

**INTRODUCTION AUX  
SYSTEMES EVOLUTIFS A MEMOIRE**  
par A.C. Ehresmann et J.-P. Vanbremeersch  
Amiens, 2007

Les *Systèmes Evolutifs à Mémoire* (SEM) offrent un modèle mathématique pour des systèmes évolutifs autonomes, tels que les systèmes 'vivants', biologiques, neuraux ou sociaux. Notre travail est basé sur la théorie des catégories, qui est un domaine spécifique des mathématiques permettant d'analyser et éventuellement de simuler la structure de ces systèmes et leur comportement dynamique. Nous avons passé plus de 20 ans pour développer progressivement la théorie des SEM et son cas particulier, le modèle MENS (Memory Evolutive Neural System) pour le système cognitif d'animaux supérieurs. Au cours des ans nos résultats ont été exposés dans une série d'articles et de conférences que le livre

*"Memory Evolutive Systems: Hierarchy, Emergence, Cognition"* (Elsevier 2007)  
reprend et développe, donnant une synthèse de ces deux décades de recherche.

## **1. Motivations**

L'un des deux auteurs, Jean-Paul Vanbremeersch, est un médecin spécialisé en gériatrie. Il s'était depuis longtemps intéressé aux causes des réponses complexes des organismes à la maladie et à la vieillesse.

L'autre, Andrée C. Ehresmann, est un mathématicien dont les aires de recherche ont inclus l'analyse, la théorie de l'optimisation, et ensuite la théorie des catégories en collaboration avec son mari, Charles Ehresmann, qui était un mathématicien très connu. Après la mort de celui-ci en 1979, elle a organisé à sa mémoire un colloque international sur la théorie des catégories à Amiens (1980). A cette occasion, elle a demandé l'aide de J.-P. Vanbremeersch pour rédiger une brève présentation de la théorie des catégories pour des non-mathématiciens. C'est au cours de ces premiers échanges que ce dernier a suggéré que les catégories pourraient avoir des applications pour résoudre des problèmes liés à la complexité.

Voici comment notre étude des SEM a débuté. Un examen de la littérature nous a révélé qu'à cette époque il n'y avait pas de vrai travail fait sur ce sujet ; bien que Robert Rosen ait promu l'utilisation de la théorie des catégories en biologie dès 1958, il n'en avait utilisé que les notions basiques et non ses constructions plus puissantes. C'est pourquoi nous avons décidé de combiner nos intérêts et de poursuivre des recherches dans cette direction.

### 1.1. Comment caractériser la complexité ?

A la fin des années 1970 et au début des années 1980, on parlait beaucoup de la question de "complexité", avec des chercheurs discutant des systèmes non-linéaires, de la théorie du chaos, des objets fractals, et d'autres constructions analytiques complexes. Nous avons vite réalisé que la théorie des catégories pourrait fournir des outils de nature différente pour étudier des problèmes liés à la complexité, en particulier :

(i) *Le problème du liage* : comment des objets simples peuvent-ils se 'recoller' pour former "un tout plus grand que la somme de ses parties" ?

ii) *Le problème de l'émergence* : comment les propriétés d'un objet complexe sont-elles reliées à celles des objets plus élémentaires qu'il recolle ?

(iii) *Le problème hiérarchique* : comment expliquer la formation d'objets de complexité croissante, en partant des particules élémentaires, qui forment des atomes, qui à leur tour forment des molécules, jusqu'à la formation de systèmes de plus en plus élaborés tels que des cellules, des animaux capables de processus cognitifs de plus en plus complexes, et des sociétés ?

Ces trois problèmes sont déjà abordés dans notre premier article en commun (Ehresmann & Vanbremeersch, 1987), dans lequel nous décrivons un modèle dynamique de système hiérarchique évoluant au cours du temps, appelé *Système Hiérarchique Evolutif* (SHE) ; nous y utilisons le concept catégorique de *colimite* et un processus de *complexification* d'une catégorie relativement à diverses données, modélisant en particulier la formation progressive d'objets de complexité croissante.

### 1.2. Auto-régulation

Toutefois ce premier article n'introduisait pas les caractéristiques des systèmes vivants qui permettent qu'ils soient autonomes, à savoir : un mécanisme de régulation interne, et une capacité pour reconnaître, de façon innée ou par apprentissage, divers traits de l'environnement, y répondre de manière appropriée et mémoriser le résultat.

Notre travail sur les SHE devait donc être enrichi pour tenir compte de ces caractéristiques, et c'est ce que nous avons fait dans des articles ultérieurs.

Initialement, nous avons introduit un unique organe de régulation (Ehresmann and Vanbremeersch, 1989). Mais bientôt nous avons réalisé qu'il en fallait plusieurs, à cause des différences de lois et d'échelles de temps entre les différents niveaux de la hiérarchie. C'est alors que nous avons introduit (Ehresmann & Vanbremeersch, 1990) le concept d'un réseau de tels organes de régulation, appelés des *Co-Regulateurs* (CR). Pour fonctionner, ces CR doivent s'appuyer sur une sorte d'archive interne centrale, appelée *Mémoire*. Cette mémoire n'est pas rigide comme dans un ordinateur, mais assez flexible pour permettre de s'adapter aux conditions changeantes au cours du temps, et de former des comportements de mieux en mieux adaptés. C'est ainsi que nous avons développé le modèle des SEM.

### 1.3. Systèmes cognitifs

En 1989, nous avons esquissé des applications des SEM au système nerveux et cognitif d'un animal. La même année, Gerald Edelman a publié "*The Remembered Present: A biological theory of consciousness*" (1989). Nous avons été étonnés de voir que les idées de ce neurologue corroboraient nombre des concepts auxquels nous étions arrivés en appliquant des méthodes catégoriques aux problèmes de la cognition. En particulier, il insiste sur la notion de "dégénérescence", qui correspond exactement à ce que nous avons appelé le *Principe de Multiplicité*, et que nous avons mis à la base des propriétés émergentes.

Le livre de G. Edelman nous a aussi encouragés à développer une étude de la *sémantique* et des processus cognitifs supérieurs, jusqu'à la conscience, dans le cadre des SEM, conduisant au modèle MENS pour les systèmes cognitifs d'animaux supérieurs. La notion de *conscience* est centrale dans certains de nos articles plus récents (Ehresmann & Vanbremeersch, 1992, 1999, 2002, 2003), dans lesquels nous avons essayé de mettre en évidence certaines de ses propriétés spécifiques, et montré comment elle repose sur le développement d'une mémoire personnelle étendue, le *Noyau Archétypal*, qui forme la base du Soi.

## 2. Pourquoi développer des modèles ?

Quel est donc l'intérêt de concevoir un modèle tel que les SEM pour étudier et, si possible, simuler des systèmes naturels complexes ? Dès leur origine, la philosophie puis la science ont rêvé de donner un schéma explicatif de l'Univers, de comprendre ce qu'est la vie, la conscience,... Mais plus le niveau de connaissance progresse, plus la complexité de ce qui reste à étudier se dévoile, demandant des outils mathématiques de plus en plus élaborés. On peut espérer qu'un modèle apporte quelques lumières sur ce qui caractérise un système complexe évolutif, sur ce qui le distingue de systèmes physiques inanimés, sur son fonctionnement et son évolution au cours du temps, de sa naissance à sa mort.

De plus, le comportement d'un tel système est fortement influencé par ses expériences antérieures ; dans un SEM, nous supposons que le système peut mémoriser ses expériences successives pour les utiliser ultérieurement. Un modèle représentant le système sur une certaine durée, avec ses réactions aux diverses expériences qu'il a subies, pourrait anticiper son comportement ultérieur, peut-être même en prévoir des variantes évolutives si des changements extérieurs surviennent. Ce rêve de la prévision, un peu comme de retrouver une Pythie des temps modernes, a été considérablement stimulé par la montée en puissance de l'informatique, qui permet de traiter de très nombreuses données, qu'elles soient numériques ou non, rapidement, efficacement; mais elle a ses limites.

Le rôle d'un modèle sera donc double: théorique pour une compréhension de nature fondamentale, pratique en vue d'applications biologiques, médicales, sociologiques, écologiques, économiques, météorologiques, etc...

## 2.1. *Quel type de modèle ?*

Il existe de nombreuses façons de concevoir des modèles.

- Les modèles classiques en physique, (e.g., ceux inspirés du paradigme newtonien, ou les modèles bien connus en thermodynamique, électromagnétisme, mécanique quantique) utilisent le plus souvent une représentation à l'aide de paramètres observables, liés entre eux par un grand nombre d'équations différentielles traduisant les lois de la physique, éventuellement avec comportement chaotique. De tels modèles ont souvent été importés en biologie et en écologie. Les paramètres (numériques ou vectoriels) sont déterminés de manière empirique, à partir des observations expérimentales. Ces modèles analytiques ont pris encore plus d'importance avec le développement de l'informatique qui permet de traiter des systèmes d'équations comportant un nombre considérable de paramètres.

- Un autre type de modèles est la "boîte noire"; ces modèles ne cherchent pas à reproduire le comportement interne d'un système; ils tiennent seulement la comptabilité des entrées et sorties en indiquant les règles permettant de passer des unes aux autres. Ces règles sont souvent de nature plus formelle, comme dans une machine de Turing ou dans les automates cellulaires de l'inventeur de l'ordinateur digital moderne, von Neumann (1966).. Ils peuvent conduire à des arbres décisionnels qui gèrent des variables issues de bases de données et fonctionnent suivant la logique booléenne habituelle, si.... et/ou ..... alors ... sinon ..... etc...; de tels arbres sont utilisés dans les systèmes experts, par exemple pour le diagnostic et la conduite à tenir devant certains tableaux médicaux.

- La cybernétique a été définie par Wiener en 1948 comme "the entire field of control and communication theory, whether in the machine or in the animal". Ses modèles utilisent de manière essentielle la notion de "feedback", et souvent aussi la théorie de l'information de Shannon (1949). Elle s'est développée entre les années 1940 et 1960, grâce à la réunion de spécialistes en biologie, neurobiologie et économie qui se sont aperçus qu'en regroupant leurs approches spécifiques, on retrouvait un certain nombre d'analogies dans la structure et les modes évolutifs des systèmes qu'ils étudiaient.

- C'est aussi dans cette pluridisciplinarité que s'est développée la théorie des systèmes, proche de la cybernétique, mais s'intéressant plus à la structure d'un système qu'à la manière dont il contrôle ses actions. L'approche systémique se différencie de l'approche analytique par l'accent mis sur l'étude des relations de toute nature entre les composants d'un système. Tel que défini par von Bertalanffy dès 1926, un système est un ensemble d'éléments en interaction entre eux organisés en fonction d'un but. Aujourd'hui (pour l'ingénieur ou le scientifique) un système consiste de deux composants ou plus, liés entre eux, et l'idée est de modéliser la dynamique du système, à savoir ses actions et interactions au cours du temps, à l'aide de l'évolution de sa fonction d'état.

- Cybernétique et théorie des systèmes sont maintenant intégrées dans une "théorie de la complexité", qui regroupe les modèles les plus divers: Intelligence artificielle, systèmes neuronaux connexionnistes (à la suite de Hopfield, 1992), théorie des catastrophes (Thom, 1974), théorie du chaos, théorie fractale (Mandelbrojt, 1975), systèmes autopoïétiques (Maturana et Varela, 1973), systèmes anticipateurs (Rosen, 1985)...

Sans compter nombre de modèles de nature moins mathématique.

## 2.2 *Les limites des modèles existants*

Les modèles décrits ci-dessus ont prouvé leur utilité dans de nombreuses applications, de la reconnaissance des formes, à la prédiction météorologique ou l'analyse financière. Ils donnent de bons résultats de nature locale, pouvant conduire à des prévisions à courte durée. Mais celles-ci sont relatives à un niveau de complexité et d'énergie particulier, chaque niveau ayant ses propres lois ; par exemple le niveau moléculaire n'aura pas les mêmes lois que le niveau des organes. De façon générale, il est impossible de connaître le général à partir du local, le tout à partir de ses parties prises une à une. D'autant que chaque partie aura sa propre temporalité, et ces différences temporelles retentissent intimement sur les mécanismes évolutifs de tout système.

- Les interactions entre un petit nombre d'objets spécifiques du système peuvent être bien comprises, mais les interactions d'un grand nombre d'objets créent de nouvelles formes d'organisation spatiale, énergétique ou temporelle, dont l'existence ne peut être considérée qu'à un niveau supérieur d'analyse pour comprendre leur fonctionnement.

On n'arrive pas plus à unifier les physiques des quanta et de la relativité que l'on n'arrive à comprendre le fonctionnement de l'esprit humain à partir des analyses les plus fines du fonctionnement des neurones ; ou comprendre comment l'évolution a pu passer de quelques macromolécules initiales mêlées dans une soupe primitive à un micro-organisme, capable de se développer en échangeant avec le milieu extérieur, de s'adapter progressivement, de se reproduire, avec des descendants capables d'adopter des comportements de plus en plus complexes.

- La prévalence dans la nature de systèmes complexes est la raison pour laquelle de nombreux auteurs ont considéré une notion de système hiérarchique dans les domaines les plus divers, par exemple: en physique (Reeves, 1988 ; Ullmo, 1993), en Biologie (von Bertalanffy, 1926 ; Jacob, 1970 ; Monod, 1970), en neurologie (Changeux, 1983 ; Jeannerod, 1983 ; Laborit, 1983), en théorie de l'évolution (Dobzhanski, 1970 ; Mayr, 1976 ; Teilhard de Chardin, 1955), en éthologie (Lorenz, 1973 ; Tinbergen, 1951), dans les sciences humaines (Koestler, 1965 ; Morin, 1977 ; Piaget, 1957). Ainsi Jacob écrit: "Tout objet que considère la biologie représente un système de systèmes; lui-même élément d'un système d'ordre supérieur, il obéit parfois à des règles qui ne peuvent être déduites de sa propre analyse."

- Mais c'est le passage d'un niveau inférieur au niveau supérieur qui reste obscur; comme le dit Farre (en préface au livre de Schempp, 1998): "computational strategies are

successively exploited only in the simulation of interactions with a single energetic level of observation". En effet, ce passage (soumis à un "energy gap") est caractérisé par ce que l'on appelle des propriétés émergentes. Pour simplifier, un tas de briques n'est rien, si ce n'est la somme de toutes ses briques, avec quelques espaces au hasard entre elles ; il est donc caractérisé par son poids, qui est la somme des poids des briques, son volume, qui est la somme de tous les volumes des briques et des espaces entre elles, et une forme plus ou moins due au hasard. Un mur, une digue, un barrage, correspondent aux mêmes briques, unies par des liens spécifiques, les unes par rapport aux autres, et chacune et toutes par rapport à un objet extérieur à elles, par exemple un cours d'eau. Chaque brique participe à l'objet mur, digue ou barrage de façon "concertée" avec les autres briques. Toutes ensemble, elles agissent de façon concertée vis à vis de ce cours d'eau, l'ensemble de leurs actions correspondant à l'action du mur, de la digue ou du barrage vis à vis du cours d'eau.

### **3. Deux exemples typiques**

#### *3.1. Système nerveux d'un animal vertébré*

Dans le cas du système nerveux, les modélisations usuelles, en particulier les systèmes neuronaux connexionnistes, donnent des résultats assez fiables quand on effectue une analyse locale : il sera possible de déterminer à partir de quelques règles de base, sur un petit nombre de neurones, sur une durée restreinte une simulation exacte du fonctionnement de ces quelques neurones. Le problème se complique dès que l'on veut étendre le modèle pour étudier le fonctionnement global du cerveau. Même la description d'une seule grande fonction cérébrale, par exemple la reconnaissance visuelle, ne peut se ramener à une somme d'analyses locales. Ce serait comme de vouloir comprendre le fonctionnement d'une société par la somme des familles qui la composent.

- L'organisation d'une telle fonction visuelle est complexe, suivant une structure que l'on peut qualifier de hiérarchique, depuis les multiples neurones composant l'image rétinienne dans le nerf optique jusqu'à des groupes neuronaux des aires supérieures : groupes de neurones des aires visuelles opérant une analyse plus ou moins parallèle des différents traits de l'objet observé, groupes de neurones de la mémoire, activés à partir de ces aires et impliqués dans la formation et la reconnaissance de l'image de l'objet, groupes de neurones des zones associatives intégrant la signification de l'image perçue dans la mémoire sémantique. En somme, il existe un processus qui à chaque étage se complexifie par l'association d'un nombre croissant de neurones intriqués réagissant de manière synchrone ; il repose sur les règles de neurophysiologie cellulaire (reliant des observables tels que fréquence d'activation d'un neurone, délais de transmission, force d'une synapse), et sur les interrelations des groupes neuronaux entre eux et avec d'autres zones cérébrales. L'association de différents groupes neuronaux peut éventuellement se comporter comme un nouvel objet, confronté ensuite à d'autres données fournies par les zones inférieures. La reconnaissance d'un objet comme étant une bouteille ne suffit pas à reconnaître le liquide qu'elle contient, puis, s'il s'agit d'un vin, sa nature, son origine etc...

- On conçoit que les observables, en particulier les temporalités, dépendent d'une manière essentielle du niveau hiérarchique (neurones, groupes de neurones, aires cérébrales, aires associatives) : la durée d'une étape d'activité d'un neurone issu de la rétine, c'est-à-dire la période comprise entre le stimulus qu'il reçoit, les phénomènes de transmission le long de l'axone, puis à la synapse, la période de repos consécutive, ne sera pas du même ordre quantitatif et qualitatif que si l'on étudie les mécanismes en jeu dans la reconnaissance d'un visage par une aire supérieure.

Donnons un exemple clinique (expérimenté par l'un d'entre nous) de cette variabilité temporelle. Il s'agit probablement d'un équivalent épileptique. Il se caractérise par une impression d'accélération, chaque geste, chaque pensée, chaque action semblant s'effectuer à une vitesse record, comme un film en accéléré. Et cependant, au delà de l'impression inquiétante de ce phénomène, le sujet peut s'attacher à analyser le rythme réel des choses, comme s'il se plaçait à l'extérieur de "lui-même accéléré". Tout se passe alors comme s'il avait deux niveaux de conscience : un premier niveau extrêmement et anormalement rapide, et un deuxième normal. On pourrait analyser ce phénomène comme l'irruption anormale au niveau conscient d'une multitude de fragments d'actions ou de pensée. Cette fragmentation est normalement inconsciente et regroupée au niveau conscient en un processus continu; mais dans ce cas, elle devient perceptible, chaque fragment étant à l'origine d'une discontinuité, d'une rupture du continu. Au lieu d'un écoulement continu, au rythme des pensées et des actions *globales*, ce phénomène introduit un écoulement haché, au rythme du jeu de la décomposition de chaque mouvement complexe en ses composants successifs, de chaque pensée en ses bouts de phrase ou même mots, mis bout à bout.

### 3.2. *Hiérarchie d'une entreprise*

Un autre exemple serait celui d'une entreprise. Il existe un certain nombre de groupes d'ouvriers, aux fonctions bien déterminées, utilisant certains outils, certaines matières premières. Leur production aboutit par exemple à des ouvriers spécialisés qui vont assembler les pièces initialement fabriquées. D'autres seront chargés des contrôles, d'autres des emballages, des expéditions, etc. Ces groupes multiples seront supervisés par des contremaîtres, des chefs d'équipe, eux-mêmes en relation entre eux et avec des cadres à l'échelon supérieur. L'encadrement consiste donc à superviser toute une hiérarchie de personnels plus ou moins spécialisés. Le personnel d'encadrement a à son tour une direction, directeurs de différents départements, qui rendent compte au conseil d'administration, et en fin de compte au P.D.G. Les ouvriers, les contremaîtres, les directeurs, le président, le conseil d'administration font tous partie du même système. Tous sont nécessaires pour l'activité de l'entreprise, mais chacun selon sa fonction.

- On conçoit que les ouvriers au bout de la chaîne ne sont pas en relation avec les mêmes objets, les mêmes outils, les mêmes personnes intérieures ou extérieures à l'entreprise que les membres du conseil d'administration. Ils n'ont pas les mêmes délais décisionnels, le même rythme d'élaboration de procédures et d'actions effectives en découlant que les cadres. Le choix entre toutes les procédures possibles pour un

problème donné au niveau de l'ouvrier est moins large, la procédure moins complexe, aussi bien en ce qui concerne les paramètres qui la compose que le nombre d'étapes sur laquelle elle sera appliquée. La prise de stratégie à l'échelon supérieur, consistant par exemple à imaginer une nouvelle production, à rechercher les marchés, les circuits de distribution, le montage financier est beaucoup plus complexe et a des répercussions à plus long terme. Elle ne se répercutera qu'ultérieurement aux échelons inférieurs, la cadence décisionnelle et d'exécution s'accroissant progressivement du haut vers le bas.

- Qu'arrive-t-il lorsque le système rencontre un problème externe – par exemple un retard dans l'approvisionnement d'une matière première ? Le manque est immédiatement perçu au niveau des ouvriers en tant que fait instantané ; il n'entraînera qu'avec retard une procédure de remplacement, décidée par les niveaux supérieurs, après analyse des causes, des conséquences, et recherche de la stratégie optimum pour un délai prévisible. Là encore, la durée des étapes est très variable, leur qualité aussi, par exemple au niveau des fréquences d'activation, du nombre et de la complexité des paramètres à analyser, du nombre et de la complexité des choix de procédures à appliquer.

#### **4. Comment le modèle des SEM fonctionne-t-il ?**

Les exemples précédents sont représentatifs des systèmes que nous voulons étudier, à savoir des systèmes autorégulés, évolutifs, capables de gérer leurs interactions avec le milieu extérieur et de mémoriser leurs expériences pour une meilleure adaptation. De tels systèmes peuvent être dits vivants, et ils comprennent aussi bien des cellules, des organismes biologiques, que plus largement des systèmes écologiques, sociaux ou culturels. Quelles sont les notions essentielles à introduire pour une modélisation de tels systèmes que R. Rosen (1985) appelle "organismes" ?

##### *4.1. Systèmes Evolutifs*

- La configuration du système à un instant donné peut être vue comme une 'photo' du système, montrant ses composants et les interactions en cours entre eux à cet instant, qu'elles soient de type structurel (déterminant la forme du système), ou de type fonctionnel permettant des transferts d'informations ou de contraintes ; avec une grande variabilité qualitative dans le niveau de complexité de ces composants, dans les liens assurant leur interconnexion horizontale et verticale, et leurs relations éventuelles avec d'autres objets externes au système, dans leur type d'activité spécifique au sein du système ; avec aussi une variabilité quantitative sur les observables qui mesurent la force et la durée des interactions.

- La structure et l'organisation du système, ainsi que ses composants, ne sont pas des invariants, mais peuvent évoluer au cours du temps. Les changements proviennent : des échanges internes entre objets et avec l'extérieur, par perte ou acquisition d'informations, d'énergie, de matière ; de la dissociation de certains composants ; de la formation de composants plus complexes. Les différentes configurations du système et les



changements entre elles forment un *Système Evolutif* (SE).

- Le système peut évoluer selon un mode naturel, dans le cadre du maintien de son homéostasie ; la structure globale reste stable bien que des objets soient renouvelés, des réparations effectuées, par exemple un comptable existera toujours dans une entreprise, bien que ce ne soit pas toujours la même personne.

Mais si l'environnement varie et si les contraintes internes ou externes deviennent trop contraignantes, il peut y avoir une rupture d'équilibre, à quel que niveau que ce soit, que de simples réparations ne peuvent réparer ; nous parlons alors d'une *fracture*. Pour la surmonter, il faut une modification plus ou moins profonde de la structure, par création de nouveaux composants et liens complexes, avec émergence de propriétés nouvelles. Ceci sera modélisé par le *processus de complexification* ('verticale'). Cette complexification peut correspondre à un enrichissement de la hiérarchie du système, par formation de niveaux plus élevés permettant en particulier une mémorisation d'expériences plus complexes, de leurs modifications successives et de leurs conséquences prévisibles.

- Le cerveau donne des exemples de ces deux situations. Le renouvellement des macromolécules d'un neurone est un exemple du maintien de la stabilité, éventuellement avec de petites réparations. Par contre, la rencontre avec un objet inconnu débute une activité d'apprentissage qui forme de nouveaux liens synaptiques. Des exemples similaires peuvent être trouvés dans une société : on a l'élection régulière du parlement, mais celle-ci peut conduire à des modifications politiques d'une nature plus fondamentale lors d'un changement de majorité.

#### 4.2. Réseau de régulateurs internes et Mémoire

L'évolution naturelle d'un système autonome est contrôlée de manière interne. Par suite de la trop grande variabilité des différents objets et groupes des différents niveaux, il ne peut exister de mécanisme régulateur central, à moins d'introduire un processus divin présent partout, à tous moments, à tous niveaux, à tous les temps/rythmes spécifiques. Il faut donc considérer un réseau parallèle d'organes de régulation internes, les CR, chargés d'observer, analyser, évaluer et prendre des décisions ; réseau parallèle horizontalement, aussi bien que verticalement dans la hiérarchie structurelle du système. Les CR participent au développement d'une mémoire centrale, à laquelle chacun a un accès différentiel.

- Chaque CR est un sous-système formé d'un petit groupe de composants d'un certain niveau de complexité, opérant ensemble par étapes à son rythme propre, utilisant des mécanismes de boucles, de feed-back ou de feed-forward. Sa spécificité d'activité entraîne une spécificité des procédures (ou stratégies) qu'il pourra être amené à mettre en œuvre (et qui déterminent sa fonction au sein du système), en tenant compte des informations partielles provenant d'autres parties du système ou de l'extérieur (qui forment son "paysage"), des contraintes structurelles et temporelles auxquelles il est

soumis, des résultats de ses expériences antérieures qui sont mémorisées pour une meilleure adaptation et auxquelles il peu accéder.

L'analyse de la situation sera très différente selon les CR. En particulier leurs temps propres sont par nature hétérogènes: si l'on considère une structure biologique, depuis ses atomes ou même ses particules jusqu'aux molécules, macromolécules, organites, cellules, organes et enfin l'organisme tout entier, chacun de ces niveaux hiérarchiques fonctionnera à son propre rythme ; il faudra des temps incomparablement plus élevés pour renouveler toutes les cellules d'un organe que tous les atomes d'une chaîne protéique. On conçoit donc que chaque CR a sa propre échelle de temps et ses propres procédures. Le comportement d'un insecte ne prend pas en compte l'évolution à long terme de son écosystème.

Et pourtant les CR ne sont pas indépendants et doivent tous fonctionner de manière cohérente : on connaît le paradoxe du battement des ailes d'un papillon en Nouvelle-Guinée qui d'une certaine façon participe à la formation d'un cyclone sur les côtes de Floride.

- Pour expliquer de tels effets globaux, il faut bien comprendre que les procédures choisies par les différents CR doivent être réalisées non sur leurs paysages respectifs mais sur le système même, où elles rentrent en compétition pour les ressources communes. Il s'instaure alors un processus d'équilibration entre elles (nous parlons du *jeu entre les procédures*), non pas dirigé centralement, mais influencé par les forces et temporalités respectives des différents CR. Si toutes les procédures choisies par eux sont cohérentes entre elles, elles sont réalisées de telle façon que l'ensemble du système maintienne au moins une certaine homéostasie, et éventuellement développe de nouvelles capacités.

Si les choix ne sont pas tous compatibles entre eux, ce jeu va éliminer certaines des procédures proposées, conduisant à une *fracture* pour les CR correspondants, qu'il faudra réparer ultérieurement, sous peine de dyschronie s'il y a dépassement des possibilités de réparation, et donc de perte de l'homéostasie. Le vieillissement et la mort peuvent alors être interprétés comme une défaillance des mécanismes régulateurs ne permettant plus une telle adaptation.

En particulier, il se créera une "dialectique" entre CR de niveaux et rythmes hétérogènes. En effet, une série de modifications d'un niveau inférieur peut n'être répercutée à un CR d'un niveau supérieur plus lent qu'avec retard, lui causant une fracture; pour la réparer, ce CR pourra imposer une nouvelle stratégie aux niveaux inférieurs, éventuellement même un changement de rythme. D'où le risque d'une "*cascade de dé/resynchronisations*" à des niveaux de plus en plus élevés, ce que nous avons proposé comme caractéristique du vieillissement d'un organisme.

- Un SEM est capable d'apprentissage et d'adaptation, grâce au développement d'une *mémoire* centrale à long terme qui enregistre les expériences successives du système, les procédures utilisées par les CR pour répondre à différentes situations et leurs résultats. Chaque CR peut accéder à une partie spécifique de cette mémoire, contenant en

particulier les procédures qui lui sont admissibles et qu'il peut utiliser dans ses choix, en fonction des résultats attendus ; en retour il participe à son développement.

Dans le cas de systèmes plus complexes (comme le système nerveux d'un animal supérieur), il y aura de plus classification des traces retenues dans la mémoire, conduisant au développement d'une *mémoire sémantique*. Et celle-ci peut permettre le développement d'une mémoire personnelle, que nous appelons le *Noyau Archétypal* (NA) qui entrelace les différentes sortes d'expériences de l'animal, est activé rapidement et auto-entretient cette activation pendant longtemps.

Ce NA est la base du soi, et permet au moins le développement d'une *conscience* primaire. Une des caractéristiques d'une telle conscience est la formation, lorsqu'arrive un évènement imprévu, d'un paysage global, sur lequel un processus de rétrospection permet de chercher la nature de cet évènement, et un processus de prospection permet de choisir et programmer sur le long terme une suite de réponses adaptées.

#### 4.3. Avec quels outils ?

Pour étudier ces problèmes, nous avons eu recours à la théorie des catégories, un sous-domaine des mathématiques introduit par Eilenberg & Mac Lane en 1945 et qui a un statut particulier, à la frontière entre mathématique, logique et méta-mathématique.

- Initialement conçue pour relier des constructions algébriques et topologiques, cette théorie a acquis un rôle fondateur en mathématique et logique, en particulier via la théorie des *topos* introduite par Lawvere et Tierney (à la suite de Grothendieck), et dans la *théorie des esquisses* développée par C. Ehresmann et son école. Elle offre un cadre unifiant les principales opérations effectuées par le "working mathematician" (expression reprise du titre du livre bien connu de Mac Lane, 1971) et rend possible une théorie générale des structures ; pour cela elle a aussi été décrite comme relevant d'un "structuralisme mathématique".

- En fait, la théorie des catégories, vue comme analysant la façon dont le mathématicien pense, reflète les principales capacités de notre esprit. Notre idée de base est que l'évolution des systèmes vivants, jusqu'à l'esprit humain, repose sur un petit nombre d'opérations archétypes, qui sont exactement celles modélisables à l'aide de la théorie des catégories : formation, comparaison et composition de relations entre objets permettant le transfert et l'analyse de l'information ; synthèse d'objets complexes par agrégation d'objets plus élémentaires interagissant (opération "colimite") ; analyse d'un objet complexe via ses décompositions, expliquant la persistance de son identité complexe malgré le renouvellement de ses composants élémentaires (transformation progressive d'une colimite) ; formation de hiérarchies d'objets de plus en plus complexes (processus de complexification) ; processus d'optimisation (constructions universelles) ; mémorisation de nouveaux objets et leur reconnaissance ultérieure (formation, préservation et rappel d'une colimite) ; classification d'objets en classes d'invariance menant à la définition de concepts (représentés par une limite).

- Ce sont ces opérations que nous utilisons pour modéliser des organismes, via les

SEM. De par leur nature relationnelle et qualitative, les SEM offrent une méthode qui englobe à la fois les différents aspects des systèmes autonomes complexes, aspects évolutifs et temporels (SE), locaux (paysages des CR), globaux (jeu des procédures).

## Références

- Bertalanffy (von), L., 1926, *Roux'Archiv* 108.
- Changeux, J.-P., 1983, *L'homme neuronal*, Fayard, Paris.
- Dobzhansky, T., 1970, *Genetics of the evolutionary process*, Columbia University Press, New York.
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 1987, Hierarchical Evolutive Systems: A mathematical model for complex systems, *Bull. of Math. Bio.* 49 (1), 13-50.
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 1989, Modèle d'interaction dynamique entre un système complexe et des agents, *Revue Intern. de Systémique* 3 (3), 315-341.
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 1990, Hierarchical Evolutive Systems, *Proc. 8th International Conference of Cybernetics and Systems* (Ed. Manikopoulos), New York, Vol. 1, The NIJT Press, Newark, 320-327.
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 1992, Semantics and Communication. for Memory Evolutive Systems, in *Proc. 6th Intern. Conf. on Systems Research* (Ed. Lasker), University of Windsor.
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 1999, Online URL:  
<http://perso.wanadoo.fr/vbm-ehr>
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 2002, Emergence Processes up to Consciousness Using the Multiplicity Principle and Quantum Physics, *A.I.P. Conference Proceedings* 627 (CASYS, 2001; Ed. D. Dubois), 221-233.
- Ehresmann, A.C. & Vanbremeersch J.-P., 2003, A categorical model for cognitive systems up to consciousness, in *Proc. Intern. Conf. on theoretical Neurobiology* (Ed. Singh), NBRC, New Delhi, 50-61.
- Eilenberg, S. & Mac Lane, S., 1945, General theory of natural equivalences, *Trans. Am. Math. Soc.* 58, 231-294.
- Hopfield, J. J., 1982, Neural networks and physical systems, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 79, 2554-2558.
- Jacob, F., 1970, *La logique du vivant*, Gallimard, Paris.
- Jeannerod, M., 1983, *Le cerveau-machine*, Fayard, Paris.
- Koestler, A., 1965, *Le cri d'Archimède*, Calmann-Lévy, Paris.
- Laborit, H., 1983, *La Colombe Assassinée*, Grasset, Paris.
- Lorenz, K., 1973, *L'envers du miroir*, Champs Flammarion, Paris.
- Mac Lane, S., 1971, *Categories for the working mathematician*, Springer.
- Mandelbrot, B., 1975, *Les objets fractals, forme, hasard et dimension*, Flammarion, Paris.
- Maturana, H. & Varela, F., 1973, Autopoietic systems: a characterization of the living organization, in *Autopoiesis and cognition: the realization of the living* (Eds.

- Mayr, E., 1976, *Evolution and the diversity of life, Essays*, Belknap Press of Harvard
- Monod, J., 1970, *Le hasard et la nécessité*, Ed. du Seuil, Paris.
- Morin, E., 1977, *La Méthode*, Editions Seuil, Paris.
- Neuman (von), J., 1966, *The theory of self-reproducing automata*, Univ. of Illinois Press, Chicago.
- Piaget, J., 1967, *Biologie et connaissance*, Gallimard, Paris.
- Reeves, H., 1988, *Patience dans l'azur, l'évolution cosmique*, Edition du Seuil, Paris.
- Rosen, R., 1958, The representation of biological systems from the standpoint of the Theory of Categories, *Bull. Math. Biophys.* 20, 245-260.
- Rosen, R., 1985a, *Anticipatory systems*, Pergamon, New York.
- Schempp, W.J., 1998, *Magnetic resonance imaging*, Wiley-Liss, New York.
- Shannon, C.E. & Weaver, W., 1949, *The mathematical theory of communication*, Univ. of Illinois Press, Urbana.
- Teilhard de Chardin, P., 1955, *Le phénomène humain*, Editions du Seuil, Paris.
- Tinbergen, N., 1951, *The study of instinct*, Clarendon Press, Oxford.
- Thom, R., 1974, *Modèles Mathématiques de la Morphogenèse*, Paris: Union Générale d'Édition, Coll. 10/18.
- Ullmo, J., 1993, *La pensée scientifique moderne*, Champs Flammarion, Paris.
- Wiener, N., 1948, *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*, Hermann, Paris.