

**Revue Internationale de**

ISSN 0980-1472

**systemique**

SYSTÈMES HIÉRARCHIQUES ET COMPLEXITÉ

Vol. 5, N° **1**, 1991

**afcet**

**Dunod**

**AFSCET**

**Revue Internationale de**  
**systemique**

**Revue**  
**Internationale**  
**de Sytémique**

volume 05, numéro 1, pages 5 - 25, 1991

Un modèle pour les systèmes évolutifs avec mémoire,  
basé sur la théorie des catégories

Andrée C. Ehresmann, Jean-Paul Vanbremeersch

Numérisation Afcset, janvier 2016.



Creative Commons

tous les sous-systèmes, les interactions inter-groupe interviennent. De cette manière, le comportement du système entier est différent du comportement de chaque sous-système isolé. Le comportement de l'ensemble des parties interagissantes est différent des comportements de chaque partie isolée. Le concept de synergie est fréquemment évoqué pour rendre compte de ce processus de couplage inter-groupe agissant en « coopération ».

L'article de B. Walliser établit une classification des différents types de hiérarchie. Dans sa contribution, J. Eugène montre que les instances internationales comme l'O.N.U. s'intéressent à l'étude et au fonctionnement des « systèmes complexes » et souhaitent développer et lancer de nouveaux programmes d'étude dans lesquels le concept de hiérarchie est assez central. Les trois autres articles s'intéressent au concept de hiérarchie dans le domaine de la Biologie ou de la Physiologie.

F. Bailly *et al.* étudient les structures géométriques fractales qui s'établissent comme autant de niveaux d'organisation. Les exemples biologiques sont abondants. E. Bernard-Weil étudie l'interaction entre deux couples ago-antagonistes et il s'intéresse à leur fonctionnement « physiologique » et à leur « pathologie ». La contribution de M<sup>me</sup> Ehresmann et de J. P. Vanbreemersch est basée sur la théorie mathématique des catégories et est appliquée au système neuronal avec mémoire et évolution. Enfin, dans mon article, j'étudie le couplage de la dynamique intra-groupe et de la dynamique de variables globales caractérisant les sous-systèmes de la partition hiérarchique permettant d'étudier les interactions entre niveaux. L'article présente une application en Écologie.

Pierre AUGER

## UN MODÈLE POUR DES SYSTÈMES ÉVOLUTIFS AVEC MÉMOIRE, BASÉ SUR LA THÉORIE DES CATÉGORIES

A. C. EHRESMANN \*, J.-P. VANBREMEERSCH \*\*

\* Université de Picardie <sup>1</sup>

\*\* Centre Médical Saint-Roch <sup>2</sup>

### Résumé

Les auteurs poursuivent l'étude des systèmes évolutifs avec mémoire qu'ils ont introduits pour modéliser des systèmes naturels capables d'apprentissage. L'évolution du système est modulée par des interactions dialectiques complexes entre des systèmes de régulation internes qui sont hétérogènes quant à leur niveau hiérarchique et à leur échelle de temps. Ceci est appliqué à l'étude du développement de processus cognitifs complexes pour un système neuronal.

### Abstract

Memory evolutionary systems have been introduced by the authors to model natural hierarchical autonomous systems such as biological systems. Here they study how the evolution of the system depends on the complex dialectical interactions between internal regulatory systems with heterogeneous complexity levels and time-scales. An application is given to the development of higher cognitive structures in neural systems.

### 1. Introduction

Les systèmes évolutifs avec mémoire, introduits par les auteurs dans des publications antérieures, constituent un modèle mathématique pour des systèmes naturels autonomes tels des systèmes biologiques, écologiques, sociologiques ou économiques; ces systèmes sont ouverts, avec une hiérarchie de composants d'ordre de complexité croissante, ils se modifient au cours du

1. U.F.R. de Mathématiques et d'Informatique, 33, rue Saint-Leu, 80039 Amiens Cedex.

2. Amiens.

temps et sont capables d'apprendre à reconnaître leur environnement et à utiliser les résultats d'expériences passées pour mieux adapter leur comportement.

Ce modèle est basé sur la Théorie des Catégories, branche récente des Mathématiques, qui offre un cadre adéquat pour une approche synergique; il permet de reconnaître de manière interne la complexité d'un objet relativement à ses « composants », de décrire la formation et le fonctionnement d'unités de plus en plus complexes, d'étudier la structure hiérarchique, qu'elle soit organisationnelle ou décisionnelle, et l'imbrication entre les différents niveaux.

Dans le présent article, après un bref rappel des résultats de Ehresmann et Vanbreemersch (1987, 1989 *a*, 1989 *b*, notés respectivement EV1, EV2, EV3), nous étudierons plus à fond la manière dont l'évolution du système est influencée par des organes de régulation internes selon leur complexité et leurs délais de fonctionnement. Chacun d'eux forme une description particulière du système total, appelée le paysage actuel (qui précise le paysage défini dans EV2), et agit par son intermédiaire, la régulation devenant plus efficace lorsque le système développe une mémoire importante. Une dialectique s'instaure entre les paysages relatifs à des systèmes de régulation hétérogènes du point de vue de leur niveau hiérarchique et de leur échelle de temps. Le résultat est que l'évolution à court terme est sous la dépendance des systèmes de régulation de bas niveau, mais à plus long terme ceux de niveaux plus élevés modulent cette évolution en rétroagissant sur les niveaux inférieurs. Bien des problèmes de nature plus ou moins philosophique semblent s'éclairer lorsqu'on les situe dans cette dialectique.

Appliqué à l'étude de systèmes neuronaux, ce modèle a l'avantage, par rapport aux modèles classiques, de développer un calcul simple sur les assemblées ou superassemblées de neurones synchrones et sur leurs interactions, ce qui aide à expliquer la formation de processus de connaissance complexes.

## 2. Organisation interne hiérarchique

Dans cette section, nous rappelons les notions d'objet complexe et de système hiérarchique étudiées dans EV1 (§ 2,3,5) et, sous forme plus intuitive, dans EV3 (§ 1-3), auxquels nous renvoyons pour plus de détails.

La modélisation d'un système naturel se fera sur trois niveaux : état à un instant donné, évolution temporelle, organes d'observation et d'autorégulation. Nous commençons par décrire la structure interne d'un système « idéal » que l'on connaîtrait entièrement; la description sera relativisée plus loin pour

étudier le cas usuel où l'on ne dispose que d'informations partielles sur le système.

L'état du système à un instant donné est représenté par une catégorie qui figure son organisation interne, formée par ses composants, les liens entre eux et la manière de les combiner. Elle correspond au sémantisme du système dans la terminologie de Ducrocq (1989).

Une *catégorie* (Eilenberg et MacLane, 1945) est formée d'objets et de flèches entre eux constituant un graphe orienté, avec éventuellement plusieurs flèches, ou aucune, entre deux objets; on suppose définie une façon de combiner deux flèches successives du graphe en une autre flèche, de sorte à associer à un chemin du graphe de N vers N' une unique flèche entre les mêmes objets (associativité); de plus chaque objet a une flèche « identité ».

Les objets modélisent les composants d'un système à un instant donné, les flèches (appelées « liens ») leurs interactions. Les liens peuvent représenter selon le cas des liaisons informationnelles ou énergétiques, des contraintes, des relations causales... Les liens partant d'un objet décrivent son comportement ou ses propriétés, et ceux arrivant les informations ou contraintes qu'il reçoit du système. La combinaison des liens et son associativité traduisent la transitivité des messages; dans un système biologique, l'identité d'un objet correspond à son « soi ».

Il faut maintenant modéliser l'organisation hiérarchique d'un système naturel complexe, dont les composants sont répartis en niveaux croissants selon leur complexité, un objet étant complexe s'il a lui-même une organisation interne du niveau inférieur. Par exemple, dans un organisme, les composants des différents niveaux seront les atomes, les macromolécules, les organites, les cellules, les tissus, les organes...

Pour étudier cette situation dans une catégorie, les objets sont différenciés selon leur complexité à l'aide des notions suivantes :

– Un *pattern* dans la catégorie est une famille d'objets  $N_i$  avec certains liens distingués entre eux. Un lien collectif de ce pattern vers un objet A sera formé de liens individuels des  $N_i$  vers A, corrélés par les liens distingués; il représente une information ou une contrainte transmise à A globalement de manière cohérente par tous les composants du pattern.

– Un objet N est appelé *limite (ou recollement)* du pattern s'il existe un lien collectif du pattern vers N et si chaque lien collectif vers A se recolle en un unique lien de N vers A. Cet objet N, lorsqu'il existe, est caractérisé de manière unique (à un isomorphisme près), et il représente le comportement global du pattern; il sera considéré comme un objet complexe admettant le pattern pour organisation interne.

Les contraintes et la cohérence introduites par les liens distingués sont mesurées par un lien qui compare la limite  $N$  avec la somme des  $N_i$ , obtenue de même en oubliant les liens distingués; comme cette somme a les mêmes propriétés que les  $N_i$ , ce lien « comparaison » indique combien les propriétés de la limite sont différentes de celles de ses constituants élémentaires. Il explique donc l'émergence de propriétés par complexification, en donnant un sens précis au fait que le Tout  $N$  est plus que l'ensemble de ses parties  $N_i$ .

– Un *système hiérarchique* est une catégorie dont les objets sont répartis en différents niveaux « de complexité », disons  $0, 1, \dots$ , de sorte que tout objet du niveau  $n+1$  soit le recollement d'un pattern d'objets liés du niveau  $n$ .

Dans ce cas, un objet  $N$  du niveau  $n+1$  a aussi une organisation interne pour chaque niveau inférieur à  $n$ , de plus en plus difficile à définir directement; mais  $N$  peut aussi être considéré comme un objet « simple » en tant que composant d'un objet du niveau  $n+2$ . Ceci donne une formalisation de la notion de holon de Kæstler (1965), avec sa double face de Janus. Ainsi une cellule dans un organisme peut être considérée de deux manières complémentaires: soit comme un simple constituant d'un tissu; soit comme un objet complexe représentant le pattern formé par ses propres composants (organites, macromolécules) et par les liens distingués entre eux. Ainsi la notion de complexité pour un composant n'a pas un sens absolu, mais dépend du point de vue auquel on se place pour l'observer.

### 3. Processus dynamique. Système évolutif

Jusqu'ici nous avons modélisé un certain état du système. Mais un système biologique ou sociologique a des échanges avec son environnement et ses composants se modifient au cours du temps. Cette évolution dynamique est représentée à l'aide de la notion de système évolutif, définie dans EV1 (§ 6).

Pour comparer l'état du système à un instant  $t$  avec son état à un instant postérieur  $t'$ , il faut repérer ce que sont devenus en  $t'$  les composants et les liens; de plus le système est supposé ouvert, c'est-à-dire qu'il a des échanges avec l'extérieur; par suite de nouveaux composants peuvent apparaître (« naissance »), tandis que d'anciens composants auront disparu (par « mort » ou rejet à l'extérieur). Cette disparition sera modélisée en introduisant dans les catégories états un objet particulier, noté  $0$ , qui représente tout ce qui a disparu. Remarquons que l'environnement ne figure pas de manière explicite, mais seulement par ses effets sur le système.

Du point de vue catégorique, le changement d'état entre les instants  $t$  et  $t'$  est représenté par un *foncteur transition* entre les catégories états en  $t$  et en

$t'$ . Un foncteur d'une catégorie vers une autre associe à un objet de la première un objet de la seconde, à un lien un lien entre les objets correspondants, et il respecte la combinaison des liens. Ainsi le foncteur transition associe à un composant ou un lien en  $t$  ce qu'il est devenu en  $t'$ ; en particulier il associe l'objet  $0$  à tout ce qui a disparu; et les nouveaux éléments sont caractérisés par le fait qu'ils ne sont l'image de rien (pour autant que le foncteur n'est pas surjectif).

L'histoire du système pendant une certaine période consiste en la donnée de ses états successifs et des foncteurs transitions entre eux. Pour avoir l'histoire « complète », il faudrait prendre « tous » les états possibles, c'est-à-dire considérer l'état à chaque instant  $t$  et les transitions de  $t$  à chaque  $t' > t$ . Mais en pratique, ce qui compte est la suite des changements observables, de sorte que le temps « continu » sera remplacé par une suite d'instant, plus ou moins rapprochés selon l'échelle à laquelle on se place. Dans ce cas, à chaque instant  $t$  considéré on peut parler de l'instant suivant (dans la suite) et considérer que le passage de l'état en  $t$  à l'état suivant définit une étape de l'évolution. Ici, la durée des étapes n'intervient pas en tant que telle, seuls importent les changements qu'elles occasionnent et l'ordre des étapes (la durée se réintroduira plus loin). Autrement dit, le temps est la mesure du changement (cf. Saint-Augustin!). D'où la définition suivante d'un système évolutif :

Un *système évolutif* (abrégé en SE) est déterminé par : un ensemble (fini ou infini) d'instant; pour chacun de ces instants  $t$  une catégorie représentant l'état du système en  $t$ ; et pour tout instant  $t' > t$  un foncteur « transition » de l'état en  $t$  vers l'état en  $t'$ . Il doit y avoir transitivité des transitions, c'est-à-dire que, pour tout instant  $t'' > t'$ , la transition de  $t$  à  $t''$  s'obtient en composant les transitions de  $t$  à  $t'$  et de  $t'$  à  $t''$ . Insistons bien sur le fait que seul compte ici l'ordre sur les « instants » et non la durée des étapes.

Dans un système naturel, la transition entre deux états successifs est décrite à partir des opérations suivantes : suppression ou décomposition de certains objets (exocytose ou scindage de molécules), absorption d'éléments externes, renforcement de la cohésion de certains patterns d'objets liés conduisant à la formation d'un objet plus complexe les représentant (synthèse de protéines), ou du moins au renforcement du pattern en une association plus fortement organisée et structurée (telles les assemblées de neurones synchrones, cf. Section 8). Du point de vue catégorique, un pattern renforcé sera représenté par un nouvel objet de nature conceptuelle ajouté à la catégorie, et qui y devient sa limite.

Toutes ces opérations sont traduites dans le processus de complexification d'une catégorie selon une stratégie (cf. EV1, § 4, et EV3, § 5).

On appelle *stratégie* sur une catégorie la donnée des objets, liens ou limites « à supprimer », d'éléments externes « à absorber », de patterns sans limite « à recoller ». Une construction catégorique permet alors de construire de manière explicite une nouvelle catégorie, appelée la *complexification*, contenant la catégorie à l'exception des objets supprimés devenus 0, et où les buts de la stratégie sont remplis de la manière la plus économique. En particulier chaque pattern à recoller admettra pour limite un nouvel objet « abstrait » qui est une unité d'ordre supérieur représentant le pattern considéré comme une totalité en soi.

Cette construction est analogue au passage d'un langage à un langage d'ordre supérieur. Ce n'est pas un simple artifice théorique sans portée pratique. Elle permet de décrire les « bons » liens entre les nouveaux objets, donc entre deux patterns recollés, de sorte à opérer facilement sur eux, et éventuellement pouvoir itérer la construction pour obtenir des objets de plus en plus complexes par recollements successifs. Remarquons que ce processus est à la base de toute connaissance : on part des termes primitifs que l'on combine pour obtenir des termes plus compliqués, lesquels deviennent eux-mêmes les termes primitifs pour une nouvelle synthèse.

La dynamique d'un système naturel peut ainsi être modélisée par la formation par étapes d'un SE où connaissant l'état à un instant donné  $t$ , l'état suivant sera obtenu par complexification relativement à une stratégie choisie sur la catégorie état en  $t$ . Mais le problème est celui du choix de cette stratégie par l'intermédiaire d'organes de régulation internes, de sorte que le système apprenne à s'adapter de mieux en mieux. Il faut pour cela préciser la structure du système.

#### 4. Systèmes de régulation internes. Paysage

Dans des systèmes autonomes tels que les systèmes biologiques ou sociologiques, l'évolution est sous la dépendance d'une hiérarchie d'organes de régulation internes qui analysent les contraintes internes et externes, et cherchent à modifier en conséquence l'état du système et son rapport à l'environnement (ce contrôle devant être entendu en un sens fonctionnel et non volitif!). Par exemple, les récepteurs membranaires d'une cellule reçoivent et transmettent des informations entre le milieu extérieur et le cytoplasme, et, par l'intermédiaire de seconds messagers, exercent un contrôle sur l'activité métabolique de la cellule.

Dans un système évolutif, un tel organe de régulation sera modélisé par un sous-système évolutif, appelé *système régulateur* (SR), dont les composants seront nommés *agents*. Pour l'instant nous n'imposons aucune condition

particulière sur les agents afin de couvrir un plus grand nombre de situations; la définition sera restreinte au fur et à mesure des besoins.

Ainsi, pour étudier un SE à un certain niveau de complexité, disons un organisme du point de vue moléculaire, on prendra pour agents les composants de ce niveau, ici les molécules. Dans le cas d'un centre de contrôle externe au système (comme dans un robot), il suffit de se placer dans un système plus grand formé par le système étudié, le centre de contrôle et les liens entre eux. Mais le plus souvent, un même SE aura plusieurs SR spécialisés assurant l'interface entre le système et son environnement, c'est-à-dire contenant des récepteurs pour les entrées (messages, contraintes...) et pouvant agir sur des effecteurs pour y répondre (sorties).

D'une façon générale, un SR aura un triple rôle : organe observationnel, il recueille des informations sur l'état interne du système et sur les communications en provenance de l'extérieur; organe décisionnel, il participe au choix d'une stratégie, compte tenu de la situation et des actions possibles; organe de commande enfin, il coopère à la mise en œuvre de cette stratégie par l'intermédiaire des effecteurs qu'il contrôle. Dans cette section, nous allons rappeler comment ces différentes fonctions sont modélisées, renvoyant à EV2 pour plus de détails. L'étude des interactions des différents SR entre eux et avec le système dans son entier fera l'objet des sections suivantes.

Partant d'un SE et d'un SR particulier, nous construisons un nouveau SE, le paysage du SR, qui représente la description « interne » du système tel qu'il peut être connu au travers des informations qui parviennent aux agents; dans la terminologie de R. Vallée (1986), on dirait qu'il est l'image observationnelle, ou épistémologique, du système pour les agents.

L'idée est qu'un composant B du système ne se manifeste à un agent A que par les liens éventuels  $b$  de B vers A; un tel  $b$  est appelé un aspect de B. Cet aspect est communiqué par A aux autres agents avec lesquels il est lié (sous la forme de la combinaison de  $b$  avec les liens entre agents), mais sans que ceci fournisse de nouvelle information pour le SR dans son ensemble. On appellera perspective de  $b$  la classe de tous les aspects qui lui sont ainsi corrélés par des liens entre agents; elle est déterminée dès qu'on en connaît un aspect.

Le *paysage* à un instant donné est la catégorie ayant pour objets les perspectives; les liens entre perspectives et leur combinaison sont tels qu'on a un foncteur distorsion, du paysage vers le système, associant à la perspective de  $b$  le composant B. Ce foncteur, non accessible pour le SR, mesure la perte d'informations causée par l'observation du système au travers des seuls

agents. (Le paysage est construit, de façon un peu différente, et étudié dans EV2, § 3.)

De manière théorique, partant de chaque état du système, on peut construire le paysage correspondant, et ces paysages forment un SE sur la même échelle de temps que le SE donné. Mais nous verrons plus loin qu'en pratique il faudra se restreindre à une échelle adaptée au niveau des agents, de sorte que le changement soit effectivement observable à ce niveau.

Le rôle régulateur des agents se jouera par l'intermédiaire du paysage, et à son échelle de temps, de la manière suivante. Une trop grande variation du paysage, sous l'effet de contraintes internes ou de changements externes, demande une révision du paysage et déclenche une nouvelle étape. Une stratégie est alors choisie sur le nouveau paysage  $P$  en cet instant  $t$  pour réagir de manière appropriée à la perturbation; nous verrons comment les résultats précédents peuvent être utilisés à cet effet lorsque le système possède de plus une mémoire (cf. Section 7).

Si la stratégie choisie par les agents avait les effets attendus, le nouveau paysage en  $t'$  après modification devrait être la complexification de  $P$  correspondant à cette stratégie; ce « *paysage anticipé* » a été construit explicitement dans EV2 (§ 4). Mais la stratégie a été choisie au vu du seul paysage, en ignorant tout ce qui n'y apparaît pas, et elle est répercutée au système par l'intermédiaire du foncteur distorsion, donc avec une perte d'information; de plus elle entre éventuellement en compétition avec les stratégies répercutées par des SR différents ainsi qu'avec des changements dus à l'environnement. Par suite le nouveau paysage en  $t'$  risque d'être différent du paysage anticipé. Nous avons montré dans EV2 (§ 4) comment mesurer, de manière accessible au SR, la différence entre ces deux paysages par un foncteur « *comparaison* ». Si une erreur est ainsi révélée (le foncteur comparaison n'est pas un isomorphisme), elle est donc connue au niveau des agents qui auront à la compenser à l'étape suivante.

Ainsi chaque étape pour les agents est divisée en quatre parties : réception et analyse des informations sur le paysage, choix d'une stratégie, mise en œuvre de cette stratégie, appréciation du résultat et éventuellement repos. Elle peut cependant être interrompue avant sa conclusion normale sous l'effet de perturbations externes.

L'évolution du SE pour le SR est décrite par le SE des paysages et par la suite des stratégies choisies par les agents à chaque étape; cette suite serait leur image pragmatique ou praxéologique du système, au sens de Vallée (1986).

Nous allons maintenant mieux analyser la situation dans le cas plus concret où les durées des opérations successives sont prises en compte.

### 5. Délais de propagation. Présent actuel

Dans les systèmes naturels, le temps n'intervient pas seulement comme paramètre indexant les changements successifs du système (c'est son seul rôle dans les SE); les délais nécessaires pour la propagation des informations et pour la mise en œuvre des stratégies imposeront des contraintes essentielles pour l'évolution. L'introduction de ces délais, négligés jusqu'ici dans notre modèle, conduit à préciser la construction du paysage et son échelle de temps, et à mieux analyser les interactions entre les différents niveaux d'une hiérarchie décisionnelle.

Les liens d'un système modélisent des liaisons informationnelles, des contraintes, ... En pratique le passage de l'information d'un composant à un autre requiert une certaine durée, qui augmente avec le niveau des composants. Ainsi le temps d'une interaction entre deux molécules est négligeable devant le délai de transmission d'un message entre deux cellules qui requiert de nombreuses opérations moléculaires. Bien que ces délais soient variables et connus seulement de manière grossière, on peut en déterminer l'ordre de grandeur.

Pour modéliser cette situation dans un SE, nous associerons à chacun de ses niveaux de complexité  $n$  un nombre qui représentera le délai de propagation moyen pour les liens entre composants de ce niveau. Ce nombre, appelé le *délai de propagation* au niveau  $n$ , noté  $d(n)$ , n'a pas à être défini de manière précise, car il n'interviendra que par son ordre de grandeur, de sorte à pouvoir comparer les délais relatifs à des liens de niveaux très différents. Guidés par les exemples, nous supposons que l'ordre de grandeur de ces délais augmente avec le niveau, et que, si un lien va d'un niveau inférieur à  $n$  au niveau  $n$ , son délai de propagation est d'ordre de grandeur inférieur ou égal à  $d(n)$ .

De manière plus spécifique, partant d'un SR dans le SE, nous appellerons *délai de latence du SR* le délai de propagation moyen des liens entre les agents, disons  $T$ .

Nous avons vu que la construction du paysage en  $t$  repose sur un échange de communications entre le système et les agents pour déterminer les aspects, puis des agents entre eux pour regrouper ces aspects en perspectives. Elle nécessitera donc un temps au moins égal à  $2T$ . Nous appellerons *présent actuel* des agents l'intervalle de temps  $[t, t + 2T]$ .

Une situation ne pourra être prise en compte par le SR que si elle perdure pendant ce présent actuel; autrement il n'y aurait pas assez de temps pour l'analyser. En conséquence certaines perspectives de composants et de liens changent trop rapidement pour être observables directement par les agents (nous verrons qu'il en est ainsi pour les composants des niveaux à délai de propagation d'ordre négligeable devant T); cependant, elles figurent théoriquement dans le paysage « instantané » tel qu'il a été défini. Ceci conduit à introduire un autre paysage, qu'on appellera le paysage actuel.

Le *paysage actuel* des agents en  $t$  recolle les sous-catégories « observables » des paysages instantanés entre  $t$  et  $2T$ . Il est construit explicitement dans l'Appendice (en considérant la limite du pattern de catégories formé par les paysages instantanés de  $t$  à  $t+2T$  et les foncteurs transitions entre eux). Ses éléments sont les trajectoires de perspectives observables pendant une durée au moins égale à  $T$  et débutant entre  $t$  et  $t+T$ .

Plus intuitivement, il tient compte de toutes les informations arrivant aux agents pendant leur présent actuel, avec leur ordre d'arrivée, et assez stables pour être communiquées aux autres agents. Par rapport aux paysages instantanés, il joue le rôle d'un masque relativement aux composants et aux liens trop instables ou de niveaux trop faibles pour être distingués par les agents; un pattern de tels composants ne pourra y figurer qu'au travers de sa limite, de sorte que, pour les agents, tous ces composants seront confondus.

Par exemple une cellule aura dans son présent actuel des populations de molécules mais non des molécules isolées et elle repérera le moment où débiter la replication de l'ADN par le fait que la densité d'une certaine population de protéines dépasse un seuil critique. Dans notre présent actuel auditif, une suite de sons assez rapprochés est regroupée pour former un air.

Les stratégies seront choisies sur le présent actuel, car elles doivent faire intervenir des composants et patterns directement observables par les agents. Elles n'imposeront des contraintes sur des composants de niveau trop bas que de manière indirecte, au moyen de niveaux intermédiaires.

Reprenons le déroulement d'une étape pour examiner la durée de ses différentes parties :

- La construction du paysage actuel exige une durée de l'ordre de  $2T$ .
- Le choix de la stratégie sur le présent actuel requiert une analyse de la situation par échange d'informations pour déterminer les stratégies admissibles et les évaluer; on admettra que la durée de ce choix, ou *délai décisionnel*, est du même ordre de grandeur que  $T$ .
- La mise en œuvre de la stratégie, c'est-à-dire la construction du paysage anticipé par complexification, se fait par une suite de réajustements (cf. EV2,

§ 4). Sa durée est variable selon la stratégie, et d'autant plus longue que la stratégie est plus complexe. On appellera *délai de réponse* du SR la durée moyenne de mise en œuvre des diverses stratégies qu'il peut choisir. Ce délai,  $T'$ , est d'un ordre de grandeur nettement supérieur à  $T$ . Il correspond au transport-lag considéré par R. Rosen (1958).

- Enfin la vérification du résultat (formation du foncteur comparaison entre les paysages anticipé et effectif) a une durée du même ordre que  $T$ .

Au total, pour que l'étape puisse se dérouler jusqu'à sa conclusion, sa durée doit être de l'ordre de  $4T+T'$  au moins; ce nombre sera appelé la *période* du SR. Le système évolutif des paysages actuels est défini sur une *échelle de temps* telle que la durée de chaque étape soit de l'ordre de cette période, excepté si elle est inopinément interrompue avant terme.

Le mot « période » évoque un phénomène cyclique. Ici la périodicité est relative au fonctionnement des agents : ils révisent le choix de leur stratégie à intervalles réguliers (sauf perturbations externes). Il s'agit donc d'une sorte d'horloge interne adaptée au SR, comme dans les rythmes biologiques. Cette notion n'est pas un simple artefact : des modèles récents de systèmes neuro-naux montrent que, pendant un apprentissage, certaines unités vont se spécialiser en horloges internes (Paternello et Carnevali, 1989). Divers auteurs vont plus loin et pensent que tout système naturel auto-organisé a une structure sous-jacente cyclique; par exemple, dans leur théorie des relateurs arithmétiques (Moulin, 1986) les chercheurs du groupe Systema en font le premier principe fondamental pour une approche des systèmes naturels (leurs cinq autres principes seraient bien vérifiés par notre modèle).

## 6. Dialectique entre paysages hétérogènes. Fractures

Le paysage actuel d'un SR masque certains composants. Si l'on a deux SR de niveaux hiérarchiques très différents, leurs descriptions du système peuvent donc être divergentes, et leurs stratégies plus ou moins conflictuelles. Nous allons analyser cette situation, en cherchant de quelle manière ils agissent l'un sur l'autre et sur le système.

Deux SR du même SE seront dits *hétérogènes* si leurs niveaux de complexité sont différents et si la *période* du moins élevé est d'un ordre de grandeur négligeable par rapport au *délai de latence* du plus élevé. Pour les distinguer, nous ajouterons le préfixe micro aux termes relatifs au SR du niveau le plus bas (microagents, microétape, micropaysage...) et, si nécessaire, le préfixe macro pour l'autre.

Pendant une macroétape, disons de  $t$  à  $t'$ , les agents choisissent une stratégie sur leur paysage actuel et la mettent en œuvre. La condition d'hétérogénéité

sur les délais signifie que, dans le même temps, il se déroule un grand nombre de microétapes. Les microchangements sont beaucoup trop rapides pour être perçus directement par les agents, mais ils s'accumulent et peuvent finalement rétroagir sur le macropaysage en modifiant l'organisation interne d'objets plus stables.

Ainsi supposons qu'un composant B soit observable dans le paysage actuel en  $t$  et qu'une partie de son organisation interne soit observable au microniveau. Les microchangements peuvent progressivement modifier cette organisation en détruisant certains de ses composants et en regroupant d'autres différemment, de sorte que B ne conserve pas son identité complexe et « meurt » (au sens de EV1, § 6); il aura donc disparu du paysage à la fin de l'étape, même si la stratégie des agents visait à le conserver, auquel cas la perte leur sera révélée par le foncteur comparaison en  $t'$ .

En fait, le délai de propagation des informations entre le microniveau et le macroniveau (par l'intermédiaire de niveaux intermédiaires) étant inférieure à la durée de l'étape, B peut disparaître avant même la fin de l'étape; dans ce cas, si la stratégie des agents faisait intervenir B de manière essentielle, elle ne pourra pas être mise en œuvre, et l'étape sera interrompue avant son terme normal  $t'$  pour qu'une nouvelle stratégie soit choisie. Nous dirons dans ce cas qu'il y a une *fracture* du paysage. Ainsi le microniveau, sans être directement observable par les agents, peut déterminer leur comportement en agissant sur les micro-organisations internes des divers composants.

Inversement, le macropaysage peut imposer une fracture aux microagents, par exemple si leur stratégie nécessite la disparition d'un composant de niveau intermédiaire que la stratégie des microagents utilise. Toutefois la durée de propagation des informations dans le sens macro-micro est beaucoup plus longue que les microétapes, de sorte que de telles fractures seront séparées par un grand nombre de microétapes.

Il en résulte que diverses situations sont susceptibles de se présenter au cours de la macroétape :

– *Synergie entre les deux SR* : Les microchangements successifs sont en accord avec la stratégie choisie par les agents et aident même à sa réalisation; par exemple les microagents mettent en œuvre la stratégie de replication d'ADN choisie par la cellule.

– *Fracture au microniveau sans répercussion* immédiate au macroniveau : La stratégie des agents, ou des perturbations indépendantes des deux SR, imposent aux microagents une stratégie qu'ils ne peuvent pas appliquer. Il se produit alors un blocage au microniveau; pour le surmonter, il faudra un recours à l'extérieur du micropaysage, c'est-à-dire à une autre partie du

système ou à l'environnement qui jouera donc ici un rôle stabilisateur. Cette intervention externe permettra de débloquer la situation, mais au prix d'une fracture au microniveau, qui risque d'entraîner ultérieurement une fracture au macroniveau. Par exemple, la replication de l'ADN imposée par la cellule sera interrompue au niveau moléculaire si une lésion entraîne des erreurs trop importantes qui paralysent les systèmes de correction usuels; la situation sera débloquée par recours au système SOS (Radman, 1975); la stratégie de replication reprendra, en acceptant une mutation, et la cellule ne sera pas affectée dans l'immédiat. (Cet exemple est développé dans EV2, § 6.)

– *Fracture au microniveau se répercutant au macroniveau* : Comme précédemment on a une fracture du micropaysage, mais elle se répercute aux agents avant la fin de leur étape, et les empêche de poursuivre leur stratégie. Il se produit donc aussi une fracture au macroniveau, nécessitant un recours à l'extérieur lorsque les agents ne disposent pas d'une autre stratégie admissible. Par exemple, si la mutation est trop importante, la cellule devra modifier certaines de ses activités métaboliques.

– *Fracture au macroniveau causée par les stratégies successives du microniveau* : les microétapes se succèdent sans difficultés, mais elles accumulent des microchangements qui sont conflictuels avec les buts de la macrostratégie, de sorte qu'il se produit une fracture au macroniveau avant ou à la fin de l'étape, comme nous l'avons expliqué au début de cette section.

– *Fracture au macroniveau indépendante du microniveau* : des perturbations indépendantes des deux SR (qu'elles proviennent du reste du système ou de son environnement qui est alors déstabilisateur) peuvent entraîner une fracture du macroniveau, avec blocage plus ou moins important. La nouvelle stratégie adoptée à ce niveau pour débloquer la situation risque, après coup, de rétroagir sur le microniveau en lui imposant aussi un changement de stratégie.

Dans tous les cas, les fractures peuvent être causées par un réel déséquilibre du système. Mais il peut aussi s'agir seulement d'une mauvaise description ou anticipation de la situation par les agents, due à un manque d'informations, et qui sera facilement corrigée en modifiant la stratégie, sans préjudice pour le système.

Ainsi, dans les modélisations quantitatives classiques inspirées par la Physique, l'évolution du système est décrite à l'aide d'équations aux dérivées partielles dépendant de paramètres, dont les solutions représentent les variations de macrocomposants sous forme d'observables sur l'espace des états (concentrations, statistiques sur des populations,...). Notre modèle montre bien pourquoi un système complexe ne peut être approché par un tel système « simple » que localement (pour des agents particuliers) et temporairement

(sur une étape), réalisant ainsi le programme proposé par R. Rosen (1985). En effet, la description continue correspond au macroniveau, et l'évolution discontinue, par microétapes, y est donc occultée. Mais elle va, rétroactivement, se manifester au macroniveau, sous forme d'une catastrophe au sens de Thom (1974), survenant au moment où il s'est accumulé trop de micro-changements pour que l'approximation continue reste valable. Autrement dit, on aura une fracture conjoncturelle du paysage, qui sera surmontée par un changement de stratégie traduit analytiquement par un changement des paramètres (et pas seulement des conditions initiales, selon Atlan, 1975).

L'analyse précédente montre qu'il s'instaure une véritable *dialectique entre SR hétérogènes* : les microchangements sont l'un des facteurs modulant le macropaysage ; inversement toute fracture du macroniveau se répercute, après un certain temps, aux microagents. Cette dialectique traduit une sorte de complémentarité entre les descriptions relatives à des niveaux très différents, du même type que la dualité entre ondes/corpuscules en Physique Quantique : chacune est valable à son propre niveau, mais plus ou moins antagoniste avec l'autre (cf. la théorie agoniste-antagoniste de Bernard-Weil, 1989). Ainsi le conflit est issu de l'ignorance. Seul un observateur capable de saisir en un instant toute l'évolution du système (Dieu !) pourrait en avoir une vision non déformée (on sait que le paysage relatif à un objet final d'une catégorie est identique à cette catégorie). Bien des paradoxes et problèmes philosophiques insolubles naissent de la recherche d'une description simultanée de paysages hétérogènes.

## 7. Systèmes évolutifs avec mémoire

Dans cette section, la structure d'un SE va être enrichie pour permettre un véritable apprentissage par mémorisation des expériences antérieures.

Le fonctionnement d'un SR présuppose que les agents retiennent les informations au moins pendant leur présent actuel pour les échanger entre eux et construire le paysage actuel. Mais pour parler à juste titre de régulation, ils doivent les retenir plus longtemps : une mémoire courte sur la durée de l'étape est nécessaire afin qu'il puisse y avoir analyse de la situation aboutissant au choix d'une stratégie, mise en oeuvre de celle-ci avec formation du paysage anticipé par complexification, et appréciation du résultat par comparaison avec le nouveau paysage.

Naturellement cette mémoire courte peut être très rudimentaire. Ainsi, les déplacements d'une bactérie (Lengeler, 1990) sont contrôlés par une vingtaine de récepteurs membranaires, les « transducteurs de signal » (nos agents). Ceux-ci sont capables de reconnaître chacun une ou plusieurs substances

chimiques (formation du paysage) et ils agissent en commun pour comparer les concentrations de ces substances dans l'environnement à des temps très rapprochés (début et fin de l'étape) ; si la concentration varie, ils activent la synthèse de protéines spécialisées commandant le mouvement des flagelles (choix d'une stratégie), ce qui déclenche une « culbute » de la bactérie dans la direction voulue.

Un vrai apprentissage par essais et erreurs, ou même un conditionnement, exige de plus que les agents aient accès à une mémoire « longue » et puissent la développer au cours des expériences. Pour améliorer les performances, il faut en effet pouvoir reconnaître ultérieurement une situation et mémoriser les stratégies utilisées ainsi que leur résultat. Pour modéliser cette situation, nous avons introduit la notion de SEM (cf. EV3, § 10), suggérée par l'exemple d'un système neuronal auquel nous l'appliquerons dans la Section 8.

Un *Système Evolutif avec Mémoire*, ou SEM, est un SE dans lequel on a distingué deux sous-SE hiérarchiques, appelés *Centre Régulateur* (CR) et *Mémoire*, reliés par des liens dans les deux directions entre niveaux comparables. On suppose que les messages venant de l'extérieur (« entrées ») sont décodés par des composants, appelés récepteurs, reliés à des niveaux inférieurs de la Mémoire, et que le CR peut aussi contrôler des effecteurs (« sorties »). Chaque niveau du CR sera considéré en soi comme un SR, de sorte que l'on a une hiérarchie de SR. Relativement à chacun de ces SR, l'évolution du SEM se décrit comme précédemment. Le problème est seulement d'indiquer comment la Mémoire intervient dans le déroulement d'une étape et permet un véritable apprentissage par essais et erreurs.

Les agents ont accès à la Mémoire reliée au SR dans leur paysage actuel. Au début de l'étape, ils vont y rechercher, à l'aide des liens SR-Mémoire, s'il existe déjà un pattern mémorisé analogue à celui formé par les nouveaux stimuli caractérisant la situation ; dans ce cas, ce pattern permet de retrouver les stratégies déjà utilisées et leurs résultats, qui ont été mémorisés. La stratégie sera choisie en fonction de ces informations ; elle consistera à contrôler les effecteurs de la manière la plus adaptée ; mais elle aura aussi pour but une rétroaction sur Mémoire pour mémoriser la stratégie mise en oeuvre à l'étape précédente et son résultat.

Nous n'avons pas la place de décrire complètement la manière dont une stratégie S est « internalisée » pour être mémorisée à l'étape suivante. Disons seulement que S sera traduite sous forme d'un pattern à recoller dans Mémoire. Par exemple supposons que S ait pour but de recoller divers patterns  $M_i$  du paysage, ayant certains liens entre eux. Chaque  $M_i$  sera représenté par une unité (limite)  $m_i$  dans Mémoire ; et on demandera que le pattern formé par ces  $m_i$  soit recollé en une limite  $s$ . Cette limite  $s$  représentera

la mémorisation de S, et c'est cet engramme que les agents pourront ultérieurement retrouver dans leur paysage. Le résultat de S, mesuré par le foncteur comparaison à la fin de l'étape, sera mémorisé d'une manière analogue, et relié à s dans Mémoire.

La partie de Mémoire formée de ces engrammes de stratégies correspond à une *mémoire procédurale*. Elle se développe au cours de l'apprentissage, par complexification, d'où une hiérarchie de stratégies mémorisées; chacune d'elles est obtenue par recolléments successifs à partir d'un noyau initial formé de stratégies plus élémentaires, dont certaines peuvent être « innées » (*i.e.* elles figurent dans Mémoire à l'instant initial).

Chaque SR du centre régulateur contribue au fonctionnement du système et au développement de Mémoire, selon son niveau et son échelle de temps propres. Ce processus modélise un véritable *apprentissage par essais et erreurs*, sous le contrôle des différents SR dont les stratégies sont plus ou moins coopératives ou divergentes. D'après les analyses des sections 5-6, l'évolution du SEM dépendra essentiellement à court terme des SR de niveaux inférieurs (réductionnisme synchronique), mais modulée à plus long terme par des phénomènes diachroniques en sens inverse, où un SR de niveau supérieur impose un changement de stratégie aux niveaux inférieurs.

Ainsi la hiérarchie « organisationnelle » du centre régulateur, *i.e.* la hiérarchie des SR, devient en fait une *hiérarchie décisionnelle*: la liberté de choix des niveaux inférieurs est conditionnelle; si leur stratégie est mal adaptée aux besoins des niveaux supérieurs, ceux-ci peuvent leur imposer un changement de stratégie. Mais si la situation est trop conflictuelle, leur nouvelle stratégie risque de rétroagir ultérieurement sur les niveaux supérieurs; de sorte qu'il y a dépendance complète des niveaux entre eux.

Ceci explique que, dans un système complexe tel un organisme vivant ou social, aucune prévision n'est possible à long terme. Par exemple, toute théorie de la décision en Sociologie se heurte au fait que le choix « rationnel » à un instant donné peut s'avérer ne pas être le meilleur à long terme (Cooper, 1989).

Nous n'aborderons pas ici ce difficile problème du choix des stratégies. Remarquons seulement que, pour qu'il y ait amélioration des performances, il faut pouvoir comparer les résultats de deux stratégies admissibles, c'est-à-dire disposer de moyens d'évaluation au niveau de chaque SR. Dans les systèmes naturels, ces moyens peuvent être de nature très simple, mesurant seulement l'augmentation ou la diminution de certains observables (faim/satiété, plaisir/déplaisir,...). Toutefois les évaluations des différents SR pouvant

être conflictuelles, le CR doit de plus « posséder une fonction d'évaluation de fonctions d'évaluations! » (*cf.* Changeux-Connes, 1989, p. 222).

La différence de description d'un même système selon le niveau du SR est bien illustrée par les différentes conceptions de l'Histoire, qui étudie les interactions entre la catégorie Homo des hommes et la catégorie Soc des groupes sociaux, considérées comme deux niveaux d'un même système global. Au niveau Homo, on s'intéressera aux faits individuels comme dans les biographies. Au contraire l'histoire scientifique (par exemple le marxisme) se placera au niveau Soc et cherchera à dégager des « lois » à l'aide d'une modélisation quantitative, les observables étant des statistiques relatives à des populations. La dialectique entre les deux niveaux est bien mise en évidence par l'histoire « existentielle » prônée par Ariès (1986), et elle montre que l'historien, dans son paysage, peut juger comme identiques des situations ou stratégies qui n'ont pas la même signification pour les protagonistes, d'où la difficulté de dégager des lois « universelles ». Ainsi selon l'état de leurs mœurs telle réforme sera envisageable pour une société et impossible pour une autre.

### 8. Système neuronal. Assemblées de neurones

La notion de SEM a été obtenue en cherchant à dégager les structures qui permettent des activités mentales complexes. Il est donc naturel qu'elle conduise à un modèle de système neuronal.

Le système neuronal est modélisé par un SEM, le *système évolutif des neurones*, où le niveau 0 correspond à l'organisation moléculaire, le niveau 1 aux neurones et synapses, et où les niveaux supérieurs de la Mémoire et du Centre Régulateur seront formés d'unités « conceptuelles », appelées neurones de catégorie, qui représentent des objets mentaux ou des processus cognitifs complexes. Nous en rappelons rapidement la définition; pour une description plus précise du SEM et de son support physiologique, nous renvoyons à EV3 (§ 4, 8).

On part de la catégorie des neurones à un instant donné  $t$ : ses objets représentent les neurones, avec leur taux instantané de décharge; les liens de N vers N' correspondent aux classes de chemins synaptiques de même force, *i.e.* qui transmettent de la même façon et dans les mêmes délais les décharges de N vers N'.

Un stimulus externe (visuel, auditif,...), ou une activité interne spécifique, active un pattern de neurones liés par des synapses bien déterminées. Dans certains cas, le pattern admet un neurone-pilote (ou cellule cardinale au sens de Barlow, 1972) permettant de le reconnaître; ce neurone-pilote peut être exactement représenté par la limite du pattern dans la catégorie des neurones.

Par exemple il existe des neurones-pilotes détecteurs de formes simples dans les zones visuelles (Hubel et Wiesel, 1962).

En général, un pattern correspondant à un stimulus, ou à une activité complexe, n'a pas de neurone-pilote, donc pas de limite dans la catégorie des neurones; mais sa cohésion se renforce, au cours du temps, par modifications des liens distingués, de sorte qu'il devient une assemblée de neurones synchrones liés au sens de Hebb (1949). Et la reconnaissance ultérieure du stimulus correspond à une oscillation de cette assemblée synchrone (Stryker, 1989).

Les méthodes classiques sont mal adaptées pour opérer sur ces assemblées (cf. cependant le modèle général de P. Auger, 1989). L'avantage du modèle catégorique est de permettre de remplacer ces assemblées par des unités abstraites de niveau supérieur, en considérant que la transformation du pattern en assemblée synchrone revient à l'adjonction d'une limite au pattern dans une complexification adéquate de la catégorie. Les limites ainsi ajoutées pour représenter les assemblées sont appelées *neurones de catégorie* (sur la suggestion de M. Ducrocq).

Cette construction n'est pas un simple artefact: en utilisant les propriétés de la complexification on développe tout un « calcul » sur les neurones de catégories. Ce calcul montre comment des assemblées peuvent être reliées entre elles, comparées, ou combinées en superassemblées devenant des neurones de catégorie de niveau supérieur qui représentent des processus cognitifs de plus en plus complexes.

Le fonctionnement par autorégulation et apprentissage du système neuronal sera décrit comme dans un SEM général, la seule différence étant qu'ici les différentes opérations ont une contrepartie physiologique. Ainsi la mise en œuvre des stratégies successives correspond à la modification des activités des neurones et des forces des synapses sous l'effet de changements moléculaires; ceci peut être quantifié selon les règles usuelles en Neurologie, que nous ne rappelons pas ici (cf. EV3, § 8), et des simulations numériques sont possibles. Disons seulement que les synapses sont supposées hebbiennes et que l'apprentissage se fait par accroissement de leur seuil minimum et renforcement local de la synapse la plus forte du voisinage.

Le centre régulateur du SEM est formé de différents SR, dont le nombre augmente chez les animaux plus évolués. Le SR de niveau inférieur correspondrait aux zones associatives du bulbe et du cortex; il est relié aux récepteurs (organes sensoriels) et aux effecteurs (organes moteurs); les SR de niveaux supérieurs, de même que les niveaux supérieurs de la Mémoire, sont formés de neurones de catégories et se développent au cours de l'apprentissage.

Les différents SR interagissent sur l'évolution selon leurs niveaux hiérarchiques et leurs échelles de temps; les étapes relatives à chacun d'eux se déroulent comme dans tout SEM: formation du paysage actuel et recours à la Mémoire; choix puis mise en œuvre de la stratégie, évaluation et engrammation des résultats afin de permettre une meilleure performance si une situation analogue se présente ultérieurement. Les stratégies des SR de niveaux élevés vont rendre compte de processus mentaux de plus en plus complexes: production d'une suite d'actions, extraction de règles, résolution de problèmes.

Il semble que l'étude du SEM des neurones et de la dialectique entre ses SR hétérogènes pourrait conduire à une véritable formalisation catégorique d'une algèbre des objets mentaux, telle qu'elle est esquissée dans Changeux (1983). Nous reviendrons ailleurs sur ce problème, nous contentant ici de donner quelques idées, de manière plus philosophique que mathématique.

A la mémoire procédurale présente dans tout SEM peut s'adjoindre une *mémoire classifiante*: des objets déjà mémorisés (percepts ou stratégies) et ayant des attributs ou propriétés analogues y sont regroupés en classes. Pour la modéliser, indiquons seulement qu'un procédé catégorique (formation d'objet libre) permet d'associer à un objet mémorisé (telle chaise particulière) un neurone de catégorie représentant la classe des objets de même « charpente » (l'item chaise). On dit que deux objets ont la même charpente, ou sont de modèles du même *item*, s'ils ont des organisations internes observables isomorphes. Un des principaux effets de l'apprentissage sera de préciser la charpente caractérisant un item grâce à la connaissance d'un plus grand nombre de ses modèles, de sorte à affiner la classification.

L'animal évolué possède une telle mémoire qui lui permet de former des images mentales. Mais le langage permettra de plus à l'homme de nommer ces « items », et de développer une *mémoire déclarative*, formée de neurones de catégories de niveaux de plus en plus complexes; elle serait sous la dépendance d'un SR également formé de neurones de catégories, appelé module interpréteur MI (Gazzaniga, 1985), qui correspondrait au système de surveillance évoqué par Changeux. L'hétérogénéité entre ce MI et les SR de bas niveaux va être cause de fractures (cf. Section 6). La *pensée* pourrait être la prise en compte de ces fractures au niveau du MI: penser, c'est revoir son image du monde pour résoudre une contradiction (la pensée est issue de la négation, cf. Le Guen, 1988). Alors la conscience ne serait que le phénomène émergent de la dialectique entre SR hétérogènes, ce qui est proche du point de vue (souvent contesté!) de Changeux (1983, p. 227): « la conscience est ce système de régulation en fonctionnement ».

Pour terminer, remarquons que les SEM peuvent généralement décrire l'apprentissage autorégulé ou avec instructeur de tout système qui est couplé

avec l'environnement de manière flexible ou prescrite par sa constitution; d'où des applications possibles en Robotique et en Intelligence Artificielle. Ils s'appliqueraient aussi au développement des connaissances en Épistémologie. Mais ils ont été essentiellement conçus pour essayer de mieux comprendre la formation et le fonctionnement de processus cognitifs complexes (et pourquoi pas « γνῶτι σεαυτον »... à travers le paysage!).

### 9. APPENDICE. Construction du paysage actuel

On part d'un système évolutif avec un système régulateur dont le délai de latence est  $T$ . Le paysage actuel en  $t$  est construit comme suit : A chaque instant  $s$  de l'échelle des temps du SE compris entre  $t$  et  $t+2T$ , soit  $P_s$  le paysage (instantané) des agents en  $s$ . Les paysages  $P_s$  et les foncteurs transition entre eux forment un système évolutif, donc un pattern de catégories indexé par la catégorie définissant l'ordre sur les instants entre  $t$  et  $t+2T$ .

Soit  $P$  la catégorie limite de ce pattern dans la catégorie des catégories. D'après la construction générale des limites (inductives) de catégories,  $P$  est obtenu en prenant la réunion des  $P_s$  et en y identifiant deux perspectives dont les trajectoires se confondent avant  $t+2T$ ; ceci signifie (cf. EV1, § 6) qu'il existe un  $s' < t+2T$  tel que ces perspectives, disons  $b$  dans  $P_s$  et  $b'$  dans  $P_{s'}$ , aient la même image par les foncteurs transition vers  $P_{s''}$ . En particulier, si une perspective devient l'objet 0 avant  $t+2T$ , elle est identifiée au 0 de  $P$ .

Un élément de  $P$  correspond à une trajectoire de perspectives; il lui est associé son instant initial, compris entre  $t$  et  $t+2T$ , qui sera la borne inférieure des  $s$  tels que l'une de ses perspectives appartienne à  $P_s$ . On appelle *paysage actuel* en  $t$  la sous-catégorie de  $P$  formée de ceux de ces éléments qui débutent avant  $t+T$ . Un élément du paysage actuel différent de 0 est dit *observable* par les agents.

Intuitivement,  $P$  est formé des trajectoires observables pendant au moins une durée égale à  $T$ , et débutant entre  $t$  et  $t+T$ . Par rapport au paysage  $P_t$ , on a « masqué » les perspectives disparaissant avant  $t+2T$ , mais ajouté celles débutant après  $t$  et avant  $t+T$ .

### Références

P. ARIÈS, *Le temps de l'Histoire*, le Seuil, Paris, 1986.

H. ATLAN, Organisation en niveaux hiérarchiques et information dans les systèmes vivants, dans *Réflexions sur de nouvelles approches dans l'étude des systèmes*, E.N.S.T.A., Paris, 1975.

P. AUGER, Dynamics and Thermodynamics in hierarchically organized systems, *Intern. Ser. on Systems Science and Engineering*, 5, Pergamon Press, Oxford, 1989.

H. B. BARLOW, *Perception*, 1, 1972, p. 371-394.

E. BERNARD-WEIL, Dans ce même volume, 1989.

J. -P. CHANGEUX, *L'homme neuronal*, Fayard, Paris, 1983.

J. -P. CHANGEUX et A. CONNES, *Matière à pensée*, O. JACOB éd., Paris, 1989.

W. S. COOPER, How evolutionary biology challenges the classical theory of rational choice, *Biology and Philosophy*, 4-4, 1989, p. 457-482.

A. DUCROCQ, *L'objet vivant*, Stock, Paris, 1989.

A. C. EHRESMANN et J. -P. VANBREMEERSCH, Hierarchical evolutive systems : a mathematical model for complex systems, *Bull. Math. Biology*, 49, (1), 1987, p. 13-50.

A. C. EHRESMANN et J. -P. VANBREMEERSCH, Modèle d'interaction dynamique entre un système complexe et des agents, *Revue Intern. Systémique*, 3, (3), 1989 a, p. 315-341.

A. C. EHRESMANN et J. -P. VANBREMEERSCH, Systèmes hiérarchiques évolutifs à mémoire auto-régulée, dans *Synergie et cohérence dans les systèmes biologiques*, WOLKOWSKI éd., Centre Interuniv. Jussieu-Saint-Bernard, Paris, 1989 b (à paraître).

S. EILENBERG et S. MACLANE, General theory of natural equivalences, *Trans. Amer. Math. Soc.*, 58, 1945, p. 231-294.

M. S. GAZZANIGA, *The social brain*, Basic Books, New York, 1985.

D. O. HEBB, *The organization of behavior*, Wiley, New York, 1949.

D. H. HUBEL et T. N. WIESEL, Receptive fields..., *J. de Physio.*, 160, (1), 1962, p. 106-154.

A. KESTLER, *Le cri d'Archimède*, Calmann-Lévy, Paris, 1965.

LE GUEN, dans Penser et Apprendre, *Colloque de Bobigny*, Eshel, Paris, 1988.

J. W. LENGELER, La nage des bactéries, *La Recherche*, 217, 1990, p. 20-29.

Th. MOULIN, Présentation sommaire des relateurs arithmétiques, *Cahiers Systema*, 12, 1986, p. 25-113.

S. PATARNELLO et P. CARNEVALI, A neural network model to simulate a conditioning experiment, *Intern. J. Neural Systems*, 1-1, 1989, p. 47-53.

M. RADMAN, SOS repair hypothesis, dans *Molecular mechanisms for repair of DNA*, HANAWALT, SETLOW, éd., 1975, p. 355-367. Plenum Press, New York.

R. ROSEN, A rational theory of biological systems, *Bull. Math. Biophys.*, 20, 1958, p. 245-260.

R. ROSEN, Organisms as causal systems which are not mechanisms..., dans *Theoretical Biology and Complexity*, Academic Press, New York, 1985.

M. P. STRYCKER, Is grand'mother an oscillation?, *Nature*, 339, 1989, p. 51.

R. THOM, *Méthodes mathématiques de la morphogenèse*, Union Gén. d'Édition, Coll. 10/18, Paris, 1974.

R. VALLÉE, Subjectivité et Systèmes, dans *Perspectives systémiques* (Actes Colloque de Cerisy), 1986, p. 44-53. L'Interdisciplinaire, Limonest.