celui d'autrui. Si la partie n'atteint pas son objectif courant, elle va le soumettre à sa "concurrente". Dans une autre situation où elle ne peut pas accepter une tâche, elle va la transmettre à la

"concurrente". Cela devrait tendre à spécialiser les parties sans duplication/concurrence inutile et à répartir la charge.

3.2 Emergence du sens

Parmi ces quelques situations d'interactions non coopératives, le traitement des incompréhensions, ambiguïtés et conflits sont obligatoires pour démontrer le théorème 1 ; elles sont l'essence d'un système auto-organisateur. Ces traitements ont une portée considérable car ils font une totale abstraction du contexte de survenue des situations.

La sémantique des messages y est totalement absente, tandis que les opérations effectuées habituellement par un ordinateur sont sémantiquement contraintes parce que chaque distinction sémantique pertinente pour son programme a été encodée dans la syntaxe de son langage symbolique par les programmeurs (Varela,93). Cela signifie que la concrétisation de tels traitements dans des logiciels devrait leur permettre de les faire converger vers l'adéquation fonctionnelle sans être obligés de leur définir la sémantique du milieu dans lequel ils sont immergés. Le sens est co-construit par les interactions entre le système et son environnement. C'est de la position de l'observateur, qui perçoit un monde ordonné au moins partiellement, que résulte le sentiment qu'un système agit de manière pertinente dans son milieu.

3.3 Apprentissage et clôture

Le fait que chaque partie soit elle-même un système (organisation récursive) impose l'existence d'un milieu intérieur qui lui est spécifique. Une frontière doit donc exister entre lui et les autres parties : elle est constituée de toutes ses parties qui sont des interactions potentielles avec son milieu (autrui ou l'environnement). Ainsi, comme toute partie est un système composé exclusivement de parties (hormis les parties atomiques), un message perçu devient une partie appartenant à sa frontière. Il en est de même des messages émis.

Il n'y plus d'apprentissage au sens donné en intelligence artificielle, c'est seulement l'auto-organisation qui modifie le comportement d'un agent. En opérant sur les données, ce système récursif opère sur lui-même, il s'agit donc d'un "programme qui se programme lui-même". En effet, dans une organisation récursive, une partie a quatre rôles :

- ☞ Une partie est un code qui s'exécute sur une donnée qu'est un signal perçu/reçu et dont le résultat est un autre/d'autres message(s).
- ☞ Le message perçu/reçu devient une composante de la partie en question, et donc peut potentiellement modifier ce code.
- ☞ La partie est aussi un message potentiel pour des méta-parties qui sont au niveau d'organisation supérieur.
- ☞ Une partie est aussi un signal reçu/perçu par d'autres parties, et donc le résultat de l'exécution d'un méta-partie.

Nous voyons donc que ce type de système peut modifier partiellement ses propres règles de fonctionnement, il réalise bien une clôture opérationnelle. Mais cette capacité de modification est elle-même programmée (par exemple selon les aptitudes que nous avons précédemment présentées) de telle sorte qu'elle au moins échappe à la maîtrise de soi que possède le programme. Cette maîtrise ne pourra donc jamais être totale comme le souligne Dupuy ; pour faire le parallèle avec le vivant il n'y aurait que des changements ontogénétiques et pas phylogénétiques.

4 CONCLUSION

L'objet de cet article était de montrer que si une fonction calculable était associée à l'ensemble des interactions qu'un système auto-organisateur avait avec son environnement, alors ce système pouvait se construire pour que ses réponses tendent vers celles de cette fonction calculable : il s'agit donc bien de calcul émergent. Si le calcul est la réponse finale de ces systèmes auto-organiseurs, sa structure (forme) en est aussi un résultat émergent secondaire. Nous avons vu que pour démontrer les propriétés des systèmes auto-organiseurs, il fallait définir et traiter des notions telle que les conflits, l'incompréhension, l'arrêt. Cela prouve que l'auto-organisation n'est pas un concept isolé, mais elle n'a de sens que si elle intègre simultanément toutes ces notions, et qu'elles doivent donc faire partie intégrante de tout système concret.

Nous reprenons ici quelques lignes de Dupuy (Dupuy,82) qui correspondent bien à ce que nous venons d'étudier. Si un système auto-organisateur est capable d'engendrer du nouveau, c'est parce qu'il a la capacité de s'adapter aux événements aléatoires qui l'agressent, de les assimiler en modifiant sa structure. Mais l'aléatoire ici, n'est que l'autre nom que l'on donne au nouveau : car le nouveau est, par définition, ce qui est étranger à la structure réceptrice et qui, par rapport à l'ordre qu'elle représente, constitue le désordre. L'auto-organisation crée donc du nouveau à partir du nouveau ; c'est, selon la formule d'Atlan, "un processus de création et de stabilisation de la nouveauté". Mais pour cela, il faut que le système soit prêt, que sa structure ait les conditions requises. Une condition nécessaire, comme Atlan l'a montré, est une certaine dose d'indétermination : c'est, entre autres conditions, parce que le système est partiellement indéterminé qu'il peut intégrer les perturbations qui l'affectent et les transformer en expériences significatives. La création résulte donc d'une coopération entre ces deux éléments qui se nient : l'ordre et le désordre, le déterminisme et la nouveauté qui le détruit.

Les domaines des réseaux neuronaux, des algorithmes génétiques, des multi-agents, cherchent à définir des méthodes pour aboutir à une organisation stable dans un contexte donné. Les théorèmes que nous avons démontré justifient les raisons de ces recherches, mais en montrant qu'il faut des approches auto-organisationnelles plus générales que celles proposées par chacun d'eux. Il faudrait notamment montrer que la vitesse d'apprentissage d'un système auto-organisateur tel que nous l'avons défini est plus rapide que celle des modèles neuronaux ou génétiques classiques. Les théorèmes présentés ne définissent en aucune manière les moyens concrets pour parvenir à cette stabilité organisationnelle, c'est là que la théorie du calcul émergent doit laisser le pas à des modèles et des méthodes.

5 BIBLIOGRAPHIE

- W. Ross ASHBY** - Principles of the self-organizing system
Principles of self-organization - H. Von FOERSTER, G. W. ZOPF Editors - Pergamon Press, 1962
- Henri ATLAN** - L'émergence du sens et du nouveau
Colloque de cerisy - Seuil, 1983
- Henri ATLAN** - Entre le cristal et la fumée
Edition du Seuil 1979
- Yves BAREL** - Le paradoxe de l'auto, Hofstadter, Varela et Atlan
Colloque de cerisy - Edition du Seuil, 1983
- Eric BONABEAU, Guy THERAULAZ** - Intelligence collective
Editions Hermes - 1994
- P. BOURRET, J. REGGIA, M. SAMUELIDES** - Réseaux neuronaux
Une approche connexionniste de l'I.A. - Editions tecknea, 1991

Christian BRASSAC - Théorie des actes de langage et IAD
 PR-GDR IA - Journée Système Multi-Agent - Montpellier, 1993
V.CAMPS, B.CARPUAT, M.P.GLEIZES, P.GLIZE, A.MACHONIN, J.PEZET, C.PIQUEMAL, C.RÉGIS, S.TROUILHET
 Calcul émergent et intelligence artificielle collective
 Rapport IRIT N° 94-64-R - 1994
Cornélius CASTORIADIS - Science moderne et interrogation philosophique
P.R.COHEN, H.LEVESQUE - On acting together : joint intentions for intelligent agents.
 Workshop on DAI, 1988
J.J.DESTOUCHES - Systèmes, modèles, prévisions
 Revue Internationale de Systémique Vol4 N°4, 1990
Paul DUMOUCHEL, Jean-Pierre DUPUY - L'auto-organisation : de la physique au politique
 Colloque de cerisy - Edition du Seuil, 1983
Jean-Pierre DUPUY - Ordres et désordres
 Editions du Seuil - 1982
Jacques FERBER - La kénétique : des systèmes multi-agents à une science de l'interaction.
 Revue internationale de systémique Vol8 N°1 - AFECT, 1994
Heinz von FOERSTER - On self-organizing system and their environements
 In Self-organizing systems, Youits et Cameron Editors - Pergamon, 1960
Jean-Claude HEUDIN - La vie artificielle
 Editions Hermès, 1994
Stephen C.KLEENE - Logique mathématique
 Editions J.Gabay, 1987
Humberto R. MATURANA, Francisco VARELA - L'arbre de la connaissance
 Addison Wesley, 1994
Marvin L. MINSKY - Computation - Finite and infinite machines
 Prentice hall, 1967
Marvin L.MINSKY - La société de l'esprit
 Ed. Interéditions, 1988
J.R.SEARLE, Daniel VANDERVAEKEN - Foundations of illocutionary logic
 Cambridge University Press, 1985
Kjeld SCHMIDT - Modes and mechanisms of interaction in cooperative work
 Rapport du RISO National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1994
Munindar P.SINGH - Multiagent systems. A theoretical framework for intentions, know-how, and communications
 Lecture notes in Artificial intelligence N°799 - Springer Verlag, 1994
Francisco VARELA, Evan THOMPSON, Eleanor ROSCH
 L'inscription corporelle de l'esprit - Seuil, Avril 1993
Pierre VENDRYES - L'autonomie du vivant
 Editions Maloine - 1981

6 ANNEXE

Cette annexe contient la démonstration des deux théorèmes, que nous avons préféré présenter d'une manière non formelle, mais rigoureuse, pour la lisibilité.

Théorème 1 : Organisation coopérative et stable \Rightarrow Adéquation fonctionnelle

Nous allons démontrer cette implication par sa contraposée (\neg Adéquation fonctionnelle $\Rightarrow \neg$ (Organisation coopérative et stable)).

Pour une entrée donnée du système, trois cas d'inadéquation fonctionnelle se présentent :

1) Pas de réponse par bouclage du traitement.

Pour tout T , t_1 , t_2 tel que $t_2 > t_1 > T$; il existe une partie P_i telle que ses sorties aux instants t_1 et t_2 soient différentes. Donc par définition le système n'est pas dans un état stable, ce qui est bien un élément de la conclusion.

2) Pas de réponse par arrêt du traitement.

Il existe au moins une partie P_i dont l'entrée n'a pas produit ni de sortie vers l'environnement, ni d'entrée vers aucune autre partie. Selon la définition, cette partie P_i n'est donc pas en situation d'interaction coopérative. Cela suffit pour démontrer que l'organisation n'est elle-même pas coopérative.

3) Réponse erronée.

Si la réponse du système est incorrecte, le fait de se situer dans un monde clos permet à un oracle (que l'on peut situer dans l'environnement) de retourner la réponse correcte (et donc différente). La partie du système qui a fourni la réponse incorrecte doit nécessairement détecter un conflit avec son propre résultat, d'où l'existence d'une situation non coopérative dans le système.

Nous venons donc de démontrer que pour une entrée donnée, un système auto-organisateur stable dont les parties ont des interactions coopératives fournit une réponse correcte.

Un système qui ne donne qu'une seule bonne réponse est évidemment inintéressant, mais la démonstration précédente peut être reproduite pour toutes les entrées possibles du système. Comme l'énoncé précise que le système doit fournir des réponses correctes pour toutes les entrées de l'ensemble test, le système est nécessairement fonctionnellement adéquat.

Théorème 2 : Système récursivement auto-organisateur \Rightarrow Adéquation fonctionnelle

Pour cette démonstration, nous allons raisonner par récurrence dans les niveaux d'organisation du système.

1) Par hypothèse au niveau 1, le plus élémentaire, il existe un ensemble de parties atomiques non décomposables mais complémentaires, de telle sorte que leur duplication et agencement permette de construire tout système de niveau 2. Toute partie de niveau 1 (ou sa réplique) peut appartenir à tout système de niveau 2.

Un système de niveau 2 est auto-organisateur et construit par l'agencement et la duplication de parties atomiques complémentaires de niveau 1. Il aboutira donc (par définition) à un état coopératif stable et par conséquent à l'adéquation fonctionnelle (en application du théorème 1).

2) Nous supposons que tous les systèmes auto-organisateurs de niveaux n sont fonctionnellement adéquats.

Le système qui nous intéresse est du niveau $n+1$ et donc constitué de parties de niveau n , qui sont des systèmes auto-organisateurs adéquats fonctionnellement. Or, tout système de niveau n fournit des réponses correctes vers d'autres parties ou l'environnement du système de niveau $n+1$. Donc l'adéquation fonctionnelle est vérifiée par définition. CQFD

HASARD ET CONTRAINTE DANS LA GENESE DE L'ARCHITECTURE ET DE LA FORME DES COLONIES DE POLYTRICS.

Pierre CORRADINI 21/2/95

1) La dynamique post-incendie des peuplements de lande:

Les landes armoricaine et la dynamique qui conduit à ces formations végétales ont fait l'objet de nombreuses études (CLEMENT, FORGEARD & TOUFFET 1980 ; CLEMENT & TOUFFET 1982,1988,1990; CLEMENT 1987). La qualité des espèces qui se succèdent dans le temps est aujourd'hui bien établie. Par contre, les stratégies et les processus qui amènent à la dominance de telle ou telle population n'ont encore été que peu abordées.

La lande de Sainte-Anne sur laquelle prennent place nos observations a fait l'objet d'un puissant incendie en Septembre 1990. La recolonisation survenue dès le printemps 1991 confirme ce qui était déjà connu après l'incendie de 1976 sur la lande de Trécesson (FORGEARD & TOUFFET 1979). Un stade muscinal pionnier dominé par le genre *Polytrichum* fait progressivement place à un stade herbacé dominé par le genre *Agrostis* avant le retour à la formation ligneuse basse caractéristique du *Calluno-Ulicetea* (Br.-Bl&Tx 1943) des landes Armoricaines.

Mais la dominance d'une espèce ne signifie pas la disparition des autres. La strate muscinale, aussi bien à Sainte-Anne qu'à Trécesson, est encore très présente. Il subsiste sur chaque site des plages de plusieurs dizaines de m² encore dominées par les polytrics. De ces recherches conduites pendant plus de 20 années au laboratoire d'Ecologie Végétale de l'Université de Rennes I (URA CNRS 1853) découlent 3 observations :

- La connaissance de ces successions secondaires a montré qu'il y a installation dès la fin de la perturbation de 5 espèces de bryophytes terricoles. La première année est dominée par *Funaria hygrometrica* et *Ceratodon purpureus*. Au printemps de la seconde année la végétation est composée à 63% de bryophytes dont 16% de polytrics répartis en 9% de *Polytrichum juniperinum*, 32% de *Polytrichum piliferum* et 59% de *Polytrichum commune* var. *perigoniale*. La majorité des touffes est bien individualisée car de petite taille et répartie aléatoirement dans un tapis continu de *Ceratodon purpureus*.

- La connaissance de la dynamique de population des espèces du genre *Polytrichum*. (WATSON M.A. 1975,1979,1980), (CLEMENT B. 1985,1986), (HOBBS V.J. & PRITCHARD N.M. 1987). Mais aussi, la mise en évidence de différences biométriques entre *P commune* et *P piliferum* se traduit par une différence de forme et de rythme de croissance influençant de façon importante l'aptitude compétitive et l'extension dans le milieu des ces espèces.

- Enfin l'importance qualitative et quantitative de cette formation muscinale peu

fréquente est la cause avérée de situations de blocage au stade polytric de ces successions secondaires (CLEMENT B. 1985).

De ces trois points, il résulte que l'étude des Polytrics devrait permettre de proposer des réponses à plusieurs questions tant sur le plan de la capacité adaptative des espèces que sur l'évolution des écosystèmes.

2) Croissance et développement des populations de Polytrics :

Cycle biologique et Ecologie.

Les 120 espèces qui constituent le genre *Polytrichum* font de lui l'un des plus représentés parmi les bryales nématodontes (SMITH 1978). Ces plantes sont robustes, cespiteuses à tige dressée, généralement non ramifiée. Les feuilles ont une nervure médiane très large garnie en face interne de nombreuses lamelles chlorophylliennes assimilatrices ; le limbe au contraire est très réduit.

Le cycle de développement des Bryophytes est extrêmement stable et comporte toujours deux phases successives (ROLAND & VIAN 1985).

- la phase **gamétophytique haploïde**: une spore monochromatique émet un protonéma chlorophyllien filamenteux et transitoire sur lequel se différencient les bourgeons des tiges feuillées. Chez les polytrics, espèces **dioïques**, chaque protonéma donne naissance à une colonie d'individus tous du même sexe. Les pieds mâles ont une croissance végétative non interrompue par la différenciation des corbeilles anthéridiales. Au contraire, les pieds femelles portent le sporogone et meurent à la maturité de celui-ci. La croissance végétative s'arrête lors de la fécondation de l'oogone.

- la phase **sporophytique diploïde**, très courte, correspond au développement du sporogone porté et nourri par le gamétophyte femelle.

Outre ce cycle digénétique haplodiplophasique, les polytrics, comme toutes les bryophytes, gardent à plusieurs points de vue une forte dépendance vis-à-vis de l'eau:

- La fécondation est aquatique. Le déplacement des spermatozoïdes ciliés nécessite la présence d'eau et a lieu pendant les mois de Mai, Juin et Juillet en Bretagne .

- L'absence de racines ne leur permet pas d'aller chercher l'eau et les sels minéraux en profondeur.

- La faible différenciation tissulaire a pour conséquence l'absence de vaisseaux conducteurs vrais et de stomates. Le végétal ne peut donc pas être homéohydre. La totalité des échanges nutritifs doit se faire par capillarité.

Il en résulte deux principales adaptations : les polytrics sont **reviviscents** (Le poids frais des bryophytes peut varier de 10 à 90% GORENFLOT 1986) ; la face interne des feuilles est couverte de **lamelles parallèles** et monostomatiques qui accroissent considérablement la surface d'échange.

Anatomie de la tige de Polytric.

Chaque tige peut être décrite en trois parties distinctes.

- Une partie **aérienne orthotrope** (la tige). C'est la partie chlorophyllienne feuillée. En coupe elle est sub-circulaire et exceptionnellement ramifiée. Sa croissance verticale montre une **rythmicité annuelle** mise en évidence chez différentes espèces par plusieurs auteurs : *Polytrichum formosum*. MEUSEL (1935), *Polytrichum alpestre* (LONGTON & GREENE 1967), *Polytrichum commune* (WATSON 1975 et CLEMENT 1985). Ce rythme se traduit par une segmentation des tiges, et correspond à une variation de la longueur des feuilles au cours des saisons (LONGTON & GREENE 1967). Cette partie aérienne présente souvent une zone étiolée plus ou moins longue. De couleur rouge, elle porte des feuilles membraneuses réduites à la gaine d'une feuille normale qui lui donne sa couleur. En coupe, cette portion de la tige est nettement triangulaire et elle devient donc tristique dans sa base. Au niveau de chaque nœud s'insèrent des rhizoïdes d'autant plus nombreux que l'on descend vers le rhizome.

- Une partie dite médiane (WIGGELESWORTH 1956) dans la zone de courbure de la tige lorsqu'elle cesse d'être d'orthotrope pour devenir plagiotrope. Cette partie est couverte d'un manchon rhizoïdien. Ces rhizoïdes sont protecteurs mais ils ont aussi un rôle de crampon qui donne sa cohérence à la colonie. Au niveau de ce segment médian dans la partie encore orthotrope, il existe presque systématiquement de nombreux **bourgeons inhibés** dont l'orientation orthotrope parallèle à la tige semble sans équivoque quant à leur avenir de future tige assimilatrice.

- Une **partie souterraine plagiotrope** (le rhizome). Intensément ramifié (LEACH 1931, WIGGELESWORTH 1947, 1956), il est recouvert d'un manchon rhizoïdien protecteur d'autant plus important que le rhizome est âgé et profondément enfoncé. Sous les rhizoïdes, des feuilles scarieuses subsistent.

Architecture des colonies de Polytric.

Les polytrics des landes armoricaines ne sont donc pas monocaules. Chaque nouvelle tige est issue du rhizome ou de la base d'une tige précédente (Fig. 1&2), au-dessous du niveau du sol, ce qui caractérise le modèle de TOMLINSON au sens de HALLE & OLDEMAN (1970). Le modèle de TOMLINSON s'établit par "tallage" à partir d'un individu initial. "Chaque nouvelle tige peut acquérir son autonomie trophique, ce qui maintient une rigoureuse équivalence entre les axes, jusque sur le plan quantitatif". Le modèle de TOMLINSON dérive soit du modèle de HOLTTUM, soit du Modèle de CORNER. Les polytrics des landes peuvent être rattachés sur le plan architectural, **pour les individus femelles au modèle ramifié de TOMLINSON dérivé de HOLTTUM** "ou chaque article est monocarpique", et **pour les mâles au modèle ramifié de TOMLINSON dérivé de CORNER** pour lequel "le perfectionnement des méristèmes édificateurs donne naissance à des articles présentant une sexualité latérale et une croissance indéfinie".

L'extension de la surface des coussins de mousse peut donc être vue sous l'angle d'une

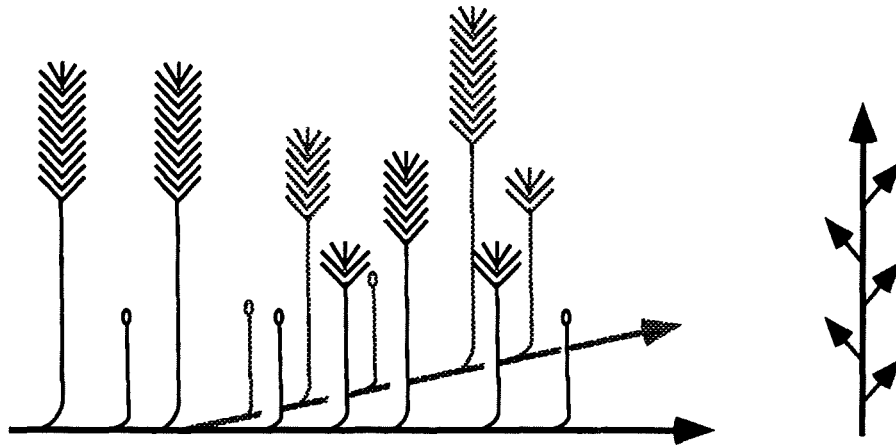


Fig. 1: Architecture monopodiale

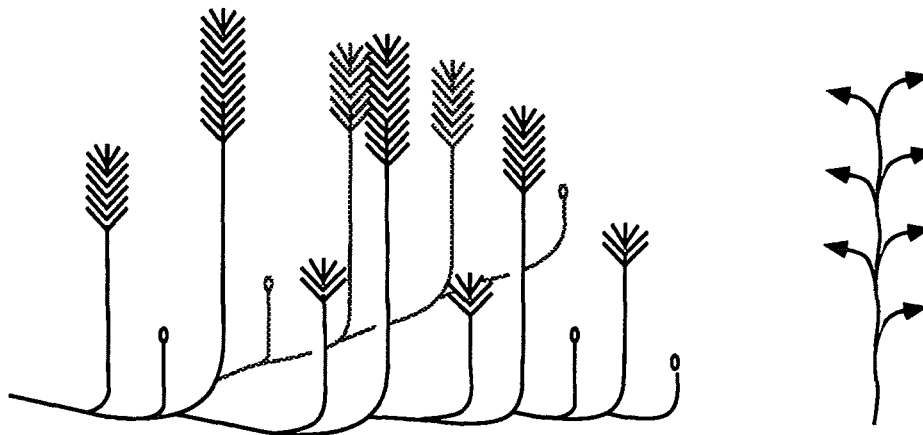


Fig. 2: Architecture sympodiale

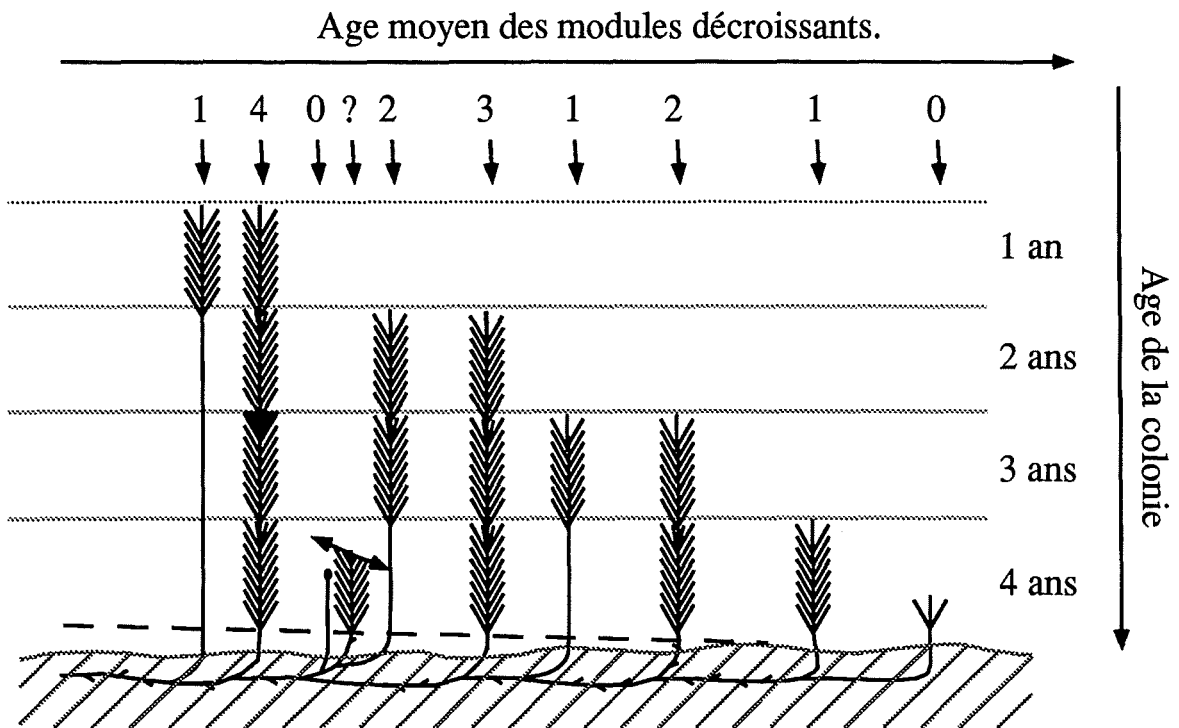


Fig. 3: Relation entre architecture et structure d'âge.

juxtaposition de tiges toutes équivalentes sur le plan fonctionnel, reliées entre elles par un important rhizome. C'est ce rhizome qui est responsable de la composante horizontale de la croissance, et de l'augmentation de surface de l'individu. Chaque colonie de polytrics (l'individu) est donc regardée comme une colonie de tiges (les modules). HARPER & BELL (1979) soulignent que ces **organismes à structure modulaire** présentent la caractéristique d'avoir une forte stabilité morphologique de leur constituant, **les modules**, et une grande plasticité morphologique de l'organisme lui-même, **l'individu** au sens traditionnel du terme. C'est cette particularité qui a conduit les taxonomistes à classer les organismes modulaires en fonction de la forme des modules et non de celle de l'individu dans son entier comme cela est le cas pour les organismes unitaires. Mais cette dualité entre **stabilité modulaire** et **plasticité individuelle** est aussi l'occasion de modéliser une structure simple permettant d'aborder des problèmes plus complexes. Entre autre comprendre les mécanismes d'évolution, puisque en définitive "Nothing in biology has meaning except in the light of evolution" (DOBZHANSKY 1973, in HARPER *et al* 1979). Or la forme de vie des végétaux, est leur réponse aux pressions de sélection ou contraintes exercées par les facteurs du milieu qu'ils soient biotiques ou abiotiques.

3) Dynamique spatio-temporelle intra-clonale : la régulation de la colonie.

Structure d'âge et mortalité densité dépendante.

CLEMENT (1985) s'attachant à la composante verticale de la croissance de *Polytrichum commune*, et en particulier aux marqueurs temporels des tiges feuillées (Fig. 3). Il étudie leur cinétique démographique et démontre que *Polytrichum commune* suit parfaitement **un modèle logistique** d'accroissement de sa population. Ses résultats prouvent également que la régulation de la population est indépendante des facteurs du milieu. Lorsque la densité atteint la valeur 2,60 modules/cm², la capacité limite du milieu (DAJOZ 1974) est atteinte et la régulation de la population liée uniquement à des mécanismes internes dépendant de la densité. La résultante est une mortalité en partie due à la sur-densité.

Forme de vie et position densité dépendante.

La représentation en profil (Fig. 4&5) permet une **vision dynamique du système "colonie de modules"**. La densité par cohorte est globalement identique chez *Polytrichum commune* et chez *Polytrichum piliferum*. Elle montre une valeur par unité de surface maximale au centre de la touffe, décroissante vers les extrémités, et minimale en bordure. Cette densité est réalisée par une forte proportion de tiges de cohorte 1 au centre. Les effectifs de la cohorte 2 se superposent globalement à ceux de la cohorte 1 fondatrice, sa densité est supérieure et plus uniforme. La cohorte 3 montre des variations d'effectifs plus faible avec deux maxima de part et d'autre de la cohorte 1. Elle apparaît comme un fond constant de 8 à 10 tiges qui ne prennent vraiment d'importance qu'en périphérie de la colonie où leur effectif dépasse celui des autres cohortes.

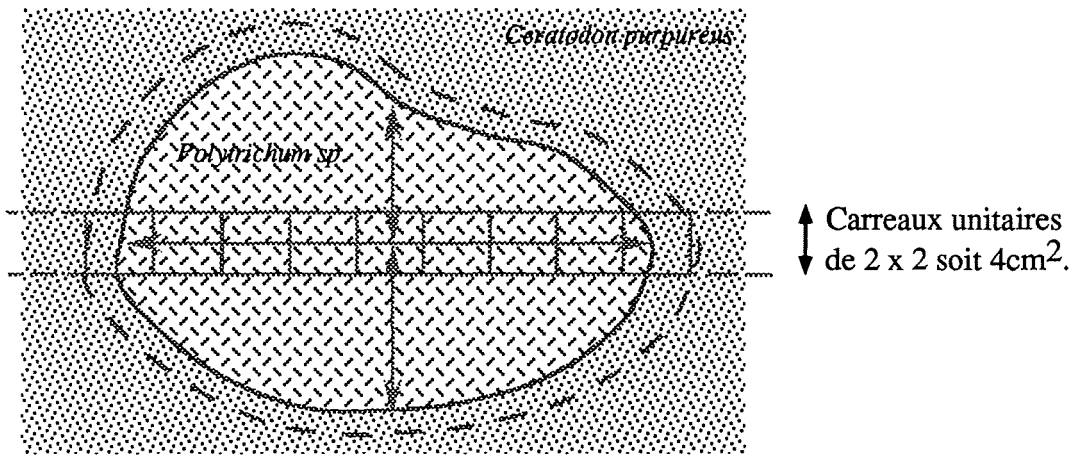


Fig. 4: Principe du sous-échantillonnage pris sur les touffes .

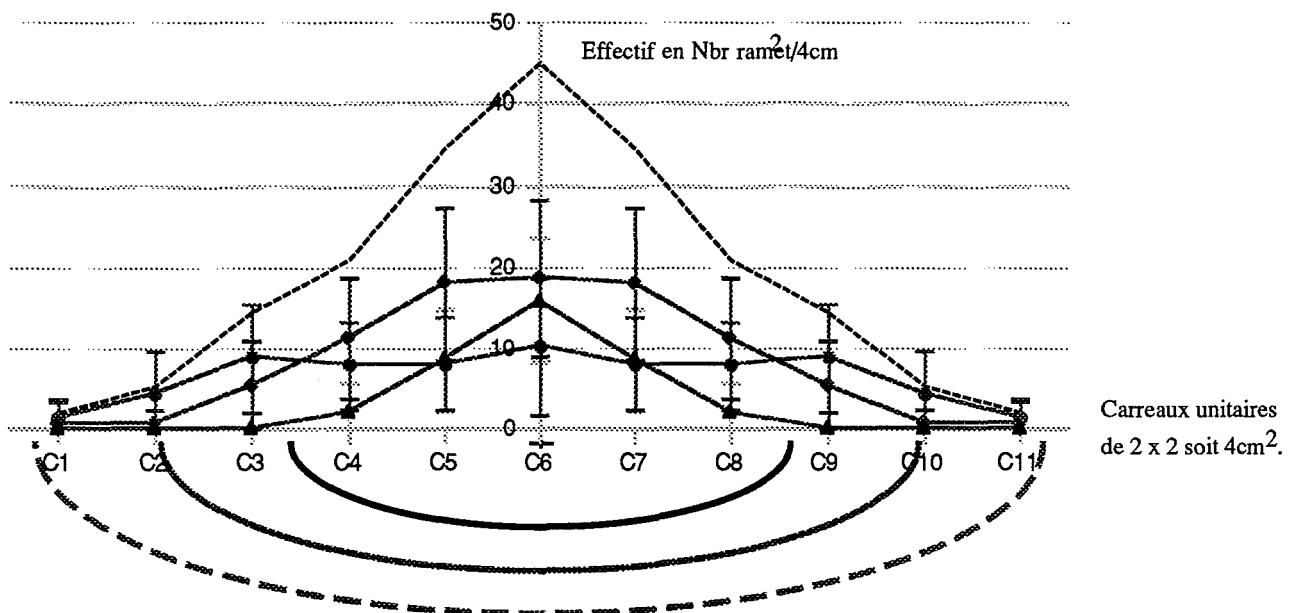


Fig. 5 : Profil moyen de *Polytrichum commune* (Pour n=12 colonies et Ø15cm)

—▲— Pc C1x —●— Pc C2x —■— Pc C3x - - - - - Pc Ctotx

Ces observations renseignent sur plusieurs aspects de la croissance des polytrics :

- Elles traduisent une **ségrégation spatiale** des cohortes dans le temps. La cohorte 3 ayant tendance à pousser là où les cohortes 1 et 2 n'occupent pas la place. La cohorte 3 est toujours représentée par un effectif faible de 5 à 10 tiges. Elles jouent un rôle de second plan là où la densité est la plus forte.

- La valeur 2,60 modules/cm², proposées par CLEMENT (1985) n'est pas significativement différente d'une densité moyenne (2,9 ± 12,3 modules/cm²) qui n'inclut pas les modules de cohorte 3 non feuillés et non chlorophylliens. Cette observation confirme que les modules de cohorte 3 ne jouent pas encore de rôle perceptible dans les processus populationnels internes. Ce point est à relier au fait qu'ils n'ont pas un encombrement suffisant pour pouvoir interagir physiquement avec les autres modules.

- Les cohortes se superposent aux précédentes en uniformisant la densité et en accroissant le diamètre. Cette description de l'accroissement modulaire des colonies de polytrics montre que jusqu'à trois ans la colonisation de l'espace ne s'effectue pas par des anneaux concentriques mais par des disques de diamètre croissant superposés. Ce phénomène si nous vérifions qu'il se maintient dans le temps pourrait en partie expliquer pourquoi les polytrics sont aussi stables dans les successions de lande (CLEMENT, FORGEARD & TOUFFET 1980) . Le fait que la cohorte 3 soit présente sur toute la surface de l'individu montre bien que la plante possède un mécanisme d'auto-entretien capable de faire face à la mortalité qu'entraîne la sexualisation chez les femelles (CLEMENT 1985) mais aussi à une prédation éventuelle, exportatrice d'une partie de l'individu comme l'a souligné HARPER (1981). Prédation qui reste dans les landes et sur les polytrics peu effective.

Globalement ces points montrent que pendant sa croissance la colonie tend à uniformiser sa densité autour de la valeur correspondant à la densité moyenne ou capacité limite biotique du milieu.

Une hypothèse qu'il pourrait être intéressant de vérifier est que la propagation des colonies de polytrics dans l'espace et le temps s'effectue à la manière des ondes en surface d'un liquide. L'épicentre correspondait au pic de cohorte 1 suivi d'un affaissement de ce pic en cohorte 2 lui-même suivi de la propagation d'une vague circulaire correspondant à la cohorte 3.

4) Les contraintes physiques liées à l'architecture :

Modélisation de la croissance horizontale des végétaux clonaux.

BELL (1985) s'est intéressé à la composante horizontale de la croissance des végétaux clonaux. Il fonde son approche sur les travaux de HALLE & OLDEMAN (1970) qui décrivent les plantes en terme quantitatif. Pour ces auteurs, chaque plante correspond à une succession d'unités mises bout à bout. Chaque unité est composée d'un nœud, d'une feuille, d'un entre-nœud et à son extrémité d'un méristème dont les potentialités peuvent varier. BELL & al (1979) construisent un modèle déterministe pour lequel ils quantifient et fixent un

minimum de paramètres reproduisant l'architecture de certains végétaux à rhizomes et à stolons (SUTHERLAND & STILLMAN 1990). Leur modèle comprend 3 règles déterministes agissant comme des contraintes à l'édification de l'architecture de la plante.

La plante commence à croître avec un seul bourgeon terminal (Fig. 6&7) . Ce bourgeon est lui-même porteur de feuilles et des futurs bourgeons qui se développeront ou non à leur tour.

En fait l'un de ces trois choix fixe **le devenir du bourgeon** :

- Se développer en un entre-nœud.
- Rester dormant et ne se développer que tardivement.
- Avorter, ou se transformer.

A chaque instant un bourgeon qu'il soit dormant ou en croissance est susceptible de mourir ou d'être endommagé irréversiblement. Si un bourgeon se développe, il peut continuer à croître indéfiniment et donner un axe monopodial. Inversement, il peut tôt ou tard finir en une inflorescence ou un apex avorté. Ces axes particuliers ont un allongement prolongé par la croissance d'un bourgeon axillaire. Cette croissance sympodiale est typique d'une majorité de plantes rhizomateuses. De tels bourgeons peuvent se développer en de longues tiges ou de courtes tiges de sorte que pèse sur eux une contrainte de **taille de l'entre-nœud**.

Les méristèmes sont localisés à des positions précises sur la tige développée à la génération précédente. Ils doivent, s'il se développent à leur tour, avoir une orientation particulière par rapport à leur parent. C'est la troisième contrainte : **l'angle de ramification**.

Ce modèle a été spécialement construit pour simuler la croissance horizontale de plantes stolonifères ou rhizomateuses dont la majorité ont une croissance sympodiale et pour qui les nouvelles tiges ne s'ajoutent qu'à l'extrémité distale des anciennes.

Deux critiques ont été formulées à l'encontre de ce modèle par SUTHERLAND & STILLMAN (1990). Pour ces auteurs les modèles sont habituellement utilisés pour décrire la morphologie des plantes et pour voir combien de règles sont nécessaires pour décrire leur croissance. Cette remarque souligne implicitement que les règles ou leurs valeurs ne peuvent être fixées a priori. Ils soulignent également que la croissance des plantes n'est pas déterministe, mais que l'introduction d'aléatoire produit d'innombrables simulations dans lesquelles il est délicat de reconnaître la réalité.

L'apport d'un modèle déterministe.

Néanmoins l'intérêt du modèle de BELL est d'avoir su reconnaître que **la forme des végétaux clonaux n'est pas l'expression littérale d'un plan pré-établi mais la juxtaposition dans l'espace et dans le temps d'unités dépendantes directement de leur voisines immédiates**. BELL ajoute "A simulated plant will not be a copy of an existing plant but will be a unique plant growing to real-plant rules."

Le résumé des contraintes physiques pesant sur l'architecture des végétaux à rhizome ou stolon conduit à plusieurs remarques :

- le nombre de méristèmes susceptibles de se développer sur une tige.
- la potentialité de chaque méristème en terme de longueur de tige doit être fixée

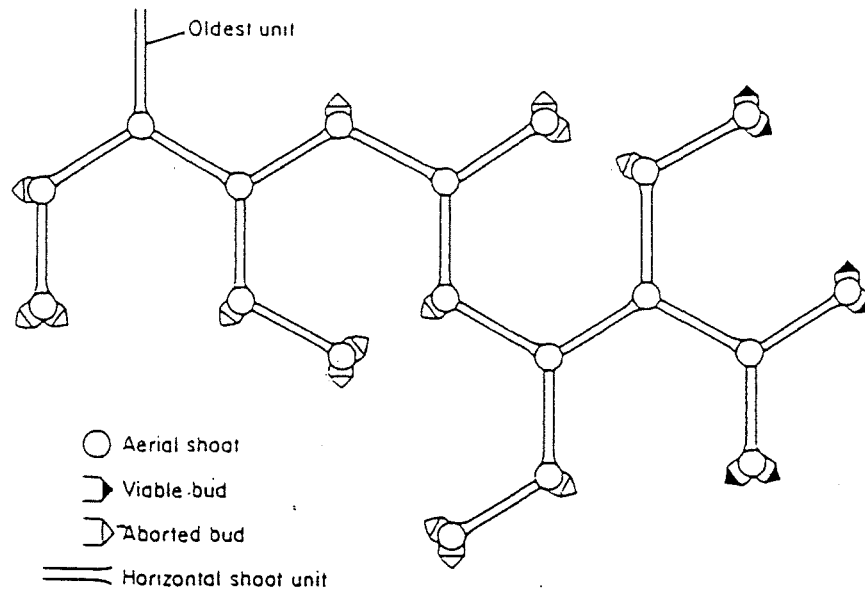


FIG. 6 Diagrammatic plan view of the rhizome system of one plant of the ginger *Alpinia speciosa* to show its construction in terms of the accumulation of shoot-units.

1 "ALPINIA"

1	1	2							
1	1	1	0	72	72	60	-1	-1	50
2	1	1	1	50	75	60	1	-1	100

Modélisation du rhizome de *Alpinia speciosa* d'après BELL *et Al.* (1979)

- 1ère ligne : Nombre de types de ramifications.
- 2ème ligne : Caractéristique du premier type de ramification : type de ramification, longueur, nombre de bourgeons.
- 3ème ligne : Caractéristiques de la première ramification née du premier bourgeon.
- 4ème ligne : Caractéristiques de la seconde ramification née du second bourgeon.

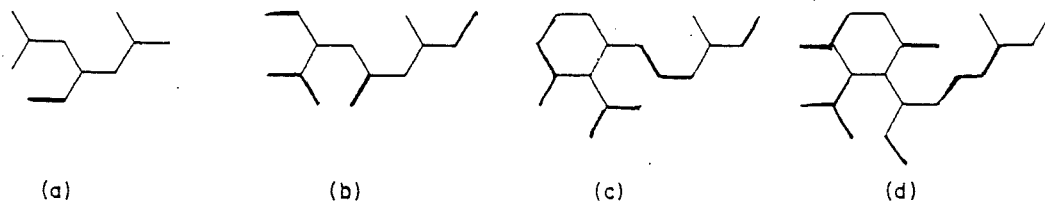


FIG. 7 Simulation sequence of the rhizomatous growth of *Alpinia speciosa* (plan view). Four successive "generations" (a)-(d) are shown. The sequence is developing in a stochastic manner in accordance with the rules contained in its growth file. In this example the durability of each shoot-unit is set at five generations, after which a unit rots (i.e. disappears). These old units are identified by thick lines in the figure.

pour chaque méristème.

- la position de la tige-fille par rapport à la tige mère.
- l'orientation de la tige-fille, soit l'angle de ramification par rapport à la tige-mère.
- la direction de la tige-fille par rapport à la tige-mère.
- le devenir du méristème en terme de vie ou mort ou plus exactement développement ou non.

- le devenir du méristème en terme de direction par rapport à la tige-mère qui lui a donné naissance.

Beaucoup plus de 3 paramètres doivent être fixés pour décrire l'architecture en termes déterministes. Les propositions impliquant le destin correspondent à des phénomènes aléatoires qui ont été soigneusement quantifiés et fixés de sorte que le modèle masque un aléatoire qui ne peut être pris en compte par les règles précédemment définies. Dans ces conditions, la simulation est effectivement déterministe mais elle oblitère des processus stochastiques.

Enfin elle ne tient aucun compte de la composante verticale de la croissance des végétaux clonaux ou coloniaux. Or ce dernier point est capital et doit certainement permettre de réduire sensiblement le nombre de règles nécessaires à l'édification de l'architecture des végétaux clonaux.

L'intégration de cette composante verticale passe par la prise en compte de la nécessité pour chaque clone ou chaque module constituant l'organisme d'avoir accès à une parcelle des ressources du milieu, ne serait-ce que la lumière. L'idée est due à HARPER & BELL (1979) qui soutiennent que la notion de densité n'est appropriée que pour les organismes libres pour qui il est impossible de prendre en compte directement l'action de la prédation ou de la compétition. Ils lui préfèrent pour les organismes fixes la notion de distance inter-individuelle. La spatialisation de ce concept aboutit à la notion de disque d'influence ou cylindre d'influence à l'intérieur duquel chaque clone ou module captera les ressources qui lui sont nécessaires.

Cette conception implique donc une nouvelle contrainte visant pour les végétaux coloniaux à **maximiser** leur occupation de l'espace tout en **maximisant** leur captage de ressources. La réponse théorique à la question est donnée par le pavage optimum du plan par des disques : une disposition en hexagone centré où 6 disques occupent un sommet de l'hexagone plus 1 au centre (Fig. 8).

Cette contrainte ne répond pas forcément à la question finaliste : quelles est la longueur de l'entre-nœud ? ou combien de méristèmes sont susceptibles de se développer sur une tige ? Mais peut-être la question est-elle plutôt : de combien la tige peut-elle s'allonger ? Et combien de méristèmes ont la possibilité de se développer ? Par contre l'introduction de cette contrainte ne nécessite pas de faire intervenir le destin. Toutes les potentialités à tout moment peuvent s'exprimer mais pas forcément se réaliser. **La maximisation de contraintes antagonistes provoque l'optimisation des structures et c'est l'optimisation des structures qui permet de reconnaître une organisation.**

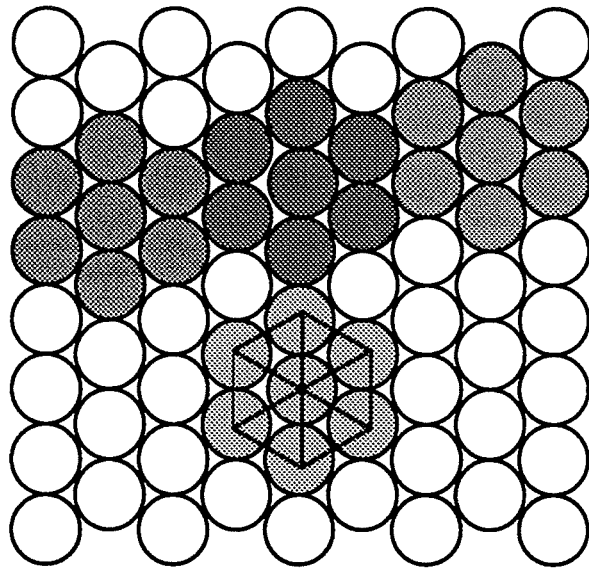


Fig. 8 : Le pavage optimum du plan correspond à une disposition hexagonale centrée.

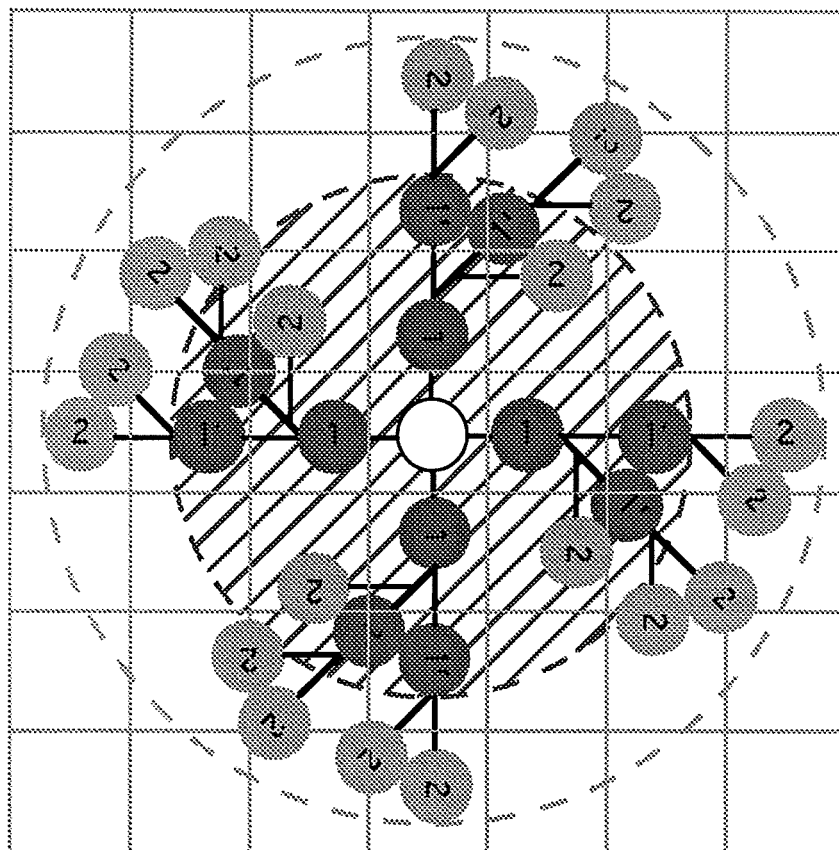


Fig. 9 : Une modélisation qui inclurait le paramètre déterministe de pavage optimum devrait permettre de prendre en compte les composantes horizontales et verticales de la croissance et restreindre à un petit nombre les simulations probables au regard des paramètres pris en compte par un modèle tel que celui de BELL *et al* (1979).

Une nouvelle proposition de modèle déterministe.

Par rapport à tous les points exposés ci-dessus, il est possible d'envisager une modélisation de l'architecture utilisant les composantes horizontales et verticales de la croissance en ne prenant en compte que des règles liées à l'encombrement des modules (Fig. 9). Le modèle doit vérifier un unique paramètre déterministe qui est le pavage hexagonal du plan et à partir de là implique :

- la densité optimum proposée comme capacité limite du milieu par CLEMENT (1985)
- la forme sub circulaire des colonies.
- la disposition concentrique des cohortes liée à la dynamique du système.

Il doit normalement permettre de tester une bonne part des paramètres proposés par BELL&Al (1979)

5) Les contraintes biotiques liées à l'environnement:

Toutefois ce développement implique une hypothèse jusque là laissée sous silence. Pourquoi certains végétaux clonaux ou coloniaux qui cherchent à **maximiser** leur occupation de l'espace tout en **maximisant** leur captage de ressources restent-ils intimement liés. Alors que la solution simple consisterait à s'éloigner le plus possible les uns des autres de sorte que l'espace qui est synonyme de ressources soit maximum pour tous. Ainsi la plante occupe un espace maximum, et capte un maximum de ressources tout en minimisant leur perte à cause à la compétition intra-clonale. C'est la stratégie qu'adoptent au premier abord les organismes unitaires.

La question qu'il revient donc de poser est : **Quelle force, quel intérêt, les végétaux clonaux ont-ils à maintenir une forte cohérence entre eux ?**

Une série de réponses simples, ou plus exactement du premier degré ont été proposées.

Une forme en coussin hémisphérique.

RUFFIER-LANCHE (1963) illustre par de nombreux exemples que tous les types architecturaux aboutissant à des végétaux en coussinet se rencontrent dans les milieux présentant une forte contrainte de sécheresse aussi bien réelle liée à l'apport atmosphérique que physiologique liée à la dessiccation. Il souligne que la forme hémisphérique de nombreux coussinets est l'une des plus aérodynamiques. Les polytrics sur les landes bretonnes ne dérogent en rien à ces observations. Les landes présentent de fortes contraintes édaphoclimatiques. De par leur position dans le paysage elles sont souvent en sommet de butte exposée au vent . Leurs sols pauvres et peu profonds sont détrempés en hiver et desséchés en été. La température peut y atteindre 30°C. Les polytrics y croissent bien en touffes hémisphériques maintenant une humidité importante en leur sein même en plein été. Du fait qu'ils sont poïkilohydres et reviviscents ils se dessèchent progressivement au cours de la journée. La dessiccation débute au sommet par les modules les plus hauts, les plus exposés au vent et les moins protégés de l'évaporation (il ne s'agit pas vraiment d'évapotranspiration).

Elle gagne ensuite des modules de plus en plus courts.

Mais la compacité présente d'autres intérêts. Ces végétaux ne possèdent pas de tissus secondaires de soutien, or des clones de plusieurs dizaines de centimètres sont connus (SARAFIS 1971). La compacité permet donc à la colonie de gagner en hauteur et ainsi de répondre à la compétition exercée par végétaux supérieurs. De plus, le fait de croître côte à côte évite les intrusions d'autres espèces. En maintenant une canopée fermée la plante coupe les ressources à une éventuelle germination de graines déjà présentes au sol. Elle évite également que des graines venant du dehors atteignent le sol. C'est ce qui est décrit par CONNELL & SLATYER (1977) comme un modèle d'inhibition puis vérifié sur les Polytrics par CLEMENT (1985).

L'architecture en colonie hémisphérique et la compacité permettent donc le maintien de ces espèces dans ce milieu. La forme hémisphérique donne moins de prise au vent et donc une meilleure résistance à la sécheresse. La proximité entre les modules favorise la conservation de l'humidité en limitation de l'évaporation. Mais également l'aptitude compétitive en augmentant les potentialités de croissance en hauteur, en limitant l'intrusion au sein même de l'individu.

Emergence des caractères de société.

HARPER (1981) quant à lui souligne l'intérêt de la croissance clonale face à la prédation. Jamais un prédateur ne consomme en entier l'individu, il exporte seulement une part des modules permettant ainsi la régénération. La plante divise un risque individuel en un risque collectif, c'est ni plus ni moins qu'une assurance. Mais la structure clonale présente également un polymorphisme modulaire en partageant les tâches. Tous les modules ne se consacrent pas simultanément à la reproduction ou à la croissance végétative. **La croissance clonale induit en définitive des concepts propres à toutes les sociétés.**

6) Discussion :

Il existe bien dans cet exemple une puissante relation entre **contrainte, apparition de forme organisée et évolution** (Fig. 10). Il est établi que le génotype sur lequel l'évolution a prise est la résultante de contraintes environnementales extrinsèques et de contraintes phénotypiques intrinsèques. C'est ce que MONOT (1970) a traduit par "Hasard et Nécessité" et qu'il décrit comme étant le moteur de l'évolution. Par ailleurs, l'évolution produit des structures collectives organisées au sein desquelles des formes sont identifiables. Ces formes sont porteuses de contraintes inhérentes qui interagissent avec l'environnement pour donner à la génération suivante une nouvelle forme ni tout à fait identique ni tout à fait différente de celle qui lui a donné naissance. Or, si dans ce sens le processus est bien établi, il soulève des interrogations causales inverses. Comme par exemple : existe-t-il des contraintes déterminant des formes ? ou encore l'émergence de forme sociale d'organisation au cours de l'évolution est-elle liée aux processus dynamiques ? A ces questions, le modèle polytrique apporte des éléments de réponse.

Il montre que **l'encombrement des modules est une contrainte intrinsèque** qui conduit au mieux

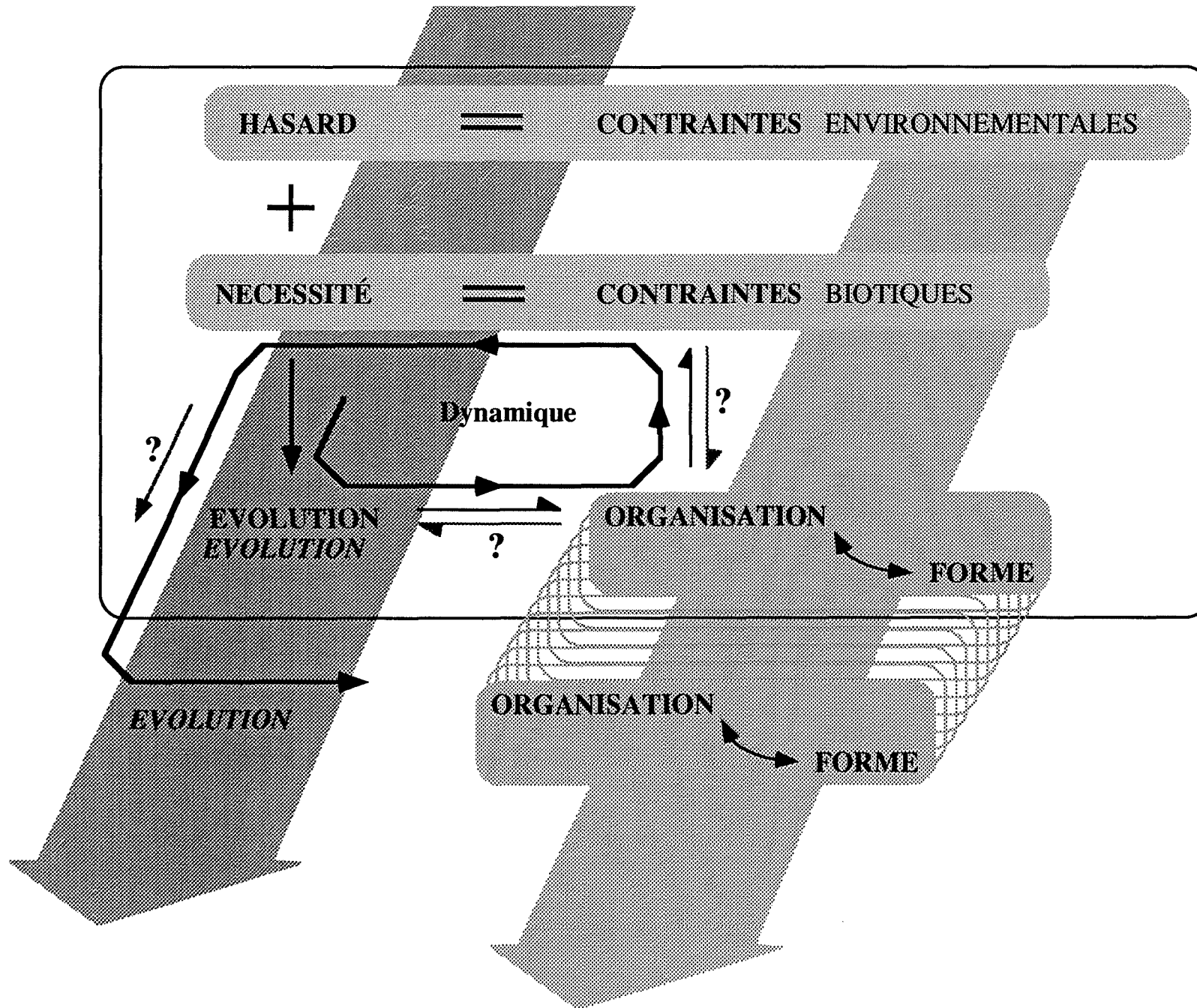


Fig. 10 : Hasard et contraintes dans la genèse des colonies de Polytrichs.

à une densité égale à celle correspondant au pavage hexagonal du plan. Ce type de pavage, et donc l'encombrement, implique également la forme sub-circulaire des colonies. **La dynamique interne de croissance des modules** induit pour sa part une croissance en hauteur différentielle responsable de la forme hémisphérique. L'ensemble du processus est maintenu compact par des **contraintes extrinsèques aléatoires** liées à l'environnement, en particulier **l'impérieuse nécessité de retenir l'eau ou d'empêcher l'intrusion dans l'organisation elle-même**.

L'adoption d'une structure : coloniale si l'on considère juste les seuls modules, clonale si l'on considère leur lien de parenté ou sociale si l'on prend en compte leur organisation, fournit à la plante un avantage adaptatif qui la conduit à être moins sensible aux aléas du milieu. L'émergence de forme collective tend à affranchir les organismes des accidents historiques (prédation, sécheresse, compétition) les rendant moins dépendants du hasard. Les contraintes intrinsèques prennent une importance évolutive supérieure aux contraintes extrinsèques de sorte que la collectivité a une emprise sur son évolution plus forte qu'un organisme unitaire.

Dans un certain sens cet exemple démontre que cette architecture que l'on considérerait comme stochastique au premier abord est probablement déterministe ce qui n'est pas sans rappeler un phénomène chaotique.

6) Bibliographie :

- BELL A.D., ROBERTS D. & SMITH A., 1979 - Branching patterns : the simulation of plant architecture. *J. Theor. Biol.*, n°81, pp 351-375.
- BELL A.D., 1985 - On the astogeny of six-cornered Clones: An aspect of modular construction. In Studies on plant demography a festschrift for John Harper. *Academic Press Inc* 1985, London, pp187-207.
- CLEMENT B. et TOUFFET J., 1982.-Le rôle des incendies dans la succession des communautés végétales des landes bretonnes. *107ème Congrès national des Sociétés savantes*, Brest, Sciences, fasc. II, 51-62.
- CLEMENT B. et TOUFFET J., 1988.-Le rôle des Bryophytes dans la recolonisation des landes après incendie. *Cryptogamie, Bryol. Lichénol.*, 9(4), 297-311.
- CLEMENT B., 1985.-Structure et dynamique de deux populations de *Polytrichum commune* des landes et tourbières des Monts d'Arrée (Bretagne, France). Analyse démographique. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, Vol. 6, n°4, 345-364.
- CLEMENT B., 1986.-Structure et dynamique de deux populations de *Polytrichum commune* des landes et tourbières des Monts d'Arrée (Bretagne, France). Croissance et productivité. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, Vol. 7, n°2, 115-133.
- CLEMENT B., 1987.-Structure et dynamique des communautés et des populations végétales des landes bretonnes. *Thèse de 3ème cycle*, Université de Rennes, 310 p.
- CLEMENT B., FORGEARD F. et TOUFFET J., 1980.-Importance de la végétation muscinale dans les premiers stades de recolonisation des landes après incendie. *Bull. Ecol.*, 11, 3, 359-364.
- CLEMENT B. & TOUFFET J., 1990 - Plant strategies and secondary succession in Brittany heathlands after severe fire. *Journal of vegetation Science*, 1990, 1, 195-202.

- CONNELL J.H. & SLATYER R.O., 1977 - Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *Am. Nat.* 111; pp1119-1144.
- DAJOZ R., 1974. -Dynamique des populations. Editions Masson et Cie, Paris, collection d'écologie 6, 301 p.
- FORGEARD F. & TOUFFET J., 1979.-Les premières phases de recolonisation végétale après incendie dans les pelouses et les landes de la région de Paimpont (Ille-et-Vilaine). *Bull. Soc. bot. Fr.* 126, *Lettres bot.*, 4, pp 473-485.
- GORENFLOT R., 1986.-Biologie végétale: plantes supérieures. Editions Masson, Paris New-York, tome I, 2^{ème} édition révisée, pp 204-213.
- HALLE F.& OLDEMAN R. A. A., 1970 - Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Collection de Monographies Botaniques et de Biologie Végétale N°6, Masson, Paris.
- HARPER J.L. & BELL A.D., 1979 - The population dynamics of growth form in organisms with modular construction. *Population Dynamics. Symposium of the British Ecological Society*; 20, pp. 27-52. Ed. by ANDERSON R.M. et TURNER B.D. et TAYLOR L.R. Blackwell Scientific Publication Oxford.
- HARPER J.L., 1981 - The concept of population in modular organisms. *Theoretical Ecology Principles and Applications*. Ed. by R.M. MAY and Ed. BLACKWELL Scientific Publication Oxford, pp. 55 -77.
- HOBBS V.J. & PRITCHARD N.M. 1987. Population dynamics of the moss *Polytrichum piliferum* in North-East Scotland. *J. Ecol.*, 75 : 177-192.
- LEACH W., 1931 - On the importance of some mosses pioneers in unstable soils, *J. Ecol.*, 1931, 19, p. 98.
- LONGTON R.E. & GREENE S.W. 1967. Plant and invertebrate physiology. The growth and reproduction of *Polytrichum alpestre* Hoppe on South Georgia. *Philosophical Transaction of the Royal Society.* 252 : 295-322.
- MEUSEL H., 1935. - Wuchsformen und wuchstypen der Europäischen Lanbmosse. *Nova Acta Leopoldina*, 3 (12), pp122-278.
- MONOD J., 1970. - Le hasard et la nécessité. Ed. du Seuil Col. Point Science, pp. 243.
- ROLAND J.C. et VIAN B., 1985.-Atlas de biologie végétale: organisation des plantes sans fleurs. Editions Masson, Paris New-York, tome I, 2^{ème} édition révisée, 110 p.
- RUFFIER-LANCHE, R. 1963. Plantes de montagne. *Bull. Soc. Amat. Jardins Alpins*, III, n° 45 : pp3 - 13.
- SARAFIS V., 1971. - A biological account of *Polytrichum commune*. *New Zealand J. Bot.*, 9, pp711-724.
- SMITH A.J.E., 1978.-The moss flora of Britain and Ireland. Cambridge University Press, Cambridge, pp89-97.
- SUTHERLAND W.J.& STILLMAN R.A., 1990. - Clonal growth: Insights from models. In Clonal growth in plants: regulation and function. Academic Publishing 1990, The Hague. , pp 95-113.

- WATSON M. A., 1975. - Annual periodicity of incremental growth in the moss *Polytrichum commune*. *The Bryologist*, 1975, 78, pp. 414-422.
- WATSON M. A., 1979. - Age structure and mortality within a group of closely related mosses. *Ecology*, 1979, 60, 5, pp. 988-997.
- WATSON M. A., 1980. - Patterns of habitat occupation in mosses-relevance to considerations of the niche. *Bull. of the Torrey Bot. Club*, 1980, 107, 3, pp. 346-372.
- WIGGLESWORTH G., 1947 - Reproduction in *Polytrichum commune* and the significance of the rhizoid system. *Trans. Br. Bryol. Soc.*, 1947, n° 1, pp. 3-14.
- WIGGLESWORTH G., 1956 - Further notes on *Polytrichum commune* L. *Trans. Brit. Bryol. Soc.*, 1956, 3 pp. 115-120.
-

Simulation multi-agents flous d'une colonie d'insectes

R. Cozien⁽²⁾ , *J. Tisseau*⁽¹⁾ , *P. Alas*⁽¹⁾ , *F. Harrouet*⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest
CP 15 - 29608 Brest Cedex - France
Tel. (33) 98.05.66.31 , Fax. (33) 98.05.66.21
e-mail. tisseau@li2.enib.fr

⁽²⁾ CNRS UA 696 - Université de Rennes 1
Laboratoire d'Evolution des Systèmes
Naturels et Modifiés
35042 Rennes Cedex - France
Tel. (33) 99.28.61.45 , Fax. (33) 99.38.15.71

Résumé

Nous proposons ici une nouvelle méthode de simulation d'une colonie d'insectes où chaque insecte est considéré comme un agent réactif autonome. La réactivité d'un agent est basée sur un ensemble capteurs/actionneurs contrôlé par la logique floue. L'évolution libre des agents nous permet de simuler différents comportements naturels : déplacement, reproduction, vie et mort dans un réseau, prédation, tri de larves. Cette approche qualitative se révèle pertinente dans le contexte de la biologie qui ne propose aucune modélisation formelle d'une colonie d'insectes.

Mots-clés

vie artificielle, biologie qualitative, simulation, multi-agents, logique floue

1 Introduction

Il n'existe pas actuellement de cadre général pour l'étude des populations d'insectes considérées comme un ensemble d'agents interagissant entre eux. Les populations sont le plus souvent modélisées comme des systèmes dynamiques [5] dont l'analyse mathématique est difficilement interprétable par rapport aux comportements naturels observés [4].

Nous proposons d'aborder une telle étude d'un point de vue qualitatif pour prendre en compte plus facilement l'expérience empirique des biologistes. Dans cette approche, chaque insecte est vu comme un agent réactif autonome doté de capteurs et d'actionneurs contrôlés par un contrôleur flou [1]. L'évolution de la population est le résultat des évolutions *a priori* indépendantes de chaque individu.

2 Insectes \equiv agents flous

Dans notre modèle, un insecte est un agent qui a des attributs biophysiques propres tels que son espérance de vie, sa capacité à se reproduire, sa vitesse de déplacement, son champ de vision, ... Il possède également des capteurs tels que des détecteur d'agents (congénère, nourriture, prédateur, ...), des détecteurs d'environnements (rugosité, couleur, ...), et un certain nombre d'actionneurs (reproduction, communication d'informations, suppression d'agents, ...). Son comportement est régi par un ensemble de domaines et de règles flous, et peut ainsi être décrit par un régulateur flou (figure 1) [6] [3].

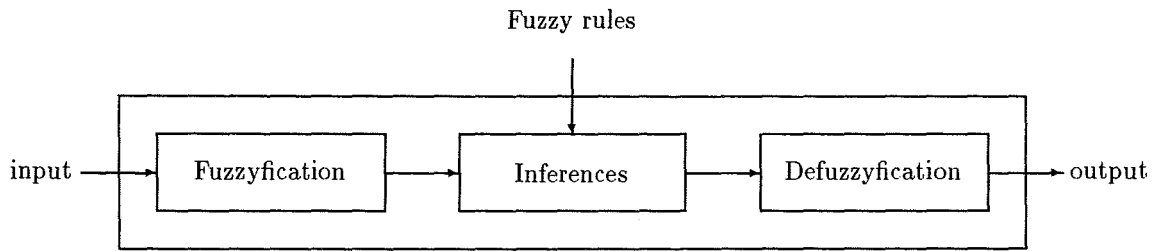


Figure 1 : un contrôleur flou

Nous avons développé un langage de description de nos agents : un exemple de description est présenté sur la figure 2 pour un agent capable de se déplacer dans un réseau en suivant la rugosité minimum.

```

agent Beetle :

attributes
  color = YELLOW,
  dt = 0.1,
  x, y, orientation,
  direction, speed = 2,
  dl, turning = PI/6,
  rough, angleMin, angleMax,
  range = 3, vision = PI;

sensors S1 : texture(rough,angleMin,angleMax)[roughness,vision,range];

fuzzy
  input
    angleMin :
      bn(-vision/2,-vision/2,-vision/6),
      sn(-vision/2,vision/6),
      sp(-vision/6,vision/2),
      bp(vision/6,vision/2,vision/2);

  output
    direction :
      bn(-5*turning/3,-turning/3),
      sn(-turning,turning/3),
      sp(-turning/3,turning),
      bp(turning/3,5*turning/3);

  rule R1 : direction[bn] <== angleMin[bn];
  rule R2 : direction[sn] <== angleMin[sn];
  rule R3 : direction[sp] <== angleMin[sp];
  rule R4 : direction[bp] <== angleMin[bp];

evolution
  get S1,
  fuzzyfication angleMin,
  infer [ R1,R2,R3,R4 ],
  defuzzyfication,
  hide,
  dl = speed * dt,
  orientation=orientation+direction,
  x = x + dl * cos(orientation),
  y = y + dl * sin(orientation),
  show;
  
```

Figure 2 : exemple de description d'un agent flou

Un agent est ainsi capable de percevoir instantanément les modifications de son environnement et de réagir de la façon la plus adéquate en fonction de ses règles de comportement et de ses caractéristiques biophysiques. De plus, il est possible de doter nos agents de métarègles pour choisir entre plusieurs comportements — tous définis par des ensembles de règles floues — selon les situations qu'ils rencontrent. Ce système de métarègles nous permet d'affiner le comportement global de l'agent tout au long de la simulation, afin de tendre vers des comportements plus réalistes.

L'exemple de la figure 3 illustre le comportement d'un prédateur selon la présence ou non d'une proie dans son champ de vision.

```

agent Predator :

attributes
  ...
sensors
  S1: near(angle,distance,agent)[prey];
actuators
  A1: kill[agent];

fuzzy
  ...
evolution
  get S1,
  if (agent == found) & (distance <= range) &
    (angle >= -vision/2) & (angle <= vision/2)
    [
      fuzzyfication angle,
      infer [ R1,R2,R3,R4 ],
      defuzzycation,
      if (distance < range/20) activate A1
    ]
  else [ direction = turning * (2 * rand - 1) ] ,
  hide,
  dl = speed * dt,
  orientation = orientation + direction,
  x = x + dl * cos(orientation),
  y = y + dl * sin(orientation),
  show ;

```

Figure 3 : exemple de comportement d'un prédateur

3 Simulation multi-agents flous

Le rôle du moteur de simulation est de désigner à tour de rôle les différents agents de la population afin de les faire évoluer. On considère alors que les agents évoluent chacun leur tour durant un intervalle de temps très court. Le fait d'être obligé de travailler en temps discret est un des principaux problèmes de la simulation informatique. La méthode d'attribution du temps à chaque agent est un point sensible de la simulation d'une simulation multi-agents.

Tout d'abord, il faut savoir si chaque agent doit évoluer complètement lorsqu'il est désigné, ou bien si l'on doit attendre que tous les agents aient été désignés pour appliquer les modifications qui leur sont apportées. Cette deuxième solution peut aboutir à des conflits. En effet, si deux agents décident d'évoluer mais que leurs actions sont incompatibles alors, au moment de modifier l'état de tous les agents, le moteur de simulation doit disposer d'un critère pour déterminer lequel des deux agents verra son souhait respecté. Dans le cas d'une population d'insectes, il est difficile de définir de tels critères; c'est pourquoi nous avons choisi la première solution où chaque agent évolue complètement lorsqu'il est désigné. Ici, la désignation d'un agent est aléatoire et tous les agents participent à ce choix aléatoire : un même agent peut donc évoluer deux fois de suite.

Nous avons testé cette méthode à l'aide de trois exemples simples.

1. La première simulation consiste à étudier les déplacements, vies et morts d'insectes non sociaux au sein d'un réseau naturel. Les noeuds de ce réseaux sont reliés par des arcs caractérisés par une certaine rugosité [2].
2. La deuxième simulation met en présence des agents "prédateurs" et des agents "proies". Les prédateurs explorent aléatoirement l'espace jusqu'à détecter une proie; une proie étant détectée, ils cherchent à s'en approcher et à la manger. A l'inverse, les proies cherchent à fuir les prédateurs.
Il est intéressant de faire varier le rapport proie/prédateur, car on constate alors que les prédateurs n'auront pas le même type de trajectoires selon qu'ils sont nombreux ou non. Toutefois, globalement, ils arrivent toujours à tuer toutes les proies qu'ils détectent.
3. Dans la troisième simulation, les insectes savent ramasser des "graines". Au cours de leur marche aléatoire au sein du réseau, ils déposent leur graine dès qu'ils en trouvent une autre de la même couleur.
Lorsque la densité d'insectes est suffisamment grande, la population arrive alors à rassembler les graines en tas de différentes couleurs (tri par société multi-agents flous) : un agent ne connaît pas la notion de tri; c'est la société multi-agents qui effectue réellement le tri.

4 Conclusion

Suite aux diverses simulations réalisées, nous constatons que nos insectes "flous" ont des comportements qualitatifs cohérents avec l'expérience des biologistes.

La logique floue permet de doter nos agents de comportements qualitatifs, qui dans bien des cas, sont les seules informations accessibles : soit les données sont trop imprécises, soit les modèles formels n'existent pas.

La simulation par multi-agents flous ne dépend pas de l'exemple considéré (une colonie d'insectes) et sa généralité permet de l'étendre à d'autres domaines tels que la robotique, l'immunologie ou la physique.

References

- [1] Buckley J.J., Hayashi Y., *Fuzzy input-output controllers are universal approximators*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 58, n°3, 273-278, 1993.
- [2] Burel F., *Dynamique du paysage - flux et réseaux biologiques.*, Ph.D. Thesis, Université de Rennes, 1991.
- [3] Kosko B., *Neural networks and fuzzy systems : a dynamical approach to machine intelligence*, Prentice Hall, 1991.
- [4] Lebreton J-D., Gonzalez-Davila G., *An introduction to models of subdivided populations*, Journal of Biological Systems, Vol. 1, n°4, 389-423, 1993.
- [5] May R.M., *When two and two do not make four : nonlinear phenomena in ecology*, Proceedings of the Royal Society, B 228, 241, 1986.
- [6] Zadeh L.A., *Fuzzy sets*, Information and Control, Vol. 8, n°4, 338-353, 1965.

Le rôle de la conception, du développement et de l'apprentissage pour la robotique autonome

Éric Dedieu

LIFIA/IMAG, 46 av. Félix Viallet, 38031 Grenoble cedex ; email Eric.Dedieu@imag.fr.

Introduction : la robotique autonome

Nous caractérisons la robotique autonome comme la robotique en environnement à la fois *physique et naturel*. Physique s'oppose à simulé, et naturel s'oppose à artificiel. Un environnement est naturel s'il est donné au robot indépendamment de la conception propre de celui-ci ; il est artificiel si l'environnement a du être instrumentalisé ou contrôlé en fonction du robot.

Pour construire un robot autonome, il est naturel de s'inspirer des êtres vivants. Les métaphores biologiques ou psychologiques abondent en robotique. On distingue souvent deux cycles dans la genèse des êtres vivants, celui de l'évolution de l'espèce, et celui du développement de l'individu. En robotique, le premier est "simulé" par la conception ad-hoc de la forme physique du robot ainsi que de son architecture logicielle, et le second cycle est abordé par la notion d'adaptation expérimentale du robot à son environnement. Conception et adaptation sont alors considérés comme des problèmes séparés et pouvant être abordés indépendamment.

Le but de ce papier est d'examiner les problèmes que pose cette approche, et d'introduire dans ce schéma un troisième cycle, celui du développement incrémental du robot, qui trouve sa place entre les deux cycles de la conception et de l'adaptation.

Nous commençons par présenter les cycles de développement d'un robot par analogie avec les cycles de développement biologiques. Nous étudions ensuite les problèmes que sont censés résoudre ces cycles, et les difficultés rencontrées. Ces réflexions nous amènent à nous interroger sur le rôle du concepteur en robotique autonome, et sur ce qui distingue cette dernière de la robotique classique, des sciences de l'ingénieur ou des sciences naturelles. Nous proposons alors l'introduction d'un cycle intermédiaire comme une première idée pour aborder certains problèmes actuellement mal traités. Ce faisant nous discutons de la pertinence des métaphores biologiques appliquées à la robotique.

Les deux cycles de développement traditionnels

Systèmes biologiques : phylogénèse et ontogénèse

En biologie, la phylogénèse (l'évolution des espèces) et l'ontogénèse (le développement des

individus) sont deux problèmes distincts, faisant appel à des mécanismes séparés et indépendants.

La phylogénèse d'un organisme est entièrement résumée par son génotype (l'ensemble de ses gènes). Quel que soit le mécanisme ayant permis d'obtenir ce génotype, on peut en faire abstraction pour décrire le rôle des gènes dans l'élaboration de l'anatomie, de la physiologie et du comportement de l'organisme.

Réciproquement, l'ontogénèse n'a aucune influence sur le mécanisme qui fournit les génotypes. L'influence de l'ontogénèse sur la phylogénèse ne se fait pas au niveau génétique, mais indirectement par la sélection naturelle : c'est parce les individus mieux adaptés se reproduiront plus que l'évolution sera possible, et non par un biais imposé aux mécanismes génétiques en eux-mêmes.

Systèmes artificiels : conception et adaptation

Un système artificiel tel qu'un robot n'est pas le produit d'une phylogénèse. Sa forme physique, ses capteurs, ses actionneurs, ses prétraitements sensoriels et son architecture logicielle ont été conçus par un ingénieur humain. Dans la conception d'un robot que l'on désire autonome, on va d'autre part inclure des mécanismes adaptatifs, c'est-à-dire pouvant changer avec l'expérience de façon à améliorer les performances du robot (e.g. apprentissage).

On peut facilement voir une analogie entre d'une part la conception d'un robot et la phylogénèse, et d'autre part entre l'adaptation d'un robot et l'ontogénèse. Traditionnellement, on voit le génotype d'un organisme comme "codant" sa morphologie, ses facultés sensorielles et motrices, ainsi que certains comportements et mécanismes adaptatifs "innés" dont il dispose. Dans l'analogie robotique, tous ces aspects sont justement ceux que doit spécifier le concepteur. L'intelligence et la créativité humaines remplaceraient en somme les millénaires d'évolution "aveugle" pour concevoir des robots de façon adéquate.

À partir de cette analogie, on peut se permettre de séparer les problèmes de la conception et de l'adaptation, et de les aborder indépendamment, puisqu'après tout cette stratégie a fait ses preuves chez les êtres vivants.

On peut par exemple concentrer les recherches sur les formes génériques d'adaptation (apprentissage connexionniste en particulier), en supposant dans un premier temps résolu le problème

de la conception "adéquate" d'un robot — adéquate au sens où cette conception permettrait aux mécanismes d'adaptation de se manifester dans toute leur richesse intrinsèque, parce que le robot serait déjà "potentiellement" en adéquation avec son environnement.

On peut réciproquement s'attaquer au problème de la conception des robots à un niveau relativement abstrait, comptant alors sur le développement des techniques adaptatives pour un jour résoudre le problème de l'opérationnalisation effective des approches abstraites.

Programmation et identification

La structure d'un robot est tant matérielle (morphologie, partie analogique) que logicielle, mais la partie matérielle est peu sujette à changement entre les applications. Nous allons donc dans un premier temps simplifier l'exposé en ramenant le cycle de conception à celui de la programmation, et le cycle d'adaptation à celui de l'identification des paramètres.¹

La programmation des robots

La décomposition en fonctionnalités indépendantes

L'idée générale pour programmer un robot est de décomposer le problème (tâche) que doit résoudre le programme en sous-problèmes (sous-tâches) indépendants. Les démarches courantes pour mener cette décomposition sont :

- L'analyse descendante, qui décompose le problème en une hiérarchie de "niveaux de description", du plus général au plus particulier.
- L'analyse comportementale, qui décompose le problème comme la collaboration de processus indépendants fonctionnant en parallèle ; en robotique on appelle souvent ces processus des "comportements".

Par exemple on peut appliquer ces deux démarches au problème de navigation classique consistant à amener un robot mobile à une certaine position en évitant les collisions :

- L'analyse descendante sépare le problème en deux sous-problèmes, la planification de trajectoire et le suivi de trajectoire. La planification consiste à trouver une trajectoire qui résolve le problème, et le suivi de trajectoire

¹ Les paramètres sont les variables que le robot peut contrôler directement et "on line" ; par exemple, pour un robot contrôlé par une architecture connexionniste, l'ensemble des poids des connexions est en général un paramètre, tandis que la structure du réseau (simulée par un algorithme séquentiel) n'est pas directement contrôlable et ne constitue donc pas un paramètre.

consiste à trouver les commandes motrices qui réalisent effectivement cette trajectoire. Cette approche fait souvent appel dans sa mise en oeuvre à des techniques de CAO (Lozano-Pérez & al. 1992).

- L'analyse comportementale distingue dans ce problème deux composantes : d'une part éviter les obstacles, d'autre part se diriger vers le but. Le mouvement global du robot qui résout le problème posé est alors obtenu par composition-coopération de ces deux "comportements". Cette approche est souvent mise en oeuvre en implémentant chaque comportement par un "réflexe" direct entre capteurs et actionneurs (Brooks 1986). La position du but devrait dans ce cas être matérialisée par une source perceptible, par exemple une ampoule lumineuse.

Hypothèses d'indépendance

L'exemple de l'analyse descendante

Dans l'exemple décrit plus haut, les problèmes de planification et de suivi de trajectoire semblent pouvoir s'aborder indépendamment. La façon dont une trajectoire a été trouvée importe peu lorsqu'on se demande seulement comment la suivre ; et la façon dont on s'assurera du suivi d'une trajectoire donnée importe peu lorsqu'on se demande seulement si cette trajectoire va bien du point de départ au point d'arrivée sans collision. Tout problème complexe sera bien plus facilement résolu si on sait ainsi le décomposer hiérarchiquement en "niveaux de description" abordables séparément.

Il est clair, certes, que la résolution du problème peut être influencée par de nombreux facteurs de nature non géométrique, tels que les couleurs, matières, textures, comportements prédictibles et historique des objets de la scène. Prendre en compte tous ces facteurs en bloc serait effroyablement complexe, mais le problème semble devenir gérable si on pouvait le décrire en termes purement géométrique (volumes, trajectoires, collisions). Pour que cette démarche soit valable, il faut postuler que les aspects non géométriques de la situation peuvent être gérés à des niveaux de description inférieurs, c'est-à-dire affirmer que ceux-ci, par leur traitement des données, peuvent intégrer les aspects non géométrique pour finalement résumer la situation en termes seulement géométriques. On cherche en somme à distinguer, parmi les connaissances innombrables potentiellement à considérer, un nombre restreint qui suffise à faire rouler un robot en ignorant les autres, la prise en compte de ces autres étant récursivement abordée par la même démarche réductrice.

L'exemple de l'analyse comportementale

La motivation de l'analyse descendante était de rendre abordable un problème complexe en concevant des niveaux de description tels que

chacun puisse ne traiter qu'un aspect de la situation, les autres aspects étant gérés aux autres niveaux. Dans l'analyse comportementale, cette notion d'indépendance des niveaux de description devient une notion d'indépendance des comportements. Il est vrai que la façon pour un robot d'éviter un obstacle peut dépendre de la position du but, ainsi que de tout ce que le robot peut être en train de faire "par ailleurs". Cependant, gérer tous ces aspects en bloc est quelque chose de trop complexe. On postule alors que l'aspect "évitement d'obstacle" peut être décrit séparément des autres aspects (i.e. l'orientation vers le but), et qu'il suffira de faire coopérer les comportements obtenus pour fusionner tous les aspects en une solution au problème complet de navigation.

L'hypothèse d'indépendance des comportements apparaît le plus clairement dans les travaux sur la "sélection des comportements" (action selection, behavioural choice). Les comportements étant postulés comme des problèmes totalement séparés, leur composition et leur coopération devient un problème de séquençement, c'est-à-dire que les comportements qui utilisent des ressources communes sont considérés comme en compétition :

«[Generating and controlling behaviour]: this basic task of animal brain can be split into three subtasks :

- 1- Sensing of the environment so as to be able to perceive what is going on at each moment in time (perception).
- 2- Taking the interpretation of the environmental situation and using it to decide which of the animal's repertoire of behaviours is the most appropriate (behavioural choice).
- 3- Transforming the chosen behaviour into a pattern of movements of parts of the body (motor control).» (Tyrrel & Mayhew 1990)

Dans les travaux sur la sélection de comportements, le point 3 est considéré résoluble indépendamment des deux premiers, et donc on s'autorise à l'imaginer résolu pour se focaliser sur les deux premiers.

Les problèmes posés par la programmation en robotique autonome

Le problème des conditions de validité

La question ici est : dans quelles conditions le programme que l'on a conçu par les approches ci-dessus fait-il bien ce que l'on veut ? Prenons l'exemple du suivi de trajectoire. Une trajectoire [1] :

$$[1] \left\{ \begin{array}{l} (0,0) \rightarrow (0,20) \rightarrow (-8,25) \rightarrow (-8,65) \\ \text{Trajectoires partielles linéaires} \end{array} \right.$$

est transformée en une série de commandes motrices. Pour cela, on remarque que la trajectoire [1] peut être réécrite sous la forme [2] :

$$[2] \left\{ \begin{array}{l} \text{translation (20cm);} \\ \text{rotation (60°);} \\ \text{translation (8cm);} \\ \text{rotation (-60°);} \\ \text{translation (40cm)} \end{array} \right.$$

Supposons alors pour simplifier que le robot soit capable de rotations pures (ce qui est peu réaliste, nous y reviendrons), et que la commande motrice disponible soit $\Delta_{roues}(g, d)$ spécifiant le nombre de tours que les roues gauche et droite effectuent, alors le programme moteur obtenu est du type :

$$[3] \left\{ \begin{array}{l} \Delta_{roues} (+1.25, +1.25); \\ \Delta_{roues} (-0.8, +0.8); \\ \Delta_{roues} (+0.5, +0.5); \\ \Delta_{roues} (+0.8, -0.8); \\ \Delta_{roues} (+2.5, +2.5) \end{array} \right.$$

Il est clair que certaines conditions doivent être remplies pour que l'exécution du programme [3] ait effectivement pour résultat la trajectoire souhaitée [1] : les deux roues sont en contact permanent et sans glissement avec le sol, le robot se situe bien à la position initiale au début de son mouvement, le sol est plan et horizontal, le robot ne rencontre effectivement pas d'obstacle (ni de trous) sur son chemin, les roues sont bien parallèles à leurs axes et de dimensions précisément mesurées, les asservissements Δ_{roues} fonctionnent correctement, etc...

Ces conditions portent sur des phénomènes qui n'ont été modélisés nulle part. En fait, à chaque niveau de description on avait postulé que les aspects non pris en compte le seraient à des niveaux "inférieurs" — mais on est arrivé *en pratique* au niveau purement moteur sans avoir effectivement pris ces phénomènes en compte.

En robotique non autonome, toute latitude est laissée au concepteur de spécifier lui-même tout ce qui ne fait pas partie explicitement du cahier des charges (c'est même là une de ses tâches principales). Le problème de navigation décrit ne précisant pas explicitement que le robot doit pouvoir glisser, par défaut le concepteur comprend qu'il a le droit de faire en sorte que le robot ne glisse pas — et ce choix, en fait, fait partie de la solution au même titre que le programme du robot. C'est souvent, ensuite, par un bouclage entre conception, expérimentation et contrôle de l'environnement qu'une solution satisfaisante peut être trouvée par le concepteur. Or c'est une telle solution qui est, par définition, à écarter en robotique autonome.²

² Affirmer que les conditions de validité seront *naturellement* respectées — sans intervention humaine spécifique — dans les environnements concernés par la robotique autonome, c'est postuler qu'un environnement naturel peut admettre un modèle qui ne soit pas une approximation commode, mais qui représente une réalité objective. Nous rejetons ce postulat, mais cette discussion est hors de propos dans ce papier.

Le problème des hypothèses d'indépendance

Revenons à l'exemple de la planification. La planification est un problème *purement formel* : la tâche et sa solution sous forme de trajectoire s'expriment dans un même modèle formel, au sens où l'espace cartésien où s'exprime la trajectoire peut être formellement plongé dans le modèle CAO où s'exprime la tâche. Toute la résolution se passe donc à l'intérieur de ce modèle formel.

Entre deux niveaux formels, le problème des conditions de validité ne se pose pas en théorie, puisque toute l'information pertinente peut être explicitée formellement. Cependant on peut décrire un problème voisin, qui concerne l'indépendance des niveaux de description.

La tâche à planifier "Aller de la position initiale à la position finale en évitant les collisions" n'est pas assez contrainte pour déterminer une solution (trajectoire) unique. Il est nécessaire de fournir soit d'autres contraintes formelles (e.g. optimiser certains critères) soit des méthodes heuristiques (e.g. tirage aléatoire) pour lever l'indétermination.

Ces choix sont faits par le concepteur. L'un d'eux est incontournable : il faut donner une forme paramétrique a-priori à la trajectoire. Une forme par morceaux telle que [1] est la plus fréquente, car elle permet une grande richesse de formes à un moindre coût mathématique. L'idée est de paramétrer la trajectoire par une suite de points entre lesquels les portions de trajectoire ont une forme donnée. La forme de ces portions de trajectoire est en toute rigueur à déterminer en fonction du niveau inférieur, i.e. le suivi de trajectoire.

Pour illustrer nos propos, remarquons alors que bien souvent le contrôleur d'un robot n'est pas capable de suivre des trajectoires linéaires par morceaux (penser par exemple à une voiture ou à un bras manipulateur). Alors, pour une modélisation exacte, il faudrait prévoir pour la planification les formes de trajectoires qui seront effectivement générées par le contrôleur du robot. Dans la pratique, cependant, cette solution est mathématiquement bien trop complexe. On préfère privilégier les formes sur lesquels les calculs de collisions sont simples, et choisir des portions de trajectoires linéaires, par exemple la trajectoire [1], bien qu'en définitive non exactement reproductible par le robot. Il apparaît alors une condition implicite qui est que cette linéarité est une approximation suffisante des formes qui seront effectivement générées par le contrôleur du robot. Si la "condition de validité" ainsi réapparue n'est pas vérifiée, certaines trajectoires prévues sans collisions pourront résulter en une collision, et réciproquement certaines solutions pourront ne pas être trouvées par le planificateur.

Que l'on choisisse la solution approchée ou la solution exacte, reste le fait qu'une modification au niveau inférieur a des répercussions aux niveaux supérieurs. Contrairement à ce qu'idéalement on pourrait souhaiter, la "séparation" des niveaux de description n'est pas étanche. Toucher à un niveau

inférieur peut amener en fin de compte à remettre en question les niveaux supérieurs ; une légère modification dans l'énoncé du problème peut se traduire par des modifications à grande échelle du programme total. Dans ces conditions il semble hasardeux d'affirmer que l'on peut traiter un problème de robotique autonome à un niveau donné en faisant abstraction des niveaux inférieurs, en postulant que ceux-ci puissent être résolus dans un second temps seulement sans répercussion profonde sur les niveaux abordés en premier.

On retrouve un problème similaire dans les approches comportementales. Les "créatures" de Brooks, par exemple, utilisent très peu de comportement qui entrent réellement en coopération (mais voir plus loin le paragraphe sur l'incrémentalité pour les détails). La plupart du temps (Connell 1988), les comportements doivent être conçus comme indépendants physiquement (pas de ressources partagées) autant que fonctionnellement (aucune interaction). Le programme résultant est à voir comme un séquençement de réflexes indépendants, forme de coopération facilitant la conception mais assez pauvre par rapport aux ambitions de cette approche. La notion d'indépendance n'est en définitive pas un outil d'analyse neutre, mais elle impose une contrainte très forte sur les types de problèmes abordables (par exemple, pour résoudre le problème de navigation par une approche comportementale en matérialisant le but par une lampe et en munissant le robot d'un anneau de cellules photo-électriques pour repérer cette lampe, l'anneau de cellules devrait être monté très haut sur le robot, de façon à éviter toute interférence avec les obstacles, e.g. qu'ils puissent cacher le but ou projeter des ombres parasites. Sans cet artifice, l'idée de séparer les deux comportements ne serait plus guère applicable).

La notion de sélection de comportements en compétition est encore plus problématique. Dans notre exemple, cela reviendrait à dire que le robot se dirige vers son but, mais en présence d'un obstacle bascule vers un comportement d'évitement, pour revenir à son comportement initial ensuite. Or, dans ce cas, il est clair qu'aller au but et éviter les obstacles ne sont pas séparés et "en compétition", mais ne sont que deux des aspects d'un comportement global souhaité.

L'identification des paramètres

La nécessité d'un cycle d'adaptation

Ayant analysé le problème comme ci-dessus, on comprend la gageure de vouloir aborder la robotique autonome au niveau de la conception seulement. Cela revient à dire que le concepteur prévoit à l'avance tout ce qui peut arriver dans un environnement naturel. Face à ce problème on trouve en générale deux positions opposées :

- Postuler que l'on peut se contenter de résoudre un problème par une conception adéquate à un

niveau de description abstrait donné, considérant le problème de l'adaptation abstrait-concret comme séparé. Nous avons vu en quoi cette position semblait hasardeuse.

- S'attaquer en priorité au problème de l'adaptation, en considérant que celui de la conception ne pourra être abordé efficacement que si l'on connaît les mécanismes adaptatifs effectifs sur lesquels bâtir la conception.

Nous examinons à présent la seconde de ces positions. Un modèle ne peut, selon ce point de vue, permettre des prédictions exactes mais seulement approximatives et à court terme. Il s'agit alors de faire au mieux malgré ces restrictions. Il est clair qu'alors la qualité des prédictions ne pourra être réellement jugée qu'expérimentalement. En fonction de ces résultats expérimentaux, il s'agira alors d'améliorer (adapter) ces prédictions de façon à les rendre utilisables.

Pour cela, on laisse non identifiées les valeurs de certains paramètres du programme (que l'on peut voir comme une forme de "mémoire"), et on les identifie expérimentalement. Cette identification peut être faite soit "off-line" en traitant globalement une masse de données, soit "on-line", itérativement, le robot s'adaptant au fur et à mesure des données disponibles, ce que nous appelons "apprentissage".

L'apport de l'apprentissage

Pour être plus clairs nous allons séparer l'apprentissage dans les modèles "analytiques" et dans les modèles "empiriques". Un modèle analytique est un modèle au sens physique ou informatique : la description formelle d'un environnement (ou d'un processus), qui peut être manipulée selon certaines lois déterminées (lois de la physique, de la géométrie, ou de la logique par exemple). Un exemple en est un modèle CAO. Un modèle empirique, au contraire, n'est pas fondé sur de telles lois. L'approximation d'une relation fonctionnelle par un réseau de neurone, par exemple, est un modèle empirique.

Exemple des modèles analytiques CAO

Un modèle CAO est par nature statique et polyédrique. Être capable de reconstruire une scène CAO à partir d'images, par exemple, peut permettre éventuellement de garantir un modèle contre certains changements lents ou accidentels, mais ne permettra jamais de tenir compte des aspects purement dynamiques ou des aspects liés à la courbure des objets (comme le fait qu'une balle puisse rouler quant on la heurte). Ces aspects ne sont pas liés aux paramètres du modèle, mais à sa structure même.

Un apprentissage qui dans ces conditions conduira à un modèle encore prédictif ne pourra pas prétendre avoir résolu le problème des conditions de validité, puisque les prédictions resteront invalides,

et sans possibilité d'être remises en question. La clef du problème ne peut donc résider que dans une notion d'*incertitude* à intégrer à la modélisation, et pas seulement dans le fait de déterminer des paramètres bien précis d'une façon expérimentale. Dans notre exemple, nous considérons que le problème des conditions de validité sera résolu lorsque le modèle deviendra explicitement non prédictif dans les circonstances où il est inadéquat (reconnaissance expérimentale de son inadéquation).

L'identification des paramètres, en résumé, est censée résoudre le problème des conditions de validité essentiellement en laissant l'expérience décider de la plage d'incertitude à accorder aux prédictions du modèle.

Exemple des modèles empiriques neuronaux

Le fait de recourir à un modèle empirique ne modifie guère fondamentalement les conclusions ci-dessus.

Apprendre une relation $y=f(x)$ par un modèle empirique semble pourtant une démarche peu discutable si le modèle constitue un "approximateur universel", comme par exemple certains réseaux neuronaux. Toutefois il faut que pour le problème concret abordé la relation soit effectivement de nature fonctionnelle, c'est-à-dire que pour un x fixé corresponde en gros un y bien défini, avec éventuellement des incertitudes à expliciter lors de l'apprentissage. En ce sens, même une structure de réseau constitue bien un modèle, car dans un environnement naturel les phénomènes liés par des relations fonctionnelles restent bien rares, et le fait même de les expliciter constitue une opération de modélisation reposant sur un choix de termes bien particuliers.

Il est clair, toutefois, qu'un modèle de ce type reste bien différent d'un modèle de type analytique, mais la différence réside essentiellement dans la faisabilité de leurs mises en oeuvre respectives, et non dans la façon dont ils résolvent le problème des conditions de validité.

En conclusion, la résolution ou non du problème des conditions de validité est là encore liée à la notion d'incertitude utilisée et non au fait d'apprendre des paramètres. Si la relation entre x et y est supposée fonctionnelle et ne l'est pas, le modèle doit de lui-même devenir non prédictif.

La notion d'incertitude³

En résumé, c'est la notion d'incertitude qui peut, plus que la notion d'apprentissage, permettre de gérer le problème des conditions de validité, en permettant de quantifier expérimentalement la

³ Nous sommes intéressés de près par la formalisation de l'incertitude par une approche probabiliste ; cela constitue un aspect de nos travaux important mais hors du cadre de cet article. Voir Bessière & al. (1994).

qualité d'un modèle ; mais cette gestion consiste en une connaissance négative (ne pas utiliser tel ou tel modèle) plus que constructive (donner les indices pour trouver un modèle adéquat).

Donc, quand bien même notre point de vue confirmerait que le problème de l'adaptation puisse être abordable indépendamment du problème de la conception, il laisse peu d'espoir que l'approfondissement des techniques d'apprentissage puisse fournir en retour un bon guide pour aborder le problème de la conception plus tard.

Le rôle du concepteur

La restriction des environnements considérés aux environnements naturels définit un rapport inhabituel entre le concepteur et le robot, que nous approfondissons ici.

La démarche de l'ingénieur et la robotique autonome

Les démarches présentées plus haut suivaient toutes la démarche de l'ingénieur ou du physicien : se représenter un problème en certains termes, puis le résoudre exclusivement dans ces termes, pour enfin valider expérimentalement la solution trouvée. La différence entre l'analyse descendante et l'analyse comportementale, c'est que dans la première on cherche à se représenter l'environnement, tandis que dans la seconde on cherche à se représenter une *interaction* entre le robot et l'environnement.

"Se représenter un problème en certains termes", c'est ce que nous appelons le "modéliser". La modélisation n'est autre que le choix des termes exclusifs qui seront utilisés pour aborder le problème.

Dans des domaines tels que les mathématiques, la physique, la biologie ou les sciences de l'ingénieur, toute modélisation est utilisée via une interprétation humaine. Résoudre un problème modélisé ne suffit pas pour avoir résolu un problème concret. La solution "dans le modèle" est abstraite, et doit pour entraîner une action être "adaptée"⁴ à la situation concrète. Cette adaptation demande une forte dose de sens commun, d'expérience, et de culture scientifique.

En robotique considérée comme un domaine d'ingénierie, l'adaptation du modèle est réalisée par le contrôle des conditions de validité de la solution obtenue, contrôle spécifié par le concepteur humain.

L'objet de la robotique autonome est au contraire d'éliminer l'intervention du concepteur dans un environnement naturel (au sens défini en introduction). Cela revient à vouloir *automatiser* l'adaptation d'une solution modélisée à un problème concret. Le problème des conditions de validité doit

être résolu par une méthode systématique : c'est pour nous une des particularités essentielles de la robotique autonome.

Le passage de l'abstrait au concret

Reprenons notre présentation des conditions de validité. Le concepteur, devant un problème concret, a modélisé ce problème par des techniques de CAO, et pour ce faire il s'est placé à un niveau de description donné. En faisant ce choix d'un niveau de description, il n'a pas voulu, ou pas pu, exprimer une myriade de connaissances pouvant avoir une influence sur la résolution concrète *effective* du problème. Pour un observateur conscient de cela, le fait d'ignorer ces connaissances définit certaines conditions de validité de la formalisation utilisée.

Le respect de ces conditions est alors l'affaire du concepteur, non du modèle utilisée. En conséquence, *éliminer l'intervention du concepteur revient à faire l'hypothèse que toutes ces conditions seront naturellement respectées dans la situation concrète où le robot aura à agir*. En robotique autonome, les conditions de validité sont donc à considérer comme des hypothèses incontournables. Or, elles ne peuvent être totalement garanties dans un environnement naturel. De fait, actuellement, les approches analytiques n'ont de résultats satisfaisants que dans des environnements très bien contrôlés.

Dans la pratique, les conditions de validités concernent toujours des caractéristiques importantes de l'environnement. On est continuellement confronté aux détails qu'on voulait justement pouvoir ignorer par le choix d'un modèle adéquat : calibrage, approximations obligées, données bruitées ou aberrantes, événements imprévus dans la scène. Or, malgré son importance quotidienne, la notion de condition de validité n'est en robotique autonome que rarement explicitée — voire reconnue.

Typiquement, un programme de suivi de trajectoire sera présenté non sous la forme [3] mais sous la forme [2], que nous avons décrite comme une trajectoire mais qui est souvent considérée comme un programme. Or, cette formulation masque le fait que *avancer* (20cm) signifie que les roues font chacune un tour et quart, et *jamais* que le robot avancera de 20cm dans l'environnement. Les conditions qui justifieraient cette dernière affirmation restent toujours implicites. Le problème des conditions de validité est donc éludé.

Voici ce qui se passe, plus généralement :

- L'environnement d'un robot est toujours présenté de façon abstraite (modélisation)
- Cette abstraction résume une grande variété d'environnements concrets.
- On parvient à résoudre le problème dans l'environnement abstrait.
- Éventuellement, la méthode trouvée est validée dans un environnement artificiel justement conçu pour correspondre au modèle — dans une

⁴ "Adapté" a ici un sens actif : il faut faire quelque chose pour réaliser cette adaptation. Pour le sens passif de "adapté", nous emploierons le terme "adéquat".

étrange inversion de causalité entre modèle et réalité.

- On en déduit que la méthode serait applicable dans tous les environnements concrets représentés par l'abstraction.

C'est ce dernier point qui est fallacieux. On considère généralement que plus un problème est abstrait, plus sa solution est de portée générale, mais ceci parce qu'en fait plus les détails concrets devront être résolus par le concepteur humain. C'est cette liberté dans l'application-interprétation de la solution qui fait la généralité de celle-ci. Mais si l'intermédiaire humain est exclu, alors les détails non modélisés, loin d'être laissés à son appréciation, se transforment en *hypothèses implicites*. Or, plus le problème posé est abstrait, plus il y a de détails non modélisés, et plus ces détails que l'on ne veut pas prendre en compte se traduisent en hypothèses implicites, qui en fait *restreignent* les situations abordables. Le phénomène est clair en robotique : les modèles très spécifiques (industriels) sont au moins applicables aux problèmes concrets pour lesquels ils ont été conçus, tandis que les modèles qui se veulent très généraux ne sont applicables à aucun problème concret, tant leurs conditions de validité deviennent contraignantes.

Cela n'est guère reconnu, en raison de l'attitude que nous avons apprise à avoir en face de problèmes posés de façon abstraite : tout ce qui n'a pas été explicitement spécifié doit être ignoré. Dans le problème de navigation qui nous sert d'exemple, nous n'avons pas été mis en face de la situation réelle envisagée, et n'avons donc pas la possibilité de nous y adapter en utilisant notre propre "sens de la situation". La convention est alors de formaliser le problème en fonction des seules données de l'énoncé, de ne pas introduire de paramètres supplémentaires au niveau des calculs — et c'est bien ce que nous avons fait dans les paragraphes précédents.

En somme, on considère par défaut que celui qui a énoncé un problème abstrait a déjà effectué une partie de la formalisation en choisissant les paramètres pertinents à considérer : *on postule systématiquement que le problème est bien posé*. Dans cet état d'esprit, la résolution du problème peut être présentée en taisant tous les "non-dits" qui seraient nécessaires pour justifier qu'il est effectivement bien posé. En revanche, devant un problème concret, le concepteur voit bien qu'il ne peut prendre en compte explicitement toutes les situations imaginables. En pratique il faut toujours faire des compromis, ignorer l'éventualité de certaines situations (e.g. panne des asservissements), et contrôler l'environnement pour en éviter d'autres (e.g. glissements).

Un cycle intermédiaire : l'incrémentalité

Où en sommes-nous de notre réflexion ?

- Nous avons rejeté comme trop hasardeuse la position affirmant que la conception pouvait être abordée séparément de l'adaptation.
- Nous avons le sentiment que l'adaptation ne peut fournir une base suffisante pour permettre d'aborder la conception.

La recherche d'une problématique systématique de la conception qui serait adéquate à la robotique autonome serait-elle donc, à notre avis, totalement inabordable dans l'état actuel des choses ? Nous pensons qu'en fait le problème est mal posé lorsqu'on ne le considère qu'en termes de conception et d'adaptation.

Métaphores biologiques

Nous avons au début de ce chapitre proposé une analogie entre phylogénèse et conception, et entre ontogénèse et adaptation. Cette vision est en fait fondée sur l'idée que le génotype d'un organisme est un "code" complet de sa morphologie, de ses facultés sensorielles et motrices, ainsi que de certains comportements "innés" et des mécanismes adaptatifs dont il dispose.

Dans ce schéma, on oublie souvent qu'en biologie le génotype ne se révèle conduire à tous ces éléments "fixes" de l'organisme que par des phénomènes de maturation extrêmement complexes, qui commencent au niveau de l'embryon. Ces phénomènes de maturation font partie de l'ontogénèse au même titre que les phénomènes d'adaptation aux circonstances locales que constituent les diverses formes d'apprentissage.

Dans la pratique, on reconnaît d'ailleurs la difficulté d'attribuer à un comportement donné une origine génétique ou acquise, les deux aspects étant souvent entremêlés. Les notions d'inné et d'acquis n'ont guère de réalité "opérationnelle" et deviennent des notions théoriques, voire non pertinentes pour ceux qui rejettent l'idée qu'un génotype "code" en soi certaines caractéristiques. En effet, non seulement l'environnement a son mot à dire dans la façon dont un gène influencera l'ontogénèse d'un organisme, mais cette influence dépend elle-même de l'ontogénèse passée (cf Stewart 1993). La distinction de fond entre phylogénèse et ontogénèse n'est pas remise en question, mais les métaphores qui y font référence (surtout dans le domaine de l'informatique) semblent de plus en plus discutables.

Pour notre part, nous arrêterons là nos références à la biologie. Le cycle de l'incrémentalité que nous allons décrire ici pourrait dans une certaine mesure être mis en parallèle avec les phénomènes de maturation. Mais nous n'avons en fait pas besoin de ces analogies dangereuses. *La problématique de la conception de robots peut être décrite en soi, c'est un problème à part entière, et non pour nous une façon détournée d'aborder par le travers les problèmes du vivant*. Si nous avons explicité le parallèle entre robotique et biologie, c'est qu'étant

couramment admis cela a permis, nous l'espérons, de clarifier nos propos jusqu'ici.

En fait, la différence fondamentale entre robotique autonome et sciences du vivant, au sein des sciences cognitives, c'est que la première veut *construire* des systèmes et non *décrire* ou étudier des systèmes existants. Par exemple, vouloir séparer les problèmes de la conception et de l'adaptation devient discutable lorsque, *en pratique*, construire un robot mettant en oeuvre des techniques adaptatives nécessite d'avoir effectivement résolu auparavant le problème de la conception (morphologie et programmation) du robot. Peut-être que cette démarche ferme la porte à des solutions intéressantes.

L'imprévu en robotique

Un robot a été construit, une phase d'apprentissage éventuellement bouclée, et lors de l'expérimentation survient un phénomène imprévu — imprévu au sens de non pris en compte par le concepteur. Par exemple, un robot se trouve glisser souvent sur un pas de porte en cuivre, alors que le concepteur avait par défaut assumé que le sol serait plan et sans glissement. La réaction à un tel imprévu peut être décrite comme un compromis entre trois critères :

- *Fréquence* : le phénomène peut être plus ou moins "normal" dans les situations où le robot est amené à fonctionner. Les pas de portes, clairement, sont des éléments suffisamment habituels dans les immeubles pour qu'un robot patrouilleur un peu générique doive les gérer (ne pas glisser ou savoir récupérer du glissement). En revanche, si l'on voyait dans un local particulier le robot prêt à tomber dans une piscine intérieure, on pourrait se dire qu'une piscine dans un immeuble est suffisamment rare pour justifier que cette situation soit hors du domaine de fonctionnement autonome du robot.
- *Interférence* : le phénomène imprévu peut interférer avec les fonctionnalités du robot de façon plus ou moins importante. Dans l'anecdote citée, il rendait impossible la bonne exécution de la tâche. Même si les pas de portes sont peu fréquents, leur effet est suffisamment critique pour que l'on doive impérativement les prendre en compte. Si la tâche s'accomplit malgré l'interférence, et que la seule gêne est une baisse des performances (e.g. temps d'accomplissement), le choix de prendre en compte ou non les pas de portes sera le résultat d'un compromis entre complexité de la programmation et performances.
- *Souplesse des fonctionnalités* : les fonctionnalités initialement prévues peuvent être plus ou moins modifiables. Les deux extrêmes sont d'une part des fonctionnalités impératives, qu'on s'interdit absolument de remettre en cause, d'autre part des fonctionnalités simplement indicatives, mais qu'il

n'est pas trop gênant de redéfinir si les possibilités d'évolution que cela ouvre semblent compenser la gêne que cela apporte.

Ce dernier critère, peu reconnu par rapport aux deux premiers, nous semble particulièrement important pour toute approche constructive. Admettre une certaine souplesse dans les fonctionnalités du robot, c'est se donner la possibilité de considérer l'imprévu comme une richesse potentielle à prendre en compte, c'est redonner un rôle à la créativité et à l'adaptabilité du concepteur dans la programmation des robots.

L'imprévu nous semble être le lot commun de la robotique autonome (du fait de travailler dans des environnements physiques et naturels). Nous proposons alors d'intégrer cette démarche dans la programmation des robots, afin de définir une forme d'incrémentalité véritablement créative.

Le cycle de l'incrémentalité

L'incrémentalité peut devenir un réel cycle de développement, qui se place entre celui de la conception et celui de l'apprentissage, à partir du moment où la re-conception née de l'observation d'imprévus ne conduit pas à remettre en cause l'intégralité de la structure du robot, mais garde ce qui a été construit comme base de développement. Alors, par rapport au cycle d'adaptation c'est la structure du robot qui est modifiée et non seulement ses paramètres ; et par rapport au cycle de conception l'histoire "individuelle" du robot est l'élément déterminant du développement (on développe réellement *le même* robot plutôt que de s'inspirer d'un système similaire pour en construire une nouvelle version, éventuellement implémenté sur le même matériel robotique et informatique). Par exemple, les identifications de paramètres déjà effectuées devraient rester présentes à chaque étape du développement.

Cette notion d'incrémentalité est proche de celle introduite par Braitenberg (1983) ou par Brooks à ses débuts (1986, 1989). Mais celui-ci avait rapidement abandonné cette voie, la "subsumption architecture" développée dans ce sens s'étant révélée peu adéquate pour étudier réellement la question de l'incrémentalité. Nous pensons que la raison à cela est dans le rejet par Brooks d'une quelconque notion de représentation, position qui masque les problèmes que rencontre le concepteur d'un robot désiré "autonome".

En effet, pour qu'une telle approche soit possible, il est nécessaire de préciser ce qui, dans la structure d'un robot, est amené à changer par incrémentalité, et ce qui doit rester fixe pour ne pas perdre dans ces changements toute l'expérience passée. Il s'agit donc de garder, tout au long du développement, des traces de cette expérience qui restent exploitables malgré le développement ultérieur. Cette question évoque de près celle de la "représentation" tant décriée par certains (e.g. Varela 1988, Brooks 1986).

Conclusion

La distinction entre phylogénèse et ontogénèse des êtres vivants est une métaphore constamment utilisée dans les "sciences de l'artificiel", notamment en robotique autonome, pour justifier d'aborder séparément le problème de la conception-programmation d'un robot et celui de son adaptation expérimentale à l'environnement particulier où il se trouve (apprentissage). Nous avons dans cet article montré que :

- La robotique autonome se distingue des sciences de l'ingénieur par le rôle restreint qu'elle veut accorder au concepteur, position qui remet en cause les fondements de la conception classique, à savoir la possibilité de séparer un problème en sous-problèmes indépendants abordables séparément, ainsi que la possibilité de considérer un modèle comme un simple outil à mettre en oeuvre par le concepteur plutôt que comme une caractérisation *complète* d'un environnement naturel ou du comportement d'un robot dans un tel environnement.
- Au sein des sciences cognitives, la robotique autonome se distingue par ailleurs des sciences naturelles, parce que le problème de la conception n'est *en pratique* pas abordé séparément de celui de l'adaptation, et que la position de principe postulant la séparabilité des deux problèmes semble appauvrir la réflexion possible.
- Il semble alors qu'en robotique autonome, mettre l'accent sur une démarche "incrémentale" puisse être considéré comme un cycle de développement à part entière, à intercaler entre conception et adaptation on-line. La démarche incrémentale est l'intervention opportuniste du concepteur pour modifier la structure même (logicielle ou matérielle) du robot à mesure de l'expérience, tout en retenant les identifications paramétriques (apprentissages) déjà effectués jusque là.
- Une métaphore biologique très lointaine pourrait être trouvée dans les phénomènes de "maturation" dans l'ontogénèse. Toutefois, nous considérons que les métaphores biologiques ne sont pas vraiment adéquates pour la robotique autonome, ou du moins qu'elles peuvent cacher les problèmes propres à ce domaine. Nous pensons que la robotique autonome gagnerait à moins souvent être considérée comme une façon détournée d'aborder les problèmes du vivant — bien que le dialogue entre ces deux disciplines reste très prometteur.

En guise de perspective : les réflexions de cet article nous ont conduits à une nouvelle approche de l'incrémentalité à partir d'une notion de représentation plutôt originale car non fondée sur des

termes dits "prédéfinis"⁵, mais sur des termes constamment réinterprétables par le concepteur. Cette approche, qui contredit les mots de Varela (1988) affirmant que "seul un monde prédéfini peut être représenté", fait l'objet d'une thèse — en cours de rédaction ; voir Dedieu & Bessière (1994, très schématique et un peu obsolète).

Références

- Bessière & al. 1994** La poubelle lumineuse, acquisition probabiliste d'organisation sensorimotrice, P. Bessière, O. Lebeltel & E. Mazer, NSI 94, Chamonix.
- Braitenberg 1983** *Vehicles : experiments in synthetic psychology*. MIT Press.
- Brooks 1986** Achieving artificial intelligence through building robots, AI MEMO 899. MIT.
- Brooks 1989** A robot that walks: emergent behaviors from a carefully evolved network, *Neural Computations*, 1:2.
- Connell 1988** A behavior-based arm controller, AI MEMO 1025. MIT.
- Dedieu & Bessière 1994** La caractérisation sensorielle des comportements, NSI 94. Chamonix.
- Lozano-Perez & al. 1992** *HANDEY: a robot task planner*. T. Lozano-Pérez, J.L. Jones, E. Mazer, P.A. O'Donnell, MIT Press.
- Stewart 1993** *Intellectica*, n° 16, (editor). CNRS.
- Varela 1988** *Connaître : les sciences cognitives*. Seuil.

⁵ Classiquement on modélise un problème de façon à ce que la difficulté conceptuelle (par opposition à technique ou algorithmique) se concentre dans cette étape de modélisation. Une fois le problème modélisé, sa résolution devient purement *formelle*, c'est-à-dire qu'elle ne concerne que les termes du modèle indépendamment de toute référence à la situation réelle. Ceci est possible parce que l'on connaît à l'avance la manipulation de ces termes et les relations qu'ils ont entre eux. *Un modèle classique se caractérise et se justifie par la connaissance préalable de la façon dont il peut être utilisé* — nous disons que les termes du modèle sont "prédéfinis". Cette approche est tournée vers le confort du programmeur et a fait ses preuves dans nombre de domaines, mais devient en revanche à notre avis un problème fondamental dans le domaine de l'autonomie — la cause commune, en fait, aux problèmes des conditions de validité, des hypothèses d'indépendances, et de la gestion de l'imprévu.

Collective intelligence in birds : first evidences from gull roosts.

Geoffroy De Schutter

*Unité d'Écologie et de Biogéographie - Université de Louvain (UCL)
Croix du Sud, 5 - B-1348 Louvain-la-Neuve - Belgique*

I. Introduction : collective intelligence and birds

I am very convinced that any aware bird-watcher will easily identify a lot of auto-catalytic behaviour (also called allelomimetic behaviour, Deneubourg & Goss 1989) among most avian gatherings. However, as far as I know, key-words such as "auto-catalytic", "allelomimetic", "self-organisation", "collective decision-making" or "collective intelligence" never occurred in avian behaviour literature. Even if some auto-catalytic behavioural rules are actually documented, they are not considered as such and their potential self-organising properties are not considered (e.g. Southern W. E. 1974, Potts 1984, Evans 1982b, Pomeroy & Heffner 1992, Mc Mahon & Evans 1992).

The main reason for such a lack of interest could be that Sociobiology (e.g. Wilson 1975), which is the essential paradigm of current behavioural ecology, has been partly constructed in reaction to the Group Selection speculations (Wynne-Edwards 1962). Thereafter, research in avian behavioural ecology mainly focussed at the individual level, especially when considering the social behaviour. Direct interest to the performances emerging at the collective level was more easily allowed to insect societies because they are generally assumed as typical kin societies (at least by avian specialists). This could be the main reason why most of the well documented collective intelligence systems occurs among insect societies.

Here I explore the communal roosting behaviour (introduced in section II.1), a widespread social behaviour of non-breeding birds. The function of this behaviour remains unestablished. More precisely, I report night-time behaviour recorded at black-headed gulls' (*Larus ridibundus*) roosts, suggest that they act as self-organised collective decision-making and discuss how far this could be one first example of collective intelligence in birds. To evidence any collective intelligence system, I suggest that three main points have to be documented.

(1.) The simple behavioural rules of interaction between individuals which lead to self-organisation. In our case-study, as in many others, these are auto-catalytic spatial interactions (section II.2).

(2.) The collective performance is the effect of the behaviour which could not have been performed by non-interacting individuals, it is due to the self-organising properties of the numerous interactions. In the case reported here, collective decision-making for dispersal changes are performed (section II.3).

(3.) Collective "intelligence" assume that the performance ensured by the self-organised collective behaviour is actually an adaptive one. This last step could be either obvious, as in the cases of thermoregulation or nest construction, or much more difficult to establish, as in the case of shoaling or flocking. I discuss some evidences to this point about the gulls' dispersal (section III.1).

Eventually, this adaptiveness has to be considered within the context of biological evolution. In section III.2, I briefly discuss how such results could highlight the evolution of collective intelligence systems in non-kin groups.

Finally, I suggest that bird collective patterns where auto-catalytic interactions seem to occur are widespread and these are potential candidates for further exploration of collective intelligence systems in birds (section III.3).

II. Results : collective decision-making in gulls

II.1 COMMUNAL ROOSTING

Communal roosting is among the most impressive and most intriguing social behaviour recorded in birds. A communal roost assembles every night (or at high tide for waders, day for nocturnal birds), hundreds to millions of birds at one given place. Most bird species use of roosts out of their breeding season. Since the sixties, various hypotheses have been suggested in order to define the function of such gatherings, including predator avoidance (Lack 1968, Waterhead 1983), epideictic properties (Wynne-Edwards 1962), thermoregulation (e.g. Walsberg 1986), information-center (Ward & Zahavi 1973, Mock et al. 1988), Diurnal Activity Center (Caccamise & Morrisson 1986), etc. Despite a lot of research in order to substantiate these hypotheses, none are validated and the function of communal roosting remains unestablished. One major reason for such failure could be the lack of reliable descriptions of the roosting behaviour itself. For instance, night-time behaviour is virtually unexplored, roosting birds are generally assumed to be resting. Here I report night-time behaviour recorded at black-headed gulls' (*Larus ridibundus*) roosts.

Draulans & Van Vesseem (1985) already suggested that roosting gulls do not rest as much as expected. I estimated the diurnal proportion of black-headed gulls engaged in any action at 31 % (refuse-tip of Mont-Saint-Guibert, Belgium, n=72 days concerning 206,500 black-headed gulls, std=0.242). At night, 37 % of the roosting birds were active, especially swimming or flying (two roosts near to Mechelen, Belgium, n=124 nights concerning 359,000 black-headed gulls, std = 0.272). In fact, the gulls do not rest more at night than during the day. While it is obvious that birds have to forage by day, the night restlessness of roosting gulls is baffling.

The night-time behaviour of roosting black-headed gulls was investigated over 295 nights (winters 1989-90 to 92-93) at two lakes in the surroundings of the city of Mechelen (Belgium). Number at each lake could reach 50.000 black-headed gulls gathering from more than 60 kilometres away. Various field-methods have been used, including light-sensitive video recording, spotting scope with coupled spotlight, individual marking through reflective back-tags (n=365), radio-tags (n=6) and a remote-controlled "swimming" stuffed gull.

II.2 AUTO-CATALYTIC BEHAVIOURAL RULES

At night, the gulls gather in the middle of the lake in one elongated group (mean breadth/length ratio=0.25, std=0.179, n=19). Within such a group, each bird maintains the same distance from each of its direct neighbours. This inter-individual distance (iid) is uniform throughout the group. The iid varies in time between 7 and 0.5 "*Larus ridibundus* body-length" (1 "*Lr*"= \sim 35 cm). At large iid, birds usually stand still. At reduced iid, collective moves emerge (fig 1(a)). Such a collective move consists of an impressive dense group, of up to thousands of birds, swimming all together in the same direction at the same speed. These moves can continue over hundreds of meters, and either slow down and stop or transform into a collective take-off. Such collective moves were recorded nearly every night, sometimes all night long. They are responsible for most of the restlessness recorded at night.

Only 6 out of the 355 recorded collective moves could ever be related to any external, possibly disturbing, event. Field observations and video images suggest a simple, endogenous, mechanism able to give rise to such collective moves. When the iid inside the group is small, any movement of one or any few birds induces their direct neighbours to move in the same way, at the same speed in order to remain equidistant. As every

bird inside a group is at the same iid, this pattern is repeated over the whole group. Such a simple auto-catalytic process (Deneubourg & Goss 1989) is similar to the chorus-line mechanism documented within dunlin flocks (Potts 1984). It is a self-organised process, comparable to other positive feed-back chain behaviour, as widely documented in the so-called "Collective Intelligence" systems (Francks 1989, Bonabeau & Theraulaz 1994).

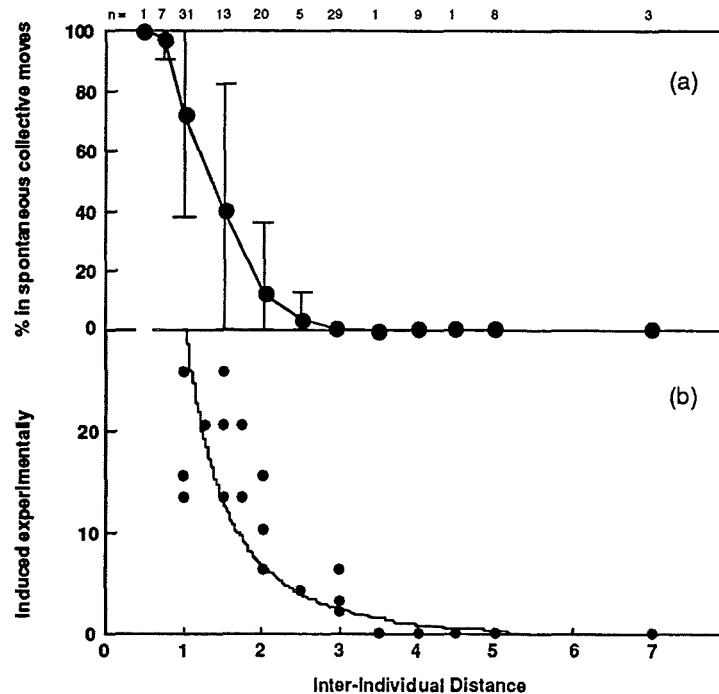


Figure 1 (a) Relationship between the inter-individual distance (iid) recorded between roosting black-headed gulls and the mean proportion ($n=128$) of these gulls moving collectively within the next 15' (15' is the time required to allow both parameters to be recorded throughout the roosting group). Iid unit used is "*Larus ridibundus* body-length" (1 Lr \approx 35 cm). At iid $>$ 3 Lr, no collective moves ever occur. At iid $<$ 1 Lr collective moves always occur and nearly always concern 100% of the group. In between, the regular decrease is striking. Collective moves generally affect most of the group. The considerable standard deviations recorded is due to the proportion of birds involved being mostly near to zero or to 100%. (b) Relationship between the iid occurring inside a roosting group and the number of gulls induced to move collectively by moving a stuffed one across this group. Iid unit used is "*Larus ridibundus* body-length" (1 Lr \approx 35 cm). No inductions arise when the iid is $>$ 3 Lr. At iid $<$ 1Lr the effect of an experimental induction could not be measured as all the birds were instantaneously, or already, engaged in vast, spontaneous collective moves. In between, the number of birds induced, directly or not, by the stuffed one decreased exponentially as the iid increased ($N_{ber(+1)} = 33.5 \text{ iid}^{-2.1}$, $n=22$, $R^2=0.832$, $F=109.18$, $p<0.0005$). This pattern is similar to the one recorded for spontaneous collective moves (1a), confirming that the same mechanism underlay both spontaneous and experimentally induced collective moves.

I tested the occurrence of such a mechanism by measuring to what extent collective moves could be experimentally induced by moving a gull inside a resting group (fig. 1(b)). Stuffed black-headed gulls attached to a small remote controlled boat were used. Stuffed gulls were always well accepted, eliciting no particular reaction when not in movement. Once moving, the stuffed bird effectively induced its neighbours to start a move in the same way, if the iid occurring inside the group was short enough (≤ 3 Lr). At the shortest iid (≤ 2 Lr), this rapidly gave rise to a collective move, involving birds

further away. When the iid was larger ($> 3 Lr$), no induced movement could ever be achieved. In fact, the size of the group induced by the stuffed gull is directly related to the inter-individual distance occurring at first inside the group (fig. 1(b)), precisely in the same way as the spontaneous collective moves were (fig 1(a)), suggesting that the same auto-catalytic process underlies both spontaneous and experimentally induced collective moves.

II.3 COLLECTIVE DECISION-MAKING

Once started, collective swimming moves could either slow down and stop, or amplify to such an extent that the birds will take flight. In fact, the boost of the auto-catalytic amplification process, and thus the issue of the move will depend on each individual's reaction to the movement of its neighbour. When an individual reacts belatedly and slowly, the collective move is decelerated. If it reacts promptly and strongly, the move is accelerated. Consequently, a collective flight will emerge only if the general birds promptness to move in its given direction is sufficiently high. In this way, the auto-catalytic amplification process acts as a procedure of collective decision-making (Deneubourg & Goss 1989) for taking flight, depending on each bird's promptness to move.

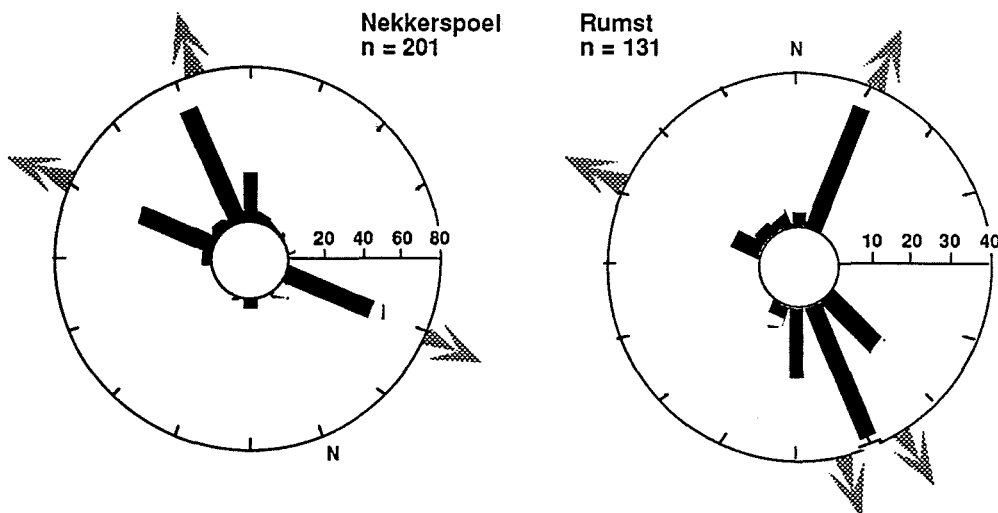


Figure 2 Absolute number of collective moves having been recorded in each of the 16 possible directions at the two most studied roosts : Nekkerspoel ($n=201$ moves) and Rumst ($n=131$ moves). All the directions were equally possible, as no physical nor environmental limitation occurred. However, only two to four preferred directions arose (true for each of the 10 roosts investigated). These directions are not correlated to wind direction nor to environmental cue or event. Instead, they are correlated to the flight-lines used by the birds to reach and leave the roost at dusk and dawn (two to five for each roost, the grey arrows plotted independently). At Rumst, moves to the west are too far from the observers standing point to be validly recorded at night time. This probably explains that few collective moves were recorded in relation to the NWW flight-line.

Once in flight, some of the birds turn back and rejoin the roosting group, while others fly straight on and leave the roost in the axis of the initial swimming movement. It is not possible to follow nor to count these flying flocks at night. However, the tracking of radio-tagged birds confirms that they always reach the roost located in the axes of the initial swimming moves' direction, generally more than ten kilometres away. Figure 2

shows that collective moves, and their consecutive departures, do not occur in every direction. Only two to four directions arise on each roost (10 different roosts were studied). These directions are the ones used by birds to reach and leave the roost (fig. 2), through a stable network of flight routes connecting every roost (De Schutter & Nuyts 1993, De Schutter in prep.).

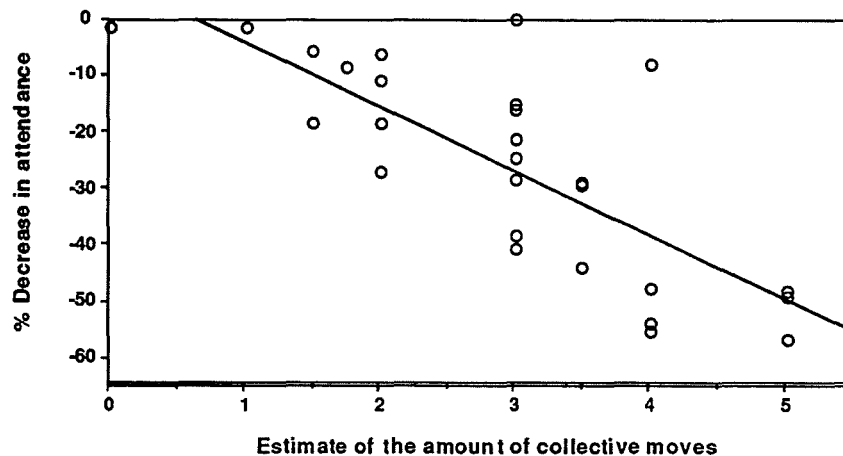


Figure 3 Relationship between an estimate of the amount of collective moves recorded during one night and the percentage of decrease recorded in the number of black-headed gulls at this roost, this night. The linear regression is highly significant (plain line, $n=27$, $n=27$, Spearman $r_s=-0.770$, $p<0.0005$). The estimate of the amount of moves is probably not linear, it was arbitrary attributed by the observer during its fourth winter of observation (definition of the values were : 0=no moves; 1=few moves; 2=quiet but regular moves; 3=a lot of quiet and regular moves; 4=a lot of moves, difficult to follow and record; 5=too many moves to be recorded in the field notebook). Arrivals from other roosts concealed part of the actual departures; this, for instance, could account for two outlier points at the top of the graph. The actual effect of the collective moves might be more important than suggested by the line.

In fact, the collective moves act as collective decision-making for dispersal changes between roosts. As these changes are repeated over the night and occurs at each roost, it eventually leads to a significant change in the winter distribution of the gulls. Figure 3 shows that the rate of numerical decrease recorded in the amount of birds roosting is highly significantly related to an estimate of the amount of collective moves occurring (fig. 3, $n=27$, Spearman $r_s=-0.770$, $p<0.0005$). While the mean of such nocturnal decreases is of -30.6 % (mean negative differences recorded between roost counts in the beginning and at the end of the same night, $n=21$, $std=0.243$, $max=-0.75$), the mean diurnal decrease in the same period is of -24.8 % (between early morning and next evening, $n=24$, $std=0.199$, $max=-0.74$). Therefore, night-time collective moves account for at least as many dispersal changes as all the diurnal movements. As only part of the feeding area could be reached from each roost (De Schutter & Nuyts 1993, De Schutter in prep.), these night-time dispersal changes would be effective between foraging-sites as well.

III Discussion : collective intelligence in birds ?

III.1 FROM COLLECTIVE DECISION-MAKING TO COLLECTIVE INTELLIGENCE ?

This study reports how the communal roosting allow gulls to perform self-organised collective decision-making for changing their dispersal. Collective intelligence assume that the performance ensured by the self-organised collective behaviour is actually adaptive. Till now, no experiments have been carried on to determine how the collective decision-making process performed by roosting gulls is actually adaptive, i.e. how it allow an individual bird to take better dispersal decisions than by itself. Therefore, we are limited to speculative arguing.

As food is the main concern for non-breeding bird, adaptiveness of dispersal changes has probably to be related to a better distribution of the birds among the foraging-areas. Thanks to the pattern of the morning departures (De Schutter, in prep), only part of the diurnal area could be reached from each of the roosts. Therefore, the night-time redistribution among roosts is effective between the foraging-areas as well.

On the other hand, black-headed gulls exhibit striking abilities to accomodate their dispersal depending on the availability of ressources. For instance, it has been show that they accomodate to periodic food depletion like the week-end closure of refuse-tips (Monaghan et al. 1986, Coulson et al. 1987, De Schutter submitted). They accomodate also very quickly to unpredictable ressource availability changes (e.g. local strike at one refuse-tip, De Schutter submitted).

Three, fully compatible, approaches can be discussed as linking the night dispersal changes to an adaptiveness to ressources availability : (1) foraging flocks formation, (2) information-transfer, (3) dispersal network.

(1) Foraging flocks formation.

Gulls mainly use of network foraging strategy (Evans 1982(a), 1982(b), Evans & Welham 1985, pers. obs.). This strategy suggest that the individuals profit from belonging to loose flocks, especially because when any bird of the flock find food the others converge to him and the ressource is shared (local enhancement, Thorpe 1963). Thus, flock formation is crucial for efficient foraging. Moreover, it has been suggested that the optimal flock size and composition could differ for each individual, depending e.g. on its physiological and starvation status (Mangel 1990). Thus the formation of foraging flocks is a important feature of the foraging strategy while its mechanisms remain poorly understood (Mangel 1990). In such a context, it could be an advantage to take the departing decisions collectively rather than individually. However, it is not easy to determinate how far the constitution of night-time dispersal flocks will be relevant to the size and composition of diurnal foraging flocks.

(2) Information-transfer : IC vs CI ?

One of the most debated hypotesis for the function of communal roosting is the Information-Center Hypothesis (ICH; Ward & Zahavi 1973, Mock et al. 1988). It suggest that birds get informations about the food location from their roosting partners. The simple information-transfer mechanism suggested is that uninformed birds would identify the informed ones and follow these going back to the food-sources (Ward 1965, Ward & Zahavi 1973). A lot of tests have been performed in various conditions in order to prove this mechanism. Only a few poor and faint evidences were recorded, most of these studies infirming the information-center hypothesis (Mock et al. 1988). It is

generally assumed now that the information-transfer mechanism suggested by Ward & Zahavi (1973) do generally not occur. However, this does not mean that other forms of information-transfer could not be considered.

Especially, it could be suggested that the collective procedure of decision-making would allow a form of information-exchange. More precisely, as far as the individual promptness to react to the neighbours' move is not casual - some results as a differential success of each direction depending on time suggests that it is not -, it is sensible to argue that it would express the individuals' own propensity to depart which could, a.o., be related to the individual's own experience of the direction involved. In this way, collective moves would allow individuals to benefit from other's experience and night-time collective behaviour would act as a form of collective information-exchange. Although the mechanism of information-transfer is a different one, this would allow roosts to act as information-centers. Such a scheme would be very difficult to be tested. A first approach would suggest the follow-up of individually marked birds throughout both their dispersal and night-time behaviour.

(3) Dispersal network.

Night-time collective departing occurs simultaneously and independently at numerous roosts over the whole black-headed gull wintering range, eventually leading to a vast, intricate and complex redistribution among all the roosts. It is therefore of interest to understand how all these independent departure decisions could allow any adaptive redistribution.

The spatial structure of the journeys between roosts has been explored over three successive years (De Schutter & Nuyts 1993, De Schutter in prep.). The main result is that journeys occurs through a vast network of flight-paths joining every roost, and the diurnal feeding areas as well, the so-called dispersal network (De Schutter & Nuyts 1993, De Schutter in prep.). Roosting actually occurs at the nodes of this network. Such a scheme could be modelled as a neural network where the roost would be the automatas inside which the night-time collective decision-making act as transition functions. The main features of such a network suggest that it will allow the system to reach more easily a more stable attractor (this, however, remain to be fully established). Thus, the spatial structure of the dispersal network could allow the general redistribution among roosts to reach more easily a stable redistribution. Insofar as the changes, due to the transition function (the collective moves), are adaptive the whole system would lead to a stable and adaptive redistribution of the black-headed gulls over their whole wintering area.

Complete changes of the distribution occur at least twice a year between the breeding and wintering ranges. Additionally environmental changes are susceptible to induce main changes at any moment of the winter. Therefore, the ability to redistribute efficiently over vast areas would be a very adaptive one.

III.2 EVOLUTION OF COLLECTIVE INTELLIGENCE IN NON-KIN GROUPS

The adaptive significance of a collective behaviour is to be related to its appearance in the course of biological evolution.

Sociobiology (e.g. Wilson 1975) is the essential paradigm of current behavioural ecology (e.g. Krebs & Davies 1987). It has been developed a.o. in reaction to the Group Selection speculations (Wynne-Edwards 1962). Following such a paradigm, the adaptiveness of any collective behaviour has to be documented at the level of the individual. Moreover, its appearance and selection has to be fully compatible with the

"Selfish Gene" theory (e.g. Dawkins 1989). Within such a frame, the occurrence of collective behaviour occurring in huge non-kin groups and ensuring a benefit at a collective level is questionable. Three arguments seem relevant to such a debate.

(1) Altruistic traits ?

One main problem could be the occurrence of altruistic traits, i.e. behaviour where costs are ensured by one individual while the benefit goes to another. These altruistic traits are compatible with the "Selfish Gene" paradigm only if the individuals involved are kin enough (Inclusive Fitness, Hamilton 1964) or member of a group which is small and stable enough (Reciprocal Altruism, Axelrod & Hamilton, 1981). Gulls roosts are nor kin, nor small, nor stable enough to fit such conditions (De Schutter in prep.).

The costs of the roosting behaviour are obvious (at least the journeys and night-time activity) and our results suggests that the benefit is collectively ensured. However, no altruistic trait is evidenced so far, the collectively ensured benefit being actually shared by every individual involved. Especially, this benefit is simultaneous and equivalent for every individual involved. For instance, an information-transfer occurring as suggested (V.(2)), would be both simultaneous and reciprocal. This is an essential difference with an Information-Center (Ward & Zahavi 1973, Mock et al. 1988), where the information-transfer is asymmetric and any potential reciprocity would be delayed.

(2) Individual determination ?

The collective behaviour seems avoidable by any individual. Even if they were usually a few minority, individuals were always recorded escaping from the collective process at any step (except the collective move itself). For instance, some birds do not reach the roost, some rest or forage along the border of the pool all or part of the night (De Schutter in prep.) and part of the birds taking wing consecutively to a collective move will rejoin the roosting group. These decision always seems to be ensured individually. Such an individual determination to use and to follow the collective decisions-making could be one essential difference with collective intelligence as recorded in the social insects.

(3) Independent selection of the behavioural traits ?

Finally, it is not necessary to admit that whole the collective intelligence system would have been selected as such. For instance, every behavioural rule constitutive of the system documented here could have been selected independently by well acknowledged selective forces. Groups could have first assembled each night at the most suitable places, for instance to avoid predators. Inside these groups, a common facing direction and the avoidance of too close neighbours are essential to allow rapid taking flights. The initial incitement of such a resting group to move could be due to migrating and/or foraging motivations. In such a context, the self-organised properties of the collective moves are perhaps susceptible to arise spontaneously from the previously selected behavioural traits. If this emergence would have ensured direct advantages to the individuals involved, the process could thenceforth been re-enforced and refined by natural selection of its behavioural traits.

Self-organisation versus Selfish gene ?

Too few is known about collective intelligence in non-kin groups to suggest a credible answer to the question how far the occurrence of such systems would contradict the sociobiological paradigm ? However, to discuss such a question would help to suggest further orientation in the exploration of the collective self-organised behaviour.

The three features suggested here upper (no altruism, individual determination, preliminar selection of behavioural traits) probably allow collective intelligence occurring in huge

non-kin groups to be fully compatible with a neo-darwinian conception of natural selection occurring at the individual and/or genetic level. However, even if compatible, they are not accounted so far. To be fully accounted, enlargements of the sociobiological framework of behavioural ecology have to be suggested at least in two ways.

(1) Consider that some main adaptive traits could be detected only by considering the collective (or group) level (e.g. Deneubourg & Goss 1988). This do not mean that adaptiveness is not assumed eventually at the individual level (as suggested e.g. by Group Selection, Wynne-Edwards 1962).

(2) Admit that some mechanisms, generally designated as "self-organisation", act within groups of interacting individuals, allowing the emergence of properties (eventually adaptive) which have not been preliminary selected in a mutation-selection process (see Kauffman 1993 for a simillar approach of interacting genes).

Such an evolution of the central paradigm is actually shared by most domain of the sciences, forced to assume the methods and concepts of the science of complexity within a reductionist framework.

III.3 OTHER ROOSTS, OTHER AVIAN COLLECTIVE BEHAVIOURS

One main benefit of such an evolution would be to allow more reliable and convincing explanations to a lot of mass behaviour which were alloted unsatisfactory function hypothesis till now. This is at least the case for the communal roosting behaviour.

This study reports how the communal roosting allow gulls to perform collective decision-making processes for changing their dispersal. As far as I know, collective self-organised systems have never been documented in bird societies. Most probably because they were never explored in this way. This would be a first report of a self-organised collective decision-making procedure in birds and one of the firsts out of social insects and fishes (Bonabeau & Theraulaz 1994). Therefore, nothing allows us to say how far collective intelligence systems are widespread among birds.

However, huge social displays using auto-catalytic behaviour were recorded in most avian roosts. The evening mass-manoeuvre of starlings "clouds" are popular. Similar pattern are performed by roosting waders such as dunlins (Potts 1984), lapwings (pers. obs.), sandpipers, etc. "Waves" of auto-catalytic taking flights are recorded at rooks roosts (L. Wargé, comm. pers.).

Moreover, social auto-catalytic displays could be widespread in most avian gatherings. Therefore, these results also suggest new explorations of other collective behaviours such as flocking (Potts 1984, Reynolds 1987, Pomeroy & Heppner 1992, Vaitkus 1990) collective fishing (Mc Mahon & Evans 1992), rafts, coloniality (Southern W. E. 1974, Evans 1982b, Danchin E. 1988), etc. Since documenting simple auto-catalytic behavioural interactions is the first step in documenting a collective intelligence system (see section I), it is very probable that this first step could be easilly ensured in most avian gatherings. Finally, I am very convinced that most of these simple behavioural rules will eventually lead to the discovery of sophisticated adaptive collective intelligence systems in birds.

REFERENCES

- Axelrod R. & W. D. Hamilton 1981 The evolution of cooperation. *Science* **211**, 1390-6.
- Bonabeau E. & G. Theraulaz 1994 *Intelligence Collective*. Hermès, Paris.
- Caccamise D. F. & D. W. Morrison *Am. Nat.* **128**, 191-198 (1986)
- Coulson J. C., Butterfield J., Duncan N. & Thomas C. 1987. Use of refuse tips by adult british herring gulls *Larus argentatus* during the week. *Journal of Applied Ecology* **24**: 789-800.
- Danchin E. *Anim. Behav.* **36**, 443-451 (1988)
- Dawkins R. 1989 *The selfish gene*, new edition. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Deneubourg J.-L. & S. Goss 1989 *Ethology, Ecology and Evolution* **1**, 295-311
- De Schutter G. & E. Nuyts in *Proceedings ECAL'93 A-K* (ULB, Brussels, 1993)
- De Schutter in prep ntw
- De Schutter submitted
- Draulans D. & J. Van Vesseem *Le Gerfaut* **75**, 225-252 (1985)
- Evans R. M. 1982a
- Evans R. M. 1982b *Can. J. Zool.* **60**, 1806-1811
- Francks N. R. 1989 *American Scientist* **77**, 138-145
- Hamilton W. D. 1964 The genetical evolution of social behaviour, I & II. *J. Theoret. Biol.* **7**, 1-16.
- Kauffman S. 1993 *The origin of order*. Oxford University Press, USA.
- Krebs J. R. & N. B. Davies 1987 *An introduction to Behavioural Ecology*, 2nd edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Lack, D. *Ecological adaptations for breeding in birds* (Methuen, London, 1968)
- Mangel 1990
- Mc Mahon B. F. & R.M. Evans 1992 *Behaviour* **20**, 69-89
- Mock D. W., Lamey T. C. & D. B. A. Thompson *Ornis Scand.* **19**, 231-248 (1988)
- Monaghan P., Metcalfe N. B. & Hansell M. H. 1986. The influence of food availability and competition on the use of a feeding-site by Herring Gulls *Larus argentatus*. *Bird Study* **33**: 87-90.
- Pomeroy H. & F. Heppner *The Auk* **109**, 256-267 (1992)
- Potts W. K. 1984 *Nature* **309**, 344-345

- Reynolds C. W. *Computer Graphics* **21**, 25-34 (1987)
- Southern W. E. 1974 *Bird Banding* **45**, 210-216
- Thorpe 1963
- Vaitkus G. *Acta Ornithologica Lituanica* **3**, 57-68 (1990)
- Walsberg G. E. *Auk* **103**, 1-7 (1986)
- Ward P. & A. Zahavi *Ibis* **115**, 517-534 (1973)
- Ward P. 1965
- Waterhead, P. J. *Am. Nat.* **121**, 237-243 (1983)
- Wilson 1975
- Wynne-Edwards, V. C. 1962 *Animal dispersion in relation to social behaviour*. Oliver & Boyd, Edinburgh

Contraintes sur l'évolution naturelle de la communication

jean-louis Dessalles

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

E-Mail: dessalles@enst.fr

Résumé :

Toute forme d'organisation repose pour une part essentielle sur la communication qui existe entre ses membres. Mais on ne peut pas se borner à constater l'existence d'une communication, il faut montrer qu'elle constitue un système *stable* et si possible donner un scénario possible de son *origine* évolutive. Autrement dit, il s'agit de montrer quel est l'intérêt génétique, pour l'individu communiquant, de l'information qu'il reçoit et du fait de fournir des informations à ses congénères. Il s'agit de montrer comment ce bénéfice génétique s'est maintenu dans toutes les phases de l'évolution du système de communication considéré.

De manière tout à fait surprenante, cette question qui est fondamentale pour expliquer le fonctionnement des organisations naturelles et en particulier humaines, n'a jamais reçu l'attention qu'elle mérite. Se contenter de justifier l'existence de la communication en disant qu'elle permet à l'organisation d'exister est erroné : cette existence se joue au niveau des individus communicants et de leurs gènes, non au niveau de l'organisation.

Nous ne proposons pas de solution complète à ce problème. Notre objectif est avant tout de le poser, puis de suggérer, dans le cas du langage humain, des éléments partiels pouvant permettre de comprendre l'avantage évolutif que nos ancêtres ont pu trouver à communiquer.

Le prix de l'information

Une organisation, naturelle ou artificielle, requiert un système de communication. La fourmi qui laisse une trace odorante pour marquer l'itinéraire vers la nourriture, le cri d'alarme d'un singe vervet, la prise de parole dans une conversation humaine sont autant d'actes de communication. Certes ces actes servent l'organisation : ils facilitent la coordination des actions collectives, ils permettent la mise en commun des informations détenues par les membres du groupe, ce qui permet par exemple de mieux éviter les dangers ou d'être plus efficace dans la collecte de nourriture. Mais tel quel, ce constat ne saurait expliquer l'existence de ces actes de communication. En effet, l'intérêt du groupe ne saurait expliquer le fait que la sélection naturelle a retenu le système de communication, tout simplement parce que les groupes ne se répliquent pas (cf. [D.S. Wilson & E. Sober 1994] et [R. Dawkins 1994] pour une discussion sur ce point).

Qu'est-ce qui, donc, pousse un individu⁽¹⁾ à communiquer une information qu'il détient ? Pourquoi un individu déviant ou mutant qui se contente de recevoir des informations sans en fournir aucune ne laisse-t-il pas davantage de descendants, ce qui à terme ruine le système de communication ?

La communication est un acte altruiste. L'information communiquée, même si elle possède une utilité collective, présente généralement aussi un intérêt pour celui qui la détient. Parfois, cette utilité augmente après l'acte de communication : imaginer que le communicateur signale la présence d'une proie qu'il ne pourra pas attraper seul. Mais de nombreux actes de communication que l'on peut observer dans la nature ou chez les humains ne sont pas du type « proie_trop_grosse ». L'utilité individuelle de l'information détenue a toutes les chances de diminuer après que l'information a été communiquée : la source de nourriture doit être partagée, les chances redeviennent égales vis à vis du prédateur dont on a signalé l'approche, etc. La communication n'est évolutivement stable que si la perte de viabilité liée au fait de fournir l'information est d'une manière ou d'une autre compensée. On doit pouvoir trouver, dans toutes les organisations naturelles, en quoi réside cette compensation.

¹ Il faudrait, pour être plus rigoureux, dire quelque chose comme « Qu'est-ce qui permet qu'un gène pousse ses porteurs à communiquer ? ». C'est au niveau du gène que nous nous placerons dans la suite.

Quelle compensation pour celui qui communique ?

Nous supposons dans la suite que l'individu qui communique dispose d'un gène le poussant à communiquer. Cette simplification ne pose pas de problème. Bien entendu, la possibilité de communiquer résulte forcément de la mise en oeuvre de nombreuses compétences chez l'individu, l'ensemble de ces compétences étant le fruit de l'expression de très nombreux gènes. Mais dans un premier temps, nous ne nous intéressons pas à la mise en place de ces compétences. Nous nous intéressons à leur maintien. Nous considérerons donc un gène qui est nécessaire à la communication (sans bien sûr être suffisant), que nous appellerons GC⁽²⁾. Nous considérerons un allèle, GS, qui conduit l'individu à ne pas communiquer (gène de silence, obtenu par exemple par une mutation rendant GC inactif). Il s'agit ainsi d'expliquer comment GC peut se maintenir face à GS dans la population, sachant qu'il pousse son porteur à effectuer des actes de communication qui se révèlent altruistes.

La question de l'altruisme et de sa compatibilité avec les modèles de l'évolution par sélection naturelle a été abondamment traitée (cf. par exemple [Hamilton 1978], [Dawkins 1978, 1982], [Wilson 1975, 1979]). Il y a deux types de modèles que l'on peut évoquer pour expliquer l'altruisme, qui s'appliquent tous deux dans le cas de la communication, et que nous appellerons l'altruisme de proximité génétique (APG) et l'altruisme par compensation (APC).

Considérons un individu A, porteur de GC. Lorsque ses actes de communication profitent exclusivement à des individus qui, avec une bonne probabilité, possèdent eux aussi GC (par exemple parce qu'ils sont apparentés à A), la fréquence de GC dans la population peut rester dominante par rapport à GS, même si A perd de la viabilité en communiquant. D'autres porteurs de GC auront en effet profité de cet acte. Nous appelons ce cas APG. Les actes de communication au sein d'une fourmilière entre certainement dans cette catégorie. Ils profitent (directement ou indirectement) aux individus reproducteurs qui ont une probabilité supérieure à $\frac{3}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ (selon le sexe) de posséder eux aussi GC [Dawkins 1978]. Dans le cas de l'APG, le bilan de l'acte de communication pour le gène GC (en terme d'espérance de reproduction de ses porteurs) est positif.

Dans de nombreux cas, les individus bénéficiaires de l'acte de communication n'ont pas de raison particulière de posséder GC. Il faut donc que l'acte de communication bénéficie, directement ou indirectement à son auteur, autrement dit que la perte de viabilité due à la communication de l'information soit compensée. C'est ce que nous désignons par APC. Les moyens par lesquels cette compensation est effectuée sont loin d'être évidents. Il n'en reste pas moins qu'il s'agit là d'une contrainte incontournable, qui s'applique selon toute vraisemblance à la communication humaine.

Le cas de la communication humaine

La stabilité évolutive de la communication humaine doit nous intéresser au plus haut point. Elle doit nous renseigner sur le fondement des organisations humaines, de la tribu primitive à l'entreprise multinationale ou la communauté scientifique. Mais surtout, elle peut éclairer l'origine phylogénétique du langage qui reste encore si mystérieuse. L'enjeu est de comprendre l'origine évolutive de l'homme lui-même, si l'on considère comme J. Monod [1970] ou D. Bickerton [1990] que l'accès au langage est ce qui a déterminé et conduit le processus de l'hominisation⁽³⁾. La question est donc de comprendre si la communication humaine est un cas d'APG ou correspond

² Une hypothèse plus réaliste ne serait pas « tout ou rien ». Il y a toujours des variations individuelles qui sont d'origine génétique. Un éleveur pourra ainsi affirmer qu'en quelques décennies (voire quelques siècles), on peut sélectionner un chien qui n'aboie jamais.

³ L'idée inverse selon laquelle le langage ne serait qu'un sous-produit de l'intelligence générale (voir [J. Piaget, in Piatelli-Palmarini 1979]) ou serait un « organe » sans fonction biologique [Piatelli-Palmarini 1988] nous paraît iréaliste d'un point de vue évolutif et ne sera pas discutée ici. On notera la suggestion de J. Pelegrin [1990] selon laquelle la fabrication d'outils en pierre nécessite précisément les compétences intellectuelles associées au langage. D'autres propositions sur l'origine évolutive du langage ont été faites récemment [Donald 1993], [Dunbar 1993].

plutôt à un APC. Mais auparavant, nous pouvons nous interroger sur la nature de cette communication.

Le contenu de ce qui est communiqué spontanément par les humains a été très peu étudié par les linguistes. Depuis [Grice 1975], il est couramment admis par les pragmaticiens que le langage est une forme de coopération. Mais quel est l'objet de cette coopération ? Cette question est peut-être de peu d'intérêt d'un point de vue linguistique, mais elle revêt une importance cruciale si l'on cherche à comprendre comment le langage est biologiquement possible. D'autres auteurs voient dans le langage le résultat d'une activité de planification (voir [Grosz, Pollack & Sidner 1989], [Scholtens 1991], [Young, Moore & Pollack 1994]). Le contenu de ce qui est dit par le locuteur est alors envisagé, et est censé servir deux buts principaux : amener l'auditeur à *croire* quelque chose, ou l'amener à *faire* quelque chose. Ce dernier point rejoint la théorie des actes de langage [Searle 1969] pour laquelle toute prise de parole équivaut à un acte social. Certains de ces actes pourraient être effectués par un autre moyen que le langage (par ex. un ordre), d'autres non (par ex. une promesse). Tous ces points de vue (coopération, planification, actes sociaux) tendent à banaliser l'activité langagière pour l'intégrer dans une théorie de l'action. Ce point de vue n'est pas le mien. Je vois plutôt dans le langage une activité tout à fait spécifique, y compris socialement. Cette spécificité est particulièrement visible dans le cas de la conversation spontanée.

A quoi sert la conversation spontanée ?

Les humains ne peuvent pas s'empêcher de converser. A quoi sert ce comportement si caractéristique ? Certes on voit mal quelle organisation humaine pourrait exister sans lui. Mais en quoi précisément ce comportement est-il utile à l'organisation, et en surout, compte tenu de ce que nous avons évoqué plus haut, en quoi augmente-t-il l'espérance de reproduction de chacun des interlocuteurs ? Je ne prétends pas proposer de réponse complète à ces questions. Mais il est possible de suggérer quelques éléments de réflexion.

J'ai suggéré ailleurs [Dessalles 1993] que la conversation servait à traiter des situations *problématiques* : les conversations que j'ai pu étudier sont toutes relatives à une situation qui est perçue comme *paradoxe, improbable, ou (in)désirable*⁽⁴⁾ par les interlocuteurs. Tout sujet de conversation qui, pour une raison ou une autre (par exemple à la suite d'un malentendu), n'apparaît pas doté de l'une au moins de ces propriétés est rejeté de manière caractéristique (« Pourquoi dis-tu ça ? »). Cette contrainte, que j'ai pu observer dans plusieurs cultures, est tellement bien formalisable par une modélisation logique simple qu'il est difficile d'imaginer qu'elle n'a pas de racines biologiques. Nous nous placerons dans l'hypothèse où il s'agit d'une contrainte biologique.

La question qui se pose alors est de savoir qui, du locuteur ou de l'interlocuteur, impose cette contrainte ? Dans [Dessalles 1992], j'ai suggéré que ces contraintes venaient de l'interlocuteur. Autrement dit, nous sommes dans la situation où le bénéficiaire de l'acte altruiste se permet d'imposer des contraintes à celui qui fournit l'information ! Mais s'agit-il vraiment d'une information ?

Dans le cas de la mention d'un événement improbable, il s'agit bien d'une information, dans le sens de Shannon. Le cas d'un événement indésirable peut être traité de la même façon : la formule de Shannon peut être étendue pour prendre en compte deux paramètres, la probabilité *a priori* et la désirabilité *a priori* [Dessalles 1993], ce qui correspond mieux à notre intuition de la notion d'information (par ex. « X a été élu » apporte seulement un bit d'information au sens classique si les sondages donnaient 50-50, mais cette information peut pourtant être achetée très cher si elle présente un enjeu en termes de désirabilité). Le cas de la mention d'un événement paradoxal est en revanche beaucoup moins clair : le contenu informationnel peut être très faible (par ex. j'exprime mon étonnement de voir que personne ne cueille les citrons qui sont à portée de main sur les branches au-dessus de la rue, sachant que les citronniers sont chose courante ici et que je n'ai nulle envie de cueillir un citron). Essayons de voir dans chaque cas ce qui permet aux individus d'augmenter leur viabilité.

⁴ C'est-à-dire présentant un enjeu.

<i>événement</i>	<i>type de contribution</i>	<i>intérêt éventuel pour la viabilité des autres interlocuteurs</i>
<i>paradoxal</i>	signaler une incohérence expliquer (invalider)	alerte sur fiabilité des prédictions permet de mieux prévoir
<i>improbable</i>	signaler une rareté banaliser	alerte sur fiabilité des prédictions permet de mieux prévoir
<i>indésirable</i>	signaler une situation à éviter banaliser suggérer (invalider) équilibrer	alerte sur un risque permet de mieux évaluer évitement permet de mieux évaluer
<i>désirable</i>	signaler une situation à rechercher	bénéfice possible

On peut constater que toutes les contributions possibles présentent potentiellement un intérêt pour celui qui les reçoit (la dernière colonne n'est certainement pas exhaustive). Par exemple, dans le mode paradoxal, l'interlocuteur peut avoir son attention attirée sur un phénomène étrange qu'il n'avait pas repéré. Il s'agit d'un avantage réel, si l'on pense que comprendre le monde qui nous entoure nous permet de mieux prévoir les événements qui nous concernent (pour les détails concernant les interventions, voir [Dessalles 1993]). Tous les types d'interventions peuvent être profitables aux interlocuteurs, mais cela ne veut pas dire qu'elles le sont toujours. Si, revenant de l'étranger, je déclare « J'ai vu qu'ils ont sorti une nouvelle pièce de 10F », je n'amène aucune information car mes interlocuteurs sont déjà bien sûr au courant de cet événement. Pourtant la contribution est parfaitement acceptable car elle mentionne bien un événement *a priori* improbable.

Au point où nous en sommes, nous voyons maintenant l'intérêt que *peut* présenter pour nos interlocuteurs chacune de nos interventions conversationnelles (sans que cet intérêt soit systématique). Pourquoi conférons nous ainsi un avantage à des interlocuteurs parfois inconnus, qui peuvent même être, avec une bonne probabilité (imaginons une tribu de chasseurs-cueilleurs), nos concurrents génétiques ? Comment expliquer que nous allions littéralement jusqu'à nous « battre » (au moins dans certaines cultures) pour prendre la parole ? Comment la sélection naturelle a-t-elle pu permettre à un tel comportement de voir le jour ? Le fait que les « informations » que nous donnons ainsi ne soient pas spécialement destinées à des individus apparentés doit exclure la possibilité que ce type d'altruisme soit de l'APG. Il ne peut donc s'agir que d'APC. Mais alors en quoi réside la compensation ?

Le commerce de l'« information »

L'étude de la stabilité évolutive de la communication est accessible à l'expérimentation par simulation (voir par ex. [MacLennan 1990, 1992], [Werner & Dyer 1992]). Son étude dans le cas de la conversation humaine est sans doute moins évidente. L'objectif ici est principalement d'indiquer qu'une telle compensation existe, il n'est pas de dire en détail en quoi elle consiste. Pour comprendre en gros la nature de cette compensation, je suggère de considérer un type de communication dérivé de la conversation : la communication au sein de la communauté scientifique. Comme les interlocuteurs dans les conversations, les scientifiques sont friands de la possibilité de donner leurs meilleures idées ou leurs meilleures critiques à leurs concurrents. Qu'est-ce qui les pousse à le faire ? Certainement de nombreuses motivations. Parmi celles-ci, la recherche de la considération de leurs collègues n'est pas à négliger. Effectivement, le chercheur qui énonce des idées originales et puissantes, ou celui qui produit des critiques pertinentes, qu'il le souhaite ou non, voit son statut socio-scientifique augmenter (distinctions honorifiques, invitations dans des conférences, nombre d'étudiants attirés, ou tout simplement estime de ses collègues). Un tel système n'est possible que si

la paternité des idées est clairement visible (d'où le système des publications). En est-il de même pour les conversations ?

Des études détaillées seraient nécessaires pour l'affirmer avec force, mais nous avons tout de même des indices. Un indice général vient d'une observation commune : notre statut social (auprès de nos proches) vient en partie de notre capacité à produire des interventions pertinentes (voir éloquentes) dans les conversations quotidiennes. Celui qui brille en société reçoit parfois autant de considération que celui qui réalise des exploits tangibles. Mais nous pouvons trouver des indices plus particuliers. Dans le mode de l'improbabilité, il semble que la paternité de l'information (celui qui annonce la nouvelle) et la qualité de cette information ne soient pas traitées à la légère. Lorsque l'on colporte une nouvelle, on se sent obligé de préciser de qui on la tient si l'interlocuteur connaît cette personne (cf. les citations en science). Lorsqu'il se trouve que l'interlocuteur est déjà au courant de la nouvelle, il s'empresse de le préciser. De même, lorsque ce dernier banalise l'information reçue (par exemple en citant des cas analogues), il diminue l'information, au sens de Shannon, qu'il reconnaît avoir reçue (cf. [Dessalles 1993]). L'hypothèse selon laquelle l'information liée à une nouvelle se paye « proportionnellement » en terme de statut est donc envisageable⁵.

Si l'on prend en compte cette notion de statut, on comprend un peu mieux en quoi la participation efficace aux conversations quotidiennes permet d'augmenter l'espérance de reproduction, si l'on admet que celle-ci est corrélée au statut social chez les chasseurs-cueilleurs [Eibl-Eibesfeldt 1967], [Morris 1970], [Mellen 1981].

Conclusion

Nous n'avons fait ici qu'effleurer la question. Bien des problèmes subsistent. Mais le but était bien de les soulever. Citons-en quelques études que cette problématique peut susciter :

- Envisager, puis explorer expérimentalement, les possibilités de « récompense sociale » associées aux types logiques d'interventions.
- Envisager d'autres formes de compensation, non liées au type logique de l'intervention (par exemple reconnaissance de l'appartenance au groupe)
- Démontrer la stabilité génétique du système information / récompense sociale.

L'objectif était avant tout d'attirer l'attention sur l'enjeu présenté par ce type de question. De montrer qu'il était possible d'aborder le thème de la stabilité évolutive du langage de telle manière que l'on puisse concevoir des expériences et des simulations. De suggérer enfin que le langage est un jeu plus complexe qu'un simple échange d'information ou une simple coopération.

Références

- Bickerton D. (1990). *Language and Species*. University of Chicago Press, 1990
- Dawkins Richard (1978). *Le gène égoïste*. Editions Menges, 1978
- Dawkins Richard (1982). *The Extended Phenotype - The Gene as the Unit of Selection*. W.H. Freeman & Co, Oxford 1982
- Dawkins Richard (1994). Burying the vehicle. *Behavioral and Brain Sciences* vol. 17, 1994, pp. 617
- Dessalles Jean Louis (1992). L'incidence logique de l'interaction dans la communication d'informations. *Technologies Idéologies Pratiques* vol. X n° 2-4, 1992
- Dessalles Jean Louis (1993). *Modèle cognitif de la communication spontanée, appliqué à l'apprentissage des concepts*. Thèse de doctorat, TELECOM-Paris 93E022, Paris 1993
- Donald Merlin (1993). Précis of Origins of the modern mind. *Behavioral and Brain Sciences* vol. 16 n° 4, 1993
- Dunbar R.I.M. (1993). Coevolution of neocortical size, group size and language in humans. *Behavioral and Brain Sciences* vol. 16 n° 4, 1993, pp. 681-735

⁵ L'exemple de la pièce de 10F donné plus haut s'analyserait ainsi : je signale que je dispose moi aussi de l'information, que je l'ai obtenue par mes propres moyens, et qu'on peut me reconnaître ce mérite.

- Eibl-Eibesfeldt Irenäus (1967). *Ethologie - Biologie du comportement*. Naturalia et Biologia ed. scientifiques, Paris 1977
- Grice H. Paul (1975). Logic and Conversation. In Cole Peter, Morgan Jerry L., *Syntax and Semantics volume 3: Speech Acts*, Academic Press, New York 1975, pp. 41-58
- Grosz Barbara J., Pollack Martha E., Sidner Candace (1989). Discourse. In Posner M.I., *Foundations of Cognitive Science*, Bradford Book, the MIT Press, Londres 1989, pp. 437-468
- MacLennan Bruce (1990). *Evolution of Communication in a Population of Simple Machines*. Research Report Jan-90, Dpt of Computer Science, Univ. of Tennessee, Knoxville 1990
- MacLennan Bruce (1992). Synthetic ethology: an approach to the study of communication. In Langton Christopher, Taylor Charles, Farmer J.D., *Artificial Life II*, Addison-Wesley, 1992, pp. 631-657
- Mellen Sydney L.W. (1981). *The Evolution of Love*. W.H. Freeman and Company, Oxford 1981
- Monod Jacques (1970). *Le hasard et la nécessité*. Seuil, Paris 1970
- Morris Desmond (1970). *Le zoo humain*. Grasset, Paris 1970
- Pelegri Jacques (1990). Prehistoric Lithic Technology: Some Aspects of Research. *Archeological Review from Cambridge* vol. 9 n° 1, 1990, pp. 116-125
- Piatelli- Massimo, Palmarini (1979). *Théories du langage - Théories de l'apprentissage*. Seuil, Paris 1979
- Piatelli- Massimo, Palmarini (1988). Evolution, selection and cognition: From 'learning' to parameter setting in biology and in the study of language. *Cognition* vol. 31, 1988, pp. 1-44
- Scholtens Anneke (1991). Planning in ordinary conversation. *Journal of Pragmatics* vol. 16, 1991, pp. 31-58
- Searle John R. (1969). *Les actes de langage - Essai de philosophie du langage*. Hermann (Speech Acts, Cambridge University Press), Paris 1972
- Werner Gregory M., Dyer Michael G. (1992). Evolution of Communication in Artificial Organisms. In Langton Christopher, Taylor Charles, Farmer J.D., *Artificial Life II*, Addison-Wesley, 1992, pp. 659-687
- Wilson Edward O. (1975). *Sociobiology: the new synthesis*. Harvard University Press, 1975
- Wilson Edward O. (1979). *L'humaine nature - Essai de sociobiologie*. Stock, Paris 1979
- Wilson David Sloan, Sober Elliott (1994). Reintroducing group selection to the human behavioral sciences. *Behavioral and Brain Sciences* vol. 17, 1994, pp. 585-654
- Young R. Michael, Moore Johanna D., Pollack M.E. (1994). Towards a principled representation of discourse plans. In Ram Ashwin, Eiselt Kurt, *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J. 1994, pp. 946-951

La Genèse d'un Mouvement Révolutionnaire La RDA en 1989

Wolf-Dieter Eberwein, WZB, Berlin
Pierre Saurel, EHESS, Paris

Avant Propos

Une étincelle suffit à déclencher un feu de prairie. Ce feu de prairie est comparable au mouvement révolutionnaire. On peut supposer cependant que l'émergence d'un mouvement révolutionnaire obéit à une dynamique systématique, même si les éléments qui la déclenche sont non prévisibles. Pour analyser ce problème, nous avons choisi un cas particulier : l'émergence d'un mouvement révolutionnaire populaire dans l'ancienne RDA en 1989 qui entraîna la chute du système communiste. Le modèle proposé ici est lié au modèle d'Ising [PRUM, 1986]. Ceci permet d'introduire l'aspect spatial du problème dans le modèle. L'objectif de ce modèle n'est pas d'expliquer ce qui s'est réellement passé ou de prévoir ce qui pourrait arriver dans des situations analogues. Par contre, nous souhaitons vérifier que certaines hypothèses sont suffisantes pour justifier la dynamique observée. L'obtention des faits est le travail du chercheur en Sciences Sociales. L'émission d'hypothèses plausibles essentielles est aussi son travail. Il revient cependant au modélisateur, en travaillant avec le chercheur en Sciences Sociales, de fixer comment ces hypothèses peuvent être intégrées et explicitées dans un système cohérent qui peut être simulé sur un ordinateur.

I/ La démocratisation : un processus évolutif ?

Parler d'évolution en politique pose des problèmes. Ce terme suggère une finalité difficile à justifier de façon théorique. Néanmoins, dans les années soixante, les théories anglo-saxonnes de la modernisation, avaient suggéré l'existence d'une évolution vers la démocratie comme forme de gouvernement universel. En fait, cet argument a été développé de manière systématique par Fukuyama (1989) dans son fameux article "The end of history". Si l'on considère l'évolution du système international depuis le XIX^{ème} siècle cette thèse semble être justifiée. Huntington (1991) décrit trois grandes vagues de démocratisation, au XIX^{ème} siècle, entre les deux guerres mondiales et depuis 1945. Aujourd'hui, environ quarante cinq pour cent des états indépendants dans le monde ont un régime démocratique. Si cette tendance se confirme, il est possible que le monde ne connaisse plus que des régimes démocratiques d'ici une centaine d'années.

L'exercice serait certainement futile de développer une théorie de l'évolution des systèmes politiques en général et de modéliser ce processus global particulier. Ce qui semble faisable, par contre, est de conceptualiser le processus de la transition à la démocratie. La plus récente vague de démocratisation a commencé dans les années soixante-dix avec la Grèce, l'Espagne et le Portugal. Elle s'est ensuite répandue en Amérique Latine pour finalement disloquer l'URSS. Nous ne pouvons pas savoir si ces transitions étaient inévitables. Il est clair cependant que le processus de démocratisation n'est pas simplement dû au hasard même si des circonstances imprévisibles peuvent le déclencher.

Plusieurs types de transition à la démocratie sont connus. Notre analyse est centrée sur un cas particulier de démocratisation, celui de la RDA en 1989. A la fin de la deuxième guerre mondiale se met en place en RDA le premier système politique socialiste allemand. Il est considéré dans les années quatre-vingts comme un système politique relativement stable. Pourtant un processus de mobilisation de masse se développe en quelques mois au cours de l'année 1989. La chute du mur de Berlin, le 11 novembre 1989 constitue le premier point d'orgue du mouvement. La réunification des deux Allemagne, le 3 octobre 1990, consacre la transformation politique de la RDA. Personne, à l'origine, n'imaginait que ce mouvement de manifestation des masses prendrait une telle ampleur. Il n'était pas envisagé non plus que ce mouvement puisse entraîner la chute du régime politique. On peut parler ici d'un phénomène d'émergence dont nous souhaitons comprendre le mécanisme.

II/ Aspects théoriques proposés en Sciences Politiques

Le déclenchement des mouvements de masses, révolutionnaires ou non, peut être considéré comme un accident. Ces mouvements sont souvent mis en route par des événements imprévus, voire imprévisibles. On ne peut cependant pas rejeter a priori l'hypothèse affirmant que l'évolution des mouvements de masses obéit à une logique dynamique systématique, même si elle n'est pas connue d'avance.

Entre l'observation et la représentation de la dynamique intervient un filtre théorique. Pour modéliser la dynamique du comportement collectif le choix d'un algorithme est requis. Pour valider et interpréter le modèle et son comportement le contexte théorique doit être bien défini.

Donc, avant de décrire le modèle nous définissons le contexte théorique dans lequel se situe cette modélisation. Au mois de novembre 1989, plus de dix pour cent de la population totale de la RDA participait aux différentes manifestations de rue. Il est clair, que tous les individus qui ont participé à ces manifestations au cours de l'année 1989 ont pris une décision personnelle en le faisant. Cependant, l'explication du choix individuel stratégique de participer à ces manifestations ne peut donner directement une explication au phénomène collectif observé. La somme de ces comportements individuels n'est pas identifiable avec le comportement collectif propre. Il ne permet pas non plus d'envisager les conditions qui, en premier lieu, ont déterminé le comportement individuel.

Une conceptualisation théorique est donc nécessaire qui permettrait de relier ce contexte global avec le comportement individuel. Hirschmann (1977) croit avoir trouvé une conceptualisation générale du comportement politique qui permettrait d'analyser sa dynamique dans le temps. Cette conceptualisation s'appuie sur trois variables centrales : *la loyauté, la contestation et l'exil*. Le fonctionnement d'un système politique ne pose pas de problèmes tant que les individus sont loyaux et acceptent l'ordre politique existant. La légitimité du régime politique est un phénomène à long terme. Il se définit comme la capacité du système politique à satisfaire les besoins de la population.

Le problème est que la loyauté ne peut être identifiée directement sur le plan phénoménologique. Seuls ses effets sont perceptibles. L'absence de contestation ouverte du régime politique par les individus ne constitue pas pour autant une légitimation de ce régime. En d'autres termes, la loyauté envers un système politique est seulement une prédisposition de la population. Comme telle, elle ne peut pas être observée directement.

Si la loyauté n'est pas observable, l'exil et la contestation par contre le sont. L'exil, dans le cas de la RDA a une interprétation directe, l'émigration en RFA. La construction du mur avait permis d'interrompre ce mode de protestation de façon systématique. Ainsi, le régime pouvait contrôler cette forme de comportement.

La contestation est parfois observable et se présente sous des aspects différents. Les motifs individuels qui poussent à la contestation ne sont par contre pas faciles à élucider et relèvent souvent de la psychologie. Il peut exprimer, en protestant, son opposition au régime politique dans son ensemble ou bien seulement montrer son refus de certains aspects d'une politique. Cette expression reste individuelle et ne correspond jamais tout à fait aux exigences de la manifestation dans son ensemble. Ce décalage n'empêche cependant pas l'individu de continuer d'adhérer à cette expression collective. Cela signifie également que les raisons du choix individuel de contester ne permettent pas de connaître d'avance les revendications du groupe. Elles ne permettent pas non plus de connaître la réaction du gouvernement, que ce soit un durcissement de la part du régime, un changement de sa politique ou bien sa défaite. Donc, même si nous sommes capables de reproduire avec un modèle la dynamique du comportement collectif a posteriori, la possibilité de généraliser un résultat particulier n'est pas du tout garantie.

La prédisposition à l'action et l'action effective des individus sont donc à la base de la genèse du comportement politique collectif, c'est à dire d'un mouvement de masse. Son évolution, par contre, est sujet à des contraintes importantes. La première d'entre elles, est la faculté des systèmes autoritaires de recourir à une répression presque immédiate. Dans cette communication nous proposons un modèle pour simuler cette mobilisation dans l'ancienne RDA en 1989. La transition à la démocratie s'explique d'abord par l'émergence d'un mouvement collectif qui se forma à partir de noyaux de dissidents créés localement au début des années quatre-vingts. A partir de 1987 ces petits groupes commencèrent à se coordonner sur le plan national. Mais c'est seulement en 1989 que ces groupes se montrèrent capables de contribuer à une mobilisation de masses.

Comment expliquer ce phénomène d'émergence auquel personne ne s'attendait ? D'après Hirschmann, le mécontentement avait atteint un tel niveau que le résultat final semble être logique. Hirschmann (1993) essaye de le montrer de façon qualitative. Il constate en particulier l'interaction entre exit et contestation qui évoluèrent de façon exponentielle à partir du mois de août ou de septembre. Une approche plus systématique et formalisée a été développée par Kuran (1989, 1991) et Lohmann (1994). Pour expliquer le comportement collectif à partir du choix stratégique individuel, ils ont proposé une conceptualisation en partant de la théorie du choix rationnel. Ces deux approches n'ont malheureusement pas abouti à la simulation.

Kuran suggère une conception du comportement collectif qui présuppose un comportement rationnel de la part des individus devant une situation révolutionnaire. Chaque individu a des préférences privées et publiques. Exprimer l'une ou l'autre est relié au calcul de l'utilité qu'il tire de s'activer ou non. Prendre position est fonction du nombre de personnes prenant publiquement position. Ce qu'il peut prouver c'est qu'en premier lieu la position publique que prend un individu ne correspond pas nécessairement à sa préférence privée. En deuxième lieu il peut aussi démontrer qu'en fin de compte la distribution des préférences individuelles peut entraîner un effet d'avalanche. Selon son analyse c'est ce qui caractérise en général les mouvements révolutionnaires.

Lohmann, par contre modélise l'évolution des mouvements de masses en termes de ce qu'elle appelle "informational cascades". Comme Kuran elle présuppose des individus rationnels. Kuran distingue seulement trois classes d'individus, le noyau dur actif révolutionnaire, le noyau dur du statu quo et les indécis qui peuvent changer de position. Lohmann, par contre, considère quatre classes d'individus qui peuvent prendre position. Ce sont les deux noyaux durs comme Kuran, les activistes modérés et les apathiques modérés. Le groupe central est celui des activistes modérés. Le nombre de contestataires représente l'information cruciale qui pourrait mobiliser ces modérés. Cette information leur permet de se rendre compte de la répartition du mécontentement dans la population. Elle montre ainsi que

ce ne sont pas les extrémistes actifs qui en fin de compte déclenchent cet effet d'avalanche mais les modérés.

Le problème que pose le modèle de Kuran est qu'il ne développe pas un algorithme formel capable de décrire les conditions qui entraînent la mobilisation de masse. Le problème du modèle de Lohmann est que c'est avant tout un modèle théorique qui provient d'une analyse de la propagation d'information. Elle a adapté ce modèle aux questions liées à la mobilisation des populations dans les phénomènes révolutionnaires. Elle a ensuite seulement essayé de vérifier que ce modèle était pertinent en le confrontant avec les données obtenues pour la ville de Leipzig. Ce modèle n'est donc pas pensé dès le départ en fonction des questions spécifiques qui se posent à propos de la démocratisation en RDA. De plus elle ne fait pas de distinction entre la mobilisation qui entraîne la chute d'un régime autoritaire comme celui de la RDA et la transition à un nouveau régime politique. Or le problème de l'écroulement d'un régime n'a a priori rien à voir d'un point de vue théorique avec la constitution d'un nouveau régime politique.

Il est encore plus problématique que l'évolution d'un mouvement de masse ne considère pas la dimension spatiale. Or il est clair que le succès d'un mouvement pareil n'est donné que sous la condition d'une certaine concentration géographique. Si un million de personnes, par exemple, manifeste en France mais que ces personnes sont réparties sur tout le pays, son effet est mineur. Si, au contraire, un million de personnes manifeste à Paris, cela fait une différence. Ces personnes sont visibles et cela pose donc des difficultés de contrôle pour les autorités. Ce même problème s'est en effet posé pour les forces de l'ordre à Leipzig à partir du moment où plus de 100 000 personnes manifestaient dans les rues.

A partir de ces idées provisoires le travail en cours consiste à modéliser l'évolution du mouvement de masses en RDA en tenant compte de la dimension spatiale.

III/ Description du modèle

Les deux premières parties nous ont permis de nous familiariser avec les faits observés par le chercheur et les hypothèses qu'il formule. Dans cette troisième partie, nous allons préciser le modèle, pour voir comment ces hypothèses sont explicitées et intégrées.

Ce modèle s'inspire de modèles comme celui d'Ising avec un champ extérieur non nul, utilisés en physique pour étudier le phénomène de magnétisation [PRUM, 1986]. Cependant il ne s'agit pas d'une application directe de ce modèle, mais de son adaptation pour essayer de modéliser le phénomène des manifestations de mécontentement lors de la démocratisation de la RDA en 1989.

Le modèle s'inspire avant tout du découpage administratif de la RDA en 227 districts. Dans chaque district vivent un certain nombre d'habitants qui sont les unités de base de notre modèle. Les habitants sont susceptibles de manifester leur mécontentement, nous dirons de s'activer. Ils contribuent également à une influence sur les autres habitants du même district. Cette activation de chaque habitant dépendra non seulement de l'activation des autres habitants du même district, mais aussi d'un facteur global du système. Ce facteur provient de l'information que chaque habitant peut observer sur le fonctionnement global du système. En particulier ce facteur dépendra du nombre total d'habitants exilés et de la répression que pourrait émettre le pouvoir sur l'ensemble du système.

1) les habitants

Les habitants de la RDA constituent les unités de base du système. On les regroupe en différentes classes grâce à des considérations sociologiques. Ils agissent entre eux, et

s'influencent mutuellement pour s'activer ou non. Cette activation est considérée comme le fait d'être mécontent du régime et le montrer au cours de manifestations.

a) la classification des habitants

La classification des habitants est réalisée à partir de données obtenues par différentes sources et qui sont recoupées. Les sources concernant les caractéristiques des habitants proviennent des archives officielles de l'ancienne RDA. Ces éléments ont ensuite été analysés avec différents outils statistiques. On observe alors qu'une classification en deux classes sociales est possible. La première correspond en gros aux classes éduquées qui sont allées à l'université, ou qui occupent des emplois d'encadrement ou de technicien supérieur. La seconde classe correspond aux ouvriers ou à des personnes ayant fait peu d'études. On observe également un recoupement de cette classification avec des critères de salubrité du logement.

Chacune de ces classes aura une réactivité différente. Nous appellerons r_1 la réactivité de la première classe et r_2 celle de la seconde classe. Cette réactivité est la même pour tous les éléments d'une même classe sociale dans un même district, mais elle peut varier d'un district à l'autre.

b) les caractéristiques des habitants

Chaque habitant est caractérisé par sa classe sociale et donc sa réactivité, ainsi que par son activité. Un habitant se trouve dans l'état 1 quand il est actif et dans l'état 0 lorsqu'il est inactif. Un troisième paramètre caractérise ces habitants, ils peuvent faire partie d'un noyau dur ou non. Dans ce cas on dira que ce sont des militants. On trouve à la fois des militants révolutionnaires qui resteront actifs quoiqu'il arrive et des militants réactionnaires qui resteront toujours inactifs.

De plus les habitants sont reliés les uns aux autres au sein d'un réseau. Ce réseau correspond aux liens avec d'autres habitants qui influence l'activation ou la désactivation d'un habitant. Dans l'exemple que nous avons programmé, chaque habitant possède trois voisins dans son entourage. Ce réseau est constitué a priori suite à un tirage aléatoire. Dans un premier temps ces voisinages sont fixes et déterminent en quelque sorte la topologie de notre problème.

En résumé, chaque individu est caractérisé par trois nombres, sa catégorie sociale, son activité et son militantisme. De plus à chaque individu est associée une liste de voisins qui ont également une activité et une catégorie sociale.

c) la dynamique d'activation des habitants

La dynamique d'activation des individus est locale. Elle ne dépend que des caractéristiques propres à chaque individu. Dans chaque district, cette dynamique s'opère de manière parallèle et synchrone sur les individus. La dynamique qui s'en déduit au niveau de l'ensemble des districts, pour leur activité totale peut également se calculer de façon parallèle et synchrone.

Les individus qui sont militants restent toujours dans le même état d'activité. Pour les individus qui ne sont pas militants, on calcule la moyenne de l'activité de ses voisins. Lorsque cette moyenne est supérieure à sa réactivité, cet habitant va s'activer ou rester actif avec une certaine probabilité. Lorsque cette moyenne est inférieure à sa réactivité, il va se désactiver ou rester inactif avec une certaine probabilité.

Actuellement ces probabilités sont les mêmes quelle que soit la catégorie sociale de l'individu et son district d'appartenance.

2) les districts

a) classification des districts et le cas de Berlin

Les différents districts ont été également catégorisés à partir de données provenant des archives de la RDA, avec les outils statistiques classiques en sociologie.

Cette analyse met en avant une première catégorisation grossière en deux grands types de districts, les premiers correspondant grossièrement aux villes et les seconds aux campagnes.

Pour Berlin, le problème qui se pose est légèrement différent. En effet, Berlin-Est comportait à elle seule onze districts différents. Les données sociologiques peuvent être obtenues pour chacun des districts de Berlin. Le problème se pose pour l'obtention des données des manifestations. Il est en effet tout à fait impossible lorsqu'une grosse manifestation a lieu dans le centre de Berlin, de savoir de quels districts berlinois proviennent chacun des participants. Il est donc plus sain dans ce cas de considérer Berlin comme un seul district gigantesque.

b) les caractéristiques des districts

Le district est tout d'abord déterminé par son numéro, et le nombre de ses habitants.

Chaque district est caractérisé, en fonction de sa classe par la répartition de sa population dans chacune des catégories sociales. Lorsque la proportion de la population du district selon chacune des classes sociales est fixée, on effectue un tirage aléatoire qui permet de fixer la catégorie sociale de chacun des habitants.

Chaque district est également caractérisé par la donnée des réactivités des différentes classes sociales r_1 et r_2 , qui sont constantes au sein du district. De plus, à chaque pas de temps, on peut calculer pour chaque district, le nombre d'actifs.

c) l'influence réciproque des districts et les facteurs géographiques

Un phénomène de réseau est alors introduit au niveau des districts. Les réactivités des catégories sociales d'un district sont modifiées en fonction de la variation de l'activité totale des autres districts pondérée par l'inverse de la distance à ces districts. Ceci permet d'introduire un effet de diffusion indirecte de l'activité des autres districts. De plus la pondération par l'inverse de la distance permet que cette diffusion dépende de la proximité géographique des districts.

3) le facteur global

Un facteur global va également influencer de manière indirecte l'activité des habitants en modifiant les seuils de réactivité des différents habitants.

a) ses composants : l'exil, la répression et la libéralisation du régime

Ce facteur global est constitué par les trois éléments déterminés et mesurés par le spécialiste en Sciences Politiques. Le premier élément est l'exil qui est obtenu comme la variation du nombre d'individus qui ont quitté le territoire de la RDA entre deux pas de temps successifs. Le second élément est la répression qui est donnée par le nombre d'arrestation et d'emprisonnements politiques. Cette donnée est obtenue grâce aux archives de Radio Free Europe, à Munich. Le troisième élément est la libéralisation, qui est constituée, entre autres par le nombre de prisonniers politiques relâchés par le régime entre deux pas de temps.

Toutes ces données sont sensées être connues de chaque individu par l'intermédiaire de la télévision ouest allemande qui était reçue dans tout le pays.

b) sa détermination par agrégation

Les trois éléments que nous avons définis influencent ensemble un facteur global qui correspondrait à une sorte de mécontentement global lié aux informations connues de tous. Cependant l'influence relative de chacun de ces éléments est difficile à déterminer. Dans un premier temps, nous considérerons une agrégation de ces éléments sous forme d'une

combinaison linéaire, les différents coefficients en jeu étant fournis grâce à une analyse des données politiques.

c) son effet sur les districts

Ce facteur global a ensuite une influence sur les seuils de réactivité de chaque catégorie sociale et dans chaque district. Cette influence n'est pas donnée par une fonction. Lorsque le facteur global augmente, cela entraîne une diminution des seuils de réactivité des catégories sociales. Le détail de cette diminution sera déterminé lorsque nous essayerons de montrer la pertinence de ce modèle. La simulation permettra de valider le modèle, en comparant l'activité totale du système et le nombre des manifestants en RDA. Cette comparaison s'effectuera grâce à une mesure adéquate de l'activité totale du système. Cette mesure devra ensuite être suffisamment proche de la mesure du nombre de manifestants. Celle-ci est fournie par l'analyse des données. Elle est calculée comme une moyenne sur chaque pas de temps du nombre de manifestants.

IV/ Difficultés de la modélisation

Les principales difficultés qui apparaissent sont liées d'une part à la sémantique de certains éléments du modèle et d'autre part à la validation de ce modèle. On peut discerner cinq problèmes principaux.

1) L'échantillonnage qui a lieu au niveau du modèle pose problème. Il est nécessaire, du fait de la performance des machines. La question qui se pose est de savoir si un modèle comportant n habitants ayant chacun p voisins peut avoir le même comportement global qu'un modèle comportant le même nombre de districts et d'habitants que la RDA en 1989.

2) La seconde question qui se pose concerne la signification des différents éléments du modèle et en particulier celle des liens entre habitant. Si chaque habitant du modèle correspond à un groupe d'individus réels, comment faut-il interpréter le réseau du modèle, et l'activité simulée ?

3) L'obtention des données et la catégorisation est également difficile, car en fonction de la précision souhaitée et des critères proposés, on n'obtient pas le même nombre de classes.

4) Le problème des échelles de temps se pose de façon très délicate. Il est évident qu'en fonction de cette échelle de temps, nous constaterons que la modélisation est plus ou moins pertinente. Il est clair également que cette modélisation ne peut pas correspondre aux phénomènes observés pour toutes les échelles de temps.

5) Enfin l'acceptation de ce modèle comme conforme jusqu'à un certain point aux données constitue un problème essentiel. Pour cela, il est nécessaire de déterminer a priori des outils de mesure et une marge acceptable par rapport à ces mesures. Cette marge est arbitraire. Par contre, le choix d'une mesure est le facteur déterminant qui permettra d'accepter ou non les valeurs fournies par le modèle.

Bibliographie

Fukuyama, Francis, 1989, "The End of History". The Public Interest.

Hirschmann, Albert O., 1977, "Exit, voice and loyalty. Responses to decline in firms, organizations and states". Cambridge: Cambridge University Press.

Hirschmann, Albert O., 1993, "Exit, voice, and the fate of the German Democratic Republic: an essay in conceptual history" World Politics 45(1).

Huntington, Samuel P., 1991, "How countries democratize". Political Science Quarterly 106(4).

Kuran, Timur, 1989, "Sparks and prairie fires: a theory of unanticipated political revolutions". Public Choice 61(1).

Kuran, Timur, 1991, "The East European revolution of 1989 : is it surprising that we were surprised ? " The American Economic Review, Papers and Proceedings 81(2).

Lohmann, Susanne, 1994, "The dynamics of informational cascades. The monday demonstrations in Leipzig, East Germany, 1989-91", World Politics 47(1).

Prum, Bernard, 1986, "Processus sur un réseau et mesures de Gibbs, Applications", Masson, Paris.

Journées de Rochebrune, 20-24 mars 1995.

EVOLUTION ET ORGANISATION. Hasard et Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives

ORIGINES ET DEFINITIONS DU HASARD EN BIOLOGIE

Charles LENAY

On trouve de nombreux emplois de la notion de hasard tant dans les théories de la biologie, que dans les modélisations des Systèmes Multi-Agents. L'objectif de cet article est de donner une analyse épistémologique de la notion de hasard telle qu'elle est utilisée dans les théories biologiques. Cela permettra, je l'espère une discussion plus précise de l'emploi de cette notion dans les simulations, en particulier pour rendre compte de l'émergence de structures ou propriétés globales nouvelles dans les Systèmes Multi-Agents. Il sera particulièrement intéressant de voir qu'un des premiers développements sur le hasard en biologie concerne précisément une problématique de l'émergence.

Darwin est le premier à avoir introduit le hasard pour l'explication des phénomènes naturels, et ce dans un cadre déterministe et mécaniciste. C'est ce qui pose le problème du hasard d'une façon claire et intéressante, loin de toute solution de facilité comme un indéterminé absolu ou une spontanéité pure du vivant. Tout le paradoxe de cette première définition du hasard est qu'elle doit être donnée sous le regard du démon omniscient de Laplace. De même, c'est dans le cadre du déterminisme rigoureux des algorithmes informatiques qu'il faut poser la question d'un emploi du hasard dans les modélisations de la Vie Artificielle et des Systèmes Multi-Agents.

Dès 1843, Antoine-Augustin Cournot (1801-1877) avait proposé de définir un hasard objectif dans un cadre déterministe. Le fait fortuit serait le résultat de la rencontre de série causales indépendantes¹. Cependant, une telle définition ne faisait que reculer le problème: comment poser et justifier l'indépendance objective de séries causale dans la nature ?

¹ Exposition de la théorie des chances et des probabilités, Paris, Hachette, 1843, réédité in Oeuvres Complètes, annoté et commenté par Bernard Bru, Paris, Vrin, 1984, t. I. C'est pour lever les équivoques de la règle de Bayes que Cournot propose de faire une distinction fondamentale entre probabilités subjectives et objectives. En effet, le problème de la règle de Bayes est que l'on doit donner a priori le nombre et les probabilités des différentes hypothèses possibles (leur possibilités). Il faut donc déterminer les possibilités des hypothèses "par l'expérience ou a posteriori" en se fiant au principe de Jacques BERNOULLI d'après lequel la fréquence observée est une approximation aussi précise que l'on veut de la véritable probabilité pourvu que le nombre des observations soit assez grand, "le mot probabilité est pris ici dans

I - Le hasard dans la théorie de la sélection naturelle

En fait, l'introduction du hasard dans les sciences de la nature a prit un chemin bien différent de celui que pronostiquait le philosophe français. En utilisant pour la première fois le hasard dans une explication scientifique, Darwin lui donnait un sens nouveau et précis qui doit être situé par rapport à l'ensemble de sa théorie de la sélection naturelle. La fonction explicative y est centrale puisqu'elle en articule les deux principales composantes: la variation et la sélection. En effet, dans le monde mécaniciste déterministe du XIX^{ème} siècle, il ne pouvait être question de hasard absolu ou de quelque effet sans cause, au moins à l'intérieur d'une explication scientifique. Ainsi, pour Darwin, il ne fait pas de doutes que les variations sont déterminées par des causes précises, et que la sélection n'est que le résultat automatique des conditions de vie. Le hasard n'appartient donc ni à la variation, ni à la sélection, mais spécifie plutôt la nature de leur relation. Darwin ne traite d'un hasard de la variation que relativement à la sélection.

Pour préciser cette relation particulière, Darwin faisait pleinement fonctionner l'analogie entre sélection artificielle et sélection naturelle qui avait été à la source de son inspiration. Dans le cas de la sélection artificielle, il est clair que les variations des animaux domestiques ne sont au hasard que pour les éleveurs. Qu'ils posent ou non que ces variations soient produites par quelque spontanéité mystérieuse n'est pas important. Dans tous les cas, dans l'ignorance de moyen précis pour déterminer ou prévoir l'apparition des variations, elles adviennent au hasard pour eux. Or ce hasard que l'on pourrait qualifier d'épistémique (puisque lié à l'ignorance d'un sujet cognitif) à des conséquences pratiques importantes. Il rend compte de l'impossibilité de mettre au point une technique directe d'amélioration des animaux domestiques par variation dirigée. C'est le constat d'une impuissance à finaliser la variation dans le sens des critères que se donnent les éleveurs qui les contraint à développer une technique de sélection artificielle.

"L'homme ne peut ni produire ni empêcher les variations; il ne peut que conserver et accumuler celles qui se présentent"²

Comme pour d'autres grands principes explicatifs, c'est à partir d'une limitation pratique que le principe de la sélection naturelle était fondé. Pour Darwin, l'analogie est directe. De même que les variations des animaux domestiques sont au hasard pour les critères de sélection des éleveurs, de même, dans la nature, les variations des êtres vivants sont au hasard pour les conditions de la

le sens objectif, comme équivalent de la possibilité" p. 157. Si l'on prend au départ ces possibilités objectives, il n'y a pas de problème pour utiliser le théorème de Bayes. Mais si, dans l'ignorance, on choisit l'équiprobabilité des hypothèses, alors le calcul est "frivole" puisqu'on est parti de probabilité subjectives.

² Darwin (Ch.), On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, London, 1859. Mes citations sont tirées de la traduction d'E.Barbier d'après la 6^{ème} édition de 1876: L'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou de la lutte pour l'existence dans la nature, Maspero, 2 vols., 1980, cit. p. 85.

sélection naturelle. A propos d'Asa Gray qui, comme bien d'autres, envisageait que les variations utiles auraient été prédestinées par une providence bien faisante, Darwin écrivait:

"Mais lorsque je lui demande (à Asa Gray) s'il regarde comme voulue par la Providence, pour l'amusement de l'homme, chaque variation du biset, duquel l'homme a fait, par accumulation de croisements, un grosse gorge ou un pigeon paon, il ne sait que me répondre; et s'il admet, lui ou quelque autre, que ces variations sont accidentelles en ce qui concerne le but (naturellement, ce n'est pas accidentel en ce qui concerne la cause ou l'origine), alors je ne vois aucunement pourquoi il considérerait comme préconçues les variations accumulées par lesquelles a été formé le pivert, si admirablement adapté."³

Dans le cas de la sélection artificielle, ce qui est accidentel, c'est l'utilité de la variation pour l'éleveur, son accord avec le "but" que ce dernier poursuit. La variation elle-même, "sa cause" ou son "origine", n'est pas accidentelle. De même, dans le cas de la sélection naturelle, ce qui est accidentel dans la variation est seulement son "utilité" pour la lutte pour l'existence. Les diverses variations qu'ont subies les ancêtres du pivert étaient au hasard pour l'adaptation qu'il devait finalement atteindre.

Ce n'est que relativement à un usage qui en sera fait que la variation est au hasard: elles ne sont pas prédéterminées. Ce hasard que l'on peut qualifier d'objectif puisque relatif au point de vue de la sélection naturelle qui est considéré comme objectif, est construit sur le modèle d'un hasard épistémique puisque relatif au point de vue cognitif des éleveurs. Il ne peut être compris à la façon de Cournot comme la rencontre de deux séries causales indépendantes. A tout moment dans le processus de l'évolution, les variations agissent sur la sélection. Darwin commençait par montrer cette interdépendance dans les pratiques des éleveurs.

D'une part, les conditions de sélection et d'élevage interviennent sur la production des variations quoique bien sûr de façon non-intentionnelle.

"Il [l'éleveur] expose, sans en avoir l'intention, les être organisés à de nouvelles conditions d'existence, et des variations s'ensuivent..."⁴

Et surtout, d'autre part, les critères de sélection changent sans cesse, et sont souvent inspirés par les variations observées.

"Personne, par exemple, n'aurait jamais essayé de produire un pigeon-paon, avant d'avoir vu un pigeon dont la queue offrait un développement quelque peu inusité ; personne n'aurait cherché à produire un pigeon Grosse-gorge, avant d'avoir remarqué une dilatation exceptionnelle du jabot chez un de ces oiseaux;..."⁵

Cette inspiration de la sélection par la variation était très importante pour Darwin. Le goût pour le bizarre permettait de montrer la liaison causale entre le critère de sélection et une variation accidentelle. Il y a là une circularité. Il y a un hasard des variations relativement au but que s'est fixé

³ Darwin, lettre à M^{lle} Julia Wedgwood, 11/07/1861, in Darwin (Ch.), Vie et correspondance de C. Darwin, traduction H. de Varigny, Paris, Reinwald, 1888, 2 t., cit. t.1, pp. 364-387.

⁴ Darwin (Ch.), Origine des espèces, op. cit., p. 85

⁵ Darwin (Ch.), Origine des espèces, op. cit., p. 38.

l'éleveur, et certaines de ces variations peuvent changer ce but. Dès lors la transformation même des animaux domestiques est radicalement imprévisible pour les éleveurs eux mêmes.

Dans le cas des espèces naturelles, on retrouve exactement la même interdépendance entre variation et sélection. Non seulement les conditions d'existence participent à la production des variations, mais il est possible qu'une variation individuelle, même légère, détermine un changement important dans l'économie naturelle d'un territoire.

"Je ne crois pas d'ailleurs, qu'il soit nécessaire que de grands changements physiques se produisent, tels que des changements climatiques, ou qu'un pays soit particulièrement isolé et à l'abri de l'immigration, pour que des places libres se produisent et que la sélection naturelle les fasse occuper en améliorant quelques-uns des organismes variables. En effet, comme tous les habitants de chaque pays luttent à armes à peu près égales, il peut suffire d'une modification très-légère dans la conformation ou dans les habitudes d'une espèce pour lui donner l'avantage sur toutes les autres."⁶

La variation pourrait ainsi être un véritable moteur créatif de l'évolution, et pour Darwin, elle était même une source importante de spéciation. Il s'expliquait en reprenant son analogie.

"En pratique, un amateur remarque, par exemple, un pigeon ayant un bec un peu plus court qu'il n'est ordinairement; un autre amateur remarque un pigeon ayant un bec long; en vertu de cet axiome que les amateurs n'admettent pas un type moyen (médium standard), mais préfèrent les extrêmes, ils commencent tous deux [...] à choisir et à faire reproduire des oiseaux ayant des becs de plus en plus longs ou des becs de plus en plus courts."⁷

Deux éleveurs ayant remarqué des variations originales différentes vont dès lors les développer chacun de leur côté, et progressivement l'écart entre variétés sera de plus en plus accentué. Ceci pouvait être traduit dans les termes du pur mécanisme de la sélection naturelle.

"Mais comment, dira-t-on, un principe analogue peut-il s'appliquer dans la nature ? Je crois qu'il peut s'appliquer et qu'il s'applique de la façon la plus efficace (mais je dois avouer qu'il m'a fallu longtemps pour comprendre comment), en raison de cette simple circonstance que, plus les descendants d'une espèce quelconque deviennent différents sous le rapport de la structure, de la constitution et des habitudes, plus ils sont à même de s'emparer de places nombreuses et très-différentes dans l'économie de la nature, et par conséquent de s'augmenter en nombre."⁸

Le principe anthropomorphique du goût pour le bizarre est remplacé dans la nature par un avantage pour ce qui est original. Une variation qui s'écarte de la norme sélective de l'ancienne place dans l'économie naturelle va explorer de nouveaux domaines d'existence.

Pour Darwin, contrairement à ses successeurs, l'évolution est donc radicalement imprévisible. Au départ il est facile de distinguer le niveau des variations au hasard pour le niveau des critères de sélection. Ces critères sont définis par des places dans "l'économie naturelle", c'est-à-dire l'équilibre

⁶ Darwin (Ch.), Origine des espèces, op. cit., p. 88, souligné par moi.

⁷ Darwin (Ch.), Origine des espèces, op. cit., p. 120.

⁸ Darwin (Ch.), Origine des espèces, op. cit., p. 120.

compétitif entre les diverses espèces et l'environnement physique. Mais maintenant, on admet que certaines variations peuvent créer de nouvelles place dans cette économie, inventer de nouveaux domaines de vie possibles, de nouveaux critères de sélection. Il y a émergence du hasard des variations au niveau d'une évolution radicalement imprévisible⁹.

Ce hasard était difficilement mathématisable et il n'y avait pas le moindre emploi des probabilités dans les écrits de Darwin. C'est son jeune cousin, Francis Galton (1822-1911) qui a introduit pour la première fois les probabilité dans les explications biologiques, et plus particulièrement la courbe en cloche de Laplace-Gauss. Je vais montrer comment cela le conduisait immédiatement à une problématique de l'émergence qui est très proche de celle que l'on trouve dans les Systèmes Multi-Agents. Je n'examinerai pas ici les conséquences mathématiques de ses travaux à propos de l'hérédité qui sont elles aussi très riches puisqu'elles l'amènèrent à découvrir les méthodes si importantes de la régression et de la corrélation.

II. - Galton et la problématique de l'émergence

Galton est surtout connu pour la nouvelle idéologie qu'il inventa, l'eugénisme, dont on sait l'avenir effroyable: l'amélioration de l'espèce humaine est le produit d'un processus sélectif qui serait gravement perturbé par le progrès social. Il faudrait donc remplacer la sélection naturelle par une sélection humaine artificielle. L'ensemble des travaux de Galton doit se comprendre à partir du programme de recherche qui découlait de cette idéologie scientiste. Si l'on veut que ce soient les savants qui donnent la direction que devrait suivre la sélection, il faut connaître ce que serait le cours normal de l'évolution et le distinguer clairement des effets de l'environnement culturel. Pour cela, Galton, comme pratiquement tous les eugénistes après lui, cherchait une forme de déterminisme évolutif, un sens naturel de l'évolution, qui puisse donner les normes pour l'action correctrice de l'eugénisme. Les savants devraient pouvoir nous dire quels sont les caractères naturellement sélectionnés, ceux qui sont donc bons, et qui serviront alors de critère pour la sélection artificielle des hommes.

Cependant, ce programme rencontrait de multiples problèmes théoriques. En particulier, le hasard radical interne à l'explication darwinienne était inacceptable puisqu'il aboutissait à nier l'idée d'un progrès déterminé dans l'évolution. Les eugénistes, Galton en premier, cherchèrent donc à minimiser la place de l'aléatoire en le réduisant par la stabilité des moyennes statistiques. C'est là l'origine des multiples développements de la théorie des probabilités en biologie qui mèneront, à travers les travaux de F. Galton, K. Pearson, R.A. Fisher et bien d'autres à la génétique des populations. Si l'on admet une variabilité continue de chaque caractère et une sélection constante, on pourra envisager une évolution dont la direction serait entièrement déterminée par cette sélection. Prenons l'exemple d'un caractère comme la taille dont on observe qu'il se répartit dans la population

⁹ " Comme nous le voyons quelquefois des individus avoir des habitudes différentes de celles propres à leur espèce et aux autres espèces du même genre, il semblerait que ces individus dussent accidentellement devenir le point de départ de nouvelles espèces, ayant des habitudes anormales, et dont la conformation s'écarterait plus ou moins de celle de leur souche type." Darwin (Ch.), Origine des espèces, op. cit., p. 193, souligné par moi.

suivant une courbe en cloche (courbe normale de Laplace-Gauss): les tailles moyennes sont les plus représentées, et il y a d'autant moins de représentants de chaque taille qu'elle est plus grande ou plus petite que cette moyenne. Si l'on applique une sélection systématique proportionnelle à la taille, on pourra espérer voir se déplacer progressivement la moyenne de la population vers une taille plus haute.

Galton avait découvert la courbe en cloche dans les écrits d'Adolphe Quételet (1796-1874) qui l'avait utilisé pour développer les premiers travaux de sociologie statistique.

Nous sommes maintenant tellement habitué à l'usage de cet instrument statistique que l'on oublie facilement les justifications théoriques que nécessite son emploi. Pour réanimer ce questionnement et définir le hasard sous-jacent, nous partirons des différences profondes qui séparent les interprétations de la courbe en cloche par Quételet et par Galton. Alors que Quételet concentrait ses analyses sur la moyenne, Galton s'intéressait plutôt aux variations qui l'entourent. Ce déplacement entraînait une objectivation des variations et du hasard sous-jacent. C'est la recherche d'une explication de ce hasard qui allait conduire Galton à sa problématique de l'émergence.

Pour Quételet, la présence d'une répartition des observations suivant une courbe en cloche s'expliquait aisément. L'observation d'une moyenne correspondrait à la mise en évidence d'une "cause constante", propre à une société donnée. Si les observations oscillent autour de cette moyenne c'est seulement l'effet d'erreurs dues à la technique d'observation. Lorsque l'on prend une mesure en physique, par exemple l'élévation d'un astre, il y a d'une part une cause constante (sa hauteur vraie qui s'exprime par la moyenne obtenue), et d'autre part des variations dues à l'imperfection de nos instruments (qui s'expriment comme des déviations par rapport à cette moyenne). Quételet avait suivi les cours de Laplace qui avait montré avant 1812 par le *théorème central limite* que les sommes des résultats de nombreuses épreuves indépendantes (ici les multiples erreurs élémentaires) devaient tendre à se répartir suivant une courbe en cloche. C'est parce que le point de vue de l'observateur est imparfait, partiel, que les erreurs sont au hasard pour lui. De même, quand on réunit des séries de données sociales (par exemple les rapports de police), on obtient une répartition suivant une courbe en cloche. Pour Quételet, la valeur moyenne d'un comportement donné exprime une cause constante, une propension réelle de l'homme moyen d'une société donnée à agir de telle façon. Les variations autour de cette moyenne sont dues au limite du point de vue de l'observateur. C'est lui qui, rassemblant les données, en a négligé l'ordre, le lieu, le moment, et toutes les différences individuelles, pour ne conserver que ce qui est pertinent pour la somme numérique effectuée.

Quételet se situait donc dans la tradition laplacienne de la recherche de causes constantes, de valeurs vraies, au milieu de la diversité des observations. Il s'intéressait essentiellement à l'observation de moyennes. Pour lui, les variations n'avaient pas d'intérêt en soit. Elles n'étaient que des erreurs. Le but de l'accumulation des données et de l'analyse statistique était de les éliminer.

Au contraire, pour Galton, ce sont les variations qui sont importantes puisque ce sont elles qui seront ou non conservées par la sélection. On comprend que pour lui, l'hérédité du "génie" exceptionnel importait infiniment plus que celle de l'homme moyen.¹⁰

¹⁰ Voir: Galton (F.), *Hereditary Genius: an Inquiry into its Laws and Consequences*, London, MacMillan, 1869; seconde ed. 1892 (c'est l'édition dont je suis la pagination); troisième ed.: Watts, 1950. La seconde édition a été

La simple observation que la répartition d'un caractère quantitatif dans une population obéissait bien à la loi des erreurs (distribution normale suivant la loi de Laplace-Gauss comprise comme une limite de la loi binomiale) prouvait, d'après lui, qu'il s'agissait d'une variabilité "naturelle", c'est-à-dire spécifiquement biologique et héréditaire, et non simplement conjoncturelle ou environnementale.¹¹ Tel était le cas des tailles ou des facultés intellectuelles dont il pensait avoir montré la répartition normale à l'aide des notes de quelques élèves relevées aux examens de mathématique à Cambridge. Mais c'est surtout dans l'étude des relations statistiques entre les variations des parents et celles de leurs enfants que cet instrument mathématique allait lui permettre de développer ses théories. Pourtant, avant de pouvoir rendre compte de la transmission des caractères héréditaires, il lui semblait nécessaire d'expliquer comment concrètement, ceux-ci pouvaient se répartir régulièrement dans une population suivant une courbe en cloche. Du point de vue biologique, il ne suffisait pas de constater cette répartition, il fallait aussi l'expliquer, ne serait-ce que pour préparer l'explication suivante des mécanismes de l'hérédité.

Or, cette répartition ne concerne plus des erreurs, mais des variations réelles. Ce ne peut plus être l'observateur qui serait responsable de variations apparentes autour d'une valeur exacte comme dans le cas des erreurs d'observation. Ce n'est plus non plus, l'observateur qui serait responsable d'une prise d'échantillon maladroit dans une population où il aurait négligé des différences individuelles. Ici, la population doit avoir un sens réel. C'est l'espèce et ses variations qui sont soumises à la sélection naturelle. Pour Galton, ces variations réelles et héréditaires ne pouvaient être simplement produites par les circonstances de l'environnement. Il se devait donc d'expliquer comment elles pouvaient apparaître dans le processus de l'hérédité pour se regrouper harmonieusement autour d'une moyenne. Ainsi, il lui fallait rendre compte explicitement du hasard et des probabilités qui président à la formation de cette courbe qu'il préféra appeler la "loi des déviations par rapport à la moyenne".

Mais, comment l'intelligence ou la taille d'un individu pourrait-elle être le résultat d'une forme de tirage au hasard ? Il ne peut y avoir, comme chez Quételet, une taille typique, une moyenne absolue, idéale, autour de laquelle s'accumulerait une série d'erreurs. La nécessité de penser une évolution sous l'effet de la sélection naturelle, ne permettait pas d'accepter l'existence de telles causes constantes. La moyenne doit être de même nature que les variations. Il n'y a pas une cible d'un côté, et des erreurs de l'autre. Il ne doit pas y avoir une cause constante de la taille d'une part, et des erreurs d'autre part, mais plutôt un même genre de causalité dans les deux cas. L'exemple directeur de Galton n'était donc pas le tir à la cible, mais plutôt les tirages dans une urne. Dans ce cas l'on comprend peut-être mieux que la poignée moyenne ou la poignée exceptionnelle soient de même

réimprimée avec une introduction de Darlington (C.D.), London, Collins, et New York, Cleveland, World Publishing Company, 1962.

¹¹ Ce refus péremptoire d'accorder un rôle significatif aux variations acquises sous l'effet de l'environnement fut très rapidement contesté, en particulier par Alphonse de Candolle. Voir: Histoire des Sciences et des Savants depuis deux siècles, (1872), Genève, Bâle, Lyon, H. Georg. librairie édition, 1873. C'est pourtant ce rejet absolument originel, dont les fondements sont essentiellement idéologiques, qui permit à Galton de poser sa problématique de l'hérédité dans un cadre suffisamment rigoureux. Cette attitude prépara d'ailleurs le monde anglo-saxon à accepter les thèses sur l'absence de tout hérédité des caractères acquis que Weismann présenta à partir de 1883.

nature. Mais, où retrouver l'équivalent de tels tirages dans l'ordre biologique? Galton pensait reconnaître une solution dans la théorie de la pangenèse de Darwin.

Pour Darwin le corps serait constitué à partir du développement d'unités organiques minimales auto-reproductrices, les "gemmules". L'hérédité correspondrait à la transmission d'une multitude de gemmules dont certains resteraient à l'état latent tandis que d'autres constitueraient les caractères de l'enfant. Les gemmules latentes transmises à la descendance expliqueraient la réapparition de caractères ancestraux que l'on observe souvent dans la suite des générations, ce que les biologistes appellent la "réversion".¹² Le développement et la morphogenèse de chaque individu résulterait d'une agrégation ordonnée de ces gemmules suivant des affinités précises.

Galton raisonnait toujours de façon très concrète. Pour se représenter la formation d'une courbe en cloche dans la nature, il cherchait donc comment, mécaniquement, pouvait s'effectuer l'équivalent d'une prise d'échantillon dans une urne. L'urne serait l'ensemble des gemmules transmises à chaque génération, ce qu'il nommait la stirpe (du latin, *stirps*, *stirpis*, racine ou progéniture). Le développement individuel se comprendrait donc comme le tirage au hasard des gemmules dans cette stirpe. Les caractères d'un individu particulier sont constitués par le tirage de gemmules qui sont donc devenues patentes, alors que dans la stirpe reste toute une diversité de gemmules à l'état latent qui se multiplient et sont transmises à la génération suivante. Par exemple, la taille des individus résulte de la sommation des effets de la prise au hasard de nombreux gemmules que l'on pourrait ranger en deux catégories, celles qui tendent à donner une grande taille, et celles qui tendent plutôt à donner une petite taille. On peut ainsi comprendre la répartition binomiale de ce caractère.¹³ Néanmoins, cette démonstration nécessite pour préalable le hasard des tirages. Comment en rendre compte ?

On pourrait proposer ici la solution génétique du hasard mendélien. Mais cela aurait été inadmissible pour Galton. Non seulement les travaux de Mendel lui étaient tout à fait inconnus, mais ils ne pouvaient s'intégrer au paradigme darwinien où il se situait. En effet, la théorie mendélienne se fondait sur des caractères constants idéaux, représentés par des déterminants manipulables comme des symboles formels (ce que l'on appellera plus tard les "gènes"). De plus, rappelons que chez Mendel le tirage au hasard se produit chez les parents, lors de la formation de leurs cellules sexuelles, puis à la rencontre de ces cellules au moment de la fécondation : les processus de transport des caractères se font indifféremment à leurs natures différentielles (les différences entre allèles d'un même gène). Les rencontres entre allèles différents sont dites au hasard dans la mesure où elles sont produites par des processus qui ne tiennent pas compte de ces différences.¹⁴ En supposant qu'un caractère quantitatif résulte de la sommation des effets de nombreux déterminants héréditaires, il est

¹² Darwin (Ch.), The Variation of Plants and Animals under Domestication, 2 vols., London, 1868, première traduction française par J.J. Moulinié: La variation des animaux et des plantes sous l'effet de la domestication, 2 vols. Paris, 1868. Traduction de la seconde édition par Ed. BARBIER: De la variation des plantes et des animaux à l'état domestique, 2 vols. 1879-1880.

¹³ Voir: Galton (F.), "On blood-relationship", Proceedings of the Royal Society of London, 20, 1872, pp. 394-402, repris in Nature, 6, 1872, pp. 173-176; et "A theory of heredity", Contemporary Review, 27, 1875, pp. 80-95, traduction française: "Théorie de l'hérédité", La Revue Scientifique, t. X, 1876, pp. 198-205.

¹⁴ Pour une discussion détaillée du hasard chez Mendel, et une analyse générale des conditions de possibilité d'un emploi du hasard à titre explicatif, voir: Lenay (Charles), Enquête sur le hasard dans les grandes théories biologiques de la deuxième moitié du XIXe siècle, thèse de doctorat soutenue le 24 juin 1989, directeur M. Jacques Roger, Paris I Panthéon-Sorbonne.

facile de rendre compte de la répartition régulière des fréquences de ses variations. C'est d'ailleurs ce que Mendel suggéra lui-même, et c'est surtout ce qui fut développé après 1900.

Mais pour Galton, le problème était tout différent. La notion de déterminant abstrait des caractères lui aurait paru tout à fait métaphysique. L'ontogenèse doit plutôt être pensée comme une agrégation ordonnée de particules suivant leurs diverses affinités: il n'y a pas une commande directrice du développement, mais la formation d'un organisme produite par les éléments qui le constituent.¹⁵ Le développement est pensé comme l'émergence d'une organisation globale.

"Les germes sont supposés être seulement gouvernés par leurs affinités naturelles respectives pour sélectionner leur point d'attachement, et ainsi, par conséquent, les merveilleuses structures des formes vivantes sont construites sous l'influence d'innombrables affinités aveugles, et non pas sous le contrôle d'un pouvoir central."¹⁶

Galton se plaçait donc dans un cadre général mécaniciste où tout appel à des concepts comme ceux de "programme" ou "d'information génétique" était proprement inconcevable. Ceci donne un intérêt particulier à la ressassie du parcours intellectuel de cet auteur. En effet, il s'agissait pour lui de penser l'émergence spontanée de la moyenne stable d'une observable par interaction entre les éléments qui la constituent. Le tirage au hasard devait donc avoir lieu lors de l'ontogenèse individuelle. Il se produirait chez l'enfant, dans l'oeuf fécondé, c'est-à-dire dans la stirpe formée des gemmules léguées par ses parents. Galton devait ainsi tenter de concevoir une sorte de tirage au hasard spontané des éléments contenus dans la stirpe.

Détaillons les données du problème. Lors de l'ontogenèse par agrégation des gemmules, chaque événement élémentaire consiste précisément en l'occupation d'un point d'attachement donné par un gemmule ou un autre.¹⁷ La place pour les gemmules suivantes est créée par l'agrégation des gemmules précédentes. Comment parler de hasard ou d'indépendance ? Quel principe permettrait ici d'aboutir à l'émergence d'une répartition ordonnée de variations autour d'une moyenne ? Pour obtenir une binomiale, il faudrait que les épreuves soient suffisamment indépendantes entre elles, mais ici il y a une multitude d'interactions entre les gemmules. Et pourquoi cette moyenne resterait-elle suffisamment stable entre les générations ?¹⁸

¹⁵ On peut montrer que c'est cette conception qui amena Galton à privilégier l'étude des caractères quantitatifs, plutôt que discrets, dans ses expériences sur les pois de senteur.

¹⁶ "..., the germs are supposed to be solely governed by their respective natural affinities, in selecting their points of attachment; and that, consequently, the marvellous structure of the living form is built up under the influence of innumerable blind affinities, and not under that of a central controlling power." Galton (F.), *Hereditary Genius*, 1869, op. cit., p. 349.

¹⁷ " Since for each place there have been many unsuccessful but qualified competitors, it must have been on some principle whose effects may be described as those of "Class Representation",..." Galton (F.), "On Blood-relationships", 1872, op. cit., p. 395. La "Class Representation" est cette opération d'échantillonnage dans la stirpe.

¹⁸ Surtout que, par ailleurs, Galton avait cru observer une réversion constante, c'est-à-dire une stabilité de la moyenne au long des générations. Cette tendance de chaque individu à ressembler à la moyenne spécifique joua un rôle important dans la construction des modèles statistiques que Galton proposa pour rendre compte de l'hérédité et de l'évolution. Voir: Galton (F.), "Typical Laws of Heredity", *Nature*, 15, 1877, pp. 492-533, ou bien, *Proceedings of the Royal Institution of G.B.*, 8, 1877, pp. 282-301. "Regression towards mediocrity in hereditary stature", *Journal of the Antropological Institute*, 15, 1885, pp. 246-263. Et surtout: *Natural Inheritance*, London, MacMillan, 1889.

Galton cherchait donc à justifier l'apparition de formes typiques à travers un jeu d'interactions entre leurs éléments.

"Les assemblages dont je parle sont tels que ceux qui ne sont pas contrôlés par une autorité centrale, mais qui ont atteint leur apparence typique à travers l'action libre des individus qui les composent..."¹⁹

Pour rendre compte d'une telle émergence du type Galton se trouvait réduit à l'emploi des métaphores. Il défendait vigoureusement cette démarche qui d'après lui devait être source d'inspiration et d'intelligibilité.

"Ces comparaisons, qui sont parfaitement légitimes au regard de la théorie de la Pangenèse, sont bien dignes d'être excusées ici, parce qu'elles donnent des précisions considérables sur notre vision de l'hérédité, et qu'elles obligent des faits qui à première vue nous paraissent anormaux, à revenir dans un ordre intelligible."²⁰

Il y aurait beaucoup à dire sur ces diverses comparaisons, souvent amusantes, qui vont de la simple image jusqu'à l'analogie qui prétend expliquer les phénomènes. Sur les plans épistémologiques et rhétoriques, ces procédés d'assimilation ou de confusion entre divers ordres de phénomènes, qui mêlent des comportements humains et des descriptions mécanistes ou biologiques sont aisément critiquables et souvent révélateurs des préjugés de l'Angleterre victorienne. Ici je cherche seulement à dégager l'ensemble des conditions suffisantes pour provoquer l'appel à ce type de métaphore: expliquer à la fois, et en restant sur un plan purement mécaniciste, l'apparition d'un ordre global à partir d'éléments plus ou moins indépendants, et la possibilité de l'évolution de cet ordre global. Voici quelques uns des exemples de Galton.

Pour présenter l'émergence spontanée de structures complexes, Galton décrivait le processus de formation des villes balnéaires en Angleterre. Tout commence accidentellement:

"...deux ou trois maisons avaient peut-être été construites pour un usage privé, et sont devenues accidentellement libres..."²¹

Puis se développe une réaction en chaîne qui s'auto-accélère:

"Alors que le village prospérait et que des boutiques commençaient à s'établir, de jeunes artisans et d'autres gemmules flottantes de la population anglaise, à la recherche d'une place où il pourraient avantageusement s'installer, viendraient s'y fixer, et ainsi

¹⁹ " The assemblages of which I speak are such as are uncontrolled by a central authority, but have assumed their typical appearance through the free action of the individuals who compose them..." Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 350.

²⁰ "These similies, which are perfectly legitimate according to the theory of Pangenesis, are well worthy of being indulged in, for they give considerable precision to our views on heredity, and compel facts that appear anomalous at first sight, to fall into intelligible order." Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 354.

²¹ "...two or three houses were perhaps built for private use, and becoming accidently vacant..." Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 350.

toute nouvelle opportunité serait saisie, toute ouverture serait aussitôt ou presque comblée dès qu'elle apparaîtrait."²²

Quelque soient les conditions initiales, le résultat final sera toujours globalement le même. Et par conséquent, le type émergent aura une certaine stabilité:

" Le résultat général de ces affinités purement égoïstes est que les places d'eau sont curieusement semblables,..."²³

Une stabilité qui donne à la forme émergente une phénoménologie propre. A propos du "croisement" d'une ville balnéaire et d'une cité industrielle, Galton remarque:

"Les deux éléments sont discordants. La saleté, le bruit, et les artisans grossiers engagés dans les usines sont peu favorables ("uncongenital") à la population des villes d'eau."²⁴

Mais cet exemple ne nous montre pas comment la structure émergente pourrait aussi se transformer qualitativement en un nouveau type. Galton développait donc d'autres analogies comme celle des élections: pour un organisme, l'ensemble des caractères que l'on l'observe ne dépend que des éléments patents, les éléments latents ne comptent pour rien. De la même façon, dans une démocratie, la majorité prend l'ensemble des décisions et la minorité ne compte pour rien. Néanmoins, dans cet exemple, si l'on rend effectivement compte des changements de forme brusques, il y a pourtant un cadre externe préexistant, comme la constitution, qui explique comment se fait le tirage de ses représentants. Pour palier à cette difficulté, Galton développait une analyse du mouvement des foules.

"Il y a une situation inextricable; chaque membre de la foule pousse, la masse est agitée, mais il n'y a aucun progrès.

A la longue, par quelque union accidentelle des efforts, la situation inextricable cède, un mouvement en avant est réalisé, [...], mais en quelques secondes se forme une nouvelle situation inextricable, [...] Chacune de ces formations de la foule, dans laquelle elle s'est trouvée dans une situation inextricable, est une position d'équilibre stable, et représente une disposition typique."²⁵

Cet exemple résume bien les objectifs de Galton; il lui fallait à la fois:

* un type correspondant à un ordre global qui ne serait que le fruit des interactions non intentionnelles entre les gemmules qui le composent (c'est une demande commune avec une théorie d'embryologie purement causale);

²² "Then as the village increased and shops began to be established, young artisans, and other floating gemmules of English population, in search of a place where they might advantageously attach themselves, became fixed, and so each new opportunity was seized upon and each opening filled up, as soon or very soon after it existed." Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 350.

²³ Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 351.

²⁴ Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 352.

²⁵ Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 355.

* que ces interactions ne soient pas strictement déterminées pour qu'il existe de légères variations réparties autour de la moyenne correspondant au "centre du type";

* et que de brusques changements qualitatifs de l'ordre global soient possibles et donnent un nouveau type, une nouvelle moyenne autour de laquelle pourront s'inscrire de nouvelles variations.

Pourtant, ces métaphores ne pouvaient rendre compte que de structurations globales relativement inintéressantes. Pour combler cette lacune, Galton toujours intarissable développait de nombreux autres exemples, comme la formation spontanée des sociétés scientifiques²⁶, ou le développement des brevets avec leurs problèmes législatifs²⁷.

Pour donner un sens proprement biologique à ces images Galton cherchait intuitivement dans le sens d'un jeu d'interactions complexes entre éléments. La formation de l'embryon résulterait d'une dynamique qui ne serait pas descriptible dans les termes simples d'une suite de causes et d'effets, mais plutôt comme un réseau de causalité:

"...il semble presque impossible d'expliquer tout ce qui se passe par l'hypothèse d'un simple développement graduel, comme celui que propose la pangenèse, B suivant A, et C venant après B, et ainsi de suite. Il est difficile d'admettre que les influences réciproques des germes ne s'exercent que suivant des lignes...."²⁸

Cette complexité, cette non-linéarité dirions-nous maintenant, Galton ne pouvait la saisir que spatialement, d'où ces images exprimant les multiples interactions spatiales de chaque gemmule avec toutes les autres:

"...nous devons plutôt penser qu'elles agissent suivant les trois dimensions de l'espace, comme, par exemple, l'on peut croire que, dans un essaim d'êtres ailés, les goûts particuliers ou les aversions d'un des individus dont il se compose doivent déterminer sa position dans cet essaim."²⁹

Mais comment ce type d'explication de l'émergence du type peut-il encore rendre compte de la répartition des variations autour de la moyenne ? Plus précisément, comment se forme la répartition binomiale qui est pour Galton le résultat du tirage au hasard d'éléments discrets, les gemmules ? Comme nous l'avons indiqué plus haut, cette répartition n'est pas une apparence pour un observateur, mais une réalité. Galton avait donc besoin d'un hasard "réel", "objectif". Or, il est impossible de faire appel ici à l'idée de rencontre entre gemmules comme le produit de séries causales indépendantes à la façon de Cournot. Toute l'ontogenèse résulte d'interactions ordonnées entre

²⁶ " Their development seems to follow a single course that has many stages, and invariably tends to establish the following staff of officers: President, vice-President, a Council, Honorary Secretaries, a paid secretary, Trustees, and a Treasurer." Galton (F.), Hereditary Genius, 1869, op. cit., p. 23.

²⁷ "Some other man, who may or may not be a plagiarist, applies for a separate patent for himself, on the ground that he has introduced modifications of a fundamental character; in other words, that he has created a fresh type. His application is opposed, and the question whether his plea be valid or not, become a subject for legal decision." Galton (F.), Natural Inheritance, 1889, op. cit., p. 26.

²⁸ Galton (F.), "A theory of heredity", 1875, op. cit., p. 200.

²⁹ Galton (F.), "A theory of heredity", 1875, op. cit., p. 201. Et plus loin: "Nous pouvons donc être certains que les germes doivent être soumis, de tous côtés, à des forces nombreuses qui varient selon la place qu'ils occupent; ils doivent passer par bien des positions d'équilibre temporaire et momentanée,[....], avant d'atteindre séparément les positions définitives qui leur conviennent le mieux."

gemmules. Il n'est pas non plus possible de penser une agitation purement aléatoire des gemmules semblable au chaos moléculaire d'un gaz parfait qui intervenait dans la physique statistique que Maxwell et Boltzmann proposaient à la même époque. Pour Galton, comme pour Darwin, il n'y a pas d'effet sans cause, le hasard est seulement relatif à un point de vue, mais ici ce point de vue c'est le type qui devra finalement émerger. Pour Galton les mots "accident" ou "chance" sont des ...

"...termes sous lesquels doit être compris un groupe d'agents de nature diverses, semblables entre eux seulement dans le fait que leur influence sur la mise en place de chaque particule n'est pas immédiatement dirigé vers cette fin."³⁰

Cette absence de finalité ne se réduit pas au principe régulateur du rejet des causes finales dans les explications scientifiques. On a vu avec Darwin comment, sur le plan épistémique, "le hasard-absence de finalité" renvoie à un "hasard-ignorance". En effet, pour l'homme c'est l'ignorance de certaines relations causales qui explique son impuissance à finaliser ses actions. De la même façon que Darwin Galton construisait le hasard objectif dont il avait besoin sur le modèle du hasard épistémique d'une ignorance. Comme les nouveaux habitants d'un village du bord de mer n'agissent pas dans le but de créer une ville balnéaire dont ils ignorent l'apparition future, comme les individus dans la foule poussent dans un sens ou dans l'autre sans connaître la direction que suivra finalement la foule, les gemmules s'attachent les unes aux autres au hasard dans la mesure où elles "ignorent" le type qu'elles constituent pourtant progressivement.

Les mouvements des gemmules ne sont pas au hasard en soi, ils sont exactement déterminés par les multiples causes présentes dans leur environnement (de même que sont exactement déterminés les mouvements de chaque individu dans un essaim). Si ces mouvements sont au hasard, ce n'est que relativement à un point de vue. Point de vue qui est ici le type moyen qui tend à se former. Les attachements des gemmules sont au hasard dans la mesure où ils se font indifféremment à ce type. Autrement dit: le type n'agit pas comme une cause lors de l'attachement des gemmules.

Un caractère observable est le produit de l'agrégation de très nombreux gemmules. Chacune de ses variations correspond à la sommation de multiples petites différences de ces gemmules. Si l'on admet que pour le type, cette agrégation se fait indifféremment à ces petites différences, on comprend que les variations se répartiront suivant une courbe en cloche.

Mais ce type est justement matériellement constitué au cours des tirages au hasard de ses composants. Tout le paradoxe de Galton est là. Le type ne peut pas préexister puisque l'on retrouverait alors un fixisme et une prédétermination des espèces. Le problème de l'émergence d'une forme relativement stable est donc posé comme le problème de l'émergence d'un point de vue pour lequel certains des événements qui le constituent sont au hasard.³¹

³⁰ "... accident or chance, under which name a group of agencies are to be comprehended, diverse in character and alike only in the fact that their influence on the settlement of each particle was not immediately directed towards that end...." Galton (F.), *Natural Inheritance*, 1889, op. cit., p. 19.

³¹ On peut comparer cette problématique à celle que l'on rencontre dans la thermodynamique loin de l'équilibre où l'on doit envisager l'apparition de structures qui se définissent par leur résistance ou leur sensibilité aux fluctuations aléatoires des éléments qui les constituent. Voir: Prigogine (I.) et Stengers (I.), *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*, Paris, Gallimard, 1979.

On comprend que Galton oscilla tout au long de ses recherches théoriques entre d'une part, une évolution continue comme déplacement d'une moyenne de fréquence de gemmules, et d'autre part, une évolution par sauts brusques d'une moyenne à une autre, d'un "centre du type" à un autre. C'est ainsi que les travaux de Galton purent être à l'origine de deux traditions contradictoires. D'un côté, la biométrie de Karl Pearson et Walter Frank Raphaël Weldon, et d'un autre côté le saltationnisme de William Bateson. Traditions qui allaient s'affronter avec la violence que l'on sait au début du XXe siècle.

III. - Bilan

Résumons les éléments de définition et de terminologie définis ci-dessus.

- Le hasard d'un événement est toujours relatif à un point de vue.
 - Il résulte de l'indifférence de ce point de vue envers les différences correspondant à l'événement.
 - L'exemple type est le tirage d'une boule dans une urne. Le hasard de la couleur de la boule tirée est relatif au point de vue du joueur. Il résulte de l'indifférence du joueur envers les différences de couleur des boules lors de l'opération de tirage.
- Le hasard est dit épistémique s'il est relatif à un point de vue qui est celui d'un sujet cognitif.
- Le hasard est dit objectif, s'il est relatif à un point de vue qui est celui d'une composante interne de la théorie sensée rendre compte de la production des phénomènes.
- Si les événements au hasard ne changent pas le point de vue, je propose les termes de hasard hiérarchique. Le point de vue est à un niveau hiérarchique distinct de celui des événements. Il maintient son indifférence quelque soient les résultats des épreuves aléatoires.
 - Les épreuves aléatoires sont de même hasard, les probabilités des différents événements sont constantes.
 - L'exemple type est le tirage d'une boule dans une urne avec remise (ou bien une urne infinie).
- Si les événements au hasard sont susceptible d'altérer le point de vue, je propose les termes de hasard systémique. L'indifférence du point de vue change suivant les événements.
 - Par exemple, chez Darwin, le point de vue des conditions de sélection est changé à la suite d'une variation qui invente une nouvelle place dans l'économie de la nature.
 - L'exemple type est le tirage dans une urne sans remise. Le résultat de chaque épreuve transforme les probabilités des épreuves suivantes. Il s'agit d'un processus markovien.
 - Pour un hasard épistémique, l'exemple type est le processus d'induction bayésienne.
- Dans le cas d'un hasard hiérarchique, on peut obtenir une répartition des observables suivant une courbe normale. Dans ce cas le point de vue est le point de vue de la sommation des résultats de nombreuses épreuves élémentaires indépendantes.

- L'indépendance des épreuves est posées par le point de vue de la sommation qui est indifférent envers l'ordre des événements, c'est-à-dire envers les différences individuelles des épreuves qui ont donné ces événements.

J'espère que ces définitions seront utile à une discussion du Hasard et des Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives. Je réserve pour ma communication orale, la présentation de quelques unes des conséquences que l'on peut tirer de ces considérations pour l'analyse des phénomènes d'émergence dans les Systèmes Multi-Agents.

Emergence de modèles de représentations sensori-motrices et coviabilité: l'exemple d'un jeu d'imitation

Dominique Snyers¹, Pascale Kuntz¹ et Paul Bourguine²

¹ LIASC, Télécom Bretagne, B.P. 832, F-29285 Brest Cedex, France

² CREA, Ecole Polytechnique, 1 Rue Descartes, Paris - France
email: Dominique.Snyers@enst-bretagne.fr

Résumé Cet article analyse, dans un cadre restreint, l'émergence de modèles de représentations sensori-motrices chez des organismes artificiels en fonction de leurs interactions avec l'environnement. Nous insistons plus particulièrement sur les mécanismes de coévolution et sur l'influence de la construction de modèles de l'environnement par apprentissage. Nous présentons différents niveaux de capacités cognitives portant sur les stratégies comportementales faces aux perceptions organisées selon un ordre croissant d'efficacité dans un environnement changeant. Nous illustrons cela par une simulation d'agents pouvant construire par apprentissage des modèles (de type chaînes de Markov cachées) de leurs propres couplages sensori-moteurs.

1 Introduction

Cet article analyse, dans un cadre restreint, l'émergence de modèles de représentations sensori-motrices chez des organismes artificiels en fonction de leurs interactions avec l'environnement. Nous considérons ici un organisme réduit à un système cognitif plongé dans un environnement dont le comportement est décrit par ses états sensori-moteurs. Les perceptions et les actions se structurent intentionnellement en fonction notamment de la signification des situations rencontrées ou envisagées. L'intention prioritaire concerne la survie de l'organisme; il doit s'adapter à des variations de l'environnement pour continuer à vivre et transmettre son patrimoine génétique à ses successeurs. Sa viabilité ne résulte pas seulement de ses propres réactions homéostatiques mais est également associée à ses interactions avec les autres organismes qui vivent dans le même environnement. Ainsi, le couplage perception-action n'est pas nécessairement imposé mais peut évoluer, de façon autonome, selon des mécanismes de coévolution; nous parlons de *coviabilité* [3]. Nous étudions ici ce phénomène selon différents niveaux d'interprétation de la perception sensorielle de l'environnement; nous insistons plus particulièrement sur l'influence comportementale de la construction de modèles de l'environnement par apprentissage.

Après avoir précisé la notion de coviabilité adoptée dans la suite, nous présentons, en nous référant à [3], différents niveaux de comportements cognitifs portant sur les stratégies comportementales faces aux perceptions organisées selon un ordre croissant de capacités cognitives. Nous insistons notamment sur le cas où les agents peuvent construire par apprentissage des modèles (de type automate fini ou chaîne de Markov cachée) de leurs propres couplages sensori-moteur ainsi que de ceux des autres. Ce cas est illustré par une simulation d'une société d'agents artificiels qui se reproduisent à chaque génération selon un taux de reproduction dépendant des gains de séquences de jeux à deux joueurs.

2 Coviabilité et systèmes de répliqueurs

Un organisme est supposé entièrement défini par son patrimoine génétique (son génotype g_i) et l'inscription corporelle de g_i (son phénotype p_i). Le phénotype marque les interactions de l'organisme avec son environnement et détermine sa viabilité. Le patrimoine génétique de

l'organisme l'associe à une espèce q nous nous contentons ici de postuler une application entre l'ensemble des génotypes et celui des espèces.

Dans le cadre néo-Darwiniste, la dynamique d'évolution d'une espèce dépend d'une dynamique rapide de sélection et de reproduction des génotypes et d'une dynamique beaucoup plus lente de mutation. La sélection et la reproduction d'un organisme sous sa définition génotypique dépend de ses interactions avec les autres organismes de l'environnement sous leur forme phénotypique. Ainsi, la dynamique d'une espèce ne dépend pas seulement des phénotypes qui la composent mais aussi de la distribution de tous les phénotypes impliqués dans le processus de coévolution. Utilisant le formalisme des systèmes répliqueurs ([1]) cette dynamique peut s'écrire :

$$\frac{dx(q,t)}{dt} = w(q;\{x\})x(q,t)$$

où $x(q,t)$ est la densité d'agents de génotype q au temps t et où $w(q;\{x\})$ est le taux de reproduction associé à q pour la composition de la population au temps t c'est-à-dire $\{x\} = \{x(q^1,t), x(q^2,t), \dots\}$. Ce taux de reproduction est lié à la probabilité d'une espèce à maintenir sa viabilité.

Le facteur variationnel lent qu'est la mutation peut être modélisé par un processus de diffusion de faible ampleur autour des espèces existantes dans l'espace des génotypes. Le système de répliqueur devient alors :

$$\frac{dx(q,t)}{dt} = w(q;\{x\})x(q,t) + D \nabla_q^2 x(q,t)$$

où D est le coefficient de diffusion.

Sous certaines hypothèses, cette équation peut s'exprimer comme une forme particulière de l'équation de Schrödinger. L'étude analytique de l'évolution dynamique de l'histogramme de la densité d'espèces fait apparaître des modes spécifiques dérivant lentement par mutation sur lesquels se manifeste un effet tunnel: au cours du temps les espèces majoritaires sautent d'un mode à l'autre, ce qui permettrait d'expliquer, entre autres choses, la création et la disparition d'espèces ([10] et [5]).

3 Hiérarchie de comportements

Si l'on semble s'accorder sur le fait que l'évolution biologique a conduit à des organismes ayant des capacités cognitives de plus en plus développées - au sens par exemple du traitement de l'information -, la compréhension de l'émergence de cette complexité est un problème encore très largement ouvert, les modèles du fonctionnement cognitif donnant lieu également à de nombreuses controverses. Nous nous contentons ici, de dégager trois niveaux hiérarchisés de comportements fonctions de la perception de l'environnement (voir ([3] pour plus de détails).

La *première classe* comporte des agents - qualifiés de réactifs - qui réagissent aux informations de l'environnement reçues à travers leurs organes sensoriels selon un mode prédéterminé; les couplages sensori-moteurs sont précablés au niveau de leur génotype et sont transmis sans variations au niveau du phénotype. Ils correspondent à une *catégorisation* fixe de l'espace sensori-moteur. Malgré les limitations de leurs appareils sensori-moteurs, il est maintenant bien connu que ces agents peuvent collectivement laisser émerger des comportements sociaux très organisés; les abeilles et les fourmis nous en fournissent des exemples paradigmatiques (cfr [2] par exemple).

La *seconde classe*, située au dessus de la précédente dans une hiérarchie basée sur l'efficacité des comportements, comprend des agents réactifs auxquels est ajoutée une faculté d'apprentissage. Cette faculté supplémentaire conduit à une plus grande flexibilité face aux perturbations éventuelles de l'environnement en permettant une *recatégorisation* des couplages sensori-moteurs en fonction de l'expérimentation de l'agent. L'apprentissage repose sur l'existence d'une rétroaction de l'action effectuée par l'agent sur l'environnement inspirée du système

endocrinien dans lequel plusieurs substances peuvent transformer les évènements qui surviennent en “plaisir” ou en “douleur”. Nous supposons une aggrégation de ces substances en un principe de “plaisir-douleur” unique et nous qualifierons ces agents d'*hédoniques*. Ainsi, la réaction d'un agent face à une perception dépendra de ses *anticipations hédoniques* obtenues par renforcement à partir des enseignements de son expérience passée, c'est-à-dire des anticipations de *récompenses* ou de *punitions* associées au principe de “plaisir-douleur”. La catégorisation de l'agent réactif devient ici active puisque l'agent hédonique peut être amené à recatégoriser ses couplages sensori-moteurs dans le but d'améliorer ses propres anticipations. Par exemple l'agent hédonique gourmet qui repère au loin un champignon ressemblant à une espèce comestible va s'en approcher pour affiner sa catégorisation avant de la manger. Les techniques d'apprentissage par renforcement (“Q-learning”, “TD(λ) learning [15]) fournissent des règles incrémentales pour l'estimation des anticipations des récompenses de même que pour l'opération de recatégorisation (“partition Q-learning” [14]). L'agent n'a aucun modèle explicite de sa propre dynamique perceptive, ce modèle est toutefois implicitement représenté par ses anticipations hédoniques. Ce niveau cognitif correspond à la conscience primaire au sens d'Edelman [9], conscience qui n'a pas conscience d'elle-même mais qui a la capacité d'anticiper le futur en fonction de ce qui vient d'arriver dans une fenêtre temporelle limitée.

Afin de pallier à son manque d'expériences face à des situations inhabituelles, la meilleure stratégie pour l'agent hédonique consiste alors à mimer les individus de même espèce agissant autour de lui. En devenant *mimétique*, l'agent hédonique acquiert la capacité de modifier ses anticipations et stratégies hédoniques rapidement et de recatégoriser son couplage sensori-moteur de façon mieux adaptée à ses anticipations nouvelles.

La *troisième classe* traite la rigidité et la lenteur des comportements des agents précédents grâce à l'ajout d'une capacité de modélisation explicite des perceptions qui permet la simulation (l'expérimentation virtuelle) de plusieurs comportements possibles avant de ce décider pour une action. Ainsi, la simulation permet d'une part, de surmonter la limitation due au nombre nécessairement restreint d'expériences éprouvées et d'autre part, d'ajuster les distributions du taux de récompense lors de variations de l'environnement. Nous parlerons d'agents *éductifs*. Il y a deux niveaux d'éduction : le niveau d'éduction sensori-moteur et le niveau d'éduction symbolique. Au *niveau sensori-moteur*, l'agent éductif construit explicitement un modèle de sa perception de l'environnement à partir de ses expérimentations effectives passées. A l'aide de ce modèle, il peut alors simuler de façon éductive (c'est-à-dire sans aucune action associée) ses perceptions dans un futur proche en en déduire des anticipations. Avec le temps, ces modèles conduisent les agents à avoir des estimations quasi-bayésiennes de leur propre dynamique perceptive.

Tout agent cognitif pris comme un système dynamique présente une dynamique symbolique naturelle à travers son activité de catégorisation. A partir de celle-ci néanmoins, l'agent éductif peut construire des anticipations sur des fenêtres temporelles nettement plus longues que l'agent hédonique qui n'a pas de modèle explicite de sa dynamique perceptive. L'agent éductif grâce à ce modèle en effet, parvient à ce projeter dans l'avenir et c'est à ce niveau, nous semble-t-il, qu'apparaît la notion d'*intensionnalité* et de conscience qui devient consciente d'elle-même.

Afin de pallier au manque d'expérience pour la construction de modèle face à des situations nouvelles, l'agent éductif peut entrer en relation avec les autres agents autour de lui et se mettre à échanger des représentations symboliques de ses modèles perceptifs. Ainsi apparaît le *niveau éductif symbolique* qui fait émerger de la dynamique symbolique intrinsèque aux modèles perceptifs des agents, un langage symbolique pouvant servir de moyen de communication entre eux. Les interactions entre agents sont alors de nature *spéculaires* : lorsqu'il est en difficulté, l'individu passe du temps à se demander comment l'autre modéliserait à sa place et éventuellement il lui pose la question. Les agents entrent alors ainsi dans un jeu de miroir (“speculum” en latin signifie miroir) qui leur permet d'augmenter leur capacité modélisatrice propre par celle des autres.

4 Emergence de modèles représentationnels symboliques

Les agents éductifs héritent de la capacité de catégorisation et de recatégorisation des classes réactive et hédonique. Cela leur permet de catégoriser, de façon explicite cette fois, la dynamique de leur modèle éductif sensori-moteur et d'en extraire une séquence de symboles caractéristique de la dynamique symbolique associée. Or, un système dynamique associé à une dynamique symbolique peut être théoriquement considéré comme un "constructeur" de langage formel caractérisé par une grammaire. Le modèle explicite de l'environnement construit par l'agent pourra être alors un automate dont les caractéristiques précises dérivent de la complexité du langage engendré. Une méthode de construction d'un tel automate nous est suggérée par la ϵ -machine de J.P. Crutchfield ([8] et [7]) qui est un automate stochastique de "pouvoir de calcul" minimal permettant une description finie d'une chaîne de caractères. Les ϵ -machines ont été initialement définies pour donner une définition opératoire de la complexité des systèmes dynamiques. Elles sont basées sur la détection de classes d'équivalence (symétries, motifs répétitifs, ...) à différentes échelles dans des ensembles de sous-séquences de symboles. On peut alors affecter à chaque classe d'équivalence un nouveau symbole: la dynamique symbolique est alors associée à un nouveau langage formel. L'automate de représentation choisi dérive directement de la structure du langage. Cependant, comme la complexité de ce dernier n'est pas connue a priori, une démarche efficace consiste à éprouver un par un les différents niveaux de la hiérarchie des modèles de grammaires formelles de Chomsky ([11]) pour trouver celui qui recouvre la dynamique symbolique du système étudié avec la représentation la plus simple - au sens des différentes mesures de complexité des automates. Crutchfield généralise cette hiérarchie aux processus stochastiques discrets [6]. Au sommet de sa hiérarchie computationnelle des processus à mémoires finies se trouve la chaîne de Markov cachée équivalente à un réseau connexionniste récurrent caractéristique, par exemple, de l'éducation sensori-motrice. L'émergence de cette dynamique symbolique est primordiale car elle fournit à l'agent l'outil nécessaire à toute communication: un langage. Les agents s'étant mis d'accord sur la syntaxe et la sémantique d'un langage peuvent ainsi s'échanger des modèles de leur dynamique perceptive symbolique fruits de leur expérimentation personnelle.

5 Simulation d'agents éductifs

Pour illustrer les différentes classes de la hiérarchie des capacités cognitives présentée en 3. nous simulons ici une société artificielle d'agents autonomes inspirée des travaux de K. Kaneko et J. Suzuki ([12]). Dans cette société, chaque agent possède un chant caractéristique et sa viabilité dépend de sa capacité à imiter le chant de ses congénères sans être lui-même trop souvent imité. Nous renvoyons à ([5]) pour une interprétation de ce jeu d'imitation selon le modèle de Lokta-Volterra. Nous l'avons antérieurement utilisé pour illustrer les caractéristiques d'un comportement mimétique chez des agents hédoniques ([4]); nous étudions ici la dynamique de ce jeu lorsque les agents ont la capacité supplémentaire de modéliser l'évolution des couplages sensori-moteurs.

5.1 Jeu d'imitation

Ce jeu d'imitation est composé d'une société d'agents artificiels élémentaires coévoluant en se reproduisant à chaque génération selon un taux de reproduction qui dépend de l'issue de combats deux-à-deux. Plus un agent remporte de victoires, plus il a de chance de se reproduire à la génération suivante.

Chants d'oiseaux Chaque agent est représenté par un génotype q qui représente le paramètre d'un générateur de série temporelle sous la forme d'une équation de récurrence $f(s_n)$:

$$s_{n+1} = 1 - q \cdot s_n^2 = f(s_n)$$

où s_n est le signal temporel compris entre -1 et 1 au temps discret n et où q prend des valeurs entre 0 et 2 . Une série temporelle (nous parlerons souvent de *chant* dans le cas de nos agents en référence à Kaneko [12]) est donc ici parfaitement définie par le paramètre q caractéristique de l'agent et valeur initiale s_0 du signal.

Jeu d'imitation La simulation de ce jeu d'imitation se déroule alors comme suit :

1. La société d'agents est initialisée par tirage aléatoire des génotypes q des agents selon une distribution uniforme dans $[0, 2]$.
2. Pendant une génération (définie par un nombre fixé de rencontres) chaque agent rencontre k autres agents selon un tirage aléatoire.
3. Ces combats entre deux agents se déroulent en deux phases. Dans un premier temps, l'un des agents engendre une série temporelle à partir d'une valeur initiale s_0 aléatoire, on parlera de l'agent *chanteur*. L'autre agent, l'*imitateur*, utilise le début de cette série temporelle pour adapter les paramètres de son générateur de séries temporelles avant le concours d'imitation proprement dit. Durant celui-ci, il produit à son tour une série temporelle et la distance euclidienne entre les deux séries est calculée. Dans un second temps, les rôles sont inversés (le chanteur devient imitateur et vice versa) et une nouvelle distance est calculée. L'agent dont l'adaptation des paramètres du générateur de séries temporelles conduit à la plus petite distance est alors déclaré vainqueur.
4. Chaque nouvelle génération est ensuite formée par une sélection des agents proportionnelle au nombre de victoires et par une mutation modélisée ici par un bruit gaussien de centre 0 et d'écart type μ .

5.2 Capacités modélisatrice

Nous dotons ici les agents de capacités modélisatrices afin de leur permettre de simuler préalablement à la rencontre effective des combats dans le but de choisir la meilleure stratégie à adopter face à un adversaire donné.

Les agents éductifs Au contraire des agents que nous avons présentés jusqu'ici, l'agent éductif possède deux générateurs de séries temporelles caractérisés par deux paramètres q_a et q_b . Le choix de l'agent parmi ces deux générateurs lors de la phase de chant est aléatoire. Par contre lors de la phase d'apprentissage du combat d'imitation, il lui est possible de choisir celui de ces deux générateurs qui possède le plus de chances de succès contre un individu donné. Ce choix s'opérera en construisant un modèle du générateur de signal de l'opposant et en comparant ensuite le signal produit par ce modèle aux modèles associés aux deux générateurs q_a et q_b de l'agent éductif. Nous nous plaçons ici au niveau de l'éduction sensori-motrice et nous modélisons ces séries temporelles en nous plaçant directement au sommet de la hiérarchie computationnelle de Crutchfield par l'utilisation de réseaux connexionnistes récurrents, équivalents aux chaînes de Markov cachées.

Réseaux connexionnistes récurrents La figure 1 représente l'architecture de réseaux retenue lors de cette simulation. Nous nous limitons ici à des réseaux à 10 entrées, une couche cachée de deux nœuds et une sortie redirigée vers l'entrée.

Ces réseaux sont entraînés à l'aide d'une variante de l'algorithme de rétropropagation en déroulant la récursion et en imposant l'égalité des poids à chaque niveau de ce réseau "déroulé" (voir [13]). L'entraînement utilise le signal à modéliser sur 30 périodes : les 10 premières servent d'entrées initiales et les 20 suivantes de signal d'entraînement. (Nous avons pris $\epsilon = 0.9$ et $\alpha = 0.5$ pour les paramètres de l'algorithme de rétropropagation, c'est-à-dire respectivement le taux de modification selon le gradient et le taux de modification selon le moment additionnel). Nous arrêtons l'apprentissage au plus tard après 20 itérations.

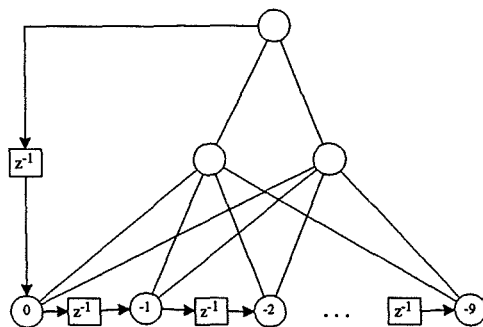


Figure1. Le modèle de réseau connexionniste récurrent à 10 entrées, 2 nœuds cachés et une sortie. Une fenêtre temporelle se déplace sur la série temporelle. Les entrées défilent de la droite vers la gauche à l'aide de délais alors que l'entrée de gauche reçoit la sortie au temps précédent.

La sigmoïde associée à chaque nœud de ce réseau rend des valeurs entre -1 et 1 comme le signal d'entrée. Ce réseau peut donc être utilisé après apprentissage comme générateur de séries temporelles similaires à la série temporelle de l'agent que ce réseau a tenté de modéliser. La Figure 2 nous donne deux exemples de sortie de réseaux associés à des signaux périodique et chaotique.

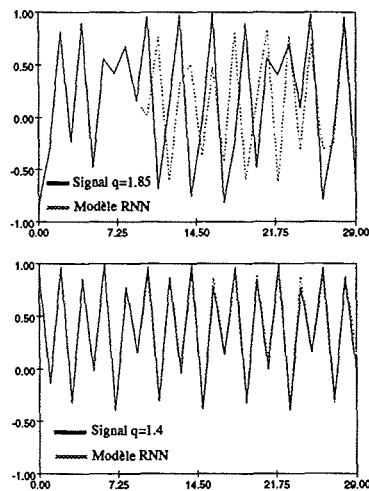


Figure2. Séries temporelles originales comparées à la sortie du réseau associé. Notons que le signal original n'est pas celui qui a servi à l'entraînement du réseau associé. Le graphe du dessus correspond à un signal chaotique ($q = 1.85$) et le signal du dessous à un signal périodique ($q = 1.4$).

5.3 Résultats expérimentaux

La société d'agents éducatifs de cette simulation consiste en un ensemble de 400 individus initialisés aléatoirement (les valeurs des paramètres de leur deux générateurs de séries temporelles sont initialisées par un tirage uniforme entre 0 et 2). A chaque génération, la probabilité de reproduction de chaque individu est calculée à partir des résultats de 100 combats contre des individus tirés au hasard dans la population. Le nombre d'individus reste constant des générations et la reproduction se compose d'une opération de sélection probabiliste (selon ces

probabilité de reproduction) et d'une opération de mutation qui ajoute aux paramètres de l'individu une valeur tirée à partir d'un générateur aléatoire gaussien d'écart type μ . Nous avons pris $\mu = 0.0001$ pour cette simulation. La figure 3 nous montre l'évolution de la distribution des 800 générateurs de séries temporelles au cours de 30 générations. Nous voyons très nettement apparaître une discrétisation de l'espace des espèces et un regroupement autour de quelques modes caractéristiques.

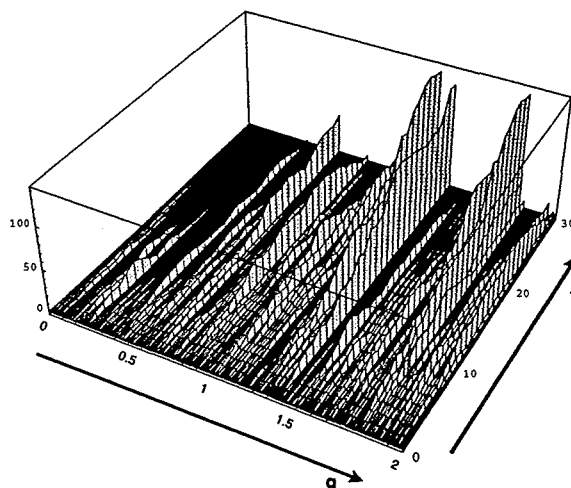


Figure 3. Evolution de la distribution des 800 générateurs de séries temporelles des 400 individus au cours de 30 générations. D'une distribution initiale uniforme, les générateurs se regroupent au cours du temps autour de certains modes caractéristiques.

La figure 4 nous montre la distribution des deux paramètres q_a et q_b caractéristiques de nos agents éductifs (les deux paramètres associés aux deux générateurs de séries temporelles) à la trentième génération. Nous remarquons qu'ils correspondent pour la plupart à des régimes dynamiques au bord du chaos, c'est-à-dire dont l'exposant de Lyapounov associé est nul ([5]).

Il est toutefois intéressant de remarquer à la figure 5 que les couples de valeurs qui émergent de cette "coévolution" artificielle se composent d'un générateur associé à un dynamique au bord du chaos aux alentours de $q = 1.765$ (exposant de Lyapounov $\lambda = 0.0$) et correspondant à une large zone au bord du chaos et d'un autre générateur dont la dynamique est aussi au bord du chaos du côté périodique (exposant de Lyapounov faiblement négatif) aux alentours de $q = 1.25$ ($\lambda = 0.0$), $q = 1.34$ ($\lambda = -0.016$), $q = 0.62$ ($\lambda = -0.014$) et $q = 1.27$ ($\lambda = -0.010$), par ordre d'importance de l'histogramme associé. Les agents qui semblent les mieux adaptés, c'est-à-dire ceux qui se reproduisent le plus sont donc constitués d'une paires de générateurs de chant dont la dynamique se trouve du côté périodique du bord du chaos comme cela avait déjà été observé précédemment [12] et [5].

6 Perspectives

Cet article complète l'illustration à travers un modèle de jeux à deux joueurs des comportements sensori-moteurs des agents de chacune des niveaux d'une hiérarchie basée sur l'accroissement des capacités cognitives (couplage sensori-moteur rigide, apprentissage par renforcement, possibilité de modélisation). Il nous reste à vérifier que cette hiérarchie coïncide également dans le cas du jeu d'imitation à un accroissement de l'efficacité dans un environnement mouvant. L'expérience à suivre devra donc mettre en compétition dans un même environnement des espèces de chaque niveau et étudier en fonction des paramètres environnementaux leurs viabilités respectives.

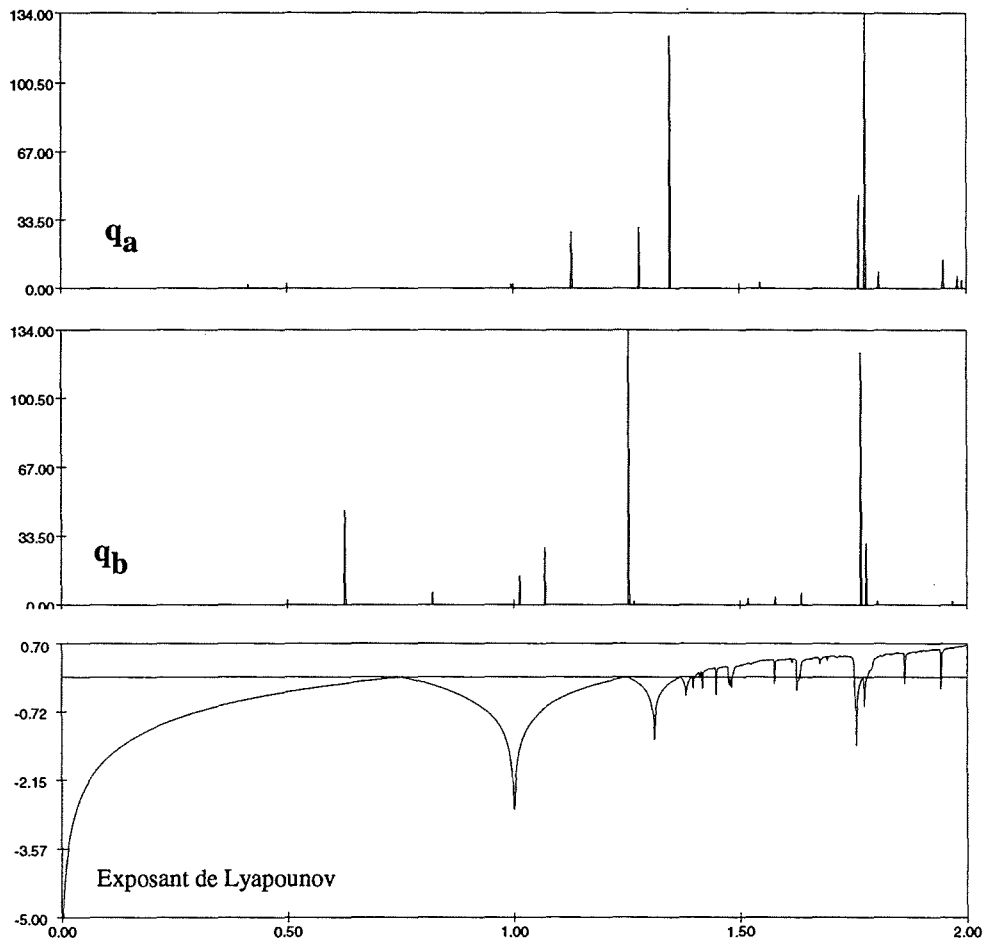


Figure 4. Distribution des individus à la génération 30. Le graphe du dessus correspond à l'histogramme de distribution des premiers paramètres q_a des individus, celui du milieu aux deuxièmes paramètres q_b et celui du bas aux valeurs des exposants de Lyapounov.

References

1. J.-P. Aubin. *Viability Theory*. Birkhauser, 1991.
2. E. Bonabeau and G. Théraulaz. *Intelligence Collective*. Hermès, 1994.
3. P. Bourguine. Models of co-evolution in a society of autoteaching agents: from the society of hedonic mimetic agents to the society of educative specular agents. In *Entretiens Jacques Cartier*, Lyon, 1993.
4. P. Bourguine and D. Snyers. Mimicry and coevolution of hedonic agent. Preprint.
5. P. Bourguine and D. Snyers. Lotka volterra coevolution at the egde of chaos. In *Proceeding of the Conference: Evolution Artificielle 94*, Toulouse, 1994.
6. J. P. Crutchfield. The calculi of emergence: Computation, dynamics, and induction. *Physica D*, 1994. Special issue on the Proceeding of the Oji International Seminar "Complex systems - from Complex Dynamics to Artificial Life".
7. J. P. Crutchfield and K. Young. Inferring statistical complexity. *Physical Review Letters*, 1989.
8. J. P. Crutchfield and K. Young. Computation at the onset of chaos. In *Entropy, Complexity, and the Physics of Information*. Addison-Wesley, 1990.
9. G. Edelman. *Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of Mind*. Basic Books, 1992.
10. R. Feistel and W. Ebeling. *Evolution of Complex Systems: Selforganization, Entropy and Development*. Kluwer Academic, Dordrecht, 1989.

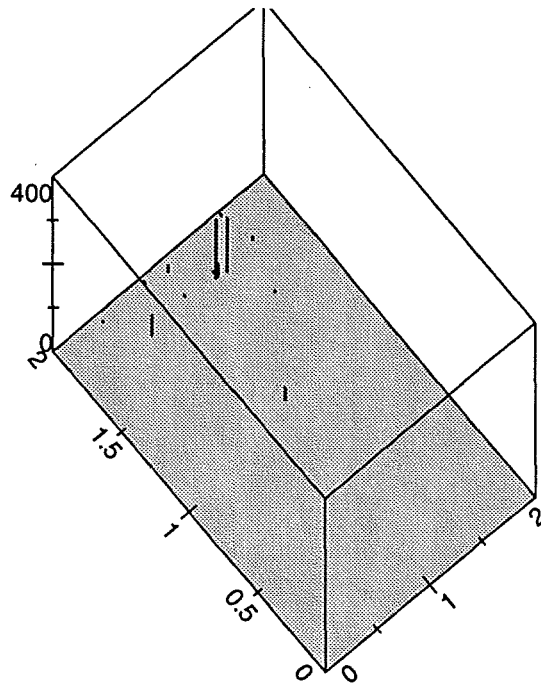


Figure 5. Histogramme des couples de paramètres q_a - q_b des 400 individus de la génération 30. Nous remarquons qu'ils se concentrent sur une ligne autour de $q = 1.76$.

11. J.E. Hopcroft and J.D. Ullman. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Addison-Wesley, Menlo Park, 1979.
12. K. Kaneko and J. Suzuki. Evolution to the edge of chaos in an imitation game. In C. Langton, editor, *Artificial life III*, Redwood City, CA, 1993. Addison Wesley.
13. S. Y. Kung. *Digital Neural Networks*. Prentice Hall, 1993.
14. R. Munos and J. Patinel. Partition q-learning. In J.L. Deneubourg, G. Nicolis, and H. Bersini, editors, *Self Organization & Life, from simple rules to global complexity: Proc. of the second European Conference on Artificial Life*, Brussels, Belgium, 1993.
15. R. Sutton. Learning to predict by the methods of temporal difference. *Machine Learning*, pages 9-44, 1991.

La Mémoire de l'Espèce en Biologie

John Stewart, LTE et TSH, UTC.

Une critique du concept de "programme génétique".

L'orthodoxie actuelle en biologie voudrait que le problème de la mémoire de l'espèce soit pour l'essentiel résolu, grâce au concept d'un "programme génétique" inscrit dans l'ADN. Ainsi, François Jacob (1970) écrit dans *La Logique du Vivant* :

"L'hérédité se décrit aujourd'hui en termes d'information, de messages, de code. La reproduction d'un organisme est devenue celle des molécules qui le constituent. Non que chaque espèce chimique possède l'aptitude à produire des copies d'elle-même. Mais parce que la structure des macro-molécules est déterminée jusque dans le détail par des séquences de quatre radicaux chimiques contenus dans le patrimoine génétique. Ce qui est transmis de génération en génération, ce sont les "instructions" spécifiant les structures moléculaires. Ce sont les plans d'architecture du futur organisme. Ce sont aussi les moyens de mettre ces plans à exécution et de coordonner les activités du système. Chaque œuf contient donc, dans les chromosomes reçus de ses parents, tout son propre avenir, les étapes de son développement, la forme et les propriétés de l'être qui en émergera. L'organisme devient ainsi la réalisation d'un programme prescrit par l'hérédité." (Jacob 1970).

Le concept de "programme génétique" occupe une place si centrale dans les sciences contemporaines du vivant qu'il peut sembler insensé de le mettre en question. Néanmoins, pour entrer en matière, posons la question naïve: comment savons-nous que le "programme" est "génétique"? Dans l'examen exhaustif de la question qu'elle a mené, Oyama (1985) a relevé le fait qu'il existe non pas une, mais trois réponses "standards" à cette question.

- Primo: le "programme" est "génétique" parce que, quand le génotype *varie*, que ce soit à l'intérieur d'une même espèce ou entre des espèces différentes, le phénotype varie souvent aussi, et que nous pouvons parfois même tracer la chaîne causale des variations physiologiques qui conduisent à ce résultat. Toutefois, force est de reconnaître que quand nous observons des variations phénotypiques dues à des variations environnementales, le même

raisonnement ne nous conduit pas à conclure que le programme est contenu "dans l'environnement". L'incohérence est manifeste.

- Secundo: il est usuel de considérer comme "génétique" tout ce qui reste constant si le génotype *ne varie pas* (typiquement, à l'intérieur d'une espèce; on parle alors de "contrainte génétique"). Il doit être clair que si l'on combine ces deux premières définitions du mot "génétique" et que l'on passe subrepticement de l'une à l'autre sans explicitation, on est d'avance garanti de pouvoir considérer que pratiquement tout est "génétique" - mais par là même, on vide le mot "génétique" de son sens.

La question est rendue encore plus confuse par le fait qu'il existe encore une autre réponse:

- Tertio: toutes les cellules d'un organisme multicellulaire contiennent des copies du même génôme, présent dès l'œuf fertilisé; ce génôme est donc à même de diriger le développement de l'organisme. Le problème provient ici du fait que des lignées cellulaires - qui partagent effectivement le même génôme - se différencient pour former des types variés: cellules nerveuses, musculaires, intestinales, sanguines, etc. Si une telle variation se produisait entre des organismes différents, elle serait sans équivoque qualifiée d' "environnementale" (cf primo); mais dès qu'elle se produit à l'intérieur de la peau d'un seul organisme, on n'hésite pas à considérer qu'elle découle du "programme génétique".

Le fait qu'il s'agit bien d'un imbroglio est confirmé par l'embarras de Mayr (1981) quand celui-ci tente d'expliquer comment exactement on peut distinguer ce qui est génétique de ce qui ne l'est pas:

"Je parle souvent du comportement en disant assez vaguement qu'il est en grande partie contrôlé par un programme génétique fermé ou ouvert. Il est en réalité très difficile de déterminer en quelle mesure un comportement particulier a des déterminantes génétiques, ainsi que l'indiquent les controverses sans fin de ces quarante dernières années. Il y a quelques rares indices qui peuvent aider à choisir, mais il serait inexact de dire que chacun d'entre est entièrement concluant...."

Tant d'hésitations et d'incohérences sont troublantes. Si donc la notion d'un programme "génétique" s'avère moins limpide qu'elle ne le paraît à première vue, faut-il alors se raviser, et considérer

que le programme est (en partie) environnemental? Telle n'est pas mon intention; car ce serait accrédi-ter le bien-fondé de la classique opposition "inné/acquis" qu'il faut, à mon avis, remettre radicalement en question. Si je suis réticent par rapport à la notion d'un programme inscrit "dans" les gènes, je ré- cuse tout autant la notion d'un programme situé "dans" l'environnement. Pour aider à comprendre comment il est possible d'échapper aux termes de cette alternative, examinons à présent une illustration relevant du monde inorganique (Oyama 1985).

Un "programme" qui n'en est pas un: le cas des flocons de neige. Les flocons de neige sont dotés d'une structure remarquable. Chaque flocon possède six bras, dont chacun est doté d'une structure dentelée et crénelée d'une telle richesse qu'il n'y a jamais eu deux flocons pareils. Pourtant, à l'intérieur d'un flocon donné, chacun des six bras est rigoureusement identique aux cinq autres. Comment cela est-il possible? Comment chaque bras peut-il "savoir" quelle forme est prise par les autres afin de s'y conformer? La tentation est presque aussi grande que dans le cas de l'organisation biologique de supposer qu'il doit y avoir un "programme" quelque part, extérieur aux bras eux-mêmes, qui les "informe" sur la morphologie qu'ils doivent prendre. Mais dans le cas du flocon de neige, force est de reconnaître qu'un tel "programme" n'existe nulle part - ni au centre du flocon, ni dans l'environnement qui l'entoure.

Il semble que l'explication est en fait la suivante (Begley & Carey, 1983). Le processus de cristallisation de la glace est étonnamment sensible aux conditions précises et combinées de température, de pression et d'humidité. Si les six bras sont identiques, c'est parce qu'ils partagent la même histoire de fluctuations du micro-climat dans lequel le processus de leur croissance se déroule. Le caractère unique de cette histoire est démultiplié par le fait qu'un autre facteur déterminant pour la morphologie de chaque accroissement, à savoir la forme du bras pré-existant à ce moment-là, est également (d'instant en instant) identique pour chacun des bras mais (progressivement) différente d'un flocon à un autre¹. En clair, l'étonnante identité des six bras

¹ Ceci rappelle le phénomène du "chaos déterminé".

n'est rien d'autre qu'une application minutieuse du principe selon lequel les mêmes causes produisent les mêmes effets.

Cette analyse de la morphogénèse des flocons de neige aboutit à deux conclusions importantes. Tout d'abord, si "programme" il y a, il n'est *localisé* nulle part; il est "distribué" sur l'ensemble des éléments qui entrent en interaction au cours du processus, sans en privilégier aucun. En second lieu, ce "programme" ne pré-existe pas aux processus en question; "l'information", si l'on tient absolument à garder ce concept, est créée *en même temps* par le processus même qui "l'exprime". Qu'en est-il dès lors du "programme" biologique qui est censé "informer" l'ontogénèse des organismes multicellulaires?

Le programme biologique est-il localisé? Commençons par la question de la localisation. Je prendrai à dessein un exemple au niveau moléculaire, la où la notion de "code génétique" fonctionne le mieux. Les molécules d'hémoglobine, qui sont les composants principaux des globules rouges du sang, possèdent la propriété très particulière de s'attacher mais aussi de relâcher des molécules d'oxygène avec une grande facilité. Cette propriété, purement physico-chimique, est d'une grande signification biologique car c'est elle qui permet aux globules rouges de remplir leur fonction de transport de l'oxygène des poumons vers les tissus. Les déterminants de cette propriété résident-ils dans les gènes?

L'hémoglobine est une protéine et, comme pour toutes les protéines, il est vrai que dans des conditions normales¹ la séquence linéaire des acides aminés qui constitue la "structure primaire" de la protéine est littéralement "codée" par la séquence de nucléotides dans le gène correspondant. Cependant, la propriété qui nous intéresse dépend non pas de cette structure primaire en tant que telle, mais de la manière dont cette chaîne linéaire d'acides aminés se replie sur elle-même pour former la structure tri-dimensionnelle de la molécule. Fait à noter tout particulièrement, cette structure est telle que des atomes de fer viennent s'y loger; ceci est tout à fait essentiel, car ces atomes, avec les deux formes Fe^{++} et Fe^{+++} , jouent

¹ C'est-à-dire avec une machinerie cellulaire convenable (les ribosomes), et avec des "décodeurs" (les ARN de transfert) appropriés. Il y a déjà là des informations indispensables qui ne sont pas "dans" le gène qui encode l'hémoglobine.

un rôle primordial dans la capacité de la molécule à lier l'oxygène. Or la configuration repliée de la chaîne d'acides aminés dépend radicalement du milieu dans lequel se trouve la molécule. Par exemple, en milieu aqueux (ce qui représente le cas normal), des acides aminés hydrophobes s'attirent réciproquement, et forment des "nœuds" qui maintiennent une certaine structure tri-dimensionnelle en place. Mais en milieu aromatique¹ (par exemple, dans du benzène), il en serait autrement et la molécule prendrait une toute autre configuration. Dans ces conditions, on comprend qu'il n'y a pas de séquence de nucléotides identifiable comme celle qui "encode" le fer. La propriété significative de l'hémoglobine dépend d'un gène, certes, mais elle dépend tout autant de certaines propriétés physico-chimiques de la matière - celles de l'eau d'une part et des matières grasses de l'autre, qui établissent ensemble la polarité hydrophile-hydrophobe; celles de l'atome de fer avec une certaine taille et une valence variable; et ainsi de suite. Exactement comme pour le flocon de neige, "l'information" est partout, distribuée sur les relations entre *tous* les éléments qui entrent en interaction pour déterminer les propriétés de la molécule; autant dire dès lors qu'elle est nulle part.

Ainsi donc, même au niveau moléculaire, le "programme" biologique n'est pas localisé, ni dans les gènes ni ailleurs. Puisqu'il s'agit du niveau a priori le plus favorable pour une localisation génétique, il semble légitime de conclure que les "programmes" qui régissent les propriétés émergentes à des niveaux d'organisation supérieurs - cellules, tissus, organes, corps entier, population, relation entre l'espèce et sa niche écologique - ne sont pas non plus localisés².

Le programme biologique préexiste-t-il à l'ontogénèse?
Qu'en est-il alors de la question de savoir si le programme biologique *pré-existe* au processus de l'ontogénèse qu'il est censé diriger? Il est vrai que les gènes contenus dans l'œuf fertilisé précèdent l'ontogénèse, ce qui est précisément l'une des raisons

¹ Ou même en milieu aqueux à des conditions d'acidité, de concentration ionique ou de température différentes.

² Cette question mériterait évidemment un examen beaucoup plus approfondi; faute de place dans le cadre de cet article, nous ne ferons ici qu'en esquisser quelques traits saillants.

}

principales qui rend la notion d'un "programme génétique" superficiellement attrayante. Mais puisque le programme biologique n'est pas localisé dans les gènes, comme nous venons de le voir, cet argument ne saurait être concluant.

Avant d'aborder la vaste question de la pré-existence ou non du programme biologique, rappelons l'autre raison principale qui rend cette notion attrayante, et même apparemment nécessaire: il s'agit de l'étonnante régularité de l'ontogénèse. En effet, dans des conditions normales, la quasi-totalité des œufs fertilisés se développent pour devenir des adultes normaux; les avortements et formes monstrueuses sont très rares. Etant donné la complexité des processus embryologiques, il s'agit d'un phénomène remarquable qui pose un authentique défi à l'explication scientifique. Mais comme nous allons le voir, le réel problème ainsi posé est *occulté* et non résolu par la notion d'un "programme génétique" pré-existant. Dès que l'on se penche sur les processus réels de l'ontogénèse, il apparaît clairement que, si les causes efficientes de l'ontogénèse s'enchaînent les unes aux autres avec une grande fiabilité, c'est essentiellement parce que leur organisation s'appuie sur des régularités qui sont produites de manière fiable par le processus de développement lui-même.

En effet, une analyse relativement simple des toutes premières étapes de l'embryogénèse, qui sont communes à la quasi-totalité des animaux multicellulaires, suffit pour révéler qu'il s'agit d'un processus "historique" qui crée lui-même, au fur et à mesure, les conditions de son propre déroulement ultérieur. Ainsi, les premières divisions cellulaires donnent lieu à la morula, amas de cellules peu différenciées possédant une forme globale sphérique. Pourquoi la morula est-elle sphérique¹? Essentiellement pour la raison en vertu de laquelle une gouttelette d'huile suspendue dans de l'eau l'est également: l'énergie libre des contacts des cellules (ou des molécules d'huile) entre elles étant moindre que celle des contacts avec le milieu aqueux, la forme qui minimise l'énergie libre globale est celle qui minimise le rapport surface/volume; dans une espace à trois dimensions, cette forme est une sphère. Ce

¹ Plutôt que d'être une feuille plate à deux dimensions, un filament à une dimension, ou bien simplement une collection de cellules dispersées dans le milieu.

mécanisme n'est nullement inscrit "dans les gènes"; par conséquent, la forme qui en résulte ne peut l'être non plus. Par ailleurs, les interactions des cellules entre elles et avec le milieu environnant qui conduisent à la réalisation effective de la forme, si elles sont parfaitement prévisibles, sont produites par le processus embryologique lui-même et ne sauraient donc lui pré-exister.

Cette caractéristique "historique" du processus embryologique ne fait que s'accroître lors des étapes ultérieures. En raison même de la forme sphérique de la morula, certaines cellules vont se trouver à la surface en contact avec le milieu extérieur, alors que d'autres seront à l'intérieur entourées d'autres cellules. Cette différence se présente à la seule condition que la morula soit effectivement sphérique; du point de vue de l'organisation de l'embryogénèse, elle peut donc être utilisée comme un signal parfaitement fiable pour déclencher une différenciation appropriée entre les deux types de cellules. En l'occurrence, les cellules intérieures réagissent en sécrétant une fluide; ceci *explique* comment il se fait que l'embryon prend ensuite la forme d'une blastula, une sphère creuse à paroi épithéliale.

Résultant de la forme précédente, la blastula est à son tour la précondition pour la formation du stade qui lui succède. En effet, la forme de la sphère creuse offre la possibilité du mouvement particulier dit de "gastrulation": un groupe de cellules initialement situées à la surface extérieure plongent dans le centre de la sphère pour donner la forme très caractéristique de la gastrula. Ces cellules forment l'endoderme et l'ébauche de l'intestin; les cellules restées à la surface forment l'ectoderme qui donnera lieu à la peau et aussi au tissu nerveux; les cellules situées entre l'ectoderme et l'endoderme forment le mésoderme qui sera à l'origine du squelette, des muscles et du sang. Encore une fois, la tâche de l'embryologie est de déterminer de quelle manière les signaux qui déterminent cette triple différenciation cellulaire sont reliés aux particularités de leurs positions respectives dans l'embryon. En un certain sens, la topologie relationnelle entre endoderme, ectoderme et mésoderme est tout à fait contingente; mais dans un autre sens, on comprend qu'elle devient inéluctable précisément dans la mesure où elle provient du processus embryologique lui-même. Autrement dit, c'est précisément la mise en évidence du fait que

}

"l'information" nécessaire pour organiser le processus ne lui pré-existe pas, mais qu'elle est constituée au fur et à mesure par le processus lui-même, qui constitue une explication scientifique de la grande régularité et de la fiabilité de l'ontogénèse.

L'abandon de la notion de "programme". Le "programme" biologique n'est pas localisable, ni dans les gènes ni ailleurs; de plus, il ne pré-existe pas aux événements qu'il est censé diriger. Il faut alors se demander si un tel "programme" en mérite encore le nom. En effet, dans ces conditions, l'emploi de ce terme prête à confusion, dans la mesure où il incite à parler du *résultat* du processus développemental comme s'il en était la *cause* ¹. Il semble donc préférable de dire qu'en ce qui concerne l'ontogénèse, il n'existe pas de programme (génétique ou autre), pas plus qu'il n'existe de "programme" des flocons de neige.

Une mémoire de l'espèce sans programme.

Mais alors, s'il n'existe pas un "programme" inscrit dans l'ADN, comment expliquer la mémoire de l'espèce? Et quel est le rôle des gènes? Pour éviter un malentendu, je précise que je ne cherche pas un instant à nier que les gènes soient des composants essentiels des organismes vivants actuels. Le passage des organismes unicellulaires aux organismes multicellulaires ayant une ontogénèse, il y a quelques 1000 Millions d'Années, n'a eu lieu qu'après émergence de cellules eukaryotes dotés d'un noyau avec des gènes chromosomiques. Certes, il ne faut pas surestimer le rôle des gènes. Ainsi, l'enchaînement des premières étapes de l'ontogénèse animale - de l'oeuf fertilisé à la gastrula - procède quasi-normalement dans des embryons où les gènes chromosomiques sont inactivés. Dans les années 1930, ce fait remarquable a amené certains embryologistes à considérer que les gènes étaient purement décoratifs - responsables par exemple de la coloration des yeux, ou celle des fleurs chez les plantes, mais non des processus fondamentaux. Ceci rappelle utilement que les gènes n'ont pas de pouvoirs magiques : leurs actions ne se comprennent que dans le contexte de processus ontogénétiques qu'ils ne sont pas

¹ Cf les médecins de Molière attribuant les effets de l'opium au fait qu'il contiendrait un "principe dormitif".

seuls à "diriger". Mais ce point de vue est exagéré : si les gènes ne sont pas tout-puissants, ils ne sont pas non plus inutiles. Prenons donc un nouveau départ, et voyons plus positivement comment il est possible de penser la mémoire de l'espèce, et le rôle réel qu'y jouent les gènes.

La caractéristique essentielle des organismes vivants réside dans leur capacité de se produire eux-mêmes : ce sont des systèmes autopoïétiques, c'est-à-dire que leur fonctionnement même assure la re-production permanente de tous leurs composants essentiels, et assure également la reconduction permanente des relations entre ces composants qui constituent leur organisation autopoïétique (Maturana & Varela 1980). On notera que selon cette définition, les organismes vivants sont intrinsèquement caractérisés par une causalité circulaire. Cette capacité autopoïétique n'est possible que parce que les organismes vivants sont des systèmes thermodynamiquement et matériellement ouverts sur leur milieu. Comme image de cette forme d'organisation circulaire branchée sur un flux énergétique et matériel, on peut prendre la figure du tourbillon. Les organismes vivants sont en quelque sorte des tourbillons biochimiques branchés directement ou indirectement sur l'énergie solaire.

La différenciation phéno-géno. Les tourbillons simples exhibent déjà un aspect fondamental de la phénoménologie des organismes vivants. Toutefois, ce sont des êtres fragiles et éphémères : que le processus dynamique qui les constitue vient à s'interrompre, ne serait-ce qu'un instant, et ils disparaissent à tout jamais sans laisser de trace. Un événement capital est donc l'émergence d'un dispositif "géno" qui permet de stabiliser les processus dynamiques du "phéno" et de lui conférer une pérennité au-delà des aléas de son fonctionnement courant. Comme image, on peut prendre le lit d'une rivière qui canalise les flux cycliques de la pluie et de l'évaporation de l'eau.

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un dispositif "géno", il faut identifier clairement deux relations productives : celle qui conduit du "phéno" vers le "géno", et celle qui conduit en retour du "géno" vers le "phéno". Il s'agit d'une deuxième causalité circulaire se déroulant sur une échelle de temps plus longue que celle du "phéno" lui-même. Ainsi, dans notre exemple du cycle de

}

l'eau, c'est l'écoulement de l'eau qui creuse petit à petit le lit de la rivière; en retour, c'est le lit dans sa vallée qui permet à la rivière de se reconstituer même après une période de sécheresse prolongée ayant provoqué la disparition temporaire du cycle et de la rivière. Le grand tort de la génétique mendélienne est de considérer la relation entre phénotype et génotype comme une relation purement formelle; par conséquent, elle court-circuite gravement l'identification positive de ces doubles liens entre "phéno" et "géo".

Dans le cas des organismes vivants, le premier dispositif "géo" est probablement celui de la membrane cellulaire. En effet, la causalité circulaire est ici évidente : les réactions "phéno" du métabolisme conduisent à la formation de la membrane; celle-ci consolide en retour les réactions métaboliques en évitant la dispersion par diffusion de leurs composants spécifiques. Un deuxième dispositif "géo" est celui des enzymes : également produits par les réactions métaboliques, ils canalisent en retour les voies empruntées par les flux du tourbillon biochimique.

Les gènes constitués d'ADN sont à comprendre comme un troisième dispositif "géo"; mais dans ce cas, la première mise en place du dispositif pose un réel énigme. En effet, il est bien connu que les gènes contiennent de l'information encodée dans la séquence des nucléotides de l'ADN; tout le problème est de comprendre comment les processus "phéno" peuvent engendrer un engramme digitalisé. L'orthodoxie de la biologie moléculaire contemporaine résout dogmatiquement le problème en le niant purement et simplement; mais si cette solution expéditive est acceptable comme description des organismes actuels, elle possède l'inconvénient de barrer la route à toute compréhension de leur première genèse. Cairns-Smith (1985), dans un livre consacré à l'origine de la vie, a proposé une intéressante analogie avec le problème de la construction d'une arche : étant donné que chaque pierre ne tient que par ses relations avec les autres (cf. la causalité circulaire), comment les pierres peuvent-elles être mises en place une à une? Il suggère comme solution le principe de l'échafaudage qui permet la construction de l'arche et qui peut être enlevé ensuite. L'hypothèse spécifique de Cairns-Smith peut surprendre ; il suggère que les premiers "gènes" étaient constitués non pas de l'ADN mais de l'argile. A vrai dire, une idée de ce type vaut autant

pour l'origine des protéines enzymatiques, qui fait partie de la même problématique dans la mesure où la synthèse des protéines chez des organismes contemporains dépend également de l'ADN. Une autre piste pour aborder ce nœud de problèmes consiste à étudier le rôle des molécules d'ARN qui sont à la fois autocatalytiques et enzymatiques pour d'autres réactions biochimiques.

Je ne prétends nullement avoir apporté une résolution des problèmes que j'ai soulevés dans cet article. J'espère seulement avoir contribué, en écartant quelques fausses solutions, à thématiser la mémoire comme une question très largement ouverte.

Bibliographie.

- Begley S. & Carey J. (1983). *Newsweek* 64, Dec. 26th.
Cairns-Smith A.G. (1985). *Seven Clues to the Origin of Life*.
Cambridge University Press, Cambridge.
Jacob F. (1970). *La Logique du Vivant*. Gallimard, Paris.
Maturana H.R. & Varela F.J. (1980). *Autopoiesis and Cognition: the Realization of the Living*. Reidel, Dordrecht.
Mayr E. (1981). *La biologie de l'évolution*. Hermann, Paris.
Oyama S. (1985). *The Ontogeny of Information : Developmental Systems and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.

Essais sur réseau et modélisation des processus de construction collective chez les insectes sociaux

GUY THERAULAZ (1) & ERIC BONABEAU (2)

(1) CNRS - URA 1837, Laboratoire d'éthologie et psychologie animale, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse, France

(2) CNET Lannion B - RIO / TNT, route de Trégastel, 22301 Lannion Cédex, France

1. Auto-organisation et phénomènes d'intelligence collective

Depuis une dizaine d'années, un grand nombre de recherches s'attache à comprendre les mécanismes de fonctionnement des sociétés d'insectes, essentiellement chez les fourmis, les guêpes et les abeilles (voir en particulier Deneubourg & Goss, 89; Franks, 89; Camazine, 91; Theraulaz & Gervet, 92; Theraulaz & coll., 94; Theraulaz & Deneubourg 94). Ces systèmes collectifs possèdent en effet tout un ensemble de propriétés très intéressantes qui proviennent de leur *capacité à s'auto-organiser*. Ils sont en particulier capables d'accomplir des tâches difficiles, complexes, dans des environnements dynamiques et variés, dont aucun individu pris individuellement n'est généralement capable, et ceci sans pilotage ni contrôle externes et sans coordination centrale. En effet, d'une part le répertoire comportemental des insectes est limité et d'autre part, leur système cognitif n'est pas suffisamment puissant pour permettre à un seul individu qui serait en possession de toute l'information nécessaire d'assurer la répartition des rôles et la bonne marche de la société.

A la suite de tout un ensemble d'études, qui ont portées notamment sur la gestion de l'organisation spatio-temporelle des activités individuelles, sur la division du travail ou bien encore sur l'organisation de l'environnement, on a pu montré que les sociétés d'insectes avaient développé des *systèmes de décision collective* qui fonctionnent sans aucune représentation symbolique, qui exploitent les contraintes physiques du milieu dans lequel elles évoluent, et enfin qui utilisent essentiellement les communications entre individus, soit directement lors de contacts, soit indirectement en utilisant l'environnement comme un canal de communication (On trouvera dans Bonabeau & Theraulaz 1994, une revue complète des phénomènes d'auto-organisation chez les insectes sociaux). Grâce à ces interactions directes ou indirectes, la société s'auto-organise et face à un problème trouve une solution dont la complexité dépasse de loin celle des insectes qui la compose.

Ce qui rend l'étude de tels systèmes particulièrement intéressante, est qu'ils constituent un *modèle naturel de résolution distribuée de problème* dont la logique fonctionnelle qui est basée sur la coopération d'unités disjointes, mobiles et individuellement peu performantes, peut être appliquée dans la conception systèmes artificiels. Il s'agit donc d'exploiter les capacités d'auto-organisation qui sont produites au travers d'une multitude d'interactions simultanées ou successives entre les agents ou entre les agents et leur milieu. Il en résulte des performances collectives telle que la production de forme ou la résolution de problèmes qui sont largement supérieures à celle des unités, ces structures collectives étant réalisées sans codage explicite au niveau individuel.

De très nombreux exemples de cette intelligence décentralisée et collective ont été étudiés comme le choix collectif d'une source de nourriture par les colonies de fourmis ou

d'abeilles (Pasteels *et coll.*, 1987; Beckers *et coll.*, 1990; Seeley *et coll.*, 1991; Camazine & Sneyd, 1991), la formation des réseaux de pistes et des patterns de fourragement chez les fourmis (Aron *et coll.*, 1990; Deneubourg & Goss, 1989; Deneubourg *et coll.*, 1989; Deneubourg *et coll.*, 1990; Franks, 1989; Goss *et coll.*, 1990), la division dynamique du travail dans les colonies de fourmis et de guêpes (Deneubourg *et coll.*, 1987; Corbara *et coll.*, 1991; Theraulaz *et coll.*, 1990a, b; 1991a, b, c), le tri collectif des éléments de couvain chez les fourmis et les abeilles (Deneubourg *et coll.*, 1991; Franks & Sendova-Franks, 1992; Camazine, 1991; Camazine *et coll.*, 1990) et certains aspects du comportement constructeur chez les abeilles, les guêpes et les fourmis (Skarka *et coll.*, 1990; Deneubourg, Theraulaz & Beckers, 1992; Karsai & Penzes, 1993; Gallais-Hamonno & Chauvin, 1972; Franks *et coll.*, 1992).

2. Propriétés et avantages des systèmes à intelligence collective

Un tel mode de fonctionnement présente en effet plusieurs avantages

- une plus grande **fiabilité**, non pas des composants individuels mais du collectif;
- une plus grande **flexibilité**, car aucune solution n'est imposée; les modifications spatio-temporelles de l'environnement entraînent en retour des modifications du comportement du collectif, qui peut ainsi s'adapter au nouvel environnement;
- une plus grande **robustesse**, ou encore une plus grande tolérance aux pannes, car la simplicité individuelle implique que les tâches "intéressantes" sont réalisées au niveau du collectif, et non à celui de ses composants.

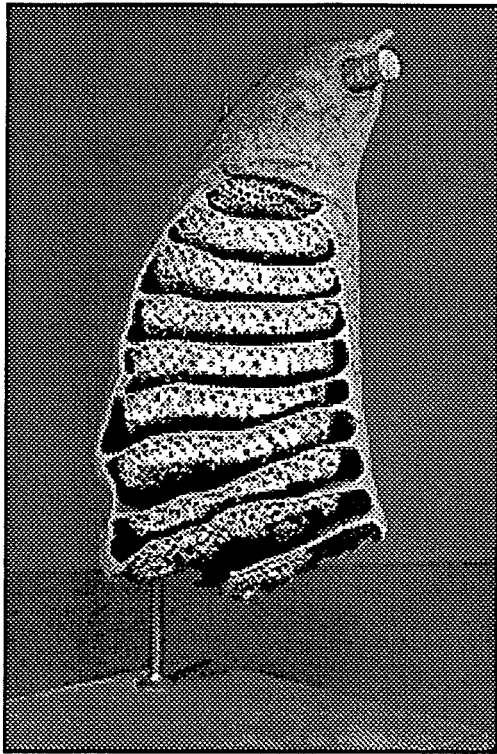
Cette complexité au niveau global, s'oppose à la simplicité du niveau individuel, et elle est souvent rendue possible par le caractère aléatoire du comportement individuel, et ce sont des rétroactions, généralement positives, qui permettent la coordination probabiliste des comportements individuels; ainsi, le dysfonctionnement d'une unité dans le collectif n'affecte pas la performance globale.

- Enfin, un collectif permet également de *s'affranchir d'un contrôle central* et d'une programmation explicite de tous les cas potentiellement rencontrés.

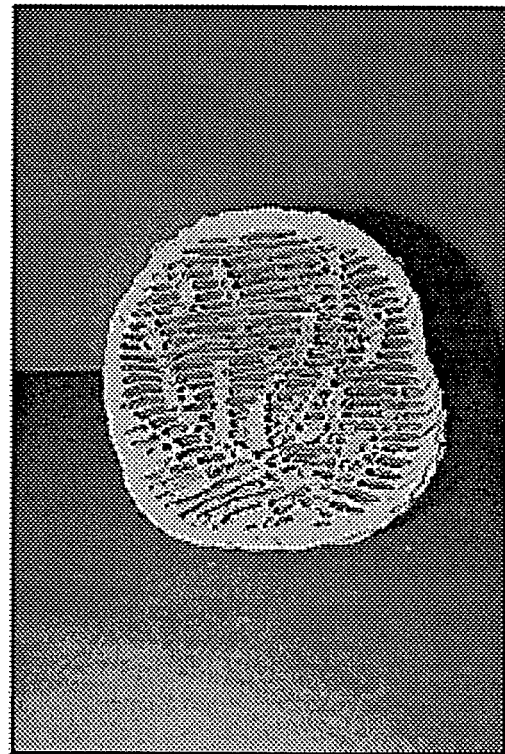
Cet aspect pose évidemment un problème pratique : celui de savoir comment "programmer" un système collectif pour qu'il réalise une tâche générique, dans une gamme étendue d'environnements. Et à cet égard, la logique de fonctionnement utilisée par les sociétés d'insectes peut s'avérer riche d'enseignement pour la conception de tels systèmes artificiels.

3. Comment les insectes sociaux parviennent-ils à construire collectivement des architectures complexes ?

Parmi les problèmes qui peuvent être abordés dans ce cadre là, celui auquel nous nous intéressons plus particulièrement actuellement est celui des constructions collectives. En effet, l'une des caractéristiques les plus frappantes des sociétés d'insectes est leur capacité à construire collectivement des nids dont l'architecture est souvent très complexe (voir figure 1). De telles structures coloniales qui sont caractéristiques de l'espèce se développent à l'échelle de la colonie, en dépit du fait que le comportement individuel d'un insecte possède une forte composante aléatoire et demeure très simple dans son principe de type stimulus-réponse. La question qui se pose alors est comment des agents aussi simples qui ne disposent chacun que d'une information locale sur leur environnement coordonnent-ils leurs actions en vue de réaliser des architectures complexes ? Il n'est qu'à voir l'extrême complexité de certains nids de termites et de guêpes pour être stupéfaits de la différence qualitative qui sépare les propriétés des agents de celle des formes qu'ils produisent.



Epipona tatua



Apicotermes

Figure 1. a. nid de la guêpe *Epipona tatua*, b. nid du termite *Apicotermes* (Guy Theraulaz & Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris).

L'un des problèmes importants auxquels sont donc confrontés les éthologistes mais d'une manière plus large tous ceux qui sont confrontés à ces problèmes de traitement distribués, est de *comprendre la structure des algorithmes comportementaux* qui sont utilisés par les différentes espèces pour construire leur nid et éventuellement leur phylogénèse.

4. La théorie de la stigmergie

Depuis la fin des années 50, nous savons que la coordination des tâches et la régulation de l'activité bâtitrice ne dépendent pas directement des insectes, mais des constructions elles-mêmes. *L'insecte ne dirige pas son travail, mais il est guidé par lui.* C'est à cette stimulation d'un type particulier que P.P. Grassé donna le nom de *stigmergie* (Grassé, 59; Grassé, 84). Comment cela se passe-t-il ? Toute activité bâtitrice d'un insecte en point de l'espace, et qui survient à la suite d'une rencontre avec une forme stimulante spécifique, qui peut être par exemple un état antérieur de la construction, entraîne la création d'une nouvelle forme stimulante, une nouvelle structure matérielle, qui pourra orienter et déclencher en retour une nouvelle activité bâtitrice chez les autres membres de la colonie, y compris chez celui qui lui a donné naissance, pour autant qu'il ait à sa disposition du matériel de construction. Il est important de noter la relation étroite qui unit le stimulus déclencheur S_1 , l'activité bâtitrice R_1 et la forme résultante qui constitue un nouveau stimulus S_2 qui pourra déclencher à son tour une nouvelle forme d'activité bâtitrice R_2 . Le principal problème consiste dès lors à comprendre quels sont les stimuli qui déclenchent une activité bâtitrice et comment ils sont organisés dans l'espace et dans le temps de manière à produire une construction cohérente. Ce processus, également appelé *communication sematectonique* (Wilson, 1975), lorsque les seules interactions entre individus surviennent au travers des modifications de

l'environnement, conduit à une coordination presque parfaite du travail et donne l'impression que la colonie suit dans son ensemble un plan pré défini.

5. Les processus de construction collective chez les guêpes

Nous avons commencé à analyser ces processus de construction collective chez différentes espèces de guêpes et de fourmis (Karsai et Theraulaz, 1995). Les guêpes sociales construisent des nids dont l'architecture peut parfois être très complexe. La grande majorité des nid de guêpes sont construits à partir de fibres de bois mâchées et cimentées avec des sécrétions salivaires (Wenzel, 1991). Le carton qui en résulte est alors modelé par les guêpes pour construire les diverses parties du nid (pédicelle, rayons de cellules ou enveloppe externe). On notera également le caractère modulaire des architectures de nid (voir figure 1). La répétition d'une même structure de base constitue la manière la plus simple d'accroître la taille du nid.

Chez les guêpes sociales, l'organisation des activités de construction individuelles s'effectue fondamentalement au travers des configurations de matière qui sont rencontrées sur le nid (Karsai et Theraulaz, 1995). Le processus de construction débute par la formation d'un pédicelle puis d'une première cellule dans son prolongement. Puis au fur et à mesure que le processus de construction se déroule, le nombre de sites potentiels susceptibles de recevoir une nouvelle cellule augmente. Dès lors, plusieurs activités peuvent être accomplies parallèlement et les activités de construction ne suivent pas une séquence a priori bien définie. L'essaim possède donc la capacité de construire simultanément au niveau plusieurs sites différents d'un même nid et cela constitue une étape importante dans l'évolution et la création d'architectures complexes. Mais cela a introduit en retour de nouvelles contraintes, puisque les informations locales qui régulent le comportement bâtisseur doivent être organisées dans l'espace et dans le temps de manière à assurer une construction collective cohérente. Et ce type de contraintes que nous avons analysés dans une première étape.

Pour cela nous avons développé un modèle formel décrivant les processus de construction distribuée chez les guêpes sociales. Nous avons pu ainsi caractériser un ensemble d'algorithmes stigmergiques distribués qui permettent à un essaim d'agents simples de construire des structures de nids cohérentes.

6. Essaims sur réseau

6.1. Caractérisation

Dans ce système que nous avons appelé **essaim sur réseau**, les agents qui composent l'essaim, se déplacent aléatoirement sur un réseau tridimensionnel, ne possèdent aucune représentation globale de l'architecture qu'ils construisent; ils ne peuvent percevoir que les configurations locales de matière qui les entoure, et seules un petit nombre de ces configurations sont stimulantes et déclenchent une activité bâtisseuse. Les agents peuvent déposer une brique élémentaire choisie parmi plusieurs types possibles, ceci en fonction de leur environnement local (les 26 cellules voisines) et en se référant à une table de comportement.

Cette table est constituée de l'ensemble des configurations locales stimulantes qui déclenchent le dépôt d'une brique, et indique le type de brique à déposer pour chacune de ces configurations. Dans les exemples que nous présentons nous considérons le cas où deux types de briques (bleue ou rouge) peuvent être déposées. Ces briques constituent le matériel de construction élémentaire à partir duquel des structures de nid seront constituées.

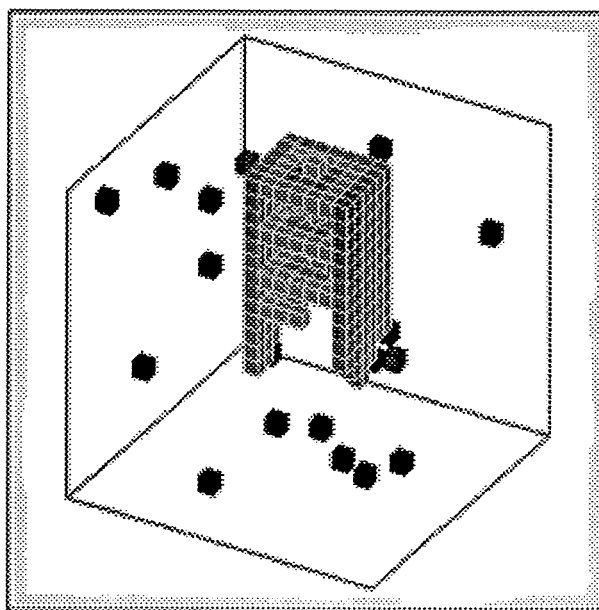


Figure 2. Simulation d'un processus de construction collective d'un nid de *Chartergus*, par un essaim sur réseau tridimensionnel. L'essaim composé de 10 agents se déplace sur un réseau de dimension 20x20x20.

Dès lors, nous nous intéressons spécifiquement à l'organisation spatio-temporelle des configurations qui déclenchent une activité constructrice. Nous considérerons que tous les agents sont capables de déposer une brique dès lors qu'ils rencontrent la bonne configuration. L'espace des configurations locales qu'un agent est susceptible de rencontrer est très grand (3^{26} en dimension 3 avec trois états de briques différents qui sont 0 (vide), 1 (brique bleue) et 2 (brique rouge) et l'espace des règles possibles ne peut être exploré de manière systématique ($3^{3^{26}}$). Dans les exemples que nous présentons, les règles de dépôt de brique sont déterministes. Il existe des configurations qui déclenchent un dépôt et d'autres non, et toutes les fois qu'un agent rencontre une configuration stimulante, il déposera une brique dans la cellule qu'il occupe. Pour mesurer la complexité des algorithmes comportementaux utilisés pour construire une architecture donnée, nous introduisons la *complexité de croissance*. La complexité de croissance d'une architecture est définie comme le nombre minimal de règles élémentaires nécessaires pour produire cette architecture.

Chaque insecte est capable de construire seul une architecture complète. En ce sens, la construction est un comportement purement individuel. Mais le comportement de construction individuel (c'est-à-dire les types de configurations locales qui déclenchent une activité constructrice) doit être organisé de telle manière qu'un groupe d'insectes puisse produire également la même architecture; c'est-à-dire sans que les multiples actions qu'accomplissent les différents insectes dans l'espace et dans le temps, n'interfèrent et ne conduisent finalement à une désorganisation de l'activité globale de l'essaim. En d'autres termes les activités individuelles doivent être coordonnées de manière à assurer l'organisation du processus de construction. Chez les guêpes, l'organisation des activités de construction individuelles s'effectue fondamentalement au travers des patterns de matière rencontrés sur le nid.

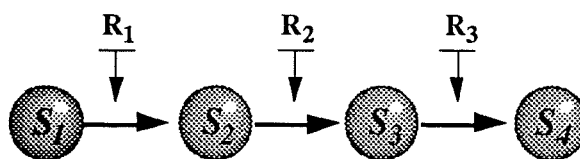
L'ensemble de ces études nous a permis de préciser l'organisation générale des configurations locales dans la table de comportement pour qu'un groupe d'insectes puisse produire un type d'architecture donnée.

6.2. Quels types de contraintes le fonctionnement collectif impose-t-il au comportement individuel, lorsque la construction s'effectue au moyen d'un algorithme stigmergique ?

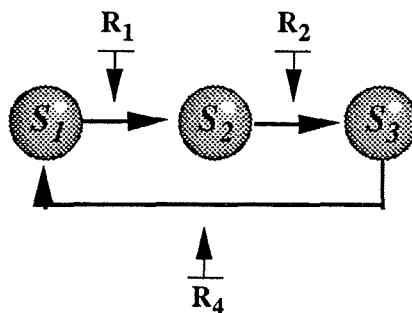
Lorsque les n agents d'un essaim (naturel ou artificiel) participent à la construction d'une architecture, toutes les fois qu'un agent modifie l'environnement au temps t , il peut percevoir en retour le résultat de sa propre action au temps $t+1$, de même que le résultat de l'action que tout autre agent aura pu effectuée dans le voisinage immédiat. Pour construire une architecture de manière cohérente, les agents d'un essaim doivent coordonner leurs activités. Pour cela il est nécessaire que tous les agents répondent de manière uniforme à l'ensemble des configurations locales qu'ils rencontrent lors de leurs déplacements sur l'architecture. Il doit donc par conséquent exister un ensemble de configurations locales qui déclenchent le dépôt d'une brique.

Soit $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ l'ensemble des configurations locales stimulantes, c'est-à-dire les configurations qui déclenchent un comportement constructeur (le dépôt d'une brique). Afin que la construction s'effectue de manière cohérente, il doit exister une succession d'un certain nombre d'états de construction. Soit (S_1, S_2, \dots, S_n) l'ensemble de ces états de construction. Chacun de ces états est caractérisé par un sous-ensemble de C , $C(S_p)$, avec $\cup_p C(S_p) = C$ et $\forall p_1 \neq p_2, C(S_{p_1}) \cap C(S_{p_2}) = \emptyset$. Considérons chaque état de construction S_p , toutes les fois qu'une brique est déposée, le résultat conduit à l'apparition d'une ou plusieurs autres configurations $\in C(S_p)$, et le processus de construction peut alors se poursuivre d'une manière séquentielle (dans ce cas une seule et unique configuration autorise les agents à déposer une brique), ou de manière parallèle (dans ce cas plusieurs configurations autorisant le dépôt d'une brique sont simultanément présentes). L'achèvement de l'état de construction S_p entraîne alors l'émergence de nouvelles configurations $\in C(S_{p+1})$. Comme on peut le voir, le processus de construction suit un certain canevas et peut donner naissance à des états récurrents. De tels états sont responsables des structures modulaires qui apparaissent dans l'architecture. On peut considérer les deux cas suivants:

- une chaîne d'états de construction strictement linéaire :



- une chaîne d'états de construction ayant des états récurrents :



Ainsi, lorsque l'on souhaite utiliser un essaim pour construire une architecture, il est nécessaire de décomposer cette dernière en un nombre fini d'états de construction, avec la condition nécessaire suivante: les configurations locales qui sont créées au cours d'un état de construction donné et qui déclenchent une activité de construction, doivent être différentes de celles créées au cours d'un état de construction antérieur ou ultérieur de manière à éviter une désorganisation de l'activité de construction. Lorsqu'un algorithme de construction stigmergique est utilisé par plusieurs individus qui coopèrent à la construction d'une architecture commune, l'ordre dans lequel les configurations stimulantes sont produites doit suivre une séquence bien définie et ne doivent pas interférer les unes avec les autres. Lorsque l'algorithme stigmergique respecte cette contrainte on dira qu'il est coordonné; il sera dit non-coordonné lorsqu'il ne respecte pas la contrainte d'ordonnement.

7. Résultats.

La figure 3 présente quelques unes des architectures que nous avons obtenu en utilisant de simples règles déterministes. Nous donnons en annexe deux exemples de règles utilisées pour produire les architectures 3e et 3f. Toutes les architectures à l'exception de i et j, ont été obtenues au moyen d'algorithmes coordonnés. La différence qui existe entre (i, j) et toutes les autres architectures est frappante. Un algorithme stigmergique coordonné converge toujours vers des architectures qui possèdent des caractéristiques globales similaires, en dépit des différentes réalisations accomplies par les marches aléatoires des agents dans les différentes situations. Au contraire, tout algorithme stigmergique non-coordonné semble diverger et le même algorithme produira des architectures globales différentes au cours de différentes simulations. Cette tendance à diverger provient du fait que les configurations stimulantes ne sont pas organisées dans le temps et dans l'espace, et que plusieurs d'entre elles se chevauchent, ce qui explique le fait que l'architecture croît dans l'espace de manière incohérente. Par exemple, les architectures g et h résultent de deux simulations successives avec les mêmes conditions initiales utilisant le même algorithme coordonné, alors que les architectures i et j sont obtenues en utilisant le même algorithme non-coordonné. Quelques unes des architectures cohérentes présentées dans la figure 3 sont caractéristiques de celles de nids de guêpes observées dans la nature. Certains de ces nids, présentent des plateaux (e, f, g, h, k, l) et les différents niveaux du nid sont reliés entre eux par un axe vertical (e, f) ou par une série de pédicelles (g, h). D'autres possèdent une enveloppe externe : les architectures k et l, qui sont présentées sans la portion frontale de l'enveloppe de manière à laisser apparaître l'organisation interne du nid, correspondent au nid construit par une guêpe du genre *Chartergus*.

La contrainte d'ordonnement que nous avons mis en évidence, impose d'autre part une contrainte sur le type d'architecture qui peut être réalisée collectivement. Par conséquent, la nature même du processus de coordination des activités individuelles de construction à travers le changement dynamique de la forme construite restreint très fortement l'espace des architectures possibles.

8. Discussion : Hasard et Contraintes dans la production collective de formes

La coopération dans l'activité de construction telle qu'elle apparaît chez les guêpes sociales, impose de fortes contraintes sur les algorithmes comportementaux des individus. Sous la condition que la régulation du comportement constructeur s'effectue au moyen d'un algorithme stigmergique strict, nous montrons que la seule manière de construire une structure cohérente consiste à utiliser une classe d'algorithme particulière appelée '*algorithmes coordonnés*'. Dans cette situation, les configurations locales de matière qui résultent de l'activité constructrice et qui sont rencontrées par les individus

lorsqu'ils se déplacent aléatoirement sur la structure du nid, constituent les seuls indices nécessaires pour diriger et coordonner les activités de construction présentes de l'essaim.

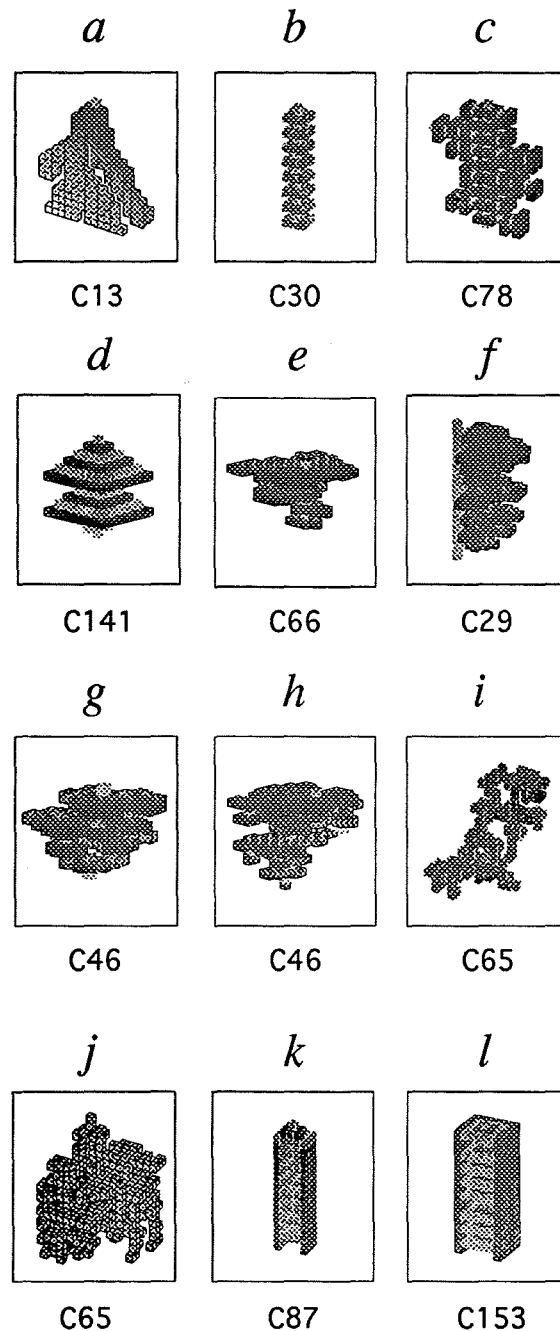


Figure 3. Simulations de constructions collectives avec un essaim sur réseau tridimensionnel. Les simulations ont été réalisées sur un réseau de dimension 20x20x20 avec 10 guêpes. Nous donnons pour les architectures qui correspondent à des nids rencontrés dans la nature le nom de l'espèce à laquelle il correspond. **a.** Architecture de nid (*Parapolybia*) obtenue après 20000 pas de temps (GC = 13). **b.** Architecture obtenue après 20000 pas de temps (GC = 30). **c.** Architecture obtenue après 80000 pas de temps (GC = 78). **d.** Architecture obtenue après 85000 pas de temps (GC = 141). **e.** Architecture de nid (*Vespa*) obtenue après 20000 pas de temps (GC = 66). **f.** Architecture de nid (*Parachartergus*) obtenue après 20000 pas de temps (GC = 29). **g, h.** Architectures de nid (*Stelopolybia*) obtenues après 20000 pas de temps (GC = 46). **i, j.** Architectures obtenues après 15000 pas de temps en utilisant le même algorithme stigmergique non-coordonné (GC = 65). **k.** Architecture de nid (*Chartergus*) obtenue après 185000 pas de temps (GC = 87). **l.** Architecture de nid (*Chartergus*) obtenue après 100000 pas de temps (GC = 153).

La situation que nous décrivons simplifie à l'extrême le processus de construction naturel, mais elle permet de mettre en évidence le type de contrainte qui s'exercent sur le comportement stigmergique individuel d'individus ou d'agents très simples qui doivent coopérer pour construire de manière cohérente une architecture dont ils ne possèdent ni le plan ni la représentation. En particulier les essaims que nous avons étudiés travaillent dans un espace abstrait et utilisent des briques cubiques pour construire les architectures, alors que les nids de guêpes que l'on rencontre dans la nature sont construits à partir de cellules hexagonales de carton ou de boue. Par conséquent les symétries ne sont pas équivalentes. Mais les contraintes comportementales que nous avons étudiées demeurent.

La logique sous-jacente à notre modèle est très similaire à celle développée par ailleurs pour rendre compte du tri collectif du couvain par les fourmis (Deneubourg *et al.*, 1991) ou les abeilles (Camazine, 1991). Dans ces modèles, les actions de chaque individu sont déterminées par les configurations locales des éléments de couvain rencontrés au hasard sur le nid. Elles produisent l'agrégation des œufs, larves et cocons dans différentes zones du nid chez les fourmis et chez les abeilles, la constitution d'un pattern caractéristique constitué de trois régions concentriques distinctes, une aire centrale dans laquelle se trouve le couvain, un anneau de pollen qui entoure cette zone, et une grande région périphérique de miel.

L'étude des mécanismes qui permettent aux insectes sociaux de traiter collectivement une grande quantité d'information sur la structure de leur environnement, ou sur l'organisation de leur colonie, peut se révéler riche d'enseignement sur les contraintes auxquelles ces espèces ont dues faire face au cours de l'évolution afin de réaliser un comportement constructeur collectif parfaitement coordonné (Theraulaz & Deneubourg, 1992; Theraulaz & Gervet, 1992; Deneubourg, Theraulaz & Beckers, 1992). En particulier nous montrons que l'utilisation de tels algorithmes stigmergiques contraint très fortement l'espace des architectures possibles que les insectes sont capables de produire.

A la question "pourquoi la forme des nids de guêpes est-elle ce quelle est ?" on peut répondre que plusieurs facteurs interagissant les uns avec les autres interviennent pour conférer aux nids la forme qu'ils possèdent. De tels facteurs prennent en compte la valeur fonctionnelle et adaptative d'une architecture donnée dans un environnement particulier (Jeanne, 1975), les contraintes physiques du matériel utilisé pour construire le nid (Hansell, 1984), et les contraintes comportementales qui s'imposent aux insectes lorsqu'ils doivent coopérer pour construire une architecture. De telles contraintes réduisent l'espace des architectures possibles, et la sélection naturelle sélectionne finalement celles qui possèdent les meilleures valeurs fonctionnelles et adaptative.

9. Références

- [Aron & coll. 90] - Aron, S., Deneubourg, J.L., Goss, S. & Pasteels, J.M. : "Functional self-organization illustrated by inter-nest traffic in ants : the case of the argentine ant", pp. 533-547. In: Alt W. & Hoffmann G. Eds. *Biological Motion, Lecture Notes in Biomathematics 89* (1990)
- [Beckers & coll. 90] - Beckers, R., Deneubourg, J.L., Goss, S. & Pasteels, J.M. : "Collective decision making through food recruitment", *Ins. Soc.*, 37: 258-267 (1990)
- [Bonabeau & Theraulaz 94] - *Intelligence Collective*. Paris: Hermès (1994)
- [Camazine 91] - Camazine, S. : "Self-organizing pattern formation on the combs of honey bee colonies", *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 28: 61-76 (1991)
- [Camazine & Sneyd 91] - Camazine, S. & Sneyd, J. : "A model of collective nectar source selection by honey bees: self-organization through simple rules", *J. theor. Biol.*, 149: 547-571 (1991)
- [Corbara & coll. 91] - Corbara, B., Deneubourg, J.L., Fresneau, D., Goss, S., Lachaud, J.P. & Pham-Ngoc, A., "Simulation de la genèse d'une division du travail au sein d'une société de fourmis Ponérines: un modèle d'auto-organisation", *Actes des Colloques Insectes Sociaux 7*: 205-206 (1991)

- [Deneubourg & coll. 87] - Deneubourg, J.L., Goss, S., Pasteels, J.M., Fresneau, D. & Lachaud, J.P. : "Self-organization mechanisms in ant societies (II) : learning in foraging and division of labour", pp. 177-196. In: Pasteels J.M. & Deneubourg J.L. Eds. From individual to collective behaviour in social insects, *Experientia Supplementum 54*, Birkhauser Verlag (1987)
- [Deneubourg & Goss 89] - Deneubourg, J.L. & Goss, S. : "Collective patterns and decision making", *Ethology Ecology & Evolution*, 1: 295-311 (1989)
- [Deneubourg & coll. 89] - Deneubourg, J.L., Goss, S., Franks, N.R. & Pasteels, J.M. : "The blind leading the blind : modeling chemically mediated army ant raid patterns", *J. Ins. Behav.*, 2: 719-725 (1989)
- [Deneubourg & coll. 90] - Deneubourg, J.L., Aron, S., Goss, S. & Pasteels, J.M. : "The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant *Irydomyrmex humilis*", *J. Ins. Behav.*, 3: 159-168 (1990)
- [Deneubourg & coll. 91] - Deneubourg, J.L., Goss, S., Franks, N.R., Sendova-Franks, A., Detrain, C. & Chretien, L. : "The dynamics of collective sorting : Robot-like ant and ant-like robot", pp. 356-365. In: Meyer J.A. & Wilson S.W. Eds. *Simulation of Adaptive Behavior : From Animals to Animats*, MIT Press/Bradford Books (1991)
- [Deneubourg & coll. 92] - Deneubourg, J.L., Theraulaz, G. & Beckers, R. : "Swarm-Made Architectures", pp. 123-133. In: Varela F.J. & Bourgine P., Edits. *Toward a Practice of Autonomous Systems*, Proceedings of The First European Conference on Artificial Life. MIT Press/Bradford Books (1992)
- [Franks 89] - Franks, N.R. : "Army ants : a collective intelligence", *American Scientist*, March-April: 139-145 (1989)
- [Franks & Sendova-Franks 92] - Franks, N.R. & Sendova-Franks, A.B. : "Brood sorting by ants: distributing the workload over the work-surface", *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 30: 109-123 (1992)
- [Gallais-Hamonno & Chauvin 72] - Gallais-Hamonno, F.G. & Chauvin, R. "Simulations sur ordinateur de la construction du dôme et du ramassage des brindilles chez une fourmi (*Formica Polyctena*)", *C. R. Acad. Sc. Paris 275 D*, 1275-1278 (1972)
- [Goss & coll. 90] - Goss, S., Deneubourg, J.L., Aron, S., Beckers, R. & Pasteels, J.M. : "How trail laying and trail following can solve foraging problems for ant colonies", pp. 661-678. In: Hughes R.N. Eds. *Behavioural mechanisms of food selection*. NATO ASI Series, Vol. G20. Springer Verlag (1990)
- [Grassé 59] - Grassé, P.P. : "La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes sp.* La theorie de la stigmergie : essais d'interprétation du coimpportement des termites constructeurs", *Ins. Soc.*, 6: 41-84 (1959)
- [Grassé 84] - Grassé, P.P. : 'Termitologia', Tome II : Fondation des Sociétés, Construction. Paris: Masson (1984)
- [Hansell 84] - Hansell M. H. : 'Animal architecture & building behaviour', Harlow, Longman Group Limited (1984)
- [Jeanne 75] - Jeanne, R. L. "The adaptativeness of Social wasp nest architecture". *The Quaterly Review of Biology* 50, 267-287 (1975)
- [Karsai & Penzes 93] - Karsai, I. & Penzes, Z. "Comb building in social wasps: self-organization and stigmergic script". *J. Theor. Biol.* 161, 505-525 (1993)
- [Karsai & Theraulaz 95] - Karsai, I. & Theraulaz, G. 1995. *Nest Building in a Social Wasp : Postures and Constraints*, Sociobiology (sous presse)
- [Pasteels & coll. 87] - Pasteels, J.M. Deneubourg, J.L. & Goss, S. : "Self-organization in ant societies (I): trail recruitment to newly discovered food sources", pp. 155-175. In: Pasteels J.M. & Deneubourg J.L. Eds. 'From individual to collective behaviour in social insects'. *Experientia Supplementum 54*. Birkhauser Verlag (1987)
- [Seeley & coll. 91] - Seeley, T.D., Camazine, S. & Sneyd, J. : "Collective decision-making in honey bees: how colonies choose among nectar sources", *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 28: 277-290 (1991)
- [Skarka & coll. 90] - Skarka, V. , Deneubourg, J.L., Belic, M.R. : "Mathematical Model of Building Behavior of *Apis mellifera*", *J. Theor. Biol.* 147: 1-16 (1990)
- [Theraulaz & coll. 90a] - Theraulaz, G., Pratte, M. & Gervet, J. : "Behavioral profiles in *Polistes dominulus* (Christ) wasp societies: a quantitative study", *Behaviour* 113: 223-250 (1990)
- [Theraulaz & coll. 90b] - Theraulaz, G., Goss, S., Gervet, J. & Deneubourg, J.L. : "Self-organization of behavioural profiles and task assignment based on local individual rules in eusocial wasp *Polistes dominulus* Christ", pp.535-537. In: Veeresh G.K., Mallik B. & Viraktamath C.A. Edits., *Social Insects and the Environment*, Proceedings of the Symposium Models and Theoretical Approaches to the Study of Social Insects, 11th International Congress of IUSSI, Bangalore, India. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New-Delhi (1990)
- [Theraulaz & coll. 91a] - Theraulaz, G., Goss, S., Gervet, J. & Deneubourg, J.L. : "Swarm Intelligence in wasps colonies : an example of task assignment in multiagents systems", in: Meystel A., Herath J. & Gray S. Eds. *Proceedings of the 1990 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Philadelphia, PA. IEEE Computer Society Press (1991)

- [Theraulaz & coll. 91b] - Theraulaz, G., Goss, S., Gervet, J. & Deneubourg, J.L. : "Task differentiation in *Polistes* wasp colonies : a model for self-organizing groups of robots", pp. 346-355. In: Meyer J.A. & Wilson S.W. Eds. *Simulation of Adaptive Behavior : From Animals to Animats*, MIT Press/Bradford Books (1991)
- [Theraulaz & coll. 91c] - Theraulaz, G., Gervet, J. & Semenov, S. : "Social regulation of foraging activities in *Polistes dominulus* Christ : a systemic approach to behavioural organization", *Behaviour*, 116 : 292-320 (1991)
- [Theraulaz & Deneubourg 92] - Theraulaz, G. & Deneubourg, J.L. : "On Formal Constraints in Swarm Dynamics", *Proc. of the IEEE International Symposium of Intelligent Control*, Glasgow (1992)
- [Theraulaz & Gervet 92] - Theraulaz, G. & Gervet, J. : "Les performances collectives des sociétés d'Insectes", *Psychologie Française*, 37: 7-14 (1992)
- [Theraulaz & coll. 94] - Theraulaz, G., Bonabeau, E., Goss, S. & Deneubourg, J.L. : "L'Intelligence Collective", *Pour La Science*, N°198, Avril 1994, 90-95 (1994)
- [Theraulaz & Deneubourg 94] - Theraulaz, G., & Deneubourg, J.L. : "Swarm Intelligence in Social Insects and the Emergence of Cultural Swarm Patterns", in: Gardner A., Chiarelli B., Gardner B. & Plooij F., Edits. *The Ethological Roots of Culture*. Proceedings NATO Advanced Study Institute, Cortona, Italy (1994)
- [Wenzel 91] - Wenzel, J. W. "Evolution of nest architecture". In: *Social Biology of Wasps* (Ross, K. G. & Matthews, R.W., eds) pp. 480-521. Ithaca: Cornell University Press (1991)
- [Wilson 75] - Wilson, E.O. : 'Sociobiology', Cambridge, Belknap Press of Harvard University Press, (1975)

Khepera : un outil pour l'étude du hasard et des contraintes dans la genèse des formes collectives

Claude Touzet
DIAM - IUSPIM

Domaine Universitaire de St Jérôme, 13397 Marseille Cedex 20, France
Tél. + 33 91 05 60 60, Fax : + 33 91 05 60 33, Email : diam_ct@vmesa11.u-3mrs.fr

Introduction

L'objectif de cet article est de présenter, succinctement, l'utilisation d'un robot miniature Khepera pour l'étude des interactions hasard/contraintes dans la génération de comportements collectifs. Dans une première partie, nous précisons sur un schéma fonctionnel d'agent autonome les points d'implication du "hasard" et des "contraintes". Nous présentons ensuite un état de l'art rapide des recherches menés autour de ce thème avec un ou plusieurs robots. Il s'agit principalement des approches à base d'algorithmes génétiques (AG) et d'apprentissage par renforcement (RL). Une discussion est débütée sur la possibilité d'inférer des conclusions sur le comportement collectif à partir de résultats sur les comportements élémentaires.

Modèle fonctionnel d'un agent autonome

Le modèle fonctionnel d'un agent autonome (fig. 1) permet de positionner hasard et contraintes.

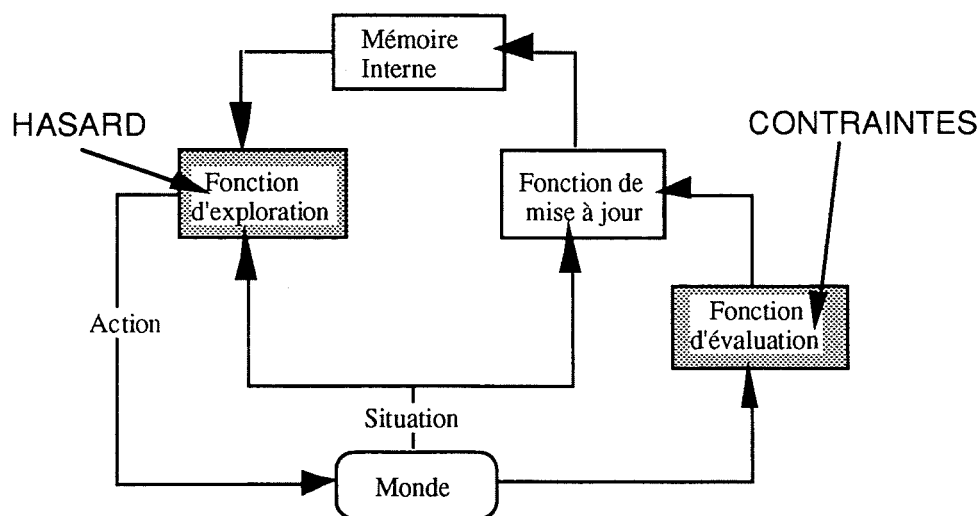


Fig. 1 Modèle fonctionnel d'un agent autonome. Le hasard est pris en compte par la fonction d'exploration alors que les contraintes peuvent être prises en compte par la fonction d'évaluation.

Mémoire interne

Stockage de la connaissance de l'agent, permet de générer des comportements adaptés. Ce stockage peut être réalisé sous formes de "gènes", de réseaux de neurones artificiels, de matrices, de règles de production (floues ou non), etc.

Fonction d'exploration

Cette fonction recherche au vu de la situation du monde et des connaissances disponibles la meilleure action à entreprendre. Afin de ne pas se limiter à des comportements stéréotypés, diverses techniques sont appliquées pour explorer de nouvelles stratégies.

Aujourd'hui, quelque soit l'approche, AG [1] ou RL [3], le hasard (fonction random) est utilisé à plus ou moins grande échelle. Cependant, dans l'objectif de réduire la durée d'acquisition du comportement de nombreux essais ont été effectués. En particulier, l'ajout d'un modèle du monde destiné à prédire la réponse du monde réel (et de la fonction d'évaluation associée). Il est à noter que la part d'aléatoire décroît au fur et à mesure que l'acquisition du comportement est réalisée.

Fonction d'évaluation

Cette fonction note qualitativement le comportement montré par l'agent. Dans le domaine de l'ingénieur, ce sont les lois de "fitness" ou les fonctions de renforcement.

A l'heure actuelle, les fonctions d'évaluation utilisées ne tiennent compte que du comportement que l'on cherche à obtenir. Il n'y a pas présence de contraintes "gratuites" issues de l'environnement. Cependant, les recherches pour comprendre les liens entre le comportement désiré, la fonction d'évaluation et le comportement obtenu débutent. Dans une première étape, des comparaisons entre AG et RL sont à effectuer, pour déterminer la part d'universalité des fonctions d'évaluations dans la synthèses des comportements. L'étape suivante devrait nous amener à la définition plus ou moins automatique des fonctions d'évaluation au vue des comportements recherchés. Cet objectif ne sera cependant atteint qu'à l'occasion de progrès réalisés au niveau de la fonction de mise à jour, aujourd'hui limité au "temporal and credit assignment problems".

Discussion

Les recherches actuellement menées mettent en oeuvre, dans la grande majorité des cas, un seul robot. Savoir si l'on peut immédiatement transposer les résultats acquis ou à venir à une population est une question délicate. En effet, le fait même que l'on parle d'émergence pour caractériser l'apparition d'un comportement collectif à partir de l'interaction de comportements élémentaires montre l'existence d'un changement de niveau de complexité. Les liens entre ces niveaux (agent, population) sont à explorer, mais si nous nous inspirons du paradigme connexionniste, nous pouvons d'ors et déjà nous attendre aux plus grandes difficultés.

L'étude de population d'agents apparaît donc comme une nécessité. Aujourd'hui, un petit nombre de chercheurs ont ouverts la voie. Les populations mettent en oeuvre parfois jusqu'à quelques dizaines d'agents. La coopération est réalisée via l'environnement. Les capacités d'acquisitions comportementales sont extrêmement réduites. Il s'agit donc de travaux précurseurs dont le principal intérêt est de démontrer aujourd'hui la faisabilité d'expérimentations avec des populations de robots dans le monde réel.

Conclusion

En conclusion, nous voudrions revenir sur l'importance de l'expérimentation dans le monde réel par rapport à la simulation. Par le passé, la simulation a été d'un immense secours, permettant la mise au point des algorithmes (surtout les fonctions de mises à jours et l'implantation de la mémoire interne) en l'absence d'outil expérimental [2]. Aujourd'hui, les outils expérimentaux sont disponibles. De plus, les difficultés liées à la réalisation d'un environnement de simulation suffisamment réaliste pour autoriser la découverte de résultats non initialement intégrés à la plate-forme ne justifie plus le seul usage de la simulation. Nous pouvons prédire que de travaux expérimentaux nombreux, nous fournirons sans aucun doute des environnement de simulation plus réalistes.

Références

- [1] J. Biondi & O. Michel, ce volume.
- [2] F. Mondada & P. Verschure, "Modeling system-environment interaction: The complementary roles of simulations and real world artifacts," ECAL 93, Brussels, Belgique, Mai (1993).
- [3] C. Touzet, apprentissage par renforcement neuronal d'un comportement d'évitement d'obstacles pour le mini-robot Khepera, " Journées de Rochebrune 1994.

Variation et Auto-Organisation à l'Intérieur du Robot: Le Cas d'un Modèle de Fréquences Propres

Elpida Tzafestas

LAFORIA-IBP, Université Pierre et Marie Curie,
4, Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.
brensham@laforia.ibp.fr

Résumé. Les architectures de contrôle comportemental algorithmique présentent une rigidité structurale qui rend la robustesse aux pannes de matériel un problème important lorsqu'il s'agit d'implémentation distribuée. Nous présentons ici une extension d'une architecture cellulaire de base pour le cas d'un système périphérique de navigation qui doit démontrer une telle plasticité. L'extension consiste à équiper chacune des cellules de multiples "motivations" de traiter/consommer les messages de types différents et à supprimer toutes les connexions fixes de manière que les cellules soient en compétition pour la consommation des messages. Les motivations individuelles sont exprimées comme variables continues qui sont excitées par les valeurs d'identification des messages en entrée, c'est-à-dire comme fréquences propres. Parallèlement, on a défini deux types de messages: les messages normaux qui sont consommés par les cellules et les messages catalytiques qui déclenchent la consommation des autres messages chez les cellules excitées. Quelques résultats de simulation indiquent que la variation génétique permet au réseau cellulaire de s'auto-organiser en "découvrant" des voies alternatives de flot de messages et que plusieurs pannes ralentissent la réactivité du système aux événements extérieurs, puisque les cellules des niveaux intermédiaires ne sont plus spécialisées au traitement d'un seul type de messages, mais partagent leur temps entre plusieurs motivations internes. Un facteur supplémentaire développemental/ontogénétique permet l'auto-organisation même dans le cas de pannes majeures dans le réseau, quand une des fréquences propres nécessaires pour le fonctionnement du système disparaît complètement du réseau.

1 Introduction

Les architectures de contrôle comportemental de robots (*behavior-based control*) sont généralement classifiées en deux grandes catégories: l'algorithmique et le connexionnisme; la première est celle où la méthode de résolution du problème (tâche robotique) est donnée d'avance et le système de contrôle est bâti là-dessus, tandis que la deuxième suppose une "a priori connaissance" limitée qui fait que le système de contrôle doit apprendre tout seul quel est le problème et converger à sa résolution (exemples typiques des deux approches sont l'architecture de subsomption (Brooks 1986) et le contrôle adaptatif distribué de Verschure et al. (1992)). Steels (1994) a identifié deux approches architecturales supplémentaires, les approches de circuit et les approches dynamiques. Sans entrer dans trop de détails, nous pouvons dire que les approches de circuit sont des approches essentiellement algorithmiques où le but est d'assurer un minimum de fonctionnalité de base qui pourrait être implémenté en électronique traditionnelle; de leur côté, les approches dynamiques ne font pas d'hypothèses sur la fonctionnalité élémentaire du réseau de composants, autres que la nécessité de traiter des variables continues afin de pouvoir recourir à la théorie des systèmes dynamiques quant à l'analyse du système de contrôle, qu'il soit algorithmique ou connexionniste. En nous penchant de plus près sur la différence entre l'algorithmique et le connexionnisme, nous constatons qu'en effet il ne s'agit que d'une différence d'échelle: l'algorithmique cherche la minimalité en vue d'un problème donné, tandis que le connexionnisme cherche la minimalité en vue d'une classe de problèmes. Cette différence reste large tant qu'on ne sait pas encore caractériser exactement ce qu'il faut ajouter dans le cas de l'algorithmique pour résoudre un problème voisin de celui traité et ce qu'il faut supprimer dans le cas du connexionnisme pour résoudre une instance particulière de la classe des problèmes. L'algorithmique reste ainsi efficace mais

structurellement rigide, tandis que le connexionnisme démontre de la plasticité structurale au détriment de l'efficacité.

Nous nous plaçons ici dans l'approche algorithmique et nous essayons d'y introduire suffisamment de plasticité afin d'élargir son domaine d'application et pouvoir dans le futur analyser la classe des problèmes qu'elle sait résoudre. La plasticité est alors considérée comme la redondance et est analysée ici de point de vue "négatif": quelle genre de redondance nous faut-il pour que le système de contrôle réussisse à résoudre le problème donné en dépit de pannes de matériel¹ et quelle cascade de pannes on devrait avoir pour anéantir l'opérationnalité du système de contrôle? Dans le futur nous allons aussi analyser cette même redondance de point de vue "positif": s'il n'y a pas de pannes, à quoi cette redondance pourrait servir et qu'est-ce qui faudrait pour que le système de contrôle "découvre" de nouveaux problèmes à résoudre, c'est-à-dire qu'il élargisse la classe de problèmes qu'il sait traiter?

Nous donnons dans le paragraphe suivant une esquisse de l'architecture cellulaire (Tzafestas 1994) qui nous sert de base de conception (autrement dit programmation) d'un système de contrôle pour un robot simulé et nous présentons ensuite un modèle étendu de cellule qui démontre de redondance. L'exemple que nous avons adopté est celui d'un système périphérique de navigation qui fusionne l'information fournie par ses capteurs d'obstacles avec la direction de navigation et éventuellement avec une direction de trace à suivre. L'extension architecturale consiste à équiper chacune des cellules de multiples "motivations" de traiter/consommer les messages de types différents et à supprimer toutes les connexions fixes de manière que les cellules soient en compétition pour la consommation des messages. Les motivations individuelles sont exprimées comme variables continues qui sont excitées par les valeurs d'identification des messages en entrée, c'est-à-dire comme fréquences propres. Parallèlement, on a défini deux types de messages: les messages normaux qui sont consommés par les cellules et les messages catalytiques qui déclenchent la consommation des autres messages chez les cellules excitées. Dans le paragraphe 4 nous donnons quelques résultats de simulation qui montrent que la variation génétique permet au réseau cellulaire de s'auto-organiser en "découvrant" des voies alternatives de flot de messages et que plusieurs pannes ralentissent la réactivité du système aux événements extérieurs, puisque les cellules des niveaux intermédiaires ne sont plus spécialisées au traitement d'un seul type de messages, mais partagent leur temps entre plusieurs motivations internes. Un facteur supplémentaire développemental/ontogénétique permet l'auto-organisation même dans le cas de pannes majeures dans le réseau, quand une des fréquences propres nécessaires pour le fonctionnement du système disparaît complètement du réseau.

2 Contrôle cellulaire

L'approche cellulaire a été adoptée comme une instanciation plus structurée du paradigme comportemental dans la problématique de révéler des principes de conception tant pour les niveaux élémentaires de comportement que pour les interfaces entre comportements. L'idée est de disposer d'un répertoire de composants primitifs qu'on sera ensuite capable de combiner afin de construire de structures de niveau plus élevé. Nous focalisons ici sur l'aspect purement

¹ N'oublions pas que dans les organismes vivants sains, comme dans un corps humain, il y a des cellules qui meurent tous les jours: malgré ce mécanisme de dégradation naturelle, les organismes arrivent à survivre et même à améliorer leur fonctionnement. Pour un observateur de haut niveau, tel qu'un éthologiste, l'algorithme de fonctionnement n'est pas atteint par ces "pannes" localisées de bas niveau. L'implémentation d'un système de contrôle sur un matériel distribuée devrait démontrer la même propriété.

structural de l'architecture; les thèmes de l'arbitrage entre comportements et de l'adaptation sont traités plus à fond dans (Tzafestas 1994).

La cellule est l'unité élémentaire de stockage et de traitement d'information. Une cellule représente et correspond à une pièce électronique douée d'une possibilité minimale de stockage et de traitement. Elle possède un ensemble de connexions d'entrée, un ensemble de connexions de sortie, un vecteur-mémoire statique ou dynamique et une unité de traitement qui correspond à une fonction de transfert plus la possibilité de mise-à-jour du vecteur mémoire comme effet de bord (adaptation). Les cellules sont alors des primitives structurales différenciées par conception ou par adaptation dans un milieu particulier et définissent un substrat uniforme à partir duquel des agrégats complexes sont construits. La complexité de la cellule se situe entre celle du neurone simulé (modèle McCulloch-Pitts) et celle du machine à états finis augmentée avec des variables (AFSM, Brooks 1986), puisque la fonction de transfert varie de cellule à cellule mais implique exclusivement des variables numériques et pas des états symboliques. Les cellules possèdent encore un temps interne d'exécution qui peut être contrôlable par le concepteur.

Chaque cellule appartient à une catégorie fonctionnelle de cellules. On distingue trois types de cellules, les cellules-capteurs, les cellules-actionneurs et les cellules de traitement. Les cellules-capteurs et actionneurs sont responsables pour les opérations primitives de perception ou d'action. Les catégories des cellules de traitement selon leurs fonctions de transfert incluent: cellules *min*, *max* et *find-a-stimulus* (qui sortent respectivement l'entrée minimale, maximale ou la première non-vide), cellules *time-out* et *cellules-priorité* (dont les entrées sont ordonnées de façon statique ou dynamique et celle de plus grande priorité est sortie). Il y a encore trois types spéciaux de cellules de traitement: les *cellules-décodeurs* (qui font partie des systèmes périphériques des actionneurs), les *cellules d'éveil* et les *cellules-d'observation* (ces deux derniers types sont utilisés dans les systèmes d'éveil de tâche, voir plus bas).

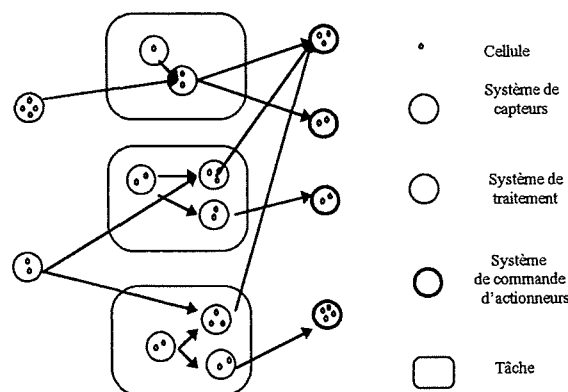


Fig. 1. Le réseau cellulaire

Pour gérer la complexité du réseau, on a défini une structure de trois niveaux imbriqués (fig.1). Les cellules sont regroupées dans des *agrégats* cellulaires et les ensembles d'agrégats forment des *tâches* (les tâches correspondent aux comportements -behaviors- qu'on trouve dans la littérature). Les agrégats sont des ensembles de cellules qui collectivement accomplissent une "fonction" particulière de perception, action ou traitement intermédiaire; on a alors respectivement des *systèmes de perception*, des *systèmes de commande-d'actionneurs*, des *systèmes de traitement* et des *systèmes d'éveil*. Les systèmes de perception consistent d'un ensemble de cellules-capteurs corrélées logiquement mais non-interconnectées et peuvent appartenir à une tâche particulière ou être partagés par plusieurs tâches. Les systèmes de commande-d'actionneurs sont partagés et leur structure générale est donnée dans fig. 2. La

cellule-décodeur combine les entrées des capteurs-réflexes avec les entrées des tâches connectées et envoie la commande calculée à l'actionneur correspondant. En effet, le décodeur a généralement comme rôle d'assurer que la commande en entrée n'est pas incompatible avec les entrées-réflexes qui agissent comme des contraintes. Cette structure permet de *découpler l'action du réflexe*, c'est-à-dire de découpler les commandes de haut niveau émises par les tâches des contraintes de bas niveau créées par les capteurs-réflexes. Ce schéma est différent des autres approches comportementales rencontrées dans la littérature (Arkin 1987, Brooks 1986) et a comme conséquence qu'il n'y a plus besoin de "subsumer" les réflexes et alors de complexifier les interfaces entre tâches. La résolution de ces conflits élémentaires est ouverte au concepteur du système périphérique (voir l'exemple du paragraphe 4). Enfin, chaque tâche comporte un système d'éveil (non-visualisé dans fig. 1) dont le rôle est d'activer la tâche quand il faut et de jouer le rôle d'interface avec les autres tâches. Une tâche possède alors un système d'éveil, des systèmes de traitement et éventuellement des systèmes privés de perception. Les systèmes de traitement sont connectés en entrée aux systèmes de perception ou à d'autres systèmes de traitement et en sortie aux systèmes de commande-d'actionneurs. À noter que *le niveau de la cellule est le seul niveau d'exécution, tandis que les niveaux de l'agrégat et de la tâche sont utiles uniquement pour la conception et l'observation/évaluation.*

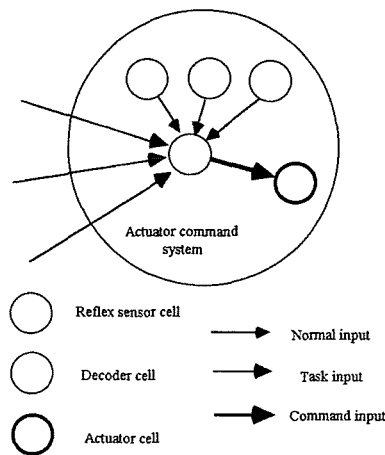


Fig. 2. Un système de commande-d'actionneurs

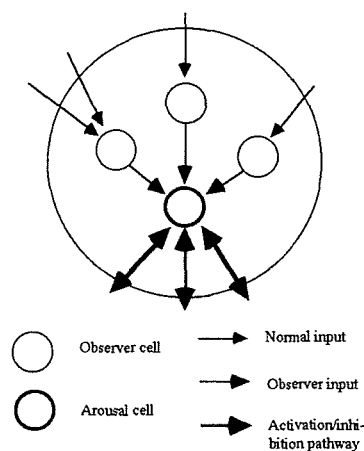


Fig. 3. Un système d'éveil

L'arbitrage entre tâches obéit au principe de séparation et nécessite deux niveaux de composition. Le traitement des informations relatif à une tâche particulière est séparé tant de la

structure d'arbitrage que de la structure de commande qui incorpore les réflexes. Ainsi, divers algorithmes réactifs peuvent être développés séparément et intégrés dans des contextes différents en définissant seulement les interfaces nécessaires à chaque fois, c'est-à-dire les systèmes d'éveil. L'arbitrage se fait soit au niveau du système d'éveil soit au niveau du système de commande-d'actionneurs; dans le premier cas, l'arbitrage concerne des interactions qui peuvent être vues et gérées de façon distribuée par les tâches (telles que flot d'activation, des tâches mutuellement exclusives ou activables en série etc.), tandis que dans le deuxième cas il concerne des interactions qui doivent être gérées de manière plus centralisée (par exemple des tâches ayant des priorités différentes ou dont les commandes doivent être fusionnées etc.).

Relation avec le connexionnisme et le grain comportemental d'activité. Chaque cellule est un point de traitement uniforme des informations en entrée: aucune entrée n'est donnée un soin particulier. Les cellules-décodeurs et les cellules d'observation font l'exception à cette règle et correspondent au points de cyclicité du réseau cellulaire -autrement, la structure de l'activité (tâches) reste acyclique (feedforward). *La structure cellulaire peut alors être vue comme une structure connexionniste typée*, où l'utilisation de primitives réactives de plus haut niveau (min, max etc.) que celle utilisée par le connexionnisme traditionnel, permet à la fois de conserver une clarté de spécification et d'analyse et de gérer la complexité. Généralement, la structure de chaque tâche reproduit un algorithme réactif à couches d'activité et ces algorithmes sont combinés et intégrés à l'aide des deux niveaux de composition. On a identifié comme grain d'activité celui de l'activité homéostatique qui permet un arbitrage simple et localisé dans le réseau. Ceci ne fait aucune hypothèse sur la profondeur d'une tâche homéostatique; on peut très bien avoir dans le même réseau des tâches rapides de survie et des tâches lentes de grande profondeur de traitement, par exemple pour la surveillance des parties du réseau. C'est cette possibilité de monter récursivement plusieurs niveaux de représentation en reliant les tâches les unes aux autres en entrée ou sortie qui présente un grand potentiel de recherche sur les capacités cognitives des agents cellulaires.

3 La cellule motivée

L'architecture cellulaire est alors organisée de façon hiérarchique par des couches successives de cellules qui correspondent à des étapes algorithmiques différentes. Supposons le niveau cellulaire intermédiaire de la fig. 4. Nous cherchons des principes de redondance pour le cas de pannes de matériel.² Supposons maintenant que la cellule A tombe en panne. L'algorithme ne peut continuer à fonctionner que si une autre cellule, par exemple B, entreprend le rôle de A. Ceci est possible si les trois propositions suivantes sont vraies.

- B peut exécuter la fonction de transfert de A,
- B peut reconnaître et traiter les messages traités par A auparavant, et
- B peut continuer à accomplir sa fonction précédente bien d'avoir entrepris également le rôle de A.

Pour que les deux premières propositions soient vraies, les cellules doivent inclure plus d'une seule "pulsion" interne (ou *drive* -terme emprunté à la littérature de comportement animal, par exemple Toates 1986) qui sont des composants indépendants autonomes correspondant aux divers rôles cellulaires. Chacun de ces drives possède une template d'identification qui est comparée aux templates des messages disponibles en entrée. Les messages ont alors deux

² Cette discussion n'a de sens que dans le cas d'une implémentation distribuée des cellules en matériel; l'approche habituelle de simulation du système distribuée de contrôle du robot sur un ordinateur embarqué ne présente pas ce besoin de gestion de pannes mais en revanche nécessite de plus grands efforts de synchronisation.

parties: la partie template d'identification et la partie donnée. Pour contourner la rigidité des messages symboliques (point aussi relevé par Schöner et Engels (1994)), on a défini les valeurs des deux parties comme des nombres réels et on a introduit un degré de résistance au bruit en ce qui concerne le matching des templates. Les templates reconnues par les divers drives ne sont alors que des fréquences propres situées dans l'échelle des valeurs permises (ici l'intervalle de -1 à 1). La troisième proposition est vraie si les cellules peuvent contenir plusieurs drives qui exécutent en parallèle.

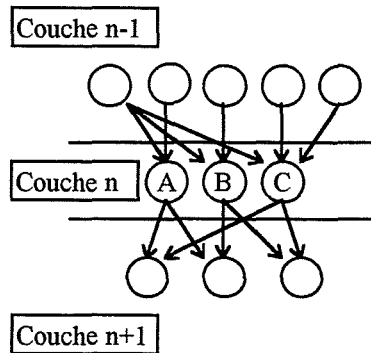


Fig. 4. Une structure cellulaire de trois niveaux

Pour gérer l'éveil et l'exécution des drives, nous avons aussi introduit un paramètre supplémentaire de *productivité/vitesse* pour chaque drive, qui exprime le rythme de balayage des messages en entrée. Chaque drive a une vitesse minimale, une vitesse maximale et un taux de modification de vitesse (augmentation ou diminution) selon la présence ou l'absence d'excitation:

$$\text{vitesse}(t+1) = \text{vitesse}(t) + s_taux * (\text{vitesse_finale} - \text{vitesse}(t))$$

où *vitesse_finale* est la vitesse maximale si le drive est stimulé (c'est-à-dire s'il y a des messages qu'il sait consommer), sinon la vitesse minimale. Selon cette loi simple d'adaptation, la vitesse de chaque drive converge vers la vitesse maximale ou minimale s'il est constamment stimulé ou non-stimulé, ou oscille entre ces deux limites si la stimulation est irrégulière. Nous supposons encore que la cellule possède une *productivité/vitesse* totale maximale, ce qui fait que des drives vivement stimulés et actifs ayant une tendance à augmenter leur vitesse locale vont entrer en compétition pour les ressources cellulaires, c'est-à-dire pour des portions de la *productivité* totale de la cellule. Les drives consomment des messages selon leurs vitesses internes, de manière que, étant donné suffisamment de variation génétique en vitesses, les drives les plus forts (ou productifs ou rapides) vont dominer la compétition en consommant les premiers les messages qui les excitent tandis que les autres drives vont tomber à leur limite inférieure.

Tâchant de rendre tous les messages également disponibles à toutes les cellules, nous pouvons supposer une connectivité tous-à-tous entre niveaux successifs: cela conduirait à des effets d'inconsistance et des goulots d'étranglement importants, puisque le même message serait généralement traité à plusieurs endroits, et le mécanisme de compétition ne fonctionnerait pas. Pour pallier ce défaut nous avons supprimé les connexions entre niveaux et à leur place nous avons défini des buffers partagés de messages où les instances uniques des messages produits par les cellules du niveau précédent sont placées. De plus, les messages qui nécessiteraient vraiment d'être répliqués dans différentes cellules ou drives (ceux qui dans le cas minimal non-redondant excitent plusieurs cellules) sont définis comme des catalytes, c'est-à-dire des messages non consommés mais simplement "consultés" par les drives: en réalité, les drives font des copies locales de ces messages.

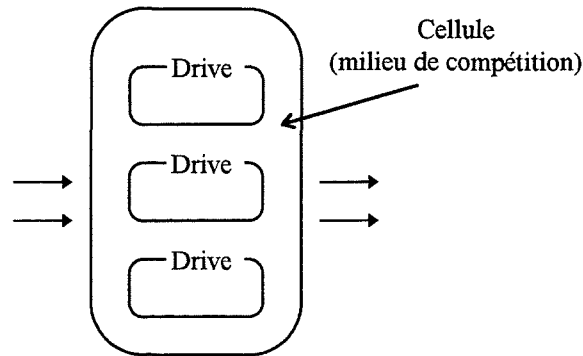


Fig. 5. Le système de la cellule

Finalement, pour permettre au réseau de récupérer de multiples pannes de plus grande échelle, on a introduit un paramètre supplémentaire développemental/ontogénétique qui “pousse” lentement les fréquences propres des drives non-actifs vers les fréquences propres des messages non traités:

$$\text{fréquence_propre}(t+1) = \text{fréquence_propre}(t) + e_taux * \text{moyenne_des_fréquences_propres_non_utilisées}(t)$$

Le paramètre s_taux doit être très élevé par comparaison au e_taux pour éviter “l’aliénation” des drives en cas de non-excitation.

On peut résumer le modèle précédent comme suit (voir aussi fig.s 5 et 6):

- Chaque cellule est aussi un système de drives autonomes qui sont en compétition pour l’utilisation des ressources cellulaires; la cellule a une productivité maximale bornée et constante.
- Chaque drive est excité par des fréquences propres qui doivent être identiques aux templates d’identification des messages consommables ou catalytes. Quand un drive est excité, il exécute sa fonction de transfert qui peut être vue comme une fonction métabolique qui transforme les messages d’entrée en messages de sortie. Il n’y a pas de connexions entre niveaux, mais des buffers partagés de messages visibles de toutes les cellules de ce niveau; les messages sont consommés par les drives les plus rapides (ou gourmands!).

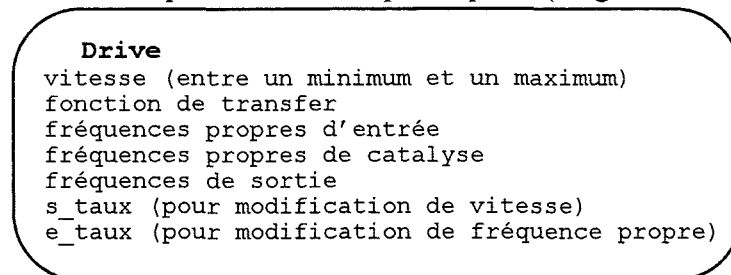


Fig. 6. Le modèle de drive

- Les drives se catalysent eux-mêmes quand ils exécutent, en augmentant leur productivité locale jusqu’à un maximum tant que leur stimulation persiste. Leur productivité baisse avec le même taux quand ils ne sont pas stimulés. Cela ressemble le mécanisme de régulation catalytique qui se trouve dans les vraies cellules biologiques et qui est principalement dû aux protéines allostériques (Monod (1970), Vogel & Angermann (1994)).
- Un facteur supplémentaire développemental/ontogénétique pousse lentement les fréquences propres non-excitées vers la moyenne des fréquences propres des messages non-traités. Le taux de cette modification est extrêmement bas, afin d’éviter l’aliénation des drives.
- La robustesse du système aux pannes et au bruit est principalement due à la présence de potentiellement grandes variations génétiques des variables qui expriment les fréquences

propres, les vitesses et les taux d'adaptation (*"The real cause of stability in a distributed system is sufficient diversity"*, Hogg & Huberman (1993)).

4 Démonstration: Navigation

Nous avons démontré en simulation le potentiel auto-organisationnel du modèle pour le cas d'un système de navigation d'un robot autonome équipé de 4 capteurs d'obstacle (devant, derrière, à droite et à gauche) qui doit se diriger vers un point but donné en suivant une trace sur le sol, si cette trace existe. Le système de contrôle algorithmique est donné dans la fig. 7 et fusionne l'information sur le but avec l'information des capteurs de trace et d'obstacles. Nous supposons que la direction du but est fournie par d'autres parties du réseau (les systèmes de traitement des tâches, comme décrit dans le paragraphe 2), tandis que la direction de la trace est donné par un ou plusieurs capteurs organisés comme les capteurs d'obstacles. Dans la fig. 7, les quatre cellules "diff" de gauche comparent la direction d'entrée à la sortie du capteur correspondant et donnent une valeur de saturation si un obstacle est perçu; les quatre cellules "diff" de droite font la même chose mais pour la direction de la trace. Les cellules du niveau suivant calculent la somme des différences fournies par le niveau plus haut; cette somme exprime la déviation totale de la direction correspondante depuis la direction désirée et celle de la trace. Finalement, la cellule-décodeur qui gère le moteur choisit parmi les messages du niveau précédent celui qui propose la déviation minimale. Les messages qui voyagent aux connexions sont des nombres réels: les directions prennent une des trois valeurs 0, 0.25, -0.25, 0.5 qui correspondent au devant, à gauche, à droite et derrière respectivement. La valeur de saturation est définie comme 100, afin que les messages qui arrivent au décodeur et dont les valeurs dépassent 1 puissent être éliminés.

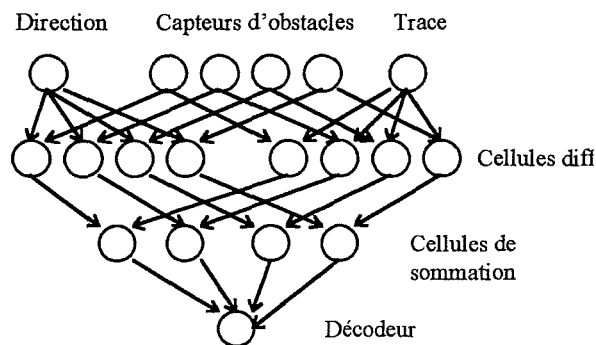


Fig. 7. Le système algorithmique de navigation

Le réseau auto-organisant correspondant est visualisé dans fig. 8. Les ensembles des connexions entre les premiers trois niveaux ont été remplacés par des buffers partagés, tandis que les connexions entre les cellules de sommation et le décodeur sont restées intactes.

Étant donné l'algorithme de navigation ci-dessus, on a trouvé naturel d'adopter comme fréquences propres les mêmes valeurs qui sont utilisés pour la discrimination des directions: 0, 0.25, -0.25 et 0.5. Ce schéma présente un avantage supplémentaire: la direction envoyée au moteur par le décodeur est la fréquence propre du message choisi (c'est-à-dire du message qui correspond à la déviation minimale). Les drives des cellules "diff" tout comme ceux des cellules de sommation nécessitent deux fréquences propres d'entrée, afin de fusionner deux messages en entrée en prenant la différence ou la somme respectivement.

Les messages de direction et de trace doivent être partagés entre toutes les cellules "diff", alors on les a définis comme des catalytes. Ceci correspond à la notion biologique/chimique de catalyse, où les messages consommables sont ignorés si les catalytes ne sont pas présents. Dans

notre cas de navigation, ceci signifie que les messages des capteurs d'obstacles sont ignorés s'il n'y a pas de direction donnée de but ou de trace. Cet algorithme d'attraction-par-un-but-en-suivant-une-trace est conçu pour le cas d'obstacles statiques, c'est-à-dire dans un monde inconnu mais pas hostile. Par construction, l'algorithme est tel que les directions (fréquences propres) pour lesquelles il n'existe pas de messages sont ignorées; si aucun des messages sur le côté gauche n'arrive au décodeur à temps, il n'y aura aucun mouvement vers la gauche, même si c'est permis.

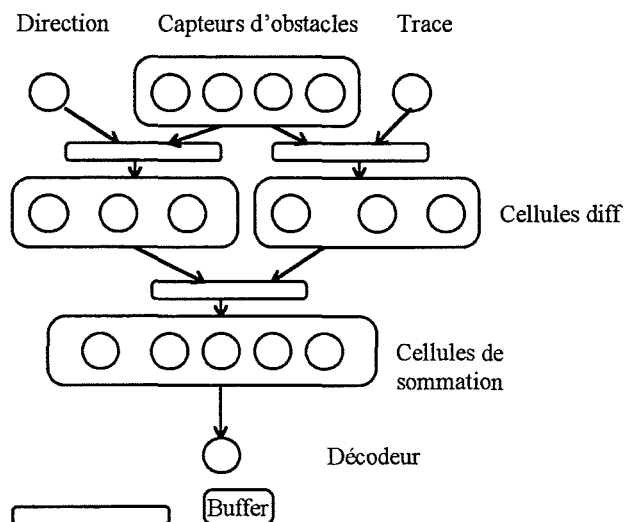


Fig. 8. Le système auto-organisant de navigation

Expérience 1. Réseaux sains. Nous avons simulé le fonctionnement du système de navigation pour 3 à 5 cellules dans chacun des ensembles "diff" et sommation. Chaque cellule était douée de 1 à 3 drives avec des fréquences propres choisies parmi les 4 fréquences fondamentales. Les vitesses minimales et maximales ont été prises au hasard entre (0, 0.2) et (0.8, 1) respectivement, tandis que les taux d'adaptation de vitesse et de fréquence propre ont pris des valeurs aléatoires entre (0, 1) et (0, 0.05) respectivement. Pour éviter que des messages obsolètes arrivent au décodeur, chaque fois qu'un mouvement était fait tous les messages dans les buffers partagés ou privés étaient tués (ceci correspond à une entrée supplémentaire de "reset" de cellule). Dans tous les cas et gardant un taux constant d'échantillonnage des capteurs d'obstacles, le réseau s'est stabilisé rapidement (dans moins de 10 cycles) à une configuration où 2 ou 3 cellules dans chaque ensemble étaient actives, c'est-à-dire qui avaient des drives exécutant à des vitesses près de leur maximum, avec le reste des cellules étant dormantes, c'est-à-dire à vitesse minimale. Un phénomène inattendu a été observé lors des simulations, dû au fait que les obstacles sont exclusivement statiques: en effet, il n'y a jamais eu des drives actifs pour les fréquences propres de 0.5. La raison en est que le robot simulé n'a jamais un obstacle derrière, même quand il tourne le dos à un obstacle, il le fait en s'en éloignant un petit peu, de manière que le capteur d'obstacle derrière, qui n'est actif que quand un obstacle est vraiment trop près, va toujours donner 0.

Expérience 2. Des lésions légères. Une fois le système s'est stabilisé à une configuration de drives, nous avons enlevé une des cellules qui contenait des drives actifs. Encore une fois, il a fallu au robot simulé seulement quelques cycles pour se re-stabiliser à une nouvelle configuration; en fait, le processus d'auto-organisation n'est guère distinct de l'activité normale du réseau, alors le système n'a pas arrêté pour apprendre la nouvelle configuration avant de continuer. Au lieu de cela, le système de navigation a continué de travailler comme avant même si la direction affectée par la blessure n'arrivait plus au décodeur à temps. Il a fallu

quelques cycles encore avant que le réseau redevienne sensible aux messages qui réfèrent à la direction affectée.

Expérience 3. Une blessure grave. Ensuite, nous avons enlevé tous les drives du niveau "diff" qui étaient excités par une fréquence propre donnée. Comme avant, le système de navigation est devenu "aveugle" à la fréquence disparue, mais cette fois il a fallu 5-6 centaines de cycles avant qu'un nouveau chemin soit découvert, c'est-à-dire avant qu'un des drives non utilisés (en effet, le plus instable/changeant!) converge à cette fréquence. Ceci constitue une conséquence attendue du fait que le e_{taux} est faible, qui nécessite une stimulation persistante du réseau pour assurer la re-convergence à une configuration stable. À noter encore que le temps total de voyage de messages depuis les points d'entrée (capteurs, direction et trace) jusqu'au moteur a augmenté après la blessure, parce que les cellules restantes ont eu à distribuer leur productivité entre des drives différents; ceci nous rappelle ce qui se passe dans les organismes vivants, tels que les animaux, où après récupération des blessures du système nerveux les performances sont baissées en termes de vitesse (notre expérience et étude de blessures ressemble celle menée par Beer (1990)).

5 Propriétés du modèle

Le modèle introduit de cellule motivée, qui constitue une extension du modèle d'unique et uniforme fonction de transfert présenté brièvement dans le paragraphe 2, diffère des modèles classiques de neurone en deux aspects fondamentaux:

- Il n'y a pas de connexions entre cellules, mais les cellules "flottent" dans un milieu commun et partagent des buffers de messages avec des autres cellules, et
- Les cellules répondent aux messages à leur propre rythme et selon des motivations/préférences locales. Elles ne sont pas de simples "machines à input" et alors des machines manipulables, mais possèdent un degré d'autonomie individuelle.

Tout comme les modèles connexionnistes cependant, les cellules s'adaptent de manière continue et en parallèle avec l'activité, c'est-à-dire les phases d'apprentissage et d'action ne sont pas séparées (non seulement le robot s'adapte sans un superviseur, mais il n'a aucune idée qu'il s'adapte). La mémoire du système est de terme moyen, alors il ne montre pas les problèmes habituels d'oubli et de mémoire à court terme. Si jamais il doit oublier, il oubliera! Ce processus d'adaptation repose sur des paramètres endogènes et ne dépend pas d'un maître bienveillant qui aurait à préparer les données d'apprentissage, choisir le langage et le niveau d'abstraction des représentations (van de Welde (1991) a insisté sur le besoin de repenser sérieusement ces questions). Si on utilise les critères de performances de Kaelbling (1991), le modèle présenté est attendu de *converger* à une configuration *correcte* en utilisant un mode d'adaptation d'une *complexité spatio-temporelle constante*. N'oublions pas, pourtant, que le robot n'apprend rien de nouveau sur son environnement, mais seulement comment mieux utiliser son potentiel inné; une étude de dimensionnement aux problèmes d'apprentissage - topologique ou autre- reste à faire.

Ce modèle laisse de la place à l'introduction des *variations génétiques* et à l'émergence de division de travail entre cellules qui en résulte. En plus, un tel réseau de cellules motivées reste largement compréhensible et dans le cas de pannes majeures un ingénieur peut intervenir directement au niveau du drive et mettre à jour le système manuellement, puisque le caractère algorithmique de l'activité/traitement de messages est conservé. Dans ce sens, *la variation permet l'auto-organisation qui assure la stabilité qualitative, c'est-à-dire l'opérationnalité algorithmique*. En outre, la nature continue tant des fréquences propres que des données

permettra de tenter une analyse dynamique de tels réseaux. Les taux d'adaptation et les vitesses minimales/maximales peuvent aussi être définis comme variables au cours de la vie du robot; on peut imaginer des taux décroissants d'adaptation qui rendront le robot de moins en moins robuste aux pannes et des limites de vitesse décroissantes qui rendront le robot de moins en moins productif.

Le comportement temporel du réseau est tel qu'il est assuré de converger à une configuration stable en cas de stimulation continue et de toutes façons il va "suivre" tout régime "capricieux" de stimulation en accord avec ses motivations internes. Le comportement cellulaire auto-catalytique rend aussi le robot paresseux (il travaille à vitesse faible) en l'absence de perturbations importantes, mais permet à sa productivité de monter rapidement quand elle est stimulé. Ce comportement auto-régulant de la cellule démontre aussi l'importance du temps comme un paramètre important de conception (des observations semblables quant au temps peuvent se trouver dans la littérature des réseaux de neurones dynamiques, par exemple Husbands et al. (1993), Yamauchi & Beer (1994)). Tant que le réseau fonctionne sous des conditions initiales aléatoires ou peu après l'occurrence des blessures, le comportement du robot simulé apparaît comme non-coordonné et sous-optimal.

6 Conclusion et perspectives

Nous avons exposé brièvement une architecture cellulaire algorithmique et la philosophie derrière la robustesse aux pannes et l'auto-organisation. On a démontré que pour permettre la redondance dans le réseau cellulaire, il a été nécessaire de faire deux extensions majeures: i) introduction des motivations/préférences locales dans les cellules et qui sont exprimées de manière uniforme comme fréquences propres d'excitation, et ii) remplacement des connexions entre niveaux par des buffers partagés de messages. Une autre extension consiste à définir deux types de messages, les messages habituels qui sont consommés et les messages catalytiques dont la seule présence suffit pour déclencher chez les cellules excitées la consommation des autres messages. Quelques résultats de simulation ont révélé que le réseau cellulaire s'auto-organise en cas de pannes en découvrant des chemins alternatifs de flot de messages et que des pannes multiples ralentissent la réactivité du système aux événements extérieures, puisque les cellules des niveaux intermédiaires ne sont plus spécialisées à un type de message mais partagent leur temps entre plusieurs motivations. De plus, la présence d'un facteur supplémentaire développemental/ontogénétique permet l'auto-organisation même dans le cas de pannes majeures dans le réseau, c'est-à-dire quand une fréquence propre disparaît complètement du réseau.

À noter que la cellule motivée est par définition "coopérative" et va essayer de se stabiliser à une fréquence nouvelle même si cette fréquence est détrimentale pour l'intégrité du réseau, par exemple si les capteurs sont en panne et sortent tous des messages avec la même fréquence d'identification. Dans ce cas ce qui est nécessaire, c'est un système immunitaire qui va surveiller et réguler l'adaptation "sociale" des autres cellules que ce soit par exemple en termes de valeurs de fréquences propres ou de quantité de messages d'un certaine fréquence. Pour que l'ensemble de deux systèmes (celui de traitement proprement dit et le système immunitaire) soit consistant et non-manipulable, la population des fréquences doivent être développés par l'agent (ou robot) lui-même au cours de sa vie. La suite du travail présenté se situe alors dans cette double problématique d'immunologie et de développement robotique.

Bibliographie

- R. C. Arkin (1987). Motor-schema based mobile robot navigation, *International Journal of Robotics Research*, 8(4):92-112, 1989.
- R. Beer (1990). *Intelligence as adaptive behavior - An experiment in computational neuroethology*, Academic Press, San Diego, CA, 1990.
- R. A. Brooks (1986). A robust layered control system for a mobile robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1):14-23, 1986.
- T. Hogg, B. A. Huberman (1993). Better than the best: The power of cooperation, in L. Nadel and D. Stein (Eds.), *SFI 1992 Lecture Notes in Complex Systems*, pp. 163-184, Addison-Wesley, 1993.
- P. Husbands, I. Harvey, D. Cliff (1993). Analysing recurrent dynamical networks evolved for robot control, *Cognitive Science Research Paper 265*, Univ. of Sussex, Jan. 1993.
- L. P. Kaelbling (1991). Foundations of learning in autonomous agents, *Robotics and Autonomous Systems*, 8(1991):131-144.
- J. Monod (1970). *Le hasard et la nécessité - Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Éditions du Seuil, Paris, 1970.
- G. Schöner, C. Engels (1994). Dynamic field architecture for autonomous systems, pp. 242-253, *Proceedings 1994 Perception to Action Conference (PerAc'94)*, Lausanne, September 1994.
- L. Steels (1994). The artificial life roots of artificial intelligence, *Artificial Life*, 1(1&2):75-110, Fall 1993/Winter 1994.
- F. Toates (1986). *Motivational systems*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1986.
- E. S. Tzafestas (1994). A cellular control architecture for autonomous robots, *Proceedings of the 1994 International Workshop on Intelligent Robotic Systems*, Grenoble, July 1994, pp. 70-79.
- W. Van de Velde (1991). Toward learning robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 8(1991):1-6.
- P. M. F. J. Verschure, B. J. A. Kröse, R. Pfeifer (1992). Distributed adaptive control: The self-organization of structured behavior, *Robotics and Autonomous Agents*, 9(1992):181-196.
- G. Vogel, H. Angermann (1994). *Atlas zur Biologie*, Deutscher Taschenbuch Verlag, 1984, french edition "*Atlas de la Biologie*", Librairie Générale Française, Paris, 1994.
- B. M. Yamauchi, R. D. Beer (1994). Sequential behavior and learning in evolved dynamical neural networks, *Adaptive Behavior*, 2(3):219-246, Winter 1994.

Index des auteurs

<i>P. Alas</i>	87
<i>Hughes Bersini</i>	9
<i>J. Biondi</i>	23
<i>Eric Bonabeau</i>	165
<i>François Bourdon</i>	29
<i>Paul Bourgine</i>	143
<i>Renaud Cazoulat</i>	37
<i>Collectif S.M.I.</i>	57
<i>Pierre Corradini</i>	69
<i>R. Cozien</i>	87
<i>Eric Dedieu</i>	91
<i>Geoffroy De Schutter</i>	101
<i>Jean-louis Dessalles</i>	113
<i>Wolf-Dieter Eberwein</i>	119
<i>F. Harrouet</i>	87
<i>Pascale Kuntz</i>	143
<i>Charles Lenay</i>	127
<i>O. Michel</i>	23
<i>Frédéric Petit-Singeot</i>	37
<i>Pierre Saurel</i>	119
<i>Dominique Snyers</i>	143
<i>John Stewart</i>	153
<i>J. Tisseau</i>	87
<i>Guy Theraulaz</i>	165
<i>Claude Touzet</i>	179
<i>Elpida Tzafestas</i>	181

