



HAL
open science

La systémique comme jalon et rhétorique en sciences de gestion

Yvon Pesqueux

► **To cite this version:**

Yvon Pesqueux. La systémique comme jalon et rhétorique en sciences de gestion. Doctorat. France. 2020. halshs-02496706

HAL Id: halshs-02496706

<https://shs.hal.science/halshs-02496706>

Submitted on 3 Mar 2020

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

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

Yvon PESQUEUX

Hesam Université

Professeur du CNAM, titulaire de la Chaire « Développement des Systèmes d'Organisation »

292 rue Saint Martin

75 141 Paris Cédex 03

France

Téléphone ++ 33 (0)1 40 27 21 63

FAX ++ 33 (0)1 40 27 26 55

E-mail yvon.pesqueux@lecnam.net / yvon.pesqueux@gmail.com

Site web eesd.cnam.fr

La systémique comme jalon et rhétorique en sciences de gestion

Résumé

Prenant acte des nombreuses références effectuées à la systémique en sciences de gestion, ce texte possède pour ambition d'en proposer les attendus. Après avoir présenté les contours du modèle systémique de l'organisation, il en propose une approche chronologique au regard des « jalons » du domaine avant de détailler les apports de J. Mélése et de J.-L. Le Moigne, compte tenu d'un focus sur la notion de « boîte noire » avant de préciser les apports de M. Crozier & E. Friedberg puis de conclure sur le connexionnisme et les réseaux neuro-mimétiques comme forme contemporaine de la modélisation systémique.

Introduction

La modélisation systémique de l'organisation est particulièrement importante dans la mesure où elle jouit d'un triple statut :

- celui d'un modèle de l'organisation, historiquement daté, né dans la décennie 50 et culminant dans la décennie 70,
- celui d'une méthodologie qui inspire toujours largement les méthodes de structuration des systèmes d'information et résonne alors d'autant avec le premier que l'organisation est aussi un système d'information ; historiquement daté dans la version précédente, on retrouve la modélisation systémique des systèmes d'information toujours en pleine actualité aujourd'hui au travers des réalisations informatiques servant de support aux systèmes d'information formels,
- celui d'une épistémologie des sciences des organisations dans la mesure où, comme base de modélisation, elle constitue une référence générale dans le domaine.

Le modèle systémique entre en phase avec le modèle ingénierique de l'organisation. Il en fournit la base la plus formalisée.

Yvon PESQUEUX

Le modèle systémique est la représentation de l'organisation la plus proche des logiques de modélisation. C'est d'ailleurs B. Walliser¹ qui montre l'étroite liaison qui s'établit entre système et modèle. Il va d'ailleurs proposer une démarche formelle applicable à la modélisation. Mais c'est aussi ce même auteur qui, dans un autre texte², signale l'utilisation « joker » du terme (ce serait ainsi en partie le cas dans l'utilisation qu'en fait K. Marx quand il parle de « système économique » dont B. Walliser précise la définition en parlant de « *structure hiérarchique d'entités, qui entretiennent des rapports simultanés d'unité et de lutte, et déterminent dynamiquement des régimes économiques successifs entrecoupés par des crises* »). On parlera aussi de « système de production ».

Le mot de système comprend donc l'idée de complexité et conduit à recouvrir aussi bien une démarche de composition permettant de passer du simple au complexe que la réciproque. La démarche de composition s'applique particulièrement bien dans les domaines techniques (on peut citer, par exemple, l'expression d'« intégration de systèmes ») et dans celle de décomposition qui exprime le projet de compréhension d'une situation difficile à décomposer de façon analytique en éléments simples. C'est en cela que le complexe (difficile à décomposer) se dissocie du compliqué. Le concept de système qui était entaché d'un caractère plutôt statique est aujourd'hui compris comme un phénomène dynamique comprenant des entités en interactions mais aussi autorégulées.

Le modèle systémique est basé sur les aspects suivants :

- une syntaxe en éléments et entités, isomorphes avec ce qu'ils représentent, homomorphe avec un système où les formalisations (variables, relations), les typologies syntaxiques (graphes, matrices, modèles analytiques, modèles élémentaires) relèvent du champ de la théorie des systèmes ;
- une sémantique où l'on retrouve les processus de base de la modélisation (classification, mise en relation, généralisation, induction, hiérarchie), les démarches systémiques (phases, outils, interaction « observateurs – système ») et son champ lexical (« intérieur – extérieur », sous-modèles, dimension temporelle) ;
- une pragmatique avec la « modifiabilité » d'un système (séquences et fonctions), la simulation qu'il permet, les typologies pragmatiques (qui permettent de distinguer entre modèles cognitifs, prévisionnels, décisionnels, normatifs) ;
- une méthodologie avec la phase de construction (délimitation et structuration, recensement des variables et des relations, mise en cohérence des relations, estimation des variables et des relations, tests), leur utilisation prospective (détermination, valorisation et agrégation des effets, niveaux de choix entre celui des décisions individuelles et des décisions collectives), les aspects de la construction d'un modèle normatif (conception, définition des modules et des liaisons, organisation d'un système, optimisation d'un système, tests) qui se trouvent prendre sens au sein d'un système.

La modélisation systémique conduit à accepter l'idée qu'un système est un outil de modélisation. Elle permet de formaliser les structures qui restent le plus souvent

¹ B. Walliser, *Systèmes et modèles*, Seuil, Paris 1977

² B. Walliser, « Systémique et économie », *Revue internationale de systémique*, vol. 2, n° 3, 1988

implicites (dans le cas d'une démarche de décomposition) ou encore venant constituer l'ossature d'une situation (dans le cas d'une démarche de composition).

Le modèle systémique de l'organisation

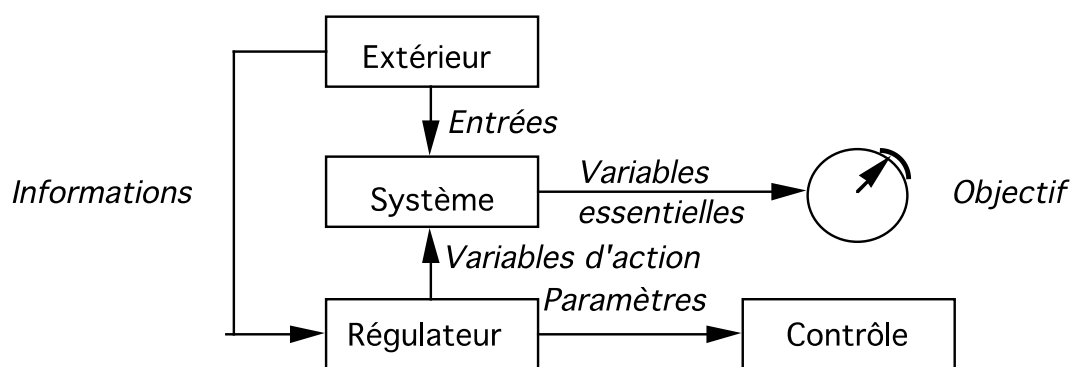
L'organisation est représentée comme un système finalisé « *effectuant des transformations, dont il s'agit d'étudier le fonctionnement de manière à en améliorer le contrôle* »³.

Le modèle systémique de l'organisation repose ainsi sur des invariants :

- une organisation se modélise comme un ensemble d'éléments en interaction, ces éléments pouvant être eux-mêmes des systèmes (on parlera alors de sous-systèmes),
- le système est finalisé,
- le système est ouvert sur son environnement d'où le jeu contradictoire de l'ordre et du désordre, les états du système devant lui permettre de s'adapter à la variété des situations avec le jeu de la loi de W. R. Ashby⁴ qui veut que la variété des ordres disponibles soit au moins égale à la variété des états du système ; mais si le système possède une frontière, cela signifie en même temps que l'on peut dissocier ce qui se trouve à l'intérieur de ce qui se trouve à l'extérieur du système ;
- les systèmes se caractérisent par des « effets retour » (*feedbacks*), les sorties rétroagissant sur les entrées ; l'approche système met ainsi l'accent sur les effets d'apprentissage des systèmes et sur les boucles positives ou négatives⁵.

La systémique permet d'offrir une modélisation forte du contrôle et de la régulation. Ainsi, J. Mèlèse⁶ propose deux représentations systémiques du contrôle et de la régulation d'un système partiellement déterminé, représentations qui serviront de module élémentaire dans la combinaison qu'il nous en propose dans l'analyse modulaire des systèmes.

Contrôle et régulation d'un système partiellement déterminé



³ Y.-F. Livian, *Organisation – théories et pratiques*, Dunod, Paris, 2001, p. 257

⁴ W. R. Ashby, *Introduction to Cybernetics*, Wiley, 1956, pp. 202-218

⁵ J.-P. Helfer & M. Kalika & J. Orsoni, *Management – stratégie et organisation*, Vuibert, Paris, 2000, p. 379

⁶ J. Mèlèse, *La gestion par les systèmes*, Hommes et Techniques, Paris 1968, pp. 199-201

Dans une organisation obtenue par combinaison de boucles et de hiérarchies de régulations, B. Walliser⁷ combine quatre activités et trois niveaux en sous-systèmes reliés à chaque niveau par des variables d'entrées – sorties et des variables de commande.

Une approche chronologique du modèle systémique⁸

La notion de système apparaît avec la cybernétique. « *La cybernétique a pour objet principal l'étude des interactions entre systèmes gouvernants (ou systèmes de contrôle) et systèmes gouvernés (ou systèmes opérationnels), dans les milieux régis par des processus de rétroaction* »⁹. Comme science des mécanismes autorégulés, elle est applicable aux processus homéostatiques (de la biologie aux ordinateurs). La théorie générale des systèmes reprend de nombreux concepts et propriétés issus de la cybernétique. Le fondateur de la Théorie générale des systèmes est L. von Bertalanffy¹⁰ et ce fut K. Boulding¹¹ qui en fit la déclinaison en économie.

La trajectoire de la théorie des systèmes dans son application aux organisations part donc de la cybernétique (théorie des systèmes artificiels) puis de sa déclinaison en biologie (théorie des systèmes vivants qui va constituer une modofocation des représentations du vivant en ouvrant la porte à la micro-biologie, c'est-à-dire une conception de la biologie à partir des codages) puis en sciences sociales (par exemple comme théorie des organisations avec la systémique et en psychologie génétique avec, J. Piaget qui s'en empare pour formaliser une théorie de l'apprentissage). Elle se distingue de la Recherche Opérationnelle dans la mesure où, même si elle conserve un aspect formalisé, elle offre un corpus théorique « ouvert » car applicable à de nombreux domaines, là où la recherche opérationnelle se caractérise par ses dimensions formelles.

Le premier auteur à avoir mobilisé la théorie des systèmes de façon marquante en organisation est J. Forrester¹² dont il en fait les fondements d'*Industrial Dynamics*.

Le second auteur est S. Beer¹³ qui propose, à partir de la théorie des systèmes, une structure organisationnelle en cinq systèmes :

- l'unité décentralisée de base fonctionnant de façon autonome avec les autres unités décentralisées,
- l'organe de contrôle qui, à partir des informations issues de l'unité décentralisée donne une image de son fonctionnement dans le but de construire des repères et des normes et tient le rôle de la direction locale et joue le rôle d'interface entre la direction générale et l'unité décentralisée,

⁷ B. Walliser, *op. cit.*, p. 115

⁸ D'après B. Lussato, *Introduction critique aux théories d'organisation*, Dunod, Paris, 1972, pp. 95-144

⁹ B. Lussato, *op. cit.*, p. 96

¹⁰ L. von Bertalanffy, « General System Theory ; a New Approach to Unity of Science », *Human Biology*, décembre 1951, vol. 23, pp. 303-361

¹¹ K. Boulding, « General System Theory, a Skeleton of Science », *Management Science*, avril 1956, vol. 2, n° 3, p. 197

¹² J. Forrester, *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1961

¹³ S. Beer, *Decision and Control*, John Wiley & Sons, New York, 1966, puis *Brain of the firm*, Penguin Press, New York, 1972

- l'organe de niveau principal qui assure l'harmonisation du fonctionnement de l'ensemble à partir d'informations issues des directions locales (qualifié de « canal central ») et d'un système venant acheminer des ordres supplémentaires (qualifié de « canal d'excitation » s'il s'agit de stimuler l'activité ou de « canal d'inhibition » s'il s'agit de la limiter),
- ce que nous appellerions aujourd'hui le système d'information stratégique qui réunit les informations internes sur l'état de l'organisation et les informations externes,
- la direction générale qui préside aux destinées de l'organisation et où, selon cet auteur, diplomatie et esprit de finesse priment.

I. H. Ansoff¹⁴ a proposé une méthode de configuration des structures à partir de la dualité « processus logistique (production des biens et des services) – processus de décision ». En tant qu'auteur de la contingence, il met l'accent sur l'interaction « stratégie – structure – fonctionnement » à partir de trois critères (efficience, faisabilité, information et décision).

Un trait est commun à ces travaux (tout comme dans ceux de J.-L. Le Moigne) : c'est la distinction qu'ils effectuent entre système opérant, système d'information et système de pilotage. On est là en présence d'un emprunt à la modélisation des automatismes.

Les approches systémiques des organisations au travers des apports de J. Mélése et de J.-L. Le Moigne

C'est à partir d'un autre ouvrage de J. Mélése¹⁵ que l'on va envisager ici cette perspective. Cet ouvrage illustre le recouvrement du modèle systémique de l'organisation par la question du système d'information. J. Mélése va argumenter sur la différence qui existe entre une donnée et une information à partir d'une définition de G. Bateson : « *une donnée est la trace laissée par un événement et l'information est une différence qui engendre une différence* ». Pour lui, l'information modifie le comportement et les représentations du récepteur, à condition qu'elle soit signifiante pour lui. Il introduit la notion de niveaux de signification : l'information prendra une signification différente en fonction du niveau auquel elle sera perçue et décodée, ou sera même considérée comme du bruit si elle n'est pas décodée. D'où le danger de rechercher et d'imposer un langage unificateur dans l'organisation. Au-delà des besoins d'informations pertinentes pour la réalisation de leurs tâches, les Hommes ont aussi des désirs d'informations qui ne sont pas forcément rationnels mais qui sont propres à l'être socialisé en relation permanente avec de multiples environnements mouvants. L'information est porteuse de ces relations et vient structurer le système organisationnel ce qui suscite la nécessité d'avoir une approche globale, systémique du système d'information qui doive être associée au système sociotechnique, c'est-à-dire l'organisation dont il est issu. En effet, la variété possible des états du système nécessite de l'appréhender comme un système informationnel capable de mobiliser l'information signifiante (d'équilibration, d'alerte, d'anticipation) en provenance de son environnement. Le concept d'information vient alors désigner l'ensemble interactif de

¹⁴ I. H. Ansoff, *Stratégie du développement de l'entreprise*, Hommes et Techniques, Paris, 1968

¹⁵ J. Mélése, *Approches systémiques des organisations – Vers l'entreprise à complexité humaine*, Editions d'Organisation, Paris 1995 (1^o Edition : Hommes et Techniques, Paris, 1979)

toutes les situations informationnelles. Afin d'enrichir le processus informationnel de l'organisation (sensation, perception, cognition, action), J. Mèlèse propose de multiplier les récepteurs à tous les niveaux. Mais la définition systémique d'un tel système d'information ne prend sens qu'au regard d'une finalité concrétisée par l'expression d'une stratégie.

L'approche systémique permet de proposer des représentations du système « organisation – environnement » qui, se substituant à la réalité, vont pouvoir fortement conditionner de façon pertinente l'élaboration des stratégies. Une « réelle » analyse stratégique est en fait une analyse de système. L'auteur introduit ainsi le terme de « dialectique projective » pour décrire les multiples échanges porteurs de projets qu'entretiennent les « centres d'intentionnalité » des systèmes entre eux. La hiérarchie de ces centres d'intentionnalité fait apparaître des « systèmes transversaux » qui se rencontrent à l'intérieur de l'organisation, celle-ci devenant alors un « *lieu d'équilibration des contradictions (provisoire) et un niveau intermédiaire de stabilisation (précaire)* ». La représentation systémique permet d'étudier les effets circulaires de ces diverses logiques.

La pauvreté informationnelle des organisations qui, dans le même temps, sont soumises à des contrôles excessifs, est à l'origine de dysfonctionnements importants. Dans ce contexte, le facteur « taille » a beaucoup moins d'incidence que la répartition de la complexité. La reconnaissance de l'individualité possède pour conséquence un changement de regard sur l'organisation. Face à la représentation qui a longtemps perduré de l'organisation comme un automate constitué d'éléments interchangeables, J. Mèlèse propose l'alternative de représenter l'organisation comme une société composée d'individus différents, singuliers, imprévisibles, autonomes. Reconnaître l'Autre implique que son comportement, jamais prévisible ne sera, de ce fait, jamais totalement contrôlable. De cette richesse des interconnexions et de la variété des états peuvent émerger des projets individuels qui ne sont pas contrôlés par l'extérieur. L'apprentissage, processus systémique, est ce qui va permettre de maîtriser la complexité. Partant des liens étroits qui unissent les concepts d'apprentissage et de système, l'auteur montre comment une démarche systémique peut avoir un impact à la fois au niveau individuel en permettant à la personne de mieux se représenter la complexité qui l'entoure (et par conséquent de mieux la maîtriser), et aussi au niveau collectif en apprenant aux différents agents en présence à élaborer des représentations communes qui de ce fait n'entreront pas en conflit.

La modélisation des systèmes complexes de J.-L. Le Moigne¹⁶ est certainement l'ouvrage le plus achevé que l'auteur consacre au concept de système. La question qu'il y pose est de savoir si l'on peut, avec des modèles analytiques, résoudre des problèmes réellement complexes. Pour traiter cette question, l'auteur commence par distinguer la complexité de la complication à partir d'un aphorisme : la simplification analytique du compliqué vers le simple appliqué au complexe a pour conséquence une aggravation de la complexité.

Les projets de modélisation ne sont pas donnés : ils se construisent. Il présente ainsi le modèle systémique comme permettant de combler les lacunes de la modélisation analytique (par exemple la fermeture du modèle), raisonnement sur un seul critère. Il

¹⁶ J.-L. Le Moigne, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris, 1990
Yvon PESQUEUX

part de l'hypothèse que, pour aborder une situation complexe, il faut changer de registre en passant de celui de la recension des connaissances disciplinées à celui des méthodes d'enrichissement des connaissances en abandonnant les raisonnements « mono critères ». La modélisation de l'action complexe se caractérise par la notion générale de processus qui se définit par son exercice et son résultat. Il représente le processus par trois fonctions : la fonction de transfert temporel, les fonctions de transformation morphologique et de transfert spatial. Pour lui, en modélisation systémique, la tâche la plus importante du modélisateur n'est pas de résoudre le problème posé, mais de résoudre d'abord le problème qui consiste à poser le problème. Cela revient à dire qu'il doit définir les projets (finalités) du système de modélisation sur le phénomène considéré.

Il introduit le concept d'organisation qui est pour lui une propriété des systèmes complexes. Il montre que l'organisation est active, s'auto-organise et qu'elle est dépendante et solidaire de l'environnement. L'organisation réagit aussi en fonction de l'information qui y circule, l'information étant considérée ici comme une configuration stable de symboles. Le symbole est à la fois signe et signifié. L'information permet à l'organisation d'adapter son comportement à chaque instant par régulation, de se transformer, de se rééquilibrer afin d'être en osmose avec l'environnement. Donc, l'information donne lieu à un processus d'ajustement permanent de l'organisation par les canaux par lesquels elle circule (le système s'adapte par accommodation) et les codes de communication par rapport à un projet (le système s'adapte alors par assimilation).

C'est à ce moment-là qu'il propose un modèle systémique de l'organisation constitué des trois éléments suivants : un système de décision, un système opérant et un système d'information entre les deux afin de les mettre en relation. En modélisation systémique, les concepts d'organisation, d'information et de décision sont étroitement liés. Il reprend ici les positions téléologiques d'H. A. Simon¹⁷ pour ce qui concerne la place de la décision dans l'organisation : la décision permet d'élaborer des projets (plans) permettant d'atteindre des familles d'objectifs, la décision est intelligente car la compréhension projective d'une situation se désigne par les objectifs qui rendent intelligibles les descriptions d'une situation perçue complexe.

C'est à partir de ces hypothèses que J.-L. Le Moigne élabore un modèle de la décision composé du système d'intelligence pour comprendre ou formuler un problème, du système de conception pour résoudre et évaluer les solutions alternatives et du système de sélection pour choisir une solution multicritères satisfaisante ou re-finaliser le problème. Il présente enfin deux types de raisonnements : l'heuristique et l'algorithme. Il recommande l'utilisation du premier car il s'agit d'un raisonnement par tâtonnements que l'on tient pour plausible alors que la convergence de l'autre a été formellement démontrée à l'avance. Pour compléter la terminologie relative à la modélisation systémique, il recommande par référence à H. A. Simon l'utilisation du qualificatif de « *satisfying* » (satisfaisant) pour qualifier une solution à un problème complexe dans la mesure où elle ne peut être optimale pour tous les critères. Il va poser le problème de l'évaluation de la décision en termes d'efficacité et d'effectivité. Il montre qu'avec l'efficacité on raisonnerait sur un seul critère qui est le rapport entre les ressources

¹⁷ H. A. Simon, *Administrative Behavior : a Study of Decision Making Processes in Administrative Organizations*, Mac Millan, New York, 1947
Yvon PESQUEUX

consommées et les ressources produites. Avec l'effectivité, on raisonne sur plusieurs critères qui sont les finalités du système. C'est par conséquent l'effectivité qui est adaptée aux systèmes complexes.

Les deux registres de la modélisation analytique et systémique peuvent être ainsi comparés :

ANALYTIQUE	SYSTEMIQUE
Objet	Projet ou Processus
Elément	Unité active
Ensemble	Système
Analyse	Conception
Disjonction (ou découpe)	Conjonction (ou articulation)
Structure	Organisation
Optimisation	Adéquation
Contrôle	Intelligence
Efficacité	Effectivité
Application	Projection
Evidence	Pertinence
Explication causale	Compréhension téléologique

Avec l'analyse systémique, il existe trois phases de modélisation : le cadrage (construction du modèle par isomorphie avec un système général), le développement (documentation du modèle par correspondance homomorphique du modèle avec les traits perçus du phénomène) et l'interprétation (simulation d'actions possibles sur le modèle pour anticiper les conséquences éventuelles dans les phénomènes). Le concept de « système général » s'est dégagé du fait de la conjonction de deux concepts supports de procédures modélisatrices : la procédure cybernétique et la procédure structuraliste. La procédure cybernétique est fondée sur la conjonction des concepts d'environnement actif, de projet ou téléologie. La « boîte noire » est le modèle qui la caractérise.

Focus sur la notion de « boîte noire »

Rappelons que, comme le précise J.-P. Briffaut¹⁸, ce concept est apparu dans les premières approches de la cybernétique. Il spécifiait que, pour un observateur extérieur, il n'était pas nécessaire de connaître la structure interne du système mais que la définition d'une fonction de transfert liant intrants et extrants permettait de modéliser de façon suffisante le comportement du système.

Ce concept de boîte noire présente les avantages de la récursivité : elle permet la modélisation d'un système comme un ensemble de sous-systèmes à condition d'être en mesure de spécifier la nature et les caractéristiques de la transformation des intrants et des extrants (fonction de transfert). Une autre perspective a ensuite été développée : celle des grandeurs d'état qui introduit la notion de pilotage. Un système est en effet dit

¹⁸ J.-P. Briffaut, *Systémique et gestion, Papier de travail*, INT 2001
Yvon PESQUEUX

pilotable si l'on peut réaliser toute transition d'un état du système vers un autre état en un temps fini par action sur les variables de commande. C'est donc l'adjonction de ce système de commandes de pilotage en relation avec des états du système qui en marque l'apport.

Il devient alors important de spécifier les logiques possibles de pilotage, en conformité avec la loi de W. R. Ashby, déjà mentionnée plus haut. Le pilotage en *feed-back* est le plus connu. Mais il faut ajouter aussi le pilotage en *feed-forward* (des *cause controlled systems*) qui implique la connaissance par le pilote des valeurs des grandeurs intrantes perturbatrices du système piloté et l'élaboration d'une action correctrice pour éviter que ces perturbations externes ne modifient l'extrait. La modélisation des systèmes conduit aussi à la distinction « pilotage interne » (le pilote envoie directement ses ordres au système piloté) et « pilotage externe » (le pilote envoie ses ordres vers l'environnement, celui-ci agissant au moyen d'intrants sur certaines grandeurs d'état du système piloté).

Retour à J.-L. Le Moigne

La procédure structuraliste inhérente au modèle systémique est fondée sur la conjonction de concepts de fonctionnement (synchronique) et de transformation (diachronique). Le modèle qui le caractérise est la forme qui, en fonctionnant, se transforme et, en se transformant, assure quelques fonctions. Ainsi le système général se décrit par une action (un enchevêtrement d'actions) dans un environnement (tapissé de processus) pour quelques projets (finalités, téléologie) fonctionnant (faisant) et se transformant.

La modélisation projective de l'action complexe repose sur l'action, concept de base du modèle systémique. Elle part de la question « qu'est-ce ça fait ? » par différence avec la modélisation analytique qui part de la question « de quoi c'est fait ». La caractérisation d'une action passe par la notion de processus. Celui-ci est la conjonction d'un transfert temporel (déplacement dans un espace) et d'une transformation temporelle (modification de la morphologie). Ainsi, tout système complexe peut être représenté par un système d'actions multiples ou par un processus qui peut être un enchevêtrement de processus. La complexité du système modélisé va se faire par interrelations des « n » processeurs préalablement identifiés pour les fonctions composées que chacun d'entre eux assure. Le nombre d'interrelations va constituer le nombre de comportements possibles du système que l'on appelle aussi la variété du système. Aussi, il est important de repérer les interrelations dites de « bouclage » notamment les relations de *feed-back* informationnel qui apportent à un processeur amont des informations sur le comportement éventuellement induit dans un processeur aval. C'est la trame constituée par tous les processeurs reliés en interrelations qui va représenter le réseau du système.

Dès lors que le nombre de processeurs considérés est élevé, on observe que la matrice structurale du système a une structure quasi-décomposable. On peut alors le représenter en sous-systèmes ou niveaux en identifiant soigneusement les interrelations de couplage entre les niveaux.

Le modèle archétype de l'articulation d'un système est repérable en neuf niveaux :

- 1er niveau : le système est identifiable,

Yvon PESQUEUX

- 2ème niveau : le système est actif : il « fait »,
- 3ème niveau : le système est régulé,
- 4ème niveau : le système s'informe sur son propre comportement,
- 5ème niveau : le système décide de son comportement,
- 6ème niveau : le système mémorise,
- 7ème niveau : le système coordonne ses décisions d'action,
- 8ème niveau : le système imagine et conçoit de nouvelles décisions possibles,
- 9ème niveau : le système se finalise.

Pour modéliser, le modélisateur doit expliciter ses projets de modélisation par la projectivité du système c'est-à-dire par la construction des projets du système, de ses finalités. L'organisation est ainsi la propriété des systèmes complexes. Le concept d'« organisation active » est le concept central à l'aide duquel on va expliciter le complexe de projets. Le modèle canonique de l'organisation (TEF) est la conjonction de trois actions T, E, F où l'action T est celle de maintenir et de se maintenir, l'action E est celle de relier et de se relier et l'action F celle de produire et de se produire. L'organisation ne doit pas être confondue avec la structure (squelette, ossature). L'organisation n'est pas un objet : elle exprime à la fois l'action, l'acteur et la transformation temporelle de l'acteur. Le développement du concept d'organisation va offrir une nouvelle palette de concepts permettant de rendre compte de la complexité des systèmes. Il s'agit des concepts d'information et de symbole, de computation et de communication, de mémorisation et d'intelligence, de décision et de projet.

L'hypothèse selon laquelle un système complexe est un système autonome qui est aussi un système intelligent a conduit à la représentation de l'autonomisation de l'organisation par un système de traitement d'information dont le modèle canonique représente la conjonction de trois composantes fondamentales : le système de mémorisation, le système de computation (traitement) et le système de couplage sur le système complexe

C'est le modèle canonique « opération – information – décision » (OID) qui va permettre de modéliser les liaisons entre les éléments d'un système. Dans ce modèle, tout se passe comme si toute action (transaction, rétroaction) s'accompagnait nécessairement de l'émission conjointe de sa représentation spécifique par des symboles et des compositions de symboles. On convient de le représenter par un système interface d'intermédiation, un système d'intermédiation et un système d'information de l'organisation. Le système de décision remplit les trois fonctions « comprendre – finaliser – concevoir », le système d'information les trois fonctions « computer – mémoriser – communiquer » et le système opérant les trois fonctions « produire – maintenir – relier ». Le système complexe est un système finalisant, qui s'informe et qui mémorise. Le développement de la modélisation des systèmes complexes a longtemps été handicapé par l'absence de véritable définition des concepts d'information et de symbole. Le modèle canonique de l'information et du symbole a permis de changer les choses. Ainsi, l'information est une composition de formes ou une configuration stable de symboles. Le symbole est, quant à lui, un opérateur assurant les fonctions de désignation et de production de symboles. Il s'exprime par la conjonction d'un signe capable d'être à la fois signifié et signifiant.

L'information n'est intelligible que dans le contexte de sa communication entre deux systèmes émetteurs et récepteurs eux-mêmes inséparables du système de communication qui les conjoint. Par la conjonction « information – organisation », on pourra décrire l'adaptation d'une organisation complexe par la conjonction de deux processus différenciables que J. Piaget désigne comme l'accommodation et l'assimilation. Pour accommoder, le système joue sur ses canaux de communication et pour assimiler, le système joue sur ses codes informations. L'accommodation propose de résoudre un problème supposé posé et l'assimilation propose de poser différemment le problème à résoudre, en identifiant les caractéristiques assimilables.

La modélisation systémique propose de considérer la décision comme un processus de traitement d'information séquentiel et projectif. La modélisation systémique du processus de décision a avancé deux hypothèses conjointes : la décision est conception c'est-à-dire peut se représenter par un processus cognitif et téléologique de résolution de problèmes et la décision est intelligence c'est-à-dire que le processus d'« identification – formulation » de problèmes peut se représenter par un processus de décision - la compréhension projective d'une situation.

La conjonction des deux hypothèses permet de modéliser les processus de décision de façon générale par la modélisation des processus cognitifs de résolution de problèmes.

Ainsi, la décision peut être représentée par la conjonction récursive de trois sous-systèmes stables, chacun pouvant être représenté par un système de décision :

- le système d'intelligence (l'intelligence est le processus par lequel le problème décisionnel est construit ; c'est un exercice de formulation de problèmes par repérages non satisfaisants qui permettra de les comprendre (la méthode « essais – erreurs »),
- le système de conception (c'est le processus par lequel le système élabore - ou conçoit - les plans d'actions intentionnels ou les stratégies possibles par lesquels il projette de résoudre le problème formulé dans le processus de l'intelligence décisionnelle ; les heuristiques - raisonnements par tâtonnement, par analogie ou les raisonnements dits rusés - et les algorithmes - raisonnements formalisés de résolution de problèmes - constituent les raisonnements formalisables mis en oeuvre en résolution de problèmes),
- le système de sélection (choix multicritères de l'action décisionnelle) est le processus par lequel le système compare l'évaluation des plans d'actions élaborés lors du processus de conception ; cette comparaison peut prendre les formes type suivantes :
 - 1) la décision arrêtée - la comparaison des évaluations de l'effectivité des solutions élaborées conduit à retenir une décision préférée qui sera la décision arrêtée ;
 - 2) la décision de s'informer - la comparaison des effectivités de solutions élaborées dont aucune ne se détache ;
 - 3) la décision de se re-finaliser : c'est le processus par lequel on reformule un problème alors qu'on n'a pas trouvé de solutions satisfaisantes. Les notions d'efficacité et d'effectivité sont liées à celle de décision, l'efficacité étant un concept monocritère pertinent en situation fermée et très structurée, l'effectivité s'évaluant par un vecteur multidimensionnel rapportant le comportement d'un système à ses finalités.

Le modèle systémique peut être représentée comme et par un système d'action intelligente. Il s'exprime comme et par une stratégie. Le cadre de la modélisation de la complexité constitue le cadre conceptuel au sein duquel peut se développer une stratégie intelligente. Dans ce cadre, le système complexe se décrit par son organisation projective en niveaux, chaque niveau assurant la conjonction des fonctions transformation récursive, d'auto-production et d'auto-maintenance et d'auto-relation. Sa limite vient de l'autonomie des sous-systèmes qui peuvent, de façon récursive, se développer comme systèmes indépendamment en quelque sorte des autres sous-systèmes (une autopoïèse récursive).

Les apports de M. Crozier & E. Friedberg dans *L'acteur et le système*

Dans *L'acteur et le système : les contraintes de l'action collective*¹⁹, M. Crozier & E. Friedberg vont appliquer la modélisation systémique en sociologie des organisations en la mettant au service de leur modèle sociologique de l'action organisée dans cet univers à téléonomie que sont les organisations, également marquées par des logiques de contingence qui ouvrent l'organisation au jeu des acteurs. Ce sera sans doute l'essai de transposition le plus abouti de la modélisation systémique dans les sciences sociales.

L'action organisée est considérée, par ces deux auteurs, comme un construit social qui aide les Hommes à trouver des solutions aux problèmes d'action collective en vue d'objectifs communs mais qui, simultanément, oriente leur comportement, circonscrit leur liberté d'action, conditionne leurs résultats.

D'où le paradoxe suivant : au cœur de l'action collective, on rencontre des effets contre-intuitifs dus au décalage entre les orientations du système et les intentions des acteurs. C'est parce que l'organisation est un champ de coopération et d'interdépendance entre acteurs avec des intérêts contradictoires, c'est-à-dire un ensemble de « jeux structurés ». Dans cette perspective, les problèmes de coopération (et donc d'intégration) des acteurs sociaux poursuivant des objectifs multiples seraient redéfinis et résolus en vue de l'obtention des résultats affichés par l'organisation. Cependant, il n'y a pas d'action sociale sans pouvoir, car s'ils constituent des instruments pour la solution de problèmes, les construits d'action collective sont aussi des contraintes pour ces solutions. Il faut donc les réguler par un système de pouvoir. On obtiendra ainsi des résultats toujours contingents de la mobilisation des acteurs. Les auteurs de cet ouvrage proposent une interprétation du comportement humain comme l'expression d'une stratégie dans un jeu, dans un ensemble de contraintes à découvrir. Ils démontrent le caractère concret de leur approche à partir de la combinaison d'une analyse stratégique²⁰ et de l'analyse

¹⁹ M. Crozier & E. Friedberg, *L'acteur et le système : les contraintes de l'action collective*, Seuil, Paris, 1977

²⁰ Rappelons que « l'analyse stratégique » est le dispositif d'analyse mis au point par M. Crozier et qui postule que les acteurs ont des « stratégies » qui doivent être explicitées pour offrir une compréhension des phénomènes organisationnels. La limite de l'analyse stratégique provient du fait que la substance sociale de l'agent organisationnel se caractérise par le fait que tout comportement organisationnel peut être considérée comme étant interprétable dans les termes d'une stratégie et entrer, *in fine* dans une théorie plus large des choix rationnels au regard des préférences de l'agent (rationalité téléologique) et venir fonder l'idée de marchandage (*bargaining*)

systemique qui ne sont pas ici seulement vues comme des propositions théoriques mais aussi avant tout comme des pratiques de recherche.

Du point de vue de l'acteur, le pouvoir, en tant qu'action de groupes ou d'individus sur d'autres groupes ou individus, s'entend en termes de relations : instrumentale quand les acteurs sont motivés par un but, non transitive car une hiérarchie reste indispensable pour obtenir des actions, et enfin réciproque mais déséquilibrée afin de transcrire l'existence des jeux de pouvoir. Puisque ces sources de pouvoir correspondent à des possibilités d'action, les zones d'incertitude, contrôlées, deviennent pertinentes en ce qu'elles élargissent la marge de liberté des participants, leurs enjeux.

Du point de vue de l'organisation, si les contraintes qui la conditionnent sont contrôlées par les ensembles de pouvoir, ceux-ci sont également régularisés dans leur déroulement par la structure de l'organisation et dépendent de la volonté des acteurs de se mobiliser. Ainsi, l'organisation établit des canaux de communication entre les membres, et assoit son autorité légitime par un système de sanctions et de récompenses. Afin de découvrir la façon dont l'organisation motive ses membres, il est possible d'établir une typologie des pouvoirs en fonction des différents types de sources d'incertitudes, à savoir : la maîtrise d'une compétence particulière, la relation de l'organisation à son environnement pour répondre à ses besoins en ressources ou pour « vendre », la maîtrise de la communication et des informations, l'ensemble des règles de l'organisation pour supprimer ces incertitudes ou paradoxalement créer d'autres incertitudes dans la négociation de ces règles.

Cet aspect défensif ou offensif de l'organisation pour les stratégies des acteurs fait de son fonctionnement un univers de conflits. Les objectifs seront donc partagés mais sans unicité. Cette conception problématique de l'organisation en tant qu'ensemble de jeux structurés, c'est-à-dire ensemble de stratégies possibles, se différencie des théories qui l'analysent en termes de rôle. Si les acteurs ne profitent pas davantage de cette situation de supériorité c'est que la structure formelle impose les règles du jeu dont dépend la survie de l'organisation.

Pour ces auteurs, le contexte est assurément une contrainte, c'est-à-dire un ensemble de facteurs limitant mais n'éliminant jamais complètement la capacité de choix des acteurs organisationnels. Il n'est donc pas déterminant pour les structures ou le mode de fonctionnement des organisations, mais il appartient au système sous-jacent à l'organisation. Il faudra déterminer par quels mécanismes de médiation ces facteurs contextuels y affectent et y modifient les règles du jeu. Il faut donc privilégier l'idée qu'il existe une multiplicité de champs fractionnés qui apportent des exigences contradictoires auxquelles il faut que l'organisation s'adapte. Ceci implique de nouveaux choix pour les acteurs et leur liberté. Si l'environnement possède des caractères de pertinence, il dépend aussi des acteurs d'une organisation et par conséquent s'intègre dans une relation de pouvoir avec ses sources d'incertitude qu'il faudra négocier afin de les stabiliser et les personnaliser. Les mécanismes de régulation s'analyseront au travers des relations établies avec les acteurs extérieurs à l'organisation.

Ainsi, l'action humaine peut se définir comme un processus actif où les Hommes apprennent à se servir d'instruments matériels et culturels mis à leur disposition pour

résoudre les problèmes, les contraintes et les opportunités des différentes situations qui se présentent à eux. Ainsi, la capacité collective propre au groupe serait inhérente à un apprentissage collectif. Dans cette optique, la culture devient un instrument, une capacité pour les relations et les échanges ... et l'analyse culturelle une ouverture pour comprendre l'utilisation effective par les acteurs des potentialités et des opportunités d'une situation et la structuration des problèmes contextuels qui en résulte.

Ces auteurs vont adopter un raisonnement sur les propriétés d'un ensemble en tant que système qui repose sur les idées suivantes : 1. seule une logique systémique permet l'analyse des activités humaines ; 2. cela demande une connaissance du système de relations et d'actions dont les propriétés induisent les objectifs des acteurs. 3. on pourra ainsi transformer ces systèmes et assurer l'épanouissement des individus, le développement des activités individuelles, l'amélioration du climat et des performances de l'ensemble.

Pour transposer le raisonnement organisationnel dans les catégories du raisonnement systémique, devant la nécessité de l'existence d'un système contenant pour rendre possibles les conflits, négociations, alliances et jeux entre les jeux contenus dans cet ensemble, ils vont proposer la notion de « le système d'action concret ».

Le modèle cybernétique asservi permet de définir des systèmes concrets ou des systèmes d'action ouverts fonctionnant de manière très précise dans le cadre d'un modèle de régulation contraignant. Or, si le système se maintient grâce aux mécanismes de régulation, c'est-à-dire par l'action de jeux structurés qui définissent à l'avance les possibilités de stratégies rationnelles pour chaque acteur, ce dernier peut aussi transformer le jeu. C'est pourquoi le système n'est pas figé.

Le système d'action est un construit contingent. Comme le problème à résoudre est celui de la constitution d'un système d'action, l'analyste ne peut se référer à l'évolution générale des institutions, ni chercher un *one best way* universel et déterministe. Le système d'action dépend d'acteurs humains libres. Mais si les systèmes ont été créés par les Hommes comme solution aux problèmes d'action collective, d'interdépendance, ou de coopération et de conflit, leur existence reste un problème car elle dépend de la régulation de ces mêmes jeux dont les mécanismes ne sont structurés ni seulement par l'asservissement à un organe régulateur, ni seulement par l'exercice d'une contrainte, même inconsciente, ni seulement par des mécanismes d'ajustement mutuel, mais aussi par les calculs rationnels et stratégiques des acteurs. L'organisation ainsi considérée présente les caractéristiques d'une classe particulière de système d'action : structuration forte, buts clairs, formalisation de jeux autour de ces buts, acteurs en pleine conscience de leurs actes. L'analyse des systèmes d'action concrets a pour but d'obliger à rechercher et permettre de découvrir (par le biais du raisonnement stratégique) à travers le vécu des acteurs les « vrais » gouvernements et les « vrais » clivages. Par conséquent, ils se révèlent comme instruments de compréhension de la coopération au sein d'une organisation.

Pour l'analyse systémique, personne ne peut s'identifier au système, complexe et nuancé. Il faut donc d'une part relativiser la décision et le mythe du décideur et d'autre part trouver les moyens rationnels pour passer de la rationalité du système à la rationalité de l'acteur. C'est la notion de satisfaction (de décision « satisfaisante ») qui

permet ainsi de déterminer les critères qui permettent de dépasser les contraintes du système, de créer les mécanismes de régulation adéquats (les différentes normes du système social ainsi que les règles du système d'action stratégique). Par conséquent, ce sont les critères de la décision satisfaisante qui permettent, à leur tour, de reconnaître les caractéristiques du système et de son contexte dont les chances de gain dépendent de la rationalité des décideurs. La décision peut donc être analysée à la fois en tant que phénomène de changement et phénomène systémique. En définitive, il s'agit de délimiter un espace (de conflits et de négociation) à l'intérieur duquel la décision se placera pour structurer le problème. Pour pallier l'absence de rationalité absolue on postule l'existence d'un ensemble systémique plus large. Pour l'analyse des décisions, on fera apparaître le ou les systèmes d'action pertinents au sein de l'ensemble. L'analyste cherche alors à découvrir la signification plus large de la stratégie employée et envisage ainsi le problème du changement, et notamment celui de la rationalité décisionnelle dont dépend la transformation du système puisqu'elle induit de nouvelles régulations des jeux d'acteurs. Par exemple, il s'agira de transposer des modèles rationnels éprouvés mais avec des ouvertures favorables en matière d'activités nouvelles, ou de développer une rationalité nouvelle à partir de l'outil technologique informatique pour rassembler et utiliser des informations et calculer des alternatives.

Ces auteurs vont alors se consacrer à des réflexions sur le changement comme phénomène systémique. En tant que phénomène systémique, on peut définir le changement comme la transformation d'un domaine d'action, c'est-à-dire non pas des règles, mais de la nature du jeu, afin de trouver un modèle de régulation qui intégrerait toutes les contradictions, des rapports de force favorables, des capacités cognitives, relationnelles, et des modèles de gouvernement suffisants. On a défini le caractère construit des jeux ou régulations à partir des contraintes pour les stratégies de pouvoir des acteurs : ce sont donc les effets systèmes qui médiatisent le changement qui devient contingent au système d'action qui l'élabore et auquel il s'applique et, par conséquent, on peut affirmer que le changement est systémique.

Ainsi, le changement s'apparente à l'apprentissage de nouvelles formes d'action collective pour découvrir et acquérir de nouvelles capacités (processus de coopération), pour élaborer une nouvelle structuration des champs (autres méthodes, résultats, systèmes d'action et de régulations différents). Il n'y a pas forcément d'évolution graduelle harmonieuse mais aussi crises, ruptures relationnelles, institutionnelles, pas seulement ajustements mutuels mais aussi des initiatives et un *leadership*. Les relations de pouvoir constituent un obstacle mais aussi une finalité pour le changement. C'est une étape essentielle à la transformation du système puisque des relations concrètes de pouvoir dépend la liberté des acteurs d'agir sur la structure collective. Pour garantir la responsabilité collective, il faut donc que les finalités soient vécues à la base de l'organisation et choisies ou plutôt « arbitrées » au sommet, lequel doit incarner alors une seconde finalité, à savoir contribuer à l'émancipation des hommes ou bien être renversé. L'homme agit par essais - erreurs.

Conclusion : le connexionnisme et les réseaux comme forme contemporaine de la modélisation systémique

Là où le concept de système était entaché d'un certain aspect statique lié à son statut de révélateur des structures, la modélisation connexionniste, systémique dans son inspiration, va introduire un contenu dynamique à la modélisation systémique.

L'approche connexionniste a souhaité pallier deux insuffisances dans le traitement des informations :

- le traitement séquentiel,
- le stockage localisé dans le système des représentations symboliques qui conduit, sous dégradation, à une perte nette d'information.

Comme le souligne P. Bréard²¹ : « *La voie empruntée par le connexionnisme pour faire état des structures des réseaux neuronaux propose un système composé d'unités de traitement d'entrée, de sortie et de traitement interne des stimulus. Selon le modèle représenté, les unités pourront être des concepts, des propriétés, voire des hypothèses. Ces unités sont toutes interconnectées et les connexions sont pondérées, offrant ainsi une variabilité pour la prise en compte des stimulus de l'environnement* ». Les modèles connexionnistes font des connexions le siège des connaissances.

Ce modèle possède les traits fondamentaux suivants²² :

- Il n'y a pas de processeur central gérant les fins et les moyens dans la mesure où c'est l'auto-ajustement des relations du système qui détermine les objectifs et les étapes du processus ;
- Le déroulement séquentiel du processus est envisagé comme s'accompagnant d'un traitement parallèle des informations ;
- La répartition des connaissances et l'organisation des concepts comme éléments constitutifs du réseau repose sur le fait que la signification ne prend sens que sur l'ensemble des nœuds du réseau dans les relations qu'ils établissent avec les autres nœuds où un concept est une somme d'interconnexions d'entités ;
- L'activation des unités de traitement est fonction de la somme des stimulus pondérés qui lui parviennent ;
- La tendance d'un réseau à répondre aux objectifs qui lui sont fixés résulte d'une démarche tutoriale, d'une fonction d'apprentissage qui mène à un ajustement des pondérations neuronales en fonction d'une sortie désirée.

Dhart & G. Hinton & J. Mc Clelland²³ proposent ainsi un modèle en huit éléments :

- un lot d'unités de traitement pour recevoir un *input* de ses voisins et, en fonction de ces *inputs*, de leur retourner des *outputs*,
- un état d'activation du système à un instant *t* représentant le niveau d'activation des unités de traitement,
- une fonction de sortie liée à chaque unité et au travers de laquelle les niveaux d'activations seront retransmis au système,
- un modèle de connexion entre unités déterminant l'influence qu'une unité possède sur une autre, cette influence pouvant être démultipliatrice, inhibitrice ou même nulle selon les poids propres à chaque couple de relations,

²¹ P. Bréard, *Réseaux neuromimétiques et gestion des connaissances*, Thèse CNAM, 2001

²² J.P. Courtial, *Science cognitive et sociologie des sciences*, PUF, Paris, 1994, p. 50 et suivantes

²³ D. Rumelhart & G. Hinton & J. Mc Clelland, « A General Framework for Parallel Distributed Processing » in D. Rumelhart & J. Mc Clelland, *Parallel Distributed Processing : Explorations in the Microstructure of Cognition*, Cambridge, MIT Press, 1986

- une règle de propagation diffusant l'activité dans le réseau et résultant du niveau d'*output* des unités liées au modèle de connexion du réseau de façon à produire un *input* net pour chaque unité,
- une règle d'activation combinant les entrées sur une unité avec l'état actuel de l'unité pour conduire à un nouveau seuil d'activation,
- une règle d'apprentissage pour rendre compte du fait que les modèles de connexion sont modifiés par l'expérience (règle de Hebb selon laquelle lorsque deux unités entrent en relation, la force de leur connexion s'accroît),
- un environnement dans lequel opère le système et pour lequel chaque vecteur d'*input* a une probabilité non nulle de se présenter.

De nombreux types conceptuels de réseau existent, mais il faut ici mentionner la spécificité de certains d'entre eux :

- les réseaux à couches présentent une articulation hiérarchique entre différentes strates composant le réseau, chaque strate étant uniquement en relation avec les strates contiguës,
- le perceptron²⁴ sur la base du système de la vision,
- l'algorithme de rétropropagation,
- les réseaux entièrement connectés,
- le modèle de Hopfield²⁵ qui reprend le principe de la dynamique du système nerveux dans lequel on constate une convergence vers un état stable autour d'attracteurs,
- le modèle de Kohonen²⁶ des *Self Organizing Maps* qui propose une organisation dans laquelle l'activation d'un neurone conduit à un renforcement des relations avec les neurones localement proches, une inhibition du signal par les neurones éloignés et une action nulle sur les neurones très éloignés,
- les réseaux bayésiens et statistiques, le choix d'un modèle de réseau de neurones étant celui d'une distribution *a priori* de probabilités sur des fonctions non linéaires et le processus d'apprentissage est interprété comme la distribution des probabilités *a posteriori* sur la fonction inconnue,
- l'algorithmie génétique qui montre l'hybridation de la lecture originelle et métaphorique du traitement de données par une approche neuronale génétique et des techniques mathématiques,
- le raisonnement à partir de cas en s'appuyant sur des bases contenant un nombre important de diagnostics.

Des logiciels applicables dans de nombreux domaines de gestion héritent des potentiels des réseaux neuronaux (prédiction de cours de matières premières, des performances d'indices boursiers, du rating client pour attribution de crédits, de la qualité d'un produit fini en fonction de la qualité des matières premières, de la valeur de biens immobiliers, de pannes sur une chaîne d'assemblage ...). Mais c'est surtout dans ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui la gestion des connaissances que l'on trouve les applications les plus importantes de la modélisation neuromimétique.

²⁴ F. Rosenblatt, « The Perceptron : A Probabilist Model for Information Storage and Organization in the Brain », *Psychological Review*, 1958, vol. 65, n° 6, pp. 386-408

²⁵ J. Hopfield, « Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities », *Proceedings of the National Academy of Scientists*, n° 79, 1982, pp. 2554-2558

²⁶ T. Kohonen, « Self Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps », *Biological Cybernetics*, vol. 43, n° 1, 1982, pp. 59-69

