

Chapitre

01**Systèmes complexes****Introduction**

L'étude des systèmes complexes s'est considérablement développée au cours des quinze dernières années, tant du point de vue des méthodes que de la formalisation et des outils.

Dans ce chapitre, nous effectuerons initialement un survol sur les concepts de systèmes complexes. La simulation de ces dernières est facilitée par l'approche multi-agent. Nous réservons alors une partie du chapitre pour exposer les concepts liés aux systèmes multi-agents et aux automates cellulaires. Ce chapitre aborde également les notions de vie artificielle, dont les approches sont parfois similaires aux simulations des systèmes complexes. Enfin, quelques techniques inspirées de systèmes naturels seront exposées.

1.1 Et les systèmes complexes ?

Dans cette section, nous reprenons quelques définitions trouvées dans la littérature scientifique.

Von Bertalanffy [Moise 01] définit des complexes d'«*éléments*». Il dit que l'on doit tenir compte de trois critères de distinction: le nombre d'éléments, leur espèce et les relations entre ces éléments. Pour lui, un complexe est la somme des éléments et des relations entre ceux-ci.

Jean-Louis Le Moigne [Moise 01] (et Clergue) fait la distinction entre systèmes complexes et systèmes compliqués. Les systèmes compliqués sont des systèmes que l'on peut réduire en éléments plus simples que l'on peut analyser séparément pour comprendre le système global. Dans le cas des systèmes complexes, la somme des éléments fait émerger de nouvelles propriétés qui ne sont pas dans les éléments eux-même.

D'après Slot [Moise 01], un système complexe est une population d'un élément unique avec des attributs bien définis. De plus, si ces éléments ont des interactions non-linéaires, il se peut que l'on assiste à l'émergence d'un comportement global.

Donc, un système complexe est composé de nombreux éléments autonomes différenciés interagissant entre eux de manière non triviale. Il se caractérise également par l'émergence au niveau global de propriétés nouvelles, non observables au niveau des éléments constitutifs et par une dynamique de fonctionnement global difficilement prédictible à partir de l'observation et de l'analyse des constituants et de leurs interactions élémentaires. Cela implique en particulier qu'un système complexe ne peut être analysé par une décomposition en sous-systèmes plus simples.

1.2 Caractéristiques des systèmes complexes

On peut résumer les caractéristique des systèmes complexes comme suit [Bertelle 03,+]:

- Le caractère hétérogène des constituants de nombreux systèmes naturels (biologiques, économiques, ...)
- Un système complexe se caractérise également par l'émergence au niveau global de propriétés nouvelles, non observables au niveau des éléments constitutifs et par une

dynamique de fonctionnement global difficilement prédictible à partir de l'observation et de l'analyse des constituants et de leurs interactions élémentaires.

- Principe d'organisation en vue d'une fonction collective (survie, adaptation, reproduction) :
 - comportement téléologique, c'est à dire guidé par ses buts.
 - le concept d'instrumentation d'un tel comportement est le "feed-back" informationnel (issu de la notion de contrôle en cybernétique)
- Organisation hiérarchique de systèmes et sous-systèmes assurant sa stabilité.
- Non-linéarité.
- Stratégies de développement :
 - adaptatives : réorganisations structurales face à des fluctuations.
 - paradoxales: coexistence d'éléments contradictoires, complémentaires, concurrents ou antagonistes. (Ces deux stratégies ne sont pas exclusives ...)
- Irréductibilité.

1.3 Concepts de base

1.3.1 Agents et systèmes multi agents [Kévin 04,+] [Kévin 04,+] [Ferber 95]

Les Systèmes Multi-Agents ou SMA représentent une nouvelle façon d'analyser, de concevoir et d'implémenter des systèmes informatiques complexes. Les agents sont utilisés dans une variété d'applications sans cesse croissante. La classe des applications concernés par les SMA s'élargit de plus en plus.

Dans ce qui suit, on va donner quelques notions sur les agents et les Systèmes Multi-Agents (SMA).

1.3.1.1 Qu'est-ce qu'un agent ?

D'un point de vue étymologique, le mot *agent* vient du latin "*agere*" qui signifie agir. Littéralement, l'agent est donc celui qui agit.

Il existe, à l'heure actuelle, encore plusieurs définitions de ce qu'est un agent et aucune d'entre-elles n'est totalement admise. Ferber définit un agent comme une entité physique ou virtuelle [Ferber 95]:

- Qui est capable d'agir sur son environnement et sur les objets présents dans cet environnement (cela inclut les objets ressources ainsi que d'autres agents) ;
- Qui peut communiquer et interagir avec d'autres agents ;

- Qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;
- Qui possède des ressources propres ;
- Qui est capable de percevoir(mais de manière limitée) son environnement ;
- Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- Qui possède des compétences et offre des services ;
- Qui peut éventuellement se reproduire ;
- Dont le comportement est la conséquence de ses objectifs, de sa perception, de ses représentations, de ses compétences et des communications qu'elle peut avoir avec les autres agents.

A part les définitions du terme agent, il y a certaines propriétés qui caractérisent un agent. Ce sont ces caractéristiques particulières qui différencient les agents des autres concepts informatiques qui s'en rapprochent, tels que les « objets », les « acteurs », les « modules logiciels » ou bien les « processus parallèles ».

Un agent est [Kévin 04,+]:

- ↳ situé : il évolue dans un environnement
- ↳ autonome : il a la capacité d'agir sans aucune intervention extérieure
- ↳ actif : il est
 - *réactif* : il réagit aux changements de son environnement dans un temps limité
 - *proactif* : il est capable de prendre des initiatives sans qu'on le sollicite
 - *social* : il communique avec le monde qui l'entoure (êtres humains ou autres agents)

Il y a certains cas d'applications où des chercheurs attribuent aux agents des caractéristiques particulières, notamment des caractéristiques semblables à celles que les humains possèdent, pour modéliser le comportement des agents. Des caractéristiques comme la connaissance, les croyances, l'intention et l'obligation sont des exemples de notions mentales normalement constatées chez l'homme qui sont éventuellement utilisées dans la conception d'agents.

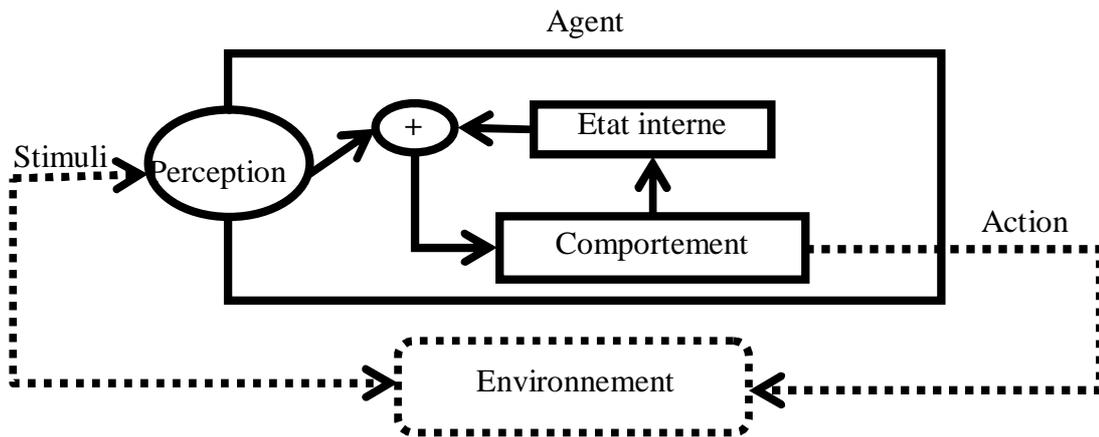


Figure 1.1 Schéma générale d'un agent, d'après [Ramat 98]

1.3.1.2 Différents types d'agents

Il y a deux grandes écoles de pensée dans la communauté multi-agents, chacune concevant les agents de manière différente :

- La première, l'école cognitive, conçoit les agents comme des entités déjà « intelligentes », c'est-à-dire capable de résoudre certains problèmes par eux-mêmes.
- La deuxième école, la réactive, conçoit les agents comme des entités très simples réagissant directement aux modifications de l'environnement.

a. Agents cognitifs

L'origine de l'approche cognitive se trouve dans la volonté de faire communiquer et coopérer des systèmes experts classiques. Dans les systèmes multi-agents cognitifs chaque agent est considéré comme un système expert d'où la cognition, synonyme de connaissance rationnelle, sert de guide à ses actions. Dans ce cadre, le système multi-agent est composé d'un petit nombre d'agents, où chaque agent dispose d'une base de connaissance comprenant l'ensemble des informations et le savoir-faire nécessaires à la réalisation de ses tâches et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec l'environnement. Les agents cognitifs, en raison de leur sophistication et de leur capacité de raisonnement, peuvent travailler indépendamment sur certaines tâches. Ils peuvent ainsi résoudre des problèmes de manière relativement individuelle. Cette capacité offre une grande souplesse dans l'expression du comportement des agents, par contre ses limites sont mises en évidence par les problèmes rencontrés pour résoudre des conflits entre les différents buts des agents du système.

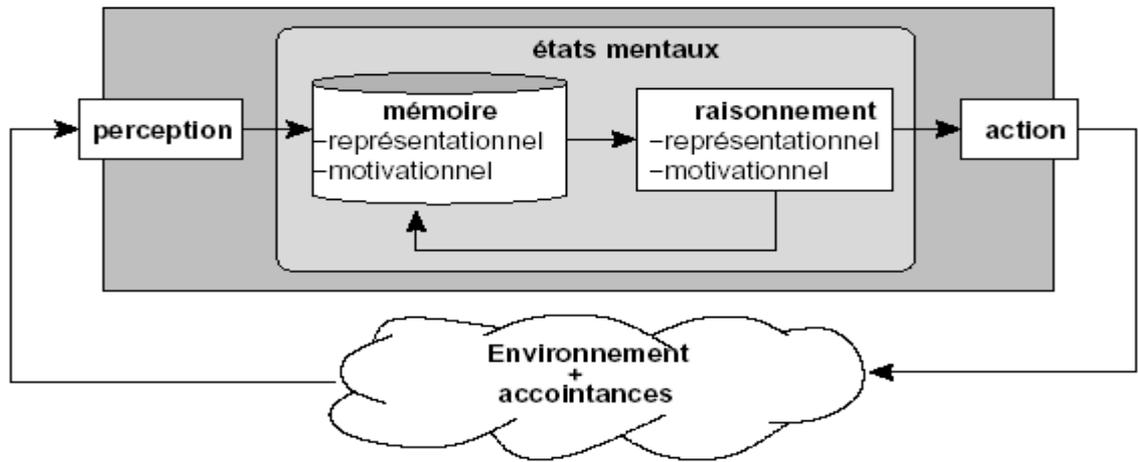


Figure 1.2 Agent cognitif, d'après [Duchesnay 01,a]

b. Agents réactifs

Les agents réactifs, contrairement aux cognitifs, n'ont pas une intelligence individuelle. Cette branche avance qu'il n'est pas nécessaire que les agents soient intelligents pour que le système ait un comportement global intelligent. Les agents réactifs possèdent des mécanismes simples de réaction aux événements. Ils ont parfois un objectif, mais ils n'ont aucune planification de la manière dont on peut arriver aux objectifs. Son mode de fonctionnement est basé sur une fonction du type $f(\text{stimulus}) \rightarrow \text{réponse}$, c'est-à-dire, ils n'agissent qu'à travers les stimulus aperçus dans l'environnement ou créés à partir d'autres agents.

En effet, la caractéristique principale des systèmes d'agents réactifs est le comportement émergent du système global qui n'est souvent pas prévu. Ainsi, une approche typique des systèmes multi-agents réactifs débute par la création d'éléments simples, gouvernés par des lois simples, qui interagissent pour développer une structure globale sans contrôleur responsable du comportement de chaque élément.

En effet, la division cognitif / réactif est parfois trop simpliste. Ferber nous présente une classification plus détaillée en citant d'autres termes utilisés par la communauté multi-agent pour plus de détails consulter [Ferber 95].

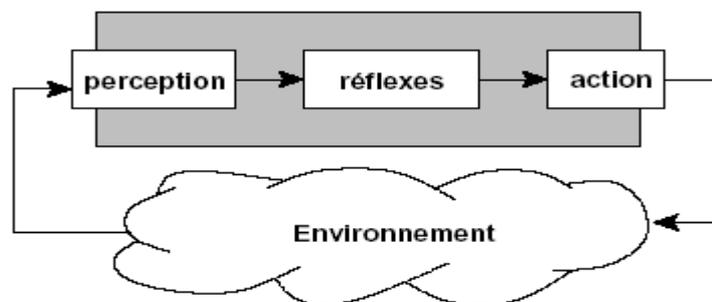


Figure 1.3 Agent réactif d'après [Duchesnay 01,a]

1.3.1.3 Systèmes Multi-Agents (SMA)

Les Systèmes Multi-Agents sont nés au cours des années 80 de la rencontre entre les approches d'algorithmiques parallèles d'une part et d'intelligence artificielle d'autre part. Un SMA est défini comme étant un système artificiel composé d'une population d'agents autonomes interactifs qui coopèrent pour aboutir à un but commun [Kévin 04,+]. L'entité de base qui est l'agent est une entité réelle ou abstraite qui poursuit un objectif individuel et qui est capable d'agir sur elle-même et sur le monde environnant en général peuplé d'autres agents. Chaque entité dispose d'une représentation partielle de cet environnement et peut communiquer avec d'autres agents. Son comportement est la conséquence de ses observations, de son savoir et de ses interactions avec le monde et les autres agents. Elle est également capable d'apprendre et donc d'améliorer ses connaissances.

Un SMA est aussi un système informatique distribué composé d'entités informatiques dites « intelligentes » qui interagissent entre elles [Kévin 04, +].

Jacques Feber [Ferber 95] donne une excellente définition d'un système multi-agents. Il est composé des éléments suivants :

- Un environnement E , dans notre cas, c'est l'espace où évoluent les agents.
- Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E .
- Un ensemble A d'agents qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer, et manipuler des objets de O . Cela correspond à la capacité des agents de percevoir leur environnement, de manger, etc.
- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

L'approche multi-agent facilite la conception de modèles pour les systèmes réels, d'entités vivantes, mais elle ne se limite pas à cet aspect. Les systèmes de vie artificielle en font également l'usage. Il convient de donner quelques notions sur le sujet de la vie artificielle où des nombreuses contributions sont effectuées dans la simulation écologique ; et vice-versa également. Le paragraphe suivant présente ce domaine de recherche.

1.3.2 Vie Artificielle

La vie artificielle, aussi connue sous la dénomination ALife - Artificial Life, est un domaine où l'on cherche à concevoir des systèmes capables de faire apparaître des processus similaires à ceux des systèmes vivants naturels [Campos 00].

C.Langton, l'un des pères de la vie artificielle l'a définie en 1989 comme « l'étude de systèmes construits par l'homme qui présente des comportements caractéristiques des systèmes vivants naturels. »

Des processus comme la reproduction, la mort, la compétition pour des ressources, l'apprentissage, le développement et bien d'autres encore peuvent faire partie d'un système ALife. Ce domaine de recherche complète l'approche traditionnelle de la biologie, où le mode de fonctionnement est l'analyse des êtres vivants, tout en essayant de synthétiser des comportements « vivants » sur ordinateur.

Nous pouvons trouver beaucoup d'applications conceptuellement différentes. Les premières réalisations mais non les moins intéressantes, sont les automates cellulaires comme le jeu de la vie de Conway (que nous ne détaillerons pas ici). Cet automate cellulaire est équivalent à une machine universelle de Turing. C'est-à-dire que théoriquement (la mise en pratique est autrement compliqué), le jeu de la vie de Conway peut résoudre les mêmes problèmes qu'un ordinateur.

La recherche sur la vie artificielle, malgré toute notre ignorance par rapport au processus complexe de la vie, peut éclairer des questions fondamentales dans plusieurs domaines de la science. Parmi ces domaines, citons d'abord la biologie et l'informatique, et en deuxième plan la physique, l'écologie, la sociologie, la psychologie, la philosophie [Charton 03],.....

1.3.3 Automates cellulaires

Les automates cellulaires sont des réseaux de cellules à une, deux, trois ou n dimensions. Dans un automate cellulaire, le temps et l'espace sont représentés de manière discrète. Chacune des cellules contient un automate à états finis qui calcule son état en fonction d'un voisinage [Batouche 02,a].

L'histoire des Automates cellulaires (AC) remonte aux années 1940 et au mathématicien Stanislas Ulam. Il s'est intéressé à l'évolution de constructions graphiques engendrées à partir de règles simples [Batouche 02,a] :

- La Base = espace à deux dimensions divisé en cellules.
- Une cellule pouvait avoir deux états: Allumée ou Éteinte.
- A partir d'une configuration donnée => déterminer la génération suivante en fonction des règles de voisinage.

Ce mécanisme permettait de générer des figures esthétiques et complexes. En parallèle, Von Neumann s'intéressait à la théorie des automates autorépliqueurs et travaillait à la conception d'une machine autorépliatrice. S.Ulam qui a suggéré à V.N d'utiliser un espace cellulaire pour construire cette machine. Sur cette base, il conçut un AC de 200.000 cellules à 29 états contenant un copieur universel, une description de lui-même et une machine de Turing pour la supervision.

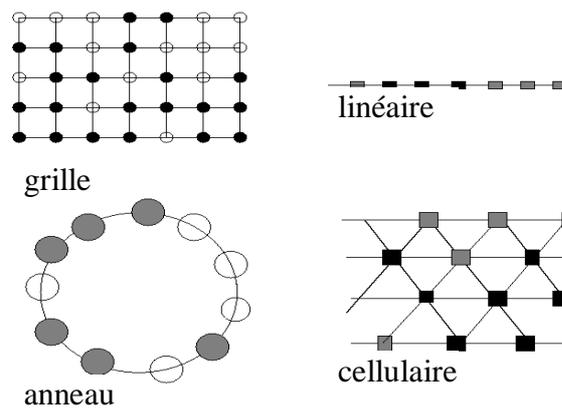


Figure 1.4 Exemples de topologies d'automates cellulaires.

Les AC sont sortis des laboratoires en 1970 avec le fameux Jeu de la Vie (Life Game) de John Horton Conway.

Donc, les automates cellulaires sont des structures abstraites qui permettent d'étudier des univers virtuels dont on maîtrise l'ensemble des lois. Ils contribuent à la connaissance de notre propre Univers : Ainsi, les systèmes physiques et biologiques complexes peuvent-ils reposer sur les mêmes classes universelles que les modèles mathématiques idéaux fournis par les automates cellulaires. La connaissance du comportement des automates cellulaires peut amener à des résultats plus généraux concernant le comportement des systèmes naturels complexes.

Les applications des AC sont nombreuses et diverses. Quelques exemples d'applications d'AC sont:

- Simulation du comportement d'un gaz. Un gaz =un ensemble de molécules dont le comportement est fonction de celui des molécules voisines.
- Les AC peuvent être utilisés comme alternative aux équations différentielles
- Conception d'ordinateurs massivement parallèles
- Simulation et étude du développement urbain.
- Simulation des processus de cristallisation.
- Simulation de la propagation des feux de forêt.

Dans un domaine plus quotidien, les AC peuvent être utilisé comme générateur graphique.

1.4 Quelques techniques inspirées de systèmes naturels

1.4.1 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques représentent une branche d'algorithmes puissants inspirée d'évolution par sélection naturelle. Ils ont été inventés dans les années 60. Depuis les années 80, ils sont devenus une technique très adoptée, on les trouve dans de nombreuses applications industrielles, où ils sont utilisés par exemple pour diagnostiquer des pannes complexes, pour traiter des images médicales...

Le principe de ce type d'algorithmes est comme suit [Bertelle 03,+] :

On génère initialement un grand nombre d'individus (ou solutions) et l'algorithme les fait évoluer en 3 phases :

- Reproduction
- Croisement
- Mutation

Le processus de sélection est basé sur une fonction d'évaluation (ou fonction objectif) qui correspond à une *performance* de l'individu. On en déduit une probabilité pour chaque individu de se reproduire ou de générer des clones (cette probabilité s'appelle *fitness*).

Finalement, ce processus contribue à produire une population ayant une meilleure adaptabilité (convergence vers l'optimum).

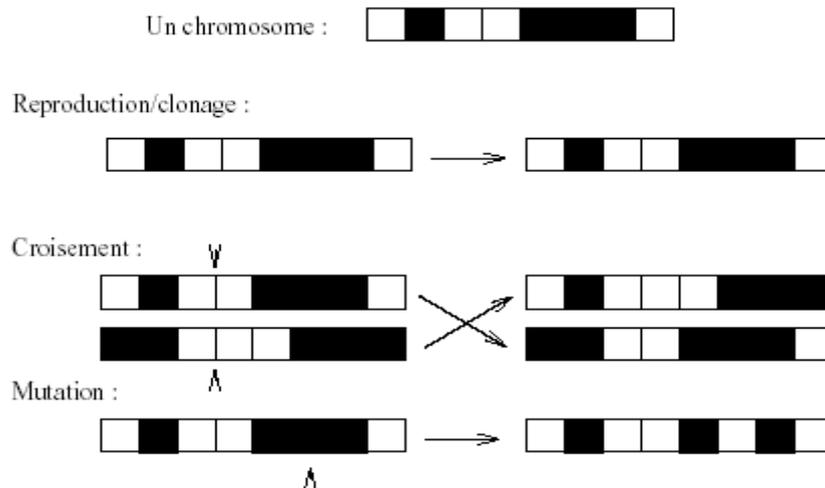


Figure 1.5 Exemple de reproduction, croisement, et mutation [Bertelle 03,+]

Par exemple, pour résoudre le fameux problème du voyageur de commerce on construit une population représentant un ensemble de parcours aléatoires. On sélectionne ensuite les meilleurs (les plus courts) que l'on croise entre eux pour obtenir une nouvelle population de parcours et ceci aussi longtemps qu'on le souhaite pour approcher le parcours optimum.

1.4.2 Réseaux neuronaux artificiels

Le champ des réseaux neuronaux va démarrer par la présentation en 1943 par W. MCCulloch et W. Pitts du neurone formel qui est une abstraction du neurone physiologique.

Le schéma des réseaux neuronaux s'inspire du mode de fonctionnement du système nerveux. Cette représentation a pour origine l'observation directe de la structure du cerveau et de ses ramifications dans l'ensemble des organismes vivants.

Un neurone peut être décrit comme un petit automate de décision. Il se compose de 2 parties (*voir figure 1.6*) ayant des fonctions distinctes [Batouche 02,b]:

- évaluation de la stimulation reçue
- évaluation de son état interne

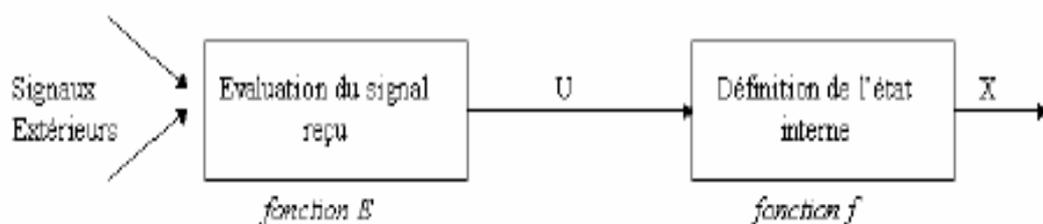


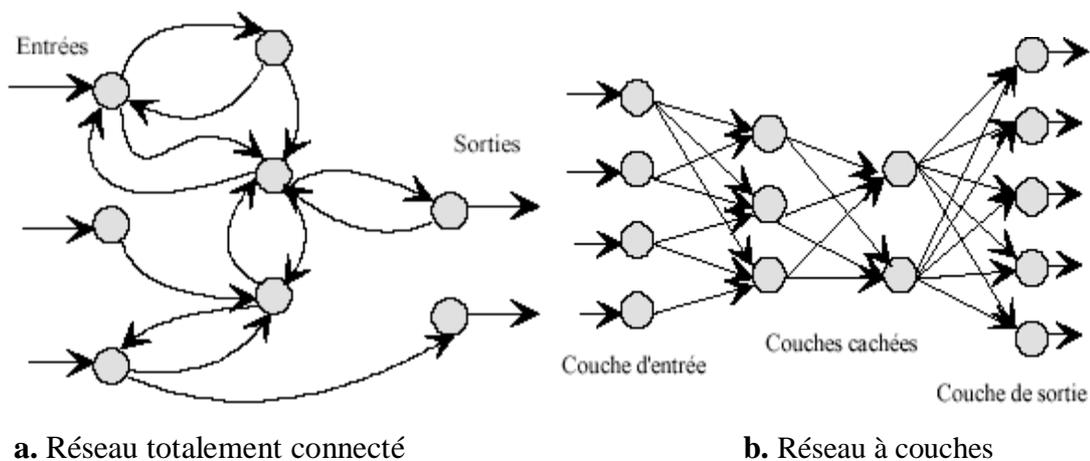
Figure 1.6 Le neurone formel, d'après [Batouche 02,b]

Un neurone est donc caractérisé par:

- son état (X)
- le niveau d'activation qu'il reçoit en entrée (U)
- sa fonction de transition (f)
- sa fonction d'entrée (une somme en général)

La topologie des réseaux de neurones peut être très variée. On peut concevoir plusieurs types de réseaux seulement en modifiant les règles de connexion. Par analogie à la biologie, on peut dire que les connexions représentent l'axone et les différentes dendrites qui relient le neurone aux autres neurones. La particularité de la connexion est d'être pondérée. On simule ainsi la relation entre les neurones, c'est à dire l'influence de l'activation (désactivation) d'un neurone sur un autre.

Dans la majorité des cas, les connexions servent à calculer l'entrée du neurone tandis que les fonctions d'activation détermineront la sortie.



a. Réseau totalement connecté

b. Réseau à couches

Figure 1.7 Exemple de topologies de réseaux de neurones d'après [Batouche 02,b]

Aujourd'hui, les réseaux neuronaux sont utilisés dans de nombreux domaines (entre autres, vie artificielle et intelligence artificielle) à cause de leur propriété en particulier, leur capacité d'apprentissage, et qu'ils soient des systèmes dynamiques.

1.4.3 Intelligence en essaim [Bonabeau 00,+]

Les recherches sur les comportements collectifs des insectes sociaux fournissent aux informaticiens des méthodes puissantes pour la conception d'algorithmes d'optimisation combinatoire et de routage et de contrôle distribué.

Chez les insectes sociaux, le comportement collectif qui émerge des comportements simples des individus est nommé intelligence en essaim. Ces phénomènes d'intelligence en essaim sont de plus en plus étudiés en informatique et en robotique, où des systèmes de contrôle centralisés gagnent à être remplacés par d'autres, plus autonomes et plus flexibles, fondés sur les interactions d'éléments simples [Jourdan 03].

L'histoire de l'intelligence en essaim remonte à l'étude du comportement de fourmis à la recherche de nourriture au départ de leur nid, par Goss, Deneubourg et leur équipe.

On distingue ici deux notions fondamentales :

a. Pheromone

En se déplaçant du nid à la source de nourriture et vice-versa (ce qui, dans un premier temps, se fait essentiellement d'une façon aléatoire), les fourmis déposent au passage sur le sol une substance odorante appelée phéromone, ce qui a pour effet de créer une piste chimique.

Les fourmis peuvent sentir ces phéromones qui ont un rôle de marqueur de chemin: quand les fourmis choisissent leur chemin, elles ont tendance à choisir la piste qui porte la plus forte concentration de phéromones (*voir figure 1.8*). Cela leur permet de retrouver le chemin vers leur nid lors du retour. D'autre part, les odeurs peuvent être utilisées par d'autres fourmis pour retrouver les sources de nourriture détectées par leurs consœurs.

Il a été démontré expérimentalement que ce comportement permet l'émergence des chemins les plus courts entre le nid et la nourriture, à condition que les pistes de phéromones soient utilisées par une colonie entière de fourmis.

Le système de fourmis (Ants System - AS) est une méthode d'optimisation basée sur ces observations [Jourdan 03]. Le système de fourmis a été employé avec succès sur des nombreux problèmes (voyageur de commerce, affectation quadratique, ...) mais les auteurs ont remarqué que l'AS n'a pas un comportement très exploratoire ce qui a conduit les auteurs à utiliser des hybridations du système de fourmis avec des recherches locales.

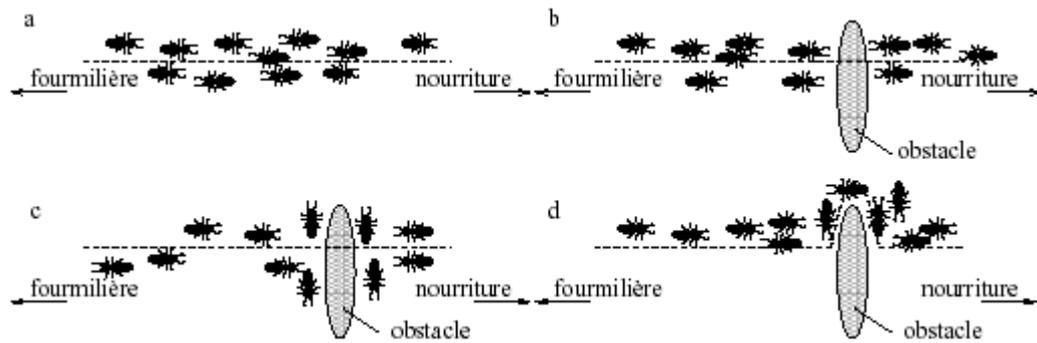


Figure 1.8 (a) Les fourmis suivent un chemin entre la fourmilière et la nourriture. (b) Un obstacle apparaît sur le chemin ; les fourmis choisissent entre prendre à droite et à gauche avec équiprobabilité. (c) La phéromone s'évapore sur le chemin le plus long. (d) Toutes les fourmis choisissent le chemin le plus court. [Jourdan 03]

b. Stigmergie

Le principe de *stigmergie* a été découvert par le biologiste Français *Grassé* dans les années 1950, par ses études sur le comportement d'insectes sociaux. Mais seulement actuellement qu'il devient une question majeure dans la conception des systèmes d'agents.

Le mot « *stigmergie* » est une combinaison des mots grecs “*stigma*” (signe remarquable) et “*ergon*.” (travail). Ce qui indique que quelques activités d'agents sont déclenchées par des signes externes qu'eux-mêmes peuvent être produits par l'activité de l'agent [Brueckner 00].

Dans un processus stigmergique, le comportement d'un individu est influencé par le résultat des actions passées des autres individus [Bourjot 01, +].

Deux formes générales de stigmergie ont été indiquées dans [Brueckner 00] :

- Stigmergie qualitative : qui implique un changement dans les caractéristiques physiques de l'environnement. La construction du nid chez les termites est un exemple de ce type de stigmergie.
- Stigmergie quantitative : ici, une marque est déposée dans l'environnement qui ne fait aucune contribution directe à la tâche qui est accomplie, mais elle a une influence sur la tâche subséquente. Un exemple de ce type stigmergie est le comportement de fourmis quand ils construisent collectivement la plus courte trajectoire d'une source de nourriture au nid.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les concepts liés aux systèmes complexes. Il a abordé également les notions de vie artificielle et d'automates cellulaires.

Les systèmes multi-agents sont de plus en plus utilisés, non seulement pour la résolution de problèmes et le développement de logiciels mais aussi pour mieux comprendre les systèmes complexes par la simulation. L'intérêt de réaliser ce genre de simulations est de voir apparaître des comportements ou des structures qui n'étaient pas explicitement programmés.

Les phénomènes collectifs en systèmes naturels sont une source d'inspiration pour proposer des méthodes multi-agents de résolution de problèmes. Ils permettent l'élaboration de comportements individuels simples produisant collectivement des phénomènes complexes. Le chapitre suivant va aborder l'une de ces sources d'inspiration : écosystèmes.

