



**HAL**  
open science

## **L'adéquation fonctionnelle comme limite des systèmes auto-organisateur**

Valérie Camps, Bernard Carpuat, Marie-Pierre Gleizes, Pierre Glize, André Machonin, Christine Piquemal, Christine Régis, Sylvie Trouilhet, J. Pezet-Link

► **To cite this version:**

Valérie Camps, Bernard Carpuat, Marie-Pierre Gleizes, Pierre Glize, André Machonin, et al.. L'adéquation fonctionnelle comme limite des systèmes auto-organisateur. 4èmes Journées de Rochebrune 95 - Evolution et organisation: Hasard et Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives (1995), Mar 1995, Megève, Haute-Savoie, France. pp.57-68. hal-03837273

**HAL Id: hal-03837273**

**<https://hal.science/hal-03837273>**

Submitted on 3 Nov 2022

**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.

# L'ADÉQUATION FONCTIONNELLE COMME LIMITE DES SYSTÈMES AUTO-ORGANISATEURS

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

## 1 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE COLLECTIVE

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

### 1.1 Le modèle collectif neuronal

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

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

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

---

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

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

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

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

## 1.2 Le modèle collectif génétique

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

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

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

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

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

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

### 1.3 Le modèle collectif social

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

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

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

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

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

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

## 1.4 Analyse

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

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

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

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

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

## 2 L'AUTO-ORGANISATION ET L'ADÉQUATION FONCTIONNELLE

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

## 2.1 Définitions

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

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

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

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

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

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

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

## 2.2 L'adéquation fonctionnelle en monde clos

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

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

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

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

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

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

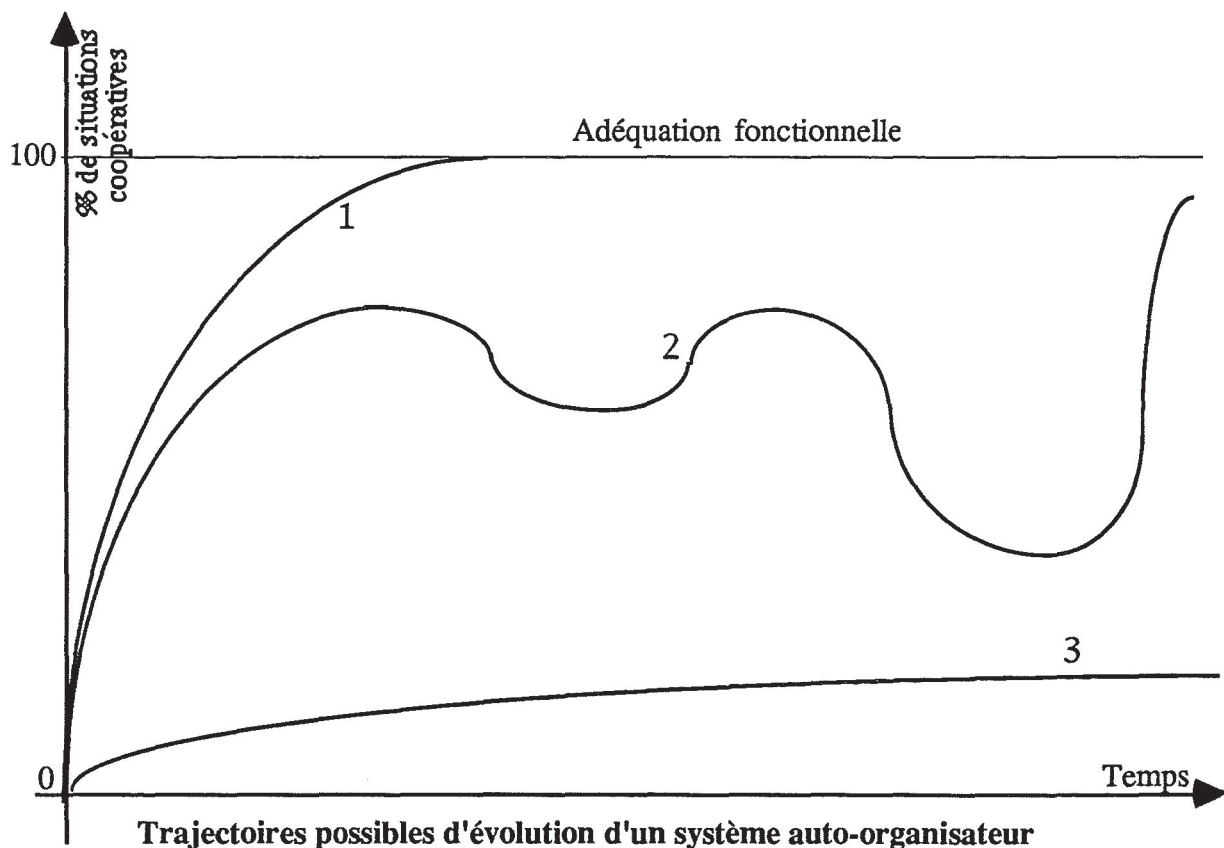
**Théorème 2 :** Tout système récursivement auto-organisateur converge vers une organisation coopérative et la stabilité ; donc vers l'adéquation fonctionnelle.

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

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

### 2.3 L'adéquation fonctionnelle en monde ouvert

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



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

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

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

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

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

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

### 3 ANALYSE D'UN SYSTÈME AUTO-ORGANISATEUR

#### 3.1 Situations de transformation de l'organisation

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

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

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

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

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



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

### 3.2 Emergence du sens

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

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

### 3.3 Apprentissage et clôture

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

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

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

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

## 4 CONCLUSION

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

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

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

## 5 BIBLIOGRAPHIE

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

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

## 6 ANNEXE

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

### **Théorème 1 : Organisation coopérative et stable $\Rightarrow$ Adéquation fonctionnelle**

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

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

1) Pas de réponse par bouclage du traitement.

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

2) Pas de réponse par arrêt du traitement.

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

3) Réponse erronée.

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

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

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

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

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

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

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

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

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