

ACADEMIE DE MONTPELLIER

Université Montpellier II

- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC -

Rapport de stage de recherche

Préparé dans le cadre de la formation au Diplôme d'Etudes Approfondies

SPECIALITE : Informatique

# Modèle de SMA réactif et récursif pour l'émergence multi-niveaux

---

BEURIER GREGORY

Directeur de stage : JACQUES FERBER

Co-encadreur : OLIVIER SIMONIN

Date de soutenance: le 01/07/2002

# Résumé

Nous abordons dans ce travail le phénomène de l'émergence multiple (ou multi-niveaux), que l'on peut résumer de la façon suivante : il existe dans certains systèmes des niveaux d'organisations fermés formant un tout ayant des propriétés qui ne peuvent être réduites aux propriétés des sous-systèmes qui le composent. L'étude de ce phénomène est donc fondamentale pour la compréhension des systèmes complexes, qu'ils soient informatiques, biologiques, physiques, etc...

Dans un premier temps, nous présentons diverses études de ce phénomène et apportons une critique quant au point de vu adopté par leurs auteurs. Puis nous développons un modèle de Système Multi-Agents réactif d'inspiration Vie Artificielle qui exhibe des caractéristiques récursives pour la production de l'émergence multiple. Nous le formalisons de façon générique en présentant ses divers composants : un environnement discret, une gestion de l'information par diffusion et des agents réactifs au comportement récursif. Nous caractérisons les interactions entre agents par deux types d'informations : l'attraction et la répulsion. Nous présentons ensuite diverses implémentations d'instances de ce modèle, développées sous l'environnement multi-agents TurtleKit. Une analyse des simulations, effectuées dans une optique d'étude des principes de l'émergence multiple, est exposée. Les résultats obtenus présentent les propriétés suivantes: il y a production d'émergences multiples dont la principale contrainte provient du caractère exponentiel de leur structuration, il y a augmentation de la complexité interactionnelle et spatiale du système jusqu'aux limites induites par les facteurs limitatifs (nombres d'agents, taille de l'environnement...), il y a autopoïèse caractérisée par une robustesse face aux perturbations et une régénération de la machine de production de l'émergence, et enfin, le système présente des analogies avec des manifestations biologiques d'une part et des phénomènes fractals d'autre part.

Ces travaux introduisent un cadre d'étude de la caractérisation des structures émergentes multi-niveaux. Il présente donc un intérêt pour la compréhension de l'organisation et de la structuration émergente des populations d'agents logiciels, de robots explorateurs, de dispositifs issus de la nanotechnologie ou de tout autre discipline mettant en jeu des systèmes complexes basés sur les interactions des parties qui le composent.

**Mots-Clés** : systèmes multi-agents, émergence multi-niveaux, simulation, auto-organisation, vie artificielle.

# Abstract

We introduce in this work the multiple emergence phenomenon which can be summarized in the following way: certain systems show closed levels of organizations forming a whole having properties which cannot be reduced to the properties of the subsystems. The study of this phenomenon is then fundamental to understand complex systems, in informatic, biology, physics, etc.

First, we give an overview of some studies on this phenomenon and bring a criticism on the point of view adopted by their authors. Then we develop a reactive Multi-Agents System model inspired by Artificial Life which exhibits recursive characteristics for multilevel emergence production. We formalize it in a generic way by presenting its different components: a discrete environment, a diffusion management of information and reactive agents with recursive behaviors. We characterize the interactions among agents by two types of information: attraction and repulsion. Then, we present various implementations of model instances developed under the multi-agents platform TurtleKit. We expose then simulations, their analysis, aiming at the study of multilevel emergence principles. The obtained results present the following properties: there is multilevel emergences productions whose principal constraints comes from the exponential character of their structuring, there is an interactionnal and spatial complexity increase until limits induced by the restrictive factors (numbers of agents, environment size...), there is autopoiesis characterized by robustness in unstable environments and regeneration of the emergence production machine, and finally, the system exhibits analogies with biologic phenomena on one hand and fractal objects on the other hand.

This work introduces a framework for multilevel emergent structures study. It is thus of an interest for the comprehension of emergent organisation and structures formation in agent softwares, probes robots, nanotechnology devices populations, or any other discipline using complex systems based on interactions of the parts which compose it.

**Keywords**: Multi-agents systems, multilevel emergence, simulation, self-organization, artificial life.

# Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement :

- Jacques Ferber pour m'avoir laissé une entière liberté dans l'exploration du sujet et pour m'avoir prodigué ses conseils justes et avisés;
- Olivier Simonin pour son éternelle disponibilité, ses critiques et son avidité contagieuse de recherche ;
- Fabien Michel pour avoir répondu à chacune des mes attentes au niveau de l'outil TurtleKit ;
- Jérôme Chapelle et Matthias Mailliard pour l'ambiance au sein de l'équipe SMA ;
- L'ensemble des membres du DEA, en particulier Stéphane, Olivier, Alexis, pour la solidarité et l'amabilité dont ils ont fait preuve ;
- Gilles Ardourel dont l'aide m'a été précieuse pour boucler ce rapport ;
- Enfin, tous ceux qui m'ont permis et donné envie d'arriver jusque là, ma famille et Chloé en particulier.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction et Problématique .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Cadre du travail .....</b>	<b>6</b>
2.1	Contexte .....	6
2.1.1	Emergence .....	6
2.1.2	Vie artificielle .....	8
2.2	Etat de l'art .....	10
2.2.1	DEA de Mahdi Hannoun [Han 96] .....	10
2.2.2	Travaux de Jari Vaario .....	10
<b>3</b>	<b>Approche théorique .....</b>	<b>12</b>
3.1	Proposition d'une définition de l'émergence multiple .....	12
3.2	Le modèle .....	13
3.2.1	L'environnement .....	13
3.2.2	Fonctionnement des Vecteurs .....	14
3.2.3	Les agents .....	16
3.2.4	L'émergence multiple : un système récursif .....	19
3.2.5	Transformation inverse .....	23
3.2.6	Discussion .....	23
<b>4</b>	<b>Expérimentation .....</b>	<b>24</b>
4.1	Utilisation du modèle .....	24
4.1.1	le choix de l'attracteur .....	24
4.1.2	paramétrage et adaptation du modèle .....	26
4.2	Simulation .....	28
4.2.1	La visualisation .....	28
4.2.2	Caractérisation de l'attracteur .....	28
4.2.3	L'émergence multiple .....	29
4.3	Analyse .....	30
4.3.1	L'émergence multiple .....	30
4.3.2	Mesure de complexité du système .....	32
4.3.3	Un système autopoïétique .....	34
4.3.4	Correspondance biologique .....	37
4.3.5	Un résultat fractal .....	39
4.4	L'environnement de simulation et l'implémentation .....	41
<b>5</b>	<b>Conclusion et Perspectives .....</b>	<b>42</b>
5.1	Conclusion .....	42
5.2	Perspectives .....	43
5.2.1	Les voies de recherches futures .....	43
5.2.2	Applications futures .....	45
<b>6</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Annexes .....</b>	<b>50</b>

# Chapitre 1

## Introduction et Problématique

Marvin Minsky [Min 86], un des pionniers de l'Intelligence Artificielle Distribuée, définit le concept d'**émergence** de la façon suivante : « *Apparition inattendue, à partir d'un système complexe, d'un phénomène qui n'avait pas semblé inhérent aux différentes parties de ce système. Ces phénomènes émergents ou collectifs montrent qu'un tout peut être supérieur à la somme de ses parties* ».

La notion d'émergence est capitale dans l'étude des systèmes complexes, qu'ils soient biologiques, physiques, informationnels, logiciels, etc... Dans la nature, ces systèmes sont majoritairement caractérisés par une structure émergente **multi-niveaux** (ou multiple) [Hey 89]. Cela se traduit par l'apparition d'une émergence au sein d'un système dont les parties sont elles-même le produit d'émergences passées.

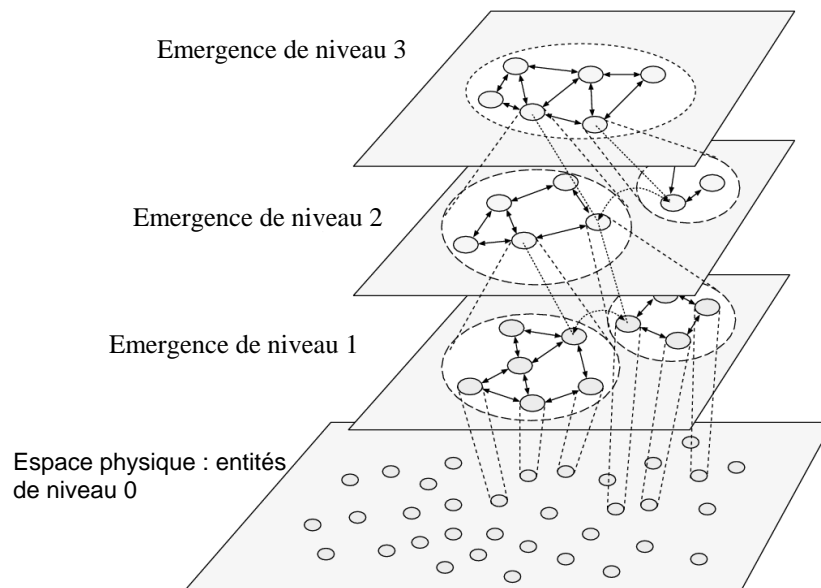


Fig 1 : L'émergence de structures [Vaa 94b]

La compréhension de ce phénomène présente donc nombres d'intérêts dans des domaines très divers. Que ce soit dans une approche **Vie Artificielle**, pour comprendre les mécanismes intrinsèques des structures biologiques et plus généralement de la vie, dans une approche **Systèmes Multi-Agents** pour caractériser la nature, le fonctionnement et les résultats des interactions entre agents ou encore dans une approche **Systèmes Auto-Organisés** pour interpréter les organisations inhérentes aux interdépendances des parties d'un système ; le phénomène de l'émergence multiple est fondamental dans la compréhension de la structuration et de l'organisation des systèmes complexes.

Les travaux sur l'émergence traitent essentiellement de systèmes caractérisés par des structures émergentes de niveau 1. Dans le cadre de ce rapport, nous exposons une étude constructive du phénomène de l'émergence multiple. Nos objectifs sont de définir un modèle de Systèmes Multi-Agents d'inspiration Vie Artificielle – basé sur l'interactions d'entités minimales – qui assure :

- l'émergence multiple de structures complexes
- la résistance et l'adaptation aux perturbations (système autopoïétique)
- et la caractérisation claire des interactions entre entités.

Pour vérifier ces propriétés nous proposons un modèle générique d'émergence multi-niveaux et mettons en œuvre des simulations de plusieurs instances de ce modèle. Ces simulations ont pour but de fournir des données pour des études détaillées du modèle.

Enfin, nous exposons les résultats de ces études tels que la correspondance entre le modèle et les systèmes fractals (autosimilarité induite par le caractère récursif du modèle).

### *Structure du rapport*

Une présentation générale des disciplines liées à cette thématique ainsi qu'une description de travaux sur l'émergence sera tout d'abord réalisée. Ensuite, nous présenterons une formalisation du modèle ainsi que plusieurs implémentations qui en ont été faites. Enfin, une analyse détaillée des simulations qui ont été réalisées sera exposée, présentant les divers intérêts du système dans quelques domaines concernés par l'émergence. Puis nous concluons en exposant les perspectives et développements possibles de ce travail.

# Chapitre 2

## Cadre du travail

### 2.1 Contexte

#### 2.1.1 Emergence

◆ *NOTIONS*

La notion d'émergence est présente depuis longtemps dans l'histoire des sciences. Elle a été employée à l'origine par les physiciens, les biologistes et les philosophes [Dam 00] pour exprimer l'apparition d'un phénomène au sein d'un système - phénomène dont la manifestation ne peut être simplement expliquée par la connaissance des constituants du système. Plus généralement, on peut formuler l'émergence comme l'idée qu'il existe dans un système des propriétés présentes à un certain niveau d'organisation qui ne peuvent être déduites des propriétés de niveaux inférieurs (cf fig 2). La compréhension de cette notion peut alors s'exprimer par la question de Descartes : « Comment peut-on concevoir un système qui surpasse les spécifications de son créateur ? » [Car 91].

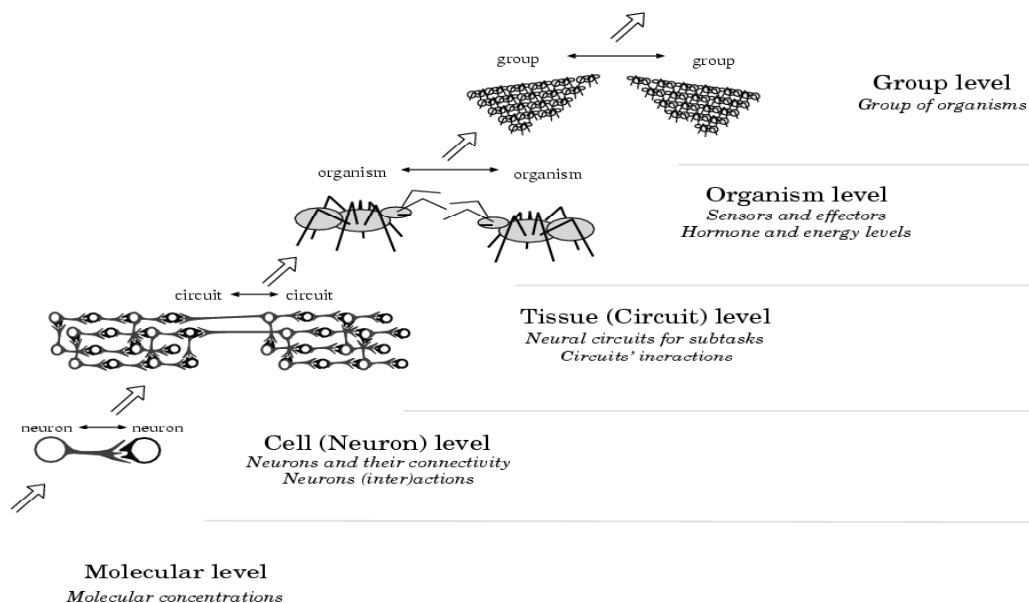


Fig 2 : Les niveaux hiérarchiques des organismes [Vaa 94]

Les définitions de l'émergence sont nombreuses. On peut citer, par exemple, Cariani [Car 91] qui distingue l'émergence computationnelle, l'émergence thermodynamique et l'émergence relative au modèle, Baas [Baa 94] qui propose une définition plus mathématique liant les théories de la complexité, de l'émergence, de l'évolution et des hiérarchies, Bunge, Searle, etc... Une approche générale de ces travaux peut être trouvée dans [MRJ 97], [Ali 98] et [Gol 99].

Au sein des domaines abordés dans ce rapport, les SMA et la vie artificielle, on peut citer les travaux de Jacques Ferber [Fer 95], Alexis Drogoul [Dro 93], Deneubourg [Den 94], Luc Steels [Ste 91], ou encore de Bonabeau et Theraulaz [Bon 94], qui pour la majorité d'entre eux sont d'inspirations éthologiques. Citons également l'article du groupe de travail M. R. Jean [MRJ 97], qui présente une vision globale de l'émergence en philosophie, en sciences cognitives, en Economie / Gestion, etc., et qui propose une approche pour une définition de l'émergence dans les systèmes multi-agents.

Dans le domaine des systèmes multi-agents, il semble essentiel de donner une définition positive, temporelle et constructive de l'émergence [Qui 99]. Nous utilisons, dans ce rapport, une généralisation du calcul émergent [For 89] proposée par le groupe M.R.Jean [MRJ 97] et Jean-Pierre Müller [Mül 98]. Un phénomène est dit émergent si:

- il y a un ensemble d'agents en interaction entre eux et via l'environnement dont la dynamique n'est pas exprimée dans les termes du phénomène émergent à produire mais dans un vocabulaire ou une théorie D;
- la dynamique des agents en interaction produit un phénomène global qui peut être une structure stable, une trace d'exécution ou n'importe quel invariant statique ou dynamique;
- ce phénomène global est observé soit par un observateur extérieur, soit par les agents eux-mêmes en des termes distincts de la dynamique sous-jacente, c'est à dire avec un autre vocabulaire ou théorie D'.

Quelques remarques s'imposent néanmoins suite à cette définition. L'observation du phénomène global ne peut avoir lieu qu'à travers une inscription de ce phénomène, dans l'environnement par exemple, et une interprétation de celui-ci par le vocabulaire D' distinct de D. Il faut également noter le rôle important de l'environnement pour pouvoir caractériser une émergence au sens fort. Les agents perçoivent et modifient localement l'environnement relativement à leur comportement. C'est donc à l'environnement modifié par l'ensemble des agents que chaque agent soumet son interprétation. Alors, la dynamique générale n'est plus simplement une juxtaposition des dynamiques individuelles mais une rétroaction du tout vers les parties, une émergence au sens fort.

#### ◆ *APPLICATIONS*

Il existe dans le domaine des SMA de nombreux travaux faisant explicitement référence à l'émergence, en particulier dans la résolution de problèmes. Parmi les premiers systèmes – 1990, il faut citer l'éco-résolution de Ferber [Fer 95] d'inspiration éthologique. Elle a été appliquée à la résolution de problèmes tels que le jeu de taquin, le monde des blocs... L'éthologie a été une grande source d'idée pour ces systèmes émergents. Le système MANTA, qui met en oeuvre des colonies de fourmis, en est un bon exemple [Dro 95].

On peut également citer les travaux de Demazeau - le système PACO (expression dans un modèle multi-agents de l'ensemble des éléments du problème) - qui repose davantage sur les systèmes dynamiques.

Enfin, nous citerons les travaux de Jari Vaario [Vaa 96a], [Vaa 96b], [Vaa 97], à cheval entre les SMA et la vie artificielle, qui utilisent des méthodes émergentes pour l'ordonnancement de tâches et la simulation biologique.

#### ◆ *APPROCHE MULTI-NIVEAUX*

Les systèmes complexes dans la nature sont majoritairement caractérisés par une structure multi-niveaux (fig 1 et 2). Une explication de cette « architecture » a été fournie par H. Simon [Sim 62]. Ses arguments sont les suivants: les éléments « naturels » se combinent via des interactions créant une importante variété d'assemblages. De ces assemblages, seuls persistent les stables, les autres se disloquent, permettant ainsi des associations futures. Les assemblages stables peuvent être alors considérés comme de

nouveaux éléments qui peuvent à leur tour se combiner en assemblages de plus hauts niveaux. On obtient ainsi une hiérarchie de structures de plus en plus complexes.

H. Simon, utilise également ce raisonnement pour montrer la plus grande probabilité de voir émerger des structures multi-niveaux que des structures à niveau unique. Une présentation de ce travail dépassant le cadre de ce rapport, nous citerons un article de Heylighen qui y fait allusion [Hey 89]. Dans le domaine de l'émergence multiple, citons à nouveau les travaux de Jari Vaario [Vaa 93], [Vaa 94] et [Vaa 95], qui utilise la hiérarchie structurelle émergente pour prédéterminer la croissance de réseaux de neurones.

Dans le cadre de ce rapport, nous proposons une définition orientée SMA de l'émergence multiple (cf 3.1), définition qui est une formulation récursive de la définition de Jean-Pierre Müller ci-dessus. Pour l'instant, notons juste que l'on considère comme émergence multi-niveaux, un phénomène émergent qui a pour constituants de niveaux inférieurs des phénomènes qui sont déjà le produit d'une émergence.

## 2.1.2 Vie artificielle

### ◆ NOTIONS

La branche des sciences appelée Vie Artificielle est née en 1987 au *Workshop* organisé par Christopher G. Langton au Los Alamos National Laboratory. Sa « création » a été motivée par l'incompréhension des processus complexes qui modèlent la vie et le monde qui nous entoure.

La première définition de cette discipline a été donnée par son fondateur en 1989 [Lan 89]:  
« *Artificial life is the study of man-made systems that exhibit behaviors characteristic of natural living systems. It complements the traditional biological sciences concerned with the analysis of living organisms by attempting to synthesis life-like behaviors within computers and other artificial media. By extending the empirical foundation upon which biology is based beyond the carbon-chain life that has evolved on Earth, Artificial Life can contribute to theoretical biology by locating life-as-we-know-it within the larger picture of life-as-it-could-be.* »

En d'autres termes, le but de la vie artificielle est d'étudier les principes généraux de la vie par l'intermédiaire de trois approches [Bed 96]:

- Les systèmes auto-organisés, la génération spontanée d'ordre, l'émergence et la coopération ;
- La métabolisation, l'auto-reproduction et l'autopoïèse ;
- L'apprentissage, l'adaptation et l'évolution.

Dans le cadre de ce rapport nous nous intéressons principalement aux aspects suivants : les systèmes auto-organisés et l'émergence qui sont deux notions très liées, et l'autopoïèse.

### ◆ SYSTEMES AUTO-ORGANISES

Un système auto-organisé est un système dans lequel une structure apparaît sans pression ou aide du milieu extérieur au système. En d'autres termes, la contrainte structurelle ou organisationnelle est interne au système, résultante des interactions entre éléments, et généralement indépendamment de la structure physique de ceux-ci. Une structure / organisation ainsi formée peut évoluer spatialement et temporellement en maintenant une ou plusieurs formes (caractère cyclique). Si un système possède une structure stable, cette structure est un attracteur. Un attracteur peut être un point (une boule dans un bol), un chemin (orbite planétaire), une série d'état (le métabolisme d'une cellule) ou une suite infinie d'états – les attracteurs étranges. Un système peut posséder plusieurs attracteurs et alterner ses états de stabilité de façon cyclique, s'organisant en un ensemble de structures autonomes. Cela forme alors un circuit fermé de sous-systèmes qui peuvent interagir entre eux formant un réseau auto-suffisant de configurations de complexité supérieure aux sous-systèmes précédents. On peut ainsi distinguer des niveaux d'organisations fermés [Hey 99] formant un tout ayant des propriétés qui ne peuvent être réduites aux propriétés des sous-systèmes qui le composent. L'organisation est alors émergente.

Les notions de l'émergence et de systèmes auto-organisés sont très voisines. Une approche cohérente d'un de ces domaines ne peut se faire sans une connaissance précise de l'autre.

## ◆ **AUTOPOÏÈSE**

Le concept d'autopoïèse a été initié au milieu des années 70 par Humberto Maturana et Francisco Varela [Var 97], [McM 97]. Beth Dempster le définit de la façon suivante [Dem 00]:

« Un système autopoïétique est un système dynamique qui est défini en tant qu'unité composite, comme un réseau de productions d'éléments qui *a*) à travers leurs interactions, régénère de façon récursive le réseau de production qui les produit et *b*) construisent un réseau dans lequel ils existent en constituant une frontière avec le milieu extérieur via leurs interactions préférentielles dans le réseau. »

Les notions à retenir de l'autopoïèse sont donc l'attribut d'auto-entretien du système et la notion d'interaction préférentielle avec le voisinage. Prenons un exemple : une bactérie est une unité autonome qui produit via son métabolisme les éléments nécessaires à son fonctionnement / sa maintenance et sa croissance, ceignant de sa membrane son système de production autocatalytique en l'isolant du milieu extérieur.

Le concept d'autopoïèse a été appliqué à une grande variété de systèmes dans des disciplines allant de la psychologie à la sociologie en passant par la communication et bien évidemment la biologie. Le but premier de Maturana et Varela [Hey 00] était de caractériser la nature des systèmes vivants. Mais de toute évidence, ce critère n'a pas été adopté par la communauté biologique comme un critère suffisant pour établir la différence entre le vivant et le non-vivant [Dem 00].

## ◆ **DES MODELES IRREALISTES POUR LA BIOLOGIE**

La discipline de la vie artificielle s'appuie sur le « dogme » que les principes fondamentaux de la vie peuvent être « capturés » à partir de modèles relativement simples avec une abstraction importante des dynamiques de très bas niveaux [Bed 96]. Il est néanmoins important de reconnaître que rien ne garantit la validité de cette hypothèse.

Néanmoins, dans le cadre de ce rapport, nous adhérons à cette croyance, en considérant [Bed 99], qu'afin de générer et d'expliquer un phénomène donné, un modèle composé d'un ensemble minimal de propriétés, permet une explication plus claire et plus simple. Plus le modèle fait preuve d'abstraction, plus la connaissance à en extraire est intelligible et universelle.

« *Simplicity and unity are paramount virtues of explanations in any context, and unrealistic models produce explanatory simplicity and unity by drastic abstraction.* » [Bed 99]

## 2.2 Etat de l'art

Les travaux sur l'émergence sont nombreux, ceux sur l'émergence multiple sont beaucoup plus rares. Nous allons présenter deux d'entre eux qui sont en partie à l'origine de la démarche adoptée dans ce rapport en essayant d'apporter un regard critique à l'approche choisie par leurs auteurs.

### 2.2.1 DEA de Mahdi Hannoun [Han 96]

Madhi Hannoun dans le cadre de son DEA, sous la tutelle de Jacques Ferber, a réalisé un travail ayant pour titre « Emergence et coopération d'organisations dans un système multi-agent réactif » [Han 96]. Ce travail, qui s'inscrit pleinement dans la discipline vie artificielle, présente un modèle d'émergence de structures de type cellulaire.

Mahdi Hannoun utilise un environnement discret, 6-connexe, peuplé d'agents réactifs qui interagissent par émission de substances liquides (champs de potentiels) qui se propagent dans le milieu. Ce travail, tourné vers la simulation, est particulièrement orienté vers le fonctionnement et la formation de structures émergentes de type cellules. Il utilise deux types d'agents, les noyaux et les membranes. Les noyaux attirent vers eux les agents membranes qui forment alors une ceinture autour de lui. Les déplacements, motivés par un besoin de ressources, sont accomplis par l'ensemble de la structure. La cohésion de la membrane lors de la déformation due au déplacement est alors assurée par la création de nouveaux agents liens qui apparaissent et disparaissent pour colmater les brèches de la membrane.

Cette approche présente un grand intérêt quant à la gestion des flots d'informations dans l'environnement. La membrane délimite une zone hors de laquelle aucune information ne peut sortir. Cela produit une individualisation de chaque structure, fonction de son contenu. Cependant le reste du modèle demeure très rigide.

Tout d'abord au niveau du peuplement de l'environnement. Le ratio d'agents membranes par rapport aux agents noyaux est primordial pour la cohésion globale du système. Or, le peuplement est prédéfini, ne laissant que peu de surprises quant au résultat escompté – ce qui va à l'encontre des principes d'un phénomène émergent. Deuxièmement, lors du déplacement des structures cellulaires, il y a création de nouveaux agents afin de conserver l'homogénéité de la membrane. Ce comportement, défini initialement, présuppose l'existence et la nature du phénomène émergent dans le comportement même des agents membranes. Ce principe va à l'encontre encore une fois du principe même de l'émergence.

Ce travail a néanmoins fourni les premières idées pour l'ébauche du modèle présenté dans ce rapport, en particulier au niveau de la gestion de l'information.

### 2.2.2 Travaux de Jari Vaario

Jari Vaario de l'université de Kobe au Japon, a publié de très nombreux papiers sur l'émergence en vie artificielle. Il présente des modèles hybrides basés sur l'émergence morphogénétique, de type systèmes auto-organisés, et l'émergence ontogénétique, basée sur l'apprentissage, la sélection et la reproduction par réseaux de neurones ou algorithmes génétiques. Ces travaux ont entre autres pour but de fournir des plans d'exécution (Scheduling) [Vaa 96a] [Vaa 96b] [Vaa 97] et de produire des réseaux de neurones. Un des aspects récurrents des modèles qu'il propose provient de l'utilisation de champs de potentiels attractifs et répulsifs pour produire une organisation des entités mises en œuvre. Cette organisation, dans la plupart de ces travaux, a pour but de qualifier un résultat ; l'ordonnancement de tâches telles que l'assemblage de pièces d'usine ou l'optimisation de fonctionnement d'une chaîne de montage en est un bon exemple. A cet effet il travaille sur des réseaux d'interactions émergents à plusieurs niveaux.

Dans une de ces publications [Vaa 95], il présente un modèle typique de la production de réseaux d'interactions entre entités autonomes en utilisant des forces d'attractions et de répulsions émises par les entités. Cela pour fournir des modèles de formations des systèmes biologiques. L'activation de ces forces se fait pour chaque entité via la perception qu'elle possède de l'environnement et le comportement, codé par un génome, qu'elle exprime. Le génome permet l'utilisation d'algorithmes évolutionnistes qui engendrent l'apparition de nouvelles interactions en modifiant l'utilisation et la perception des champs de forces par les

entités mises en œuvre. L'environnement fournit le support d'existence et les restrictions spatiales des structures formées.

Ce travail offre un cadre très intéressant pour une étude de l'émergence multiple. Les simulations présentent des organisations hiérarchisées avec une distinction nette entre les niveaux d'émergences. Plusieurs types de structures sont formées, spécifiques des comportements des entités qui les composent. Néanmoins quelques critiques peuvent être apportées à ce travail.

Tout d'abord au niveau du choix du vecteur de l'information. Le modèle par champs, s'il a de nombreux intérêts pour la simulation comme nous le verrons par la suite, annihile complètement l'inertie que peut avoir le système. La perception de l'information est instantanée et aucune trace de celle-ci ne perdure dans le milieu. Cette approche nous paraît donc très déterministe et peu pertinente dans un cadre vie artificielle.

L'autre critique que nous apportons à ce travail provient de l'absence d'autopoïèse (cf. 2.1.2) dans le modèle. Le processus émergent est statique, une fois la structuration réalisée, le système est stable. Néanmoins, ce choix de rigidité du système, accentué par le modèle par champs, est atténué par l'utilisation d'algorithmes génétiques pour l'évolution des entités. Cela permet ainsi de produire une modification comportementale des entités et une dynamique intrinsèque du système provenant non plus du comportement initial de celles-ci mais des modifications des interactions entre elles via leur nouveau comportement.

Cet article reste, malgré ses défauts, primordial dans l'approche de l'émergence multiple qui a été choisie dans le cadre de ce DEA. Tout d'abord, l'approche de J. Vaario est principalement orientée sur la caractérisation des résultats de l'émergence, en particulier sur la structuration des entités. Cet aspect a été conservé pour qualifier le phénomène émergent à observer. Cependant, nous avons opté pour une approche plus proche du phénomène de l'émergence que de son résultat, qu'il soit structurel, organisationnel, etc... Enfin, les expérimentations de J. Vaario ont permis de confirmer le choix qui avait été fait de l'utilisation de deux types d'informations pour la formation de structures, attractifs et répulsifs.

# Chapitre 3

## Approche théorique

### 3.1 Proposition d'une définition de l'émergence multiple

Dans le cadre de ce rapport, nous proposons une définition récursive de l'émergence multiple orienté Systèmes Multi-Agents. Cette définition est une généralisation récursive de la définition de l'émergence proposée par Jean-Pierre Müller [Mül 98]. Nous introduisons la notion de niveau dans le concept d'émergence ; un phénomène peut être émergent à un niveau  $i$  significatif du niveau structurel ou organisationnel produit avec  $1 \leq i$ . Nous allons donc définir récursivement l'émergence multiple dans le cadre d'une approche multi-agents.

Un phénomène est dit émergent de niveau 1 si:

- il y a un ensemble d'agents en interaction entre eux et via l'environnement dont la dynamique n'est pas exprimée dans les termes du phénomène émergent à produire mais dans un vocabulaire ou une théorie  $D$ ;
- la dynamique des agents en interaction produit un phénomène global qui peut être une structure stable, une trace d'exécution ou n'importe quel invariant statique ou dynamique;
- ce phénomène global est observé soit par un observateur extérieur, soit par les agents eux-mêmes en des termes distincts de la dynamique sous-jacente, c'est à dire avec un autre vocabulaire ou théorie  $D'$ .

Un phénomène est dit émergent de niveau  $i+1$  si:

- il y a un ensemble de phénomènes émergents  $P$ , dont un est au moins de niveau  $i$ , en interaction entre eux et via l'environnement dont la dynamique n'est pas exprimée dans les termes du phénomène émergent de niveau  $i+1$  à produire mais dans un vocabulaire ou une théorie  $D$ ;
- la dynamique des phénomènes émergents  $P$  en interaction produit un phénomène global qui peut être une structure stable, une trace d'exécution ou n'importe quel invariant statique ou dynamique;
- ce phénomène global est observé soit par un observateur extérieur, soit par les agents, soit par les phénomènes émergents de  $P$  eux-mêmes, en des termes distincts de la dynamique sous-jacente, c'est à dire avec un autre vocabulaire ou théorie  $D'$ .

## 3.2 Le modèle

Le modèle présenté est un système multi-agents  $S$ , composé d'un ensemble d'agents  $\Psi$  dans un environnement  $E$ . La gestion du temps est discrète, au tour par tour.

Soit  $S_{(t)}$ , le système à un temps  $t$ , caractérisé par un ensemble  $\Psi$  d'agents dans l'environnement  $E_{(t)}$ .

$$S_{(t)} = (E_{(t)}, \Psi) \xrightarrow{t+1} S_{(t+1)} = (E_{(t+1)}, \Psi)$$

Les agents, par rapport à d'autres approches de la simulation d'agents réactifs, et ce en particulier dans le domaine de la vie artificielle, sont inaltérables. Ils ne sont pas soumis à la déliquescence et ne peuvent donc disparaître. De la même façon, ils ne sont pas limités quant à la quantité d'information qu'ils peuvent déposer dans le milieu. Ils ne peuvent également engendrer de nouveaux agents.

### 3.2.1 L'environnement

L'environnement a un rôle essentiellement de vecteur de l'information. C'est une surface discrète, une matrice  $M$ , de taille  $n \times m$ , plongement d'un tore dans un espace à 2 dimensions.

$$E = M[n][m]$$

L'environnement conserve pour chacune de ses cases  $C(i,j)$  avec  $0 < i < n$  et  $0 < j < m$ , l'identifiant  $\alpha$  des agents et la quantité ainsi que le type des informations présents sur la case.

L'information est codée sous forme de Vecteurs d'informations  $P$  inspirés des substances d'interactions biologique (phéromones, coactones, exocoactones...), structure qui sera présentée par la suite. Dans la suite de ce rapport, nous emploierons simplement le terme de Vecteur pour désigner cette substance informationnelle. La quantité  $q$  de Vecteur dans une case est un entier. Une case stocke ainsi pour chaque type de Vecteur, un tuple  $K$  contenant le Vecteur et la quantité de celui-ci.

Soit un Vecteur  $P$  et une quantité entière  $q$ . Nous notons alors,

$$K_j = [P, q]$$

Soit  $A$  l'ensemble des identifiants des agents présents dans l'environnement  $E$ . Soit  $\Gamma_{(i,j)}$  l'ensemble des identifiants des agents présents sur une case  $c_{(i,j)}$  tels que  $\Gamma_{(i,j)} \subset A$ .

$$\Gamma_{(i,j)} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

Pour une case donnée, on a donc:

$$M[i][j] = C_{(i,j)} = \left( \begin{array}{c} \Gamma_{(i,j)} \\ K_1 \\ K_2 \\ \mathbf{M} \\ K_n \end{array} \right)$$

Le modèle étant orienté vers la simulation, une approche discrète en environnement torique a été choisi. Néanmoins nous verrons par la suite que ces deux paramètres (discret et torique) peuvent être changés. Deux remarques s'imposent. Tout d'abord, l'environnement est complètement indépendant des agents qui le « peuplent », s'opposant ainsi à une approche par automates cellulaires. Enfin, malgré une forme torique, l'environnement est fini, cela apporte une restriction spatiale à la structuration des émergences.

### 3.2.2 Fonctionnement des Vecteurs

Un Vecteur est un élément / un produit qui peut être déposé par les agents ou par l'observateur du système sur une ou plusieurs cases de l'environnement. Un Vecteur possède trois propriétés : un type, un coefficient de diffusion et un taux d'évaporation.

Le choix d'un modèle par Vecteur – modèle par diffusion, a été adoptée pour plusieurs raisons. La première raison concerne la dynamique du système. A la différence d'une approche par champs, une approche par diffusion permet d'introduire un facteur temps dans la propagation de l'information dans l'environnement. Cela est primordial, en particulier dans un contexte émergentiste, pour conserver au sein du système une « diminution créatrice de l'entropie ». La deuxième raison provient de la persistance de l'information dans l'environnement. Le comportement des agents est purement réactif, une condition – discrimination des stimuli / perceptions de l'environnement, produit une action. Ces agents n'ont pas de représentation du monde qui les entoure et ne possèdent qu'une perception limitée de celui-ci. Cette persistance fournit donc une sorte de « mémoire » aux agents, via l'environnement. Pour finir, la dernière raison qui a orienté ce choix provient du fait que cette approche permet de quantifier l'information. Une approche par champs par exemple demeure trop rigide en ne fournissant qu'une perception limitée de l'information.

Soit un Vecteur P :

$$P = \langle t, r, s \rangle \text{ avec}$$

$\tau$  : type de Vecteur

$\rho$  : coefficient de diffusion,  $\rho \in [0\mathbf{K}1]$

$\sigma$  : taux d'évaporation,  $s \in [0\mathbf{K}1]$

- Le type du Vecteur est une chaîne de caractère qui peut être lue par les intervenants du système pour pouvoir identifier la nature d'un Vecteur. Plusieurs types distincts de Vecteurs peuvent être présents au même instant sur une case donnée, sans qu'il y ait d'amalgame de la valeur de l'information.
- Le coefficient de diffusion représente la propagation de l'information dans l'environnement. C'est une valeur qui exprime le pourcentage d'information qui va être exporté vers l'ensemble des cases voisines. A partir de la quantité de Vecteur présent dans une case, stockée sous la forme d'un entier, l'environnement peut déterminer la masse d'information à transmettre aux cases voisines; en considérant une 8-connexité par défaut.

Soit  $V_{(i,j)}$  l'ensemble des cases connexes à une case C(i,j) dans un environnement 8-connexe.

$$V_{C_{(i,j)}} = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\}$$

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
C <sub>8</sub>	C <sub>(i,j)</sub>	C <sub>4</sub>
C <sub>7</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>5</sub>

Soit  $Q(C)$  la quantité de Vecteur de type X dans la case C. Soit  $C_{(i,j)}$  une case et  $V_{C_{(i,j)}}$  l'ensemble des cases  $C_1, \dots, C_8$  du voisinage de  $C_{(i,j)}$ . Soit  $\rho$  le coefficient de diffusion du Vecteur de type X. Soit  $v$  le nombre de cases connexes à  $C_{(i,j)}$ .

Après chaque cycle de temps,  $t \rightarrow t + 1$ ,

$$\forall C_{(i,j)}, \forall C_k \in V_{C_{(i,j)}},$$

$$Q(C_k)_t = Q(C_k)_{t-1} + \frac{r \times Q(C_{(i,j)})_{t-1}}{v}$$

et

$$Q(C_{(i,j)})_t = Q(C_{(i,j)})_{t-1} - r \times Q(C_{(i,j)})_{t-1}$$

A chaque tour, un Vecteur d'un type donné se diffuse vers les cases du voisinage. La case dans laquelle s'effectue la diffusion perd donc une quantité de Vecteur égale au coefficient de diffusion multiplié par la quantité de produit dans la case. Les cases avoisinantes gagnent alors cette quantité divisée par le nombre de cases connexes – ex : 1 huitième en 8-connexité dans un monde torique.

- Le taux d'évaporation  $\sigma$  représente la quantité d'information qui disparaît de l'environnement à chaque tour. C'est une valeur qui exprime le pourcentage de Vecteur qui va disparaître de chaque case.

Soit  $Q(C_{(i,j)})$ , la quantité de Vecteur de type X dans la case  $C_{(i,j)}$ . Soit  $\sigma$  le taux d'évaporation du Vecteur de type X. Alors après chaque cycle de temps,  $t \rightarrow t + 1$ ,

$$Q(C_{(i,j)})_t = Q(C_{(i,j)})_{t-1} - \sigma \times Q(C_{(i,j)})_{t-1}$$

Une case perd pour chaque Vecteur et à chaque tour, une quantité d'information égale à sa quantité initiale multipliée par le taux d'évaporation.

Nous pouvons maintenant exprimer l'évolution des Vecteur pour une case donnée à chaque tour, en généralisant à un environnement n-connexe :

Soit  $Q(C)_y$ , la quantité de Vecteur de type y dans la case C. Soit  $v_i$  le nombre de cases connexes à une case  $C_i$ . Soit  $C_0$  une case de l'environnement et  $V_{C_0}$  l'ensemble des cases  $C_1, \dots, C_{v_0}$  du voisinage de  $C_0$ . Soit  $\rho_y$  le coefficient de diffusion du Vecteur de type y et  $\sigma_y$  le taux d'évaporation du Vecteur de type y. Soit t le temps.

$$\forall y, \forall C_0, \forall C_i \in V_{C_0},$$

$$(Q(C_0)_y)_t = \left( \sum_{i=1}^{m_y} \frac{(Q(C_i)_y)_{t-1} \times r_y}{v_i} \right) - \left( (Q(C_0)_y)_{t-1} \times r_t \right) - \left( (Q(C_0)_y)_{t-1} \times \sigma_y \right)$$

La quantité de chaque type de Vecteur, pour chaque case de l'environnement varie à chaque tour de la façon suivante :

- elle augmente en fonction des diffusions des cases connexes
- elle diminue en fonction de la diffusion du Vecteur vers les cases connexes
- elle diminue en fonction de l'évaporation du Vecteur.

### 3.2.3 Les agents

Les agents mis en oeuvre dans ce modèle sont des agents réactifs, nommés briques (allusion au terme générique « brique de la vie »), qui vivent sur la grille de l'environnement. L'interaction entre agents se fait via l'environnement, en percevant ou en déposant des Vecteurs.

Le fonctionnement d'une brique peut se décomposer en 4 étapes:

- La perception: la brique perçoit certains types de Vecteurs présents sur sa case et dans son voisinage direct.
- La mutation: la brique peut changer d'état.
- L'émission: la brique dépose des Vecteurs sur la case où elle se trouve.
- Le déplacement: la brique change éventuellement de case.

La réalisation de ces 4 étapes représente un cycle de fonctionnement de l'agent – réalisé une fois par tour, et identique quelque soit l'agent.

Le fonctionnement d'une brique dépend également de son état  $i$  avec  $i$  entier et  $0 < i < n$ . L'état d'une brique représente la nature des interactions qu'elle a avec son environnement et avec les autres agents. Il va influencer les 4 étapes de son fonctionnement.

L'état d'une brique est primordial dans l'approche du phénomène émergent. On considère, en effet, que c'est via une brique d'état  $i$  interagissant avec des briques d'état identique, que peut se produire une émergence, qui se structurera ensuite par l'interaction entre une brique d'état  $i+1$  et des briques d'état  $i$ . C'est pourquoi les briques sont uniquement sensibles aux informations des briques d'états directement supérieur, égal ou inférieur. Ce phénomène sera expliqué plus en détail par la suite.

Il existe trois classes de Vecteurs qui permettent aux agents d'interagir :

- Présence: Il a pour rôle de fournir aux briques une connaissance, via la perception de l'environnement, sur la présence de briques d'état donné.
- Attractifs: Il a pour rôle d'attirer les briques d'état donné.
- Répulsifs: Il a pour rôle de repousser les briques d'état donné.

Pour chacune des classes de Vecteurs, il existe un type de Vecteur par états possibles  $i$  des agents. Nous pouvons alors décrire trois ensembles de Vecteurs pour des états d'agents  $i$  possible,  $0 < i < n$  :

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= \{ \text{Pr}_1, \text{Pr}_2, \mathbf{K}, \text{Pr}_i, \mathbf{K}, \text{Pr}_n \} & \text{Att} &= \{ \text{Att}_1, \text{Att}_2, \mathbf{K}, \text{Att}_i, \mathbf{K}, \text{Att}_n \} \\ \text{Rep} &= \{ \text{Rep}_1, \text{Rep}_2, \mathbf{K}, \text{Rep}_i, \mathbf{K}, \text{Rep}_n \} \end{aligned}$$

Un exemple de paramétrage de ces classes de Vecteurs sera fourni lors de l'expérimentation. On peut néanmoins noter dès maintenant l'importance de ce paramétrage dans le fonctionnement du système. Le fonctionnement d'un agent est entièrement dépendant de la nature des Vecteurs contenus dans ces trois ensembles. Une brique n'a néanmoins pas besoin de stocker ces ensembles de Vecteur et peut les calculer à tous moment (cf 3.2.4). Nous allons maintenant décrire formellement ce fonctionnement étape par étape.

#### ◆ LA PERCEPTION

A chaque tour, une brique peut percevoir certains types Vecteurs sur sa case et sur les cases du voisinage. Soit une brique  $a$  dans l'état  $i$ ,

$$a_i \xleftarrow{\text{perçoit}} \begin{pmatrix} \text{Pr}_{i-1} & \emptyset & \emptyset \\ \text{Pr}_i & \emptyset & \emptyset \\ \text{Pr}_{i+1} & \text{Att}_{i+1} & \text{Rep}_{i+1} \end{pmatrix} \begin{matrix} i-1 \\ i \\ i+1 \end{matrix}$$

**Rappel :**

Soit un Vecteur P :

$$P = \langle t, r, s \rangle \text{ avec}$$

- $\tau$  : type de Vecteur
- $\rho$  : coefficient de diffusion
- $\sigma$  : taux d'évaporation

Une brique peut donc percevoir les Vecteurs de présence des agents qui sont dans un état identique, directement supérieur ou directement inférieur à son propre état. Cette information sera exploitée dans l'étape de mutation.

Une brique perçoit également les répulsifs et attractifs émis par les briques dont l'état est directement supérieur au sien. Une brique dans un état  $i$  est donc attirée ou repoussée uniquement par des briques dans un état  $i + 1$ . Cela sera exploité dans la phase de déplacement et pour caractériser la structure émergente voulue (cf 3.2.4).

◆ **LA MUTATION**

A chaque tour, une brique dans un état  $i$  peut avoir l'occasion de muter. Cela veut dire qu'elle peut changer d'état, passer à l'état supérieur  $i+1$ , ou à l'état inférieur  $i-1$ . Cela dépend de la perception qu'elle a des Vecteurs de présence des briques d'états directement supérieurs ou directement inférieurs. Nous verrons les caractéristiques de la mutation ci-après (cf. 3.2.4).

◆ **L'EMISSION**

A chaque tour, chaque brique  $a$  dans un état  $i$  dépose dans sa case trois types de Vecteurs:

- une quantité  $\theta_p$  de Vecteur de type  $Pr_i$  pour marquer sa présence dans l'environnement.
- une quantité  $\theta_A$  de Vecteur de type  $Att_i$  pour attirer les briques d'état  $i-1$ .
- une quantité  $\theta_R$  de Vecteur de type  $Rep_i$  pour repousser les briques d'état  $i-1$ .

$$a_i \xrightarrow{\text{émet}} \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ Pr_i & Att_i & Rep_i \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{pmatrix} \begin{matrix} i-1 \\ i \\ i+1 \end{matrix}$$

Chaque brique, quelque soit son état émet en permanence ces Vecteurs. Cela signifie qu'il y a une émission permanente d'information dans le milieu et donc une dynamique sous-jacente.

◆ **LE DEPLACEMENT**

Une brique peut se déplacer tous les  $\kappa$  tours.  $\kappa$  étant fonction de l'état  $i$  dans lequel elle se trouve. Son déplacement dépend essentiellement de sa position dans l'environnement. Pour plus de facilité, on nommera par la suite attractif (Att) et répulsif (Rep) les seuls Vecteurs des classes Attractif et Répulsif qu'une brique de niveau  $i$  perçoit, c'est à dire les Vecteurs de type  $Att_{i+1}$  et  $Rep_{i+1}$ .

Une brique peut connaître les quantités d'information liées aux Vecteurs qu'elle perçoit lorsque cette quantité dépasse un certain seuil. Ce seuil est appelé seuil de sensibilité,  $\phi$ . Lorsque la quantité de Vecteur perçue est inférieure à ce seuil, la brique ne perçoit rien.

On peut distinguer quatre types de cases où peut se trouver une brique :

- vide : lorsque les quantités perçues sont inférieures au seuil de sensibilité  $\phi$
- intolérable : lorsque la quantité de répulsif est supérieur à la quantité d'attractif
- tolérable : lorsque la quantité d'attractif est supérieur à la quantité de répulsif
- frontière : lorsque la case est tolérable et est connexe à une case intolérable (frontière entre répulsion et attraction)

On peut écrire cela formellement :

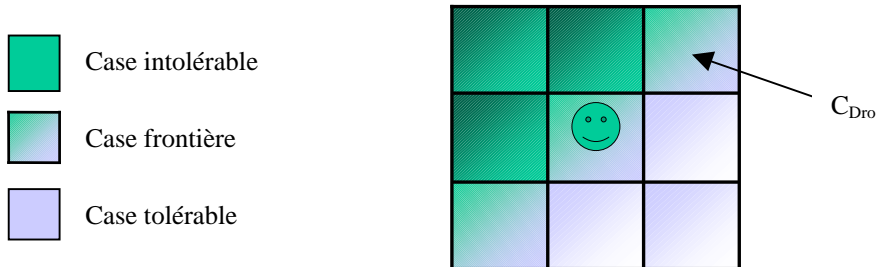
Soit  $Q(C)_x$ , la quantité de Vecteur de type X dans la case C. Soit  $C_0$  la case où se trouve la brique et  $V_{C_0}$  l'ensemble des cases  $C_1, \dots, C_8$  du voisinage de l'agent.

On peut distinguer les quatres types de cases où peut se trouver la brique:

- vide :  $\forall P Q(c_0)_P < j \Rightarrow C_{\text{vid}}$
- intolérable :  $Q(c_0)_{\text{Rep}} > Q(c_0)_{\text{Att}} \Rightarrow C_{\text{int}}$
- tolérable :  $Q(c_0)_{\text{Att}} > Q(c_0)_{\text{Rep}} \Rightarrow C_{\text{tol}}$
- frontière :  $(Q(c_0)_{\text{Att}} > Q(c_0)_{\text{Rep}})$  et  $\exists i \in \{1, 2, \mathbf{K}, 8\}$  tel que  $(Q(c_i)_{\text{Rep}} > Q(c_i)_{\text{Att}}) \Rightarrow C_{\text{fro}}$

On peut également distinguer dans les cases du voisinage trois types de cases où peut se déplacer là brique :

- Max attractif :  $\exists i \in \{1, 2, \mathbf{K}, 8\}$  tel que  $\forall j \in \{1, 2, \mathbf{K}, 8\} (Q(c_i)_{\text{Att}} \geq Q(c_j)_{\text{Att}}) \Rightarrow C_{\text{Max}}$
- Min répulsif :  $\exists i \in \{1, 2, \mathbf{K}, 8\}$  tel que  $\forall j \in \{1, 2, \mathbf{K}, 8\} (Q(c_i)_{\text{Rep}} \leq Q(c_j)_{\text{Rep}}) \Rightarrow C_{\text{Min}}$
- Droite frontière : case connexe aux positions frontières d'une brique, elle même de type frontière et qui est la première rencontrée lors d'un parcours dans un sens inverse des aiguilles d'une montre des cases du voisinage de l'agent  $\Rightarrow C_{\text{Dro}}$ .



Le déplacement d'un agent  $\alpha$  se réalise de la façon suivante :

- **Si**  $\alpha$  est sur une case  $C_{\text{vid}}$ 
  - o **Alors** bouger en random
- **Si**  $\alpha$  est sur une case  $C_{\text{fro}}$ 
  - o **Alors** aller sur la case  $C_{\text{dro}}$
- **Sinon si**  $\alpha$  est sur une case  $C_{\text{int}}$ 
  - o **Alors** aller sur la case  $C_{\text{Min}}$
- **Sinon si**  $\alpha$  est sur une case  $C_{\text{tol}}$ 
  - o **Alors** aller sur la case  $C_{\text{Max}}$
- **Si** destination déjà occupée
  - o **Alors** retirer destination du voisinage de  $C_0$  et recommencer

Une remarque s'impose quand à l'étape de déplacement. L'algorithme de déplacement de l'agent répond à un soucis de dynamique permanente du système. C'est pourquoi, quelque soit la position de l'agent, même si celle-ci est optimale, il effectuera un déplacement dès que possible. C'est également pour cette raison que la notion de case frontière a été introduite. Elle permet de conserver la dynamique du système même lorsque l'agent est dans une position optimale.

### 3.2.4 L'émergence multiple : un système récursif

#### ◆ *PRINCIPE*

La caractérisation structurelle du phénomène émergent dans ce modèle se fait via l'organisation spatiale des agents - attracteur dans un système auto-organisé. Cette organisation est basée par l'interaction entre des briques d'état  $i+1$  qui attirent et repoussent des briques d'états  $i$ . Lorsque on fixe l'état initial des briques à 0, la première structure formée est le produit de l'interaction entre une brique dans un état 1, qui aura préalablement muté, et des briques dans un état 0. Par conséquent si la brique dans l'état 1 se déplace, c'est l'ensemble de la structure qui se déplace également, les comportements d'attraction et de répulsion restant identiques. On peut donc assimiler la structure qui a émergé à l'état de la brique qui en est l'initiatrice et le contrôleur. Cette brique conserve néanmoins le même comportement que les briques dans un état inférieur avec comme seules nuances une perception et une émission différentes.

Une brique ayant ainsi évolué vers un état élevé aura la possibilité d'organiser la structure émergente via l'interaction avec des briques qui sont déjà elles-mêmes les initiatrices de structures émergentes. On a ainsi une organisation composée de structures ayant déjà émergées. En considérant un ensemble d'agents initialement dans un état 0, on peut assimiler le niveau d'émergence du système à l'état de la brique qui en contrôle la structure de plus au niveau ayant émergé.

On peut ainsi représenter un agent comme une structure qui évolue de façon récursive. La fonction de récurrence  $H$  telle que  $\mathbf{a}_{i+1} = H(\mathbf{a}_i)$  est la mutation de la brique.

#### ◆ *MUTATION*

Le fonctionnement de la mutation est le suivant:

- **Si** la moyenne des quantités de Vecteur de type  $Pr_i$  dans les cases perçues (voisinage et position) est supérieure à un seuil  $\delta$ .
- **Et si** la moyenne des quantités de Vecteur de type  $Pr_{i+1}$  dans les cases perçues est inférieure à un seuil  $\epsilon$ .

Alors la brique a une probabilité  $\gamma$  de passer de l'état  $i$  à l'état  $i+1$ .

Inversement:

- **Si** la moyenne des quantités de Vecteur dans les cases perçues de type  $Pr_{i-1}$  est inférieur au seuil  $\delta$ .

Alors la brique a une probabilité  $\eta$  de passer de l'état  $i$  à l'état  $i-1$ .

Plus clairement, lorsqu'une brique est entourée d'une forte population de briques dans le même état qu'elle, et que peu de briques de l'état supérieur sont présentes, elle a tendance à essayer de changer d'état pour l'état supérieur. Inversement, si la population de briques d'état inférieur au sien est trop faible, une brique a tendance à changer d'état pour celui juste en dessous.

Cela traduit deux choses. Tout d'abord, nous avons dit brièvement qu'une émergence se structure via l'interaction de briques dans un état  $i+1$  avec des briques dans un état  $i$ . Une brique dans un état  $i$  fortement entourée de brique dans le même état, va donc muter vers l'état  $i+1$ , pour favoriser une structuration émergente future.

Inversement, si une brique dans un état  $i$  ne « ressent » pas la présence de briques d'états  $i-1$ , cela signifie que l'interaction avec ce « type » de brique est faible et que donc, l'organisation ne sera pas possible directement. Il vaut mieux pour elle muter vers un état inférieur. Cette mutation ébauche déjà le caractère autopoïétique du système qui sera présenté ci-après.

Chaque mutation fait évoluer la brique vers un état  $i+1$  ou un état  $i-1$ . Les uniques modifications entre ces états affectent la perception et l'émission de Vecteur. Nous allons voir maintenant la nature de ces modifications.

### ◆ *LES VECTEURS*

Les mutations qui affectent les briques ont trait aux Vecteurs. Une brique qui change de niveau perçoit et émet de nouveaux Vecteurs. Un agent n'a pas une connaissance exhaustive l'ensemble des Vecteurs, néanmoins, les paramètres d'un Vecteur évoluent de façon récursive. Nous avons vu précédemment qu'il existait pour chaque classe de Vecteur, un type Vecteur par état possible d'agent. Nous pouvons donc fournir, comme dans le cas de l'état d'un agent, un niveau initial pour chaque type de Vecteur.

Soit  $P_0 = \langle t_0, r_0, s_0 \rangle$  un Vecteur de niveau initial.

Soit  $P_i = \langle t_i, r_i, s_i \rangle$  un Vecteur de niveau  $i$ .

Alors,

$$P_{i+1} = f(P_i) = f(\langle t_i, r_i, s_i \rangle)$$

Nous allons maintenant décrire la fonction récursive  $f$  pour chacun des paramètres  $\tau$ ,  $\rho$ , et  $\sigma$ .

$\tau$  est une chaîne de caractère composée de la classe du Vecteur et de son niveau. Nous avons donc :

$$t_{i+1} = \text{"Classe"} + (i+1)$$

Dans le cadre de ce modèle, la diffusion est considérée constante quelque soit le type et la classe d'un Vecteur. L'évaporation détermine alors la distance jusqu'à laquelle il va se diffuser. Nous avons donc :

$$r_{i+1} = r_i$$

et

$$s_{i+1} = \frac{s_i}{w} \text{ ou } s_{i+1} = \frac{s_0}{w^{i+1}}$$

Plus une brique est dans un état élevé, plus la structure à laquelle elle appartient est étendue – car composée des structures formées par les briques d'état inférieur. Pour que la briques initiatrice perçoive l'information des briques qui l'entourent, le Vecteur concerné doit donc se diffuser sur de plus longues distances. C'est pourquoi le taux d'évaporation diminue entre chaque « niveau » de type de Vecteur. Cette diminution est ici exponentielle – division par un facteur  $\omega$  pour chaque augmentation d'état.

On peut résumer cela par :

$$P_{i+1} = \left\langle \text{"Classe"} + (i+1), r_i, \frac{s_i}{w} \right\rangle$$

◆ *L'AGENT*

*Récurtivité*

On peut maintenant caractériser de façon récursive le comportement de l'agent en fonction de l'émission et de la perception.

Soit  $\alpha_0$ , un agent dans l'état initial 0,

$$a_0 \xleftrightarrow{\text{se comporte}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} & \text{Perçoit} & & & \text{Emet} & \\ \text{Pr}_0 & \emptyset & \emptyset & \text{Pr}_0 & \text{Att}_0 & \text{Rep}_0 \\ \text{Pr}_1 & \text{Att}_1 & \text{Rep}_1 & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) \begin{array}{l} 0 \\ 1 \end{array}$$

Soit  $\alpha_i$ , un agent dans un état  $i$ ,

$$a_i \xleftrightarrow{\text{se comporte}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} & \text{Perçoit} & & & \text{Emet} & \\ \text{Pr}_{i-1} & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \text{Pr}_i & \emptyset & \emptyset & \text{Pr}_i & \text{Att}_i & \text{Rep}_i \\ \text{Pr}_{i+1} & \text{Att}_{i+1} & \text{Rep}_{i+1} & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) \begin{array}{l} i-1 \\ i \\ i+1 \end{array}$$

Vérifions que c'est une écriture récursive :

Soit  $\alpha_{i+1}$ , un agent dans l'état  $i+1$ ,

$$a_{i+1} \xleftrightarrow{\text{se comporte}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} & \text{Perçoit} & & & \text{Emet} & \\ \text{Pr}_i & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \text{Pr}_{i+1} & \emptyset & \emptyset & \text{Pr}_{i+1} & \text{Att}_{i+1} & \text{Rep}_{i+1} \\ \text{Pr}_{i+2} & \text{Att}_{i+2} & \text{Rep}_{i+2} & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) \begin{array}{l} i \\ i+1 \\ i+2 \end{array}$$

**M**

$$a_{i+1} \xleftrightarrow{\text{se comporte}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} & \text{Perçoit} & & & \text{Emet} & \\ f(\text{Pr}_{i-1}) & f(\emptyset) & f(\emptyset) & f(\emptyset) & f(\emptyset) & f(\emptyset) \\ f(\text{Pr}_i) & f(\emptyset) & f(\emptyset) & f(\text{Pr}_i) & f(\text{Att}_i) & f(\text{Rep}_i) \\ f(\text{Pr}_{i+1}) & f(\text{Att}_{i+1}) & f(\text{Rep}_{i+1}) & f(\emptyset) & f(\emptyset) & f(\emptyset) \end{array} \right) \begin{array}{l} (i+1)-1 \\ (i+1) \\ (i+1)+1 \end{array}$$

**M**

$$a_{i+1} = H \left( \begin{array}{c} \text{Perçoit} \\ \text{Emet} \\ \left( \begin{array}{ccc|ccc} \text{Pr}_{i-1} & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \text{Pr}_i & \emptyset & \emptyset & \text{Pr}_i & \text{Att}_i & \text{Rep}_i \\ \text{Pr}_{i+1} & \text{Att}_{i+1} & \text{Rep}_{i+1} & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) \begin{array}{l} i-1 \\ i \\ i+1 \end{array} \end{array} \right)$$

**N**

$$a_{i+1} = H(a_i)$$

Nous avons bien un système défini de façon récursive. La fonction de mutation H étant une application de la fonction récursive  $f$  sur l'ensemble des Vecteurs perçus et émis, le décalage de niveau de  $i$  vers  $i+1$ .

### Forme développée

$$a_{i+1} \xleftrightarrow{\text{se comporte}} \left( \begin{array}{c} \text{Perçoit} \\ \text{Emet} \\ \left( \begin{array}{ccc|ccc} \langle \text{Pr}_i, r_0, \frac{S_i}{\omega} \rangle & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \langle \text{Pr}_{i+1}, r_0, \frac{S_i}{\omega} \rangle & \emptyset & \emptyset & \langle \text{Pr}_{i+1}, r_0, \frac{S_i}{\omega} \rangle & \langle \text{Att}_{i+1}, r'_0, \frac{S'_i}{\omega} \rangle & \langle \text{Rep}_{i+1}, r''_0, \frac{S''_i}{\omega} \rangle \\ \langle \text{Pr}_{i+2}, r_0, \frac{S_i}{\omega} \rangle & \langle \text{Att}_{i+2}, r'_0, \frac{S'_i}{\omega} \rangle & \langle \text{Rep}_{i+2}, r''_0, \frac{S''_i}{\omega} \rangle & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) \begin{array}{l} i \\ i+1 \\ i+2 \end{array} \end{array} \right)$$

soit encore,

$$a_{i+1} \xleftrightarrow{\text{se comporte}} \left( \begin{array}{c} \text{Perçoit} \\ \text{Emet} \\ \left( \begin{array}{ccc|ccc} \langle \text{Pr}_i, r_0, \frac{S_0}{\omega} \rangle & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \langle \text{Pr}_{i+1}, r_0, \frac{S_0}{\omega} \rangle & \emptyset & \emptyset & \langle \text{Pr}_{i+1}, r_0, \frac{S_0}{\omega} \rangle & \langle \text{Att}_{i+1}, r'_0, \frac{S'_0}{\omega} \rangle & \langle \text{Rep}_{i+1}, r''_0, \frac{S''_0}{\omega} \rangle \\ \langle \text{Pr}_{i+2}, r_0, \frac{S_0}{\omega} \rangle & \langle \text{Att}_{i+2}, r'_0, \frac{S'_0}{\omega} \rangle & \langle \text{Rep}_{i+2}, r''_0, \frac{S''_0}{\omega} \rangle & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) \begin{array}{l} i \\ i+1 \\ i+2 \end{array} \end{array} \right)$$

### 3.2.5 Transformation inverse

Nous avons vu dans le paragraphe consacré à la mutation, qu'une brique pouvait passer de l'état  $i$  à l'état  $i+1$  mais également de l'état  $i$  à l'état  $i-1$ . La fonction de mutation  $H$  définit la mutation de l'état  $i$  vers l'état  $i+1$ . De la même façon, nous pouvons facilement définir une fonction  $H^{-1}$ , telle que

$$a_{i-1} = H^{-1}(a_i)$$

La fonction de mutation  $H^{-1}$  est une application de la fonction récursive  $f^{-1}$  sur l'ensemble des Vecteurs perçus et émis puis le décalage de niveau de  $i$  vers  $i-1$ . La définition de la fonction  $f^{-1}$  est triviale et ne sera pas présentée plus en détail.

### 3.2.6 Discussion

Nous verrons dans la suite du rapport la façon dont le modèle proposé a été exploité et les modifications qui en ont été faites dans un souci principalement lié à l'implémentation. Néanmoins nous pouvons dès maintenant exprimer quelques remarques :

- Tout d'abord, notons que le modèle de l'environnement (discret-torique) est indépendant du fonctionnement du système. Le choix d'un environnement discret permet de mettre en œuvre simplement la diffusion d'informations. Cependant le modèle peut être facilement porté dans un modèle continu. Les lois de diffusion dans un système continu sont simples, il est donc possible de généraliser le système.
- Dans une approche purement quantitative de la perception de l'environnement, il est également possible de généraliser le modèle en diminuant le nombre de Vecteurs utilisés. Une approche de type attraction / répulsion peut être transformée en une approche utilisant uniquement une seule information, l'attraction. Le facteur répulsion peut être alors remplacé par un seuil perceptif. L'attractif conserve son rôle jusqu'à ce que la quantité d'information dépasse un seuil donné et qu'alors le comportement de l'agent soit différent.
- Pour finir, le comportement des agents est très simple. On pourrait donc imaginer un modèle d'information différent, de type signaux par exemple [Sim 01], en conservant cependant le modèle comportemental des agents.

Le modèle présenté est avant tout une tentative pour définir un système multi-agent à émergence multiple le plus général possible. Nous verrons par la suite que de nombreuses interprétations et modifications peuvent y être apportées: au niveau de la structure émergente désirée (cellulaire, serpentiforme...), au niveau de l'environnement (4-connexité, monde clos), etc...

# Chapitre 4

## Expérimentation

### 4.1 Utilisation du modèle

Il est intéressant de réaliser des simulations pour vérifier la pertinence du système proposé. Nous allons voir de quelles façons le modèle a été utilisé et les modifications qui y ont été apportées pour l'implémentation.

#### 4.1.1 le choix de l'attracteur

La première étape pour valider le modèle est de caractériser la structure émergente qui doit être observée, la structure stable au sens des systèmes auto-organisés (cf 2.1.2). Le modèle proposé fournit déjà l'ébauche pour définir cet attracteur. En effet, nous avons vu que la formation de structures dans le système s'opérait par l'interaction entre une brique d'état  $i+1$  avec des briques d'états  $i$ . Les briques d'état  $i$  sont attirés par les attractifs de la brique d'état  $i+1$  jusqu'à ce que la concentration de celui-ci soit inférieure à la concentration de répulsif émis par la brique d'état  $i+1$ . Or, la diffusion de ces informations (attractifs-répulsifs) dans un environnement homogène s'accomplit dans toutes les directions. Cela produit donc une répartition des gradients d'informations circulaire, donc une première ébauche d'une structure de type cellule.

Nous avons donc conservé cette formation de type cellule dans nos simulations. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons. Tout d'abord dans un cadre de vie artificielle, une forme circulaire de type cellule est universelle. Une étude du comportement d'une telle forme peut alors s'avérer intéressante. Enfin la forme cellulaire a l'avantage de délimiter distinctement deux zones : l'intérieur de la cellule et l'extérieur de la cellule. Cela permet une étude claire des interactions au sein de la structure émergente, et dans le cadre d'une émergence multiple, une vision nette des interactions externes entre ces structures.

Nous avons vu dans le modèle (cf 3.2.3) qu'un agent dans une position frontière se déplaçait en longeant cette frontière. Pour entretenir la structure cellulaire nous avons donc paramétré les Vecteurs pour que la frontière attractif / répulsif soit de forme cellulaire, piégeant ainsi les briques d'états  $i$  dans une zone de forme membranaire. Cela se réalise de la façon suivante :

Les Vecteurs attractifs et répulsifs sont émis à quantité constante par la brique d'état  $i+1$  à des quantités  $\theta_A$  et  $\theta_R$  (cf 3.2.3). Nous avons fixé expérimentalement :

$$\theta_{Rep} = 2 \times \theta_{Att}$$

Une brique émet donc en permanence deux fois plus de répulsif que d'attractif. En contrepartie, le répulsif a un taux d'évaporation plus élevé :

Soit  $\sigma_P$  le taux d'évaporation d'un Vecteur de la classe P, alors

$$\sigma_{Rep} = \sigma_{Att} \times \mu$$

La facteur  $\mu$  a été fixé expérimentalement :  $1.6 < \mu < 1.9$

Le coefficient de diffusion est quant à lui supposé égal quelque soit le Vecteur appartenant à la classe d' attractif ou de répulsif. Avec un paramétrage de ce type nous obtenons donc une diffusion de l'information créant une frontière circulaire entre attractif et répulsif autour de la brique d'état  $i+1$ . Ceci est illustré sur les figures suivantes.

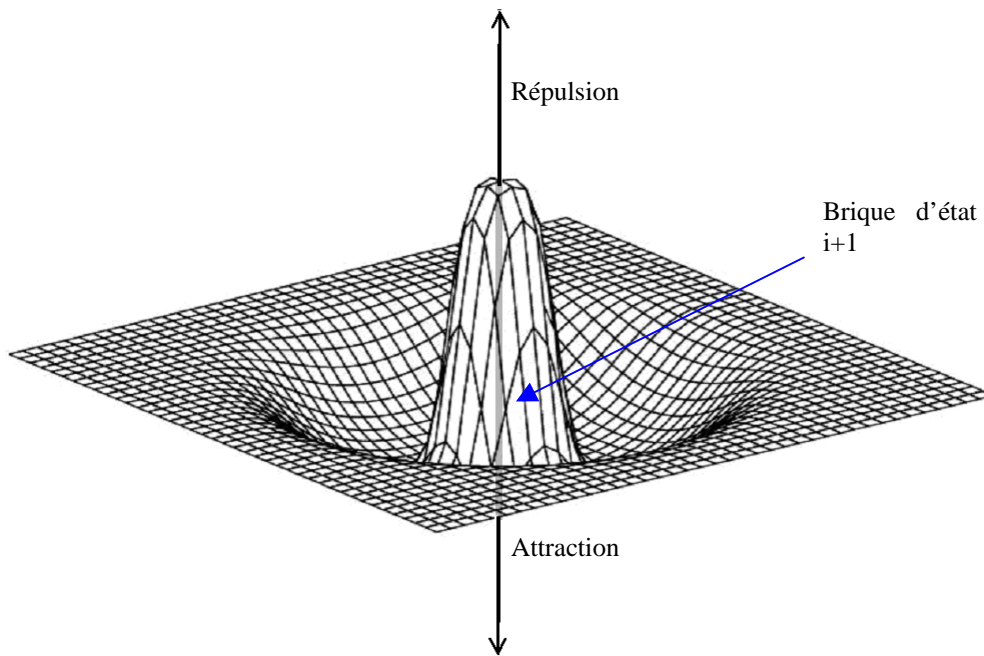
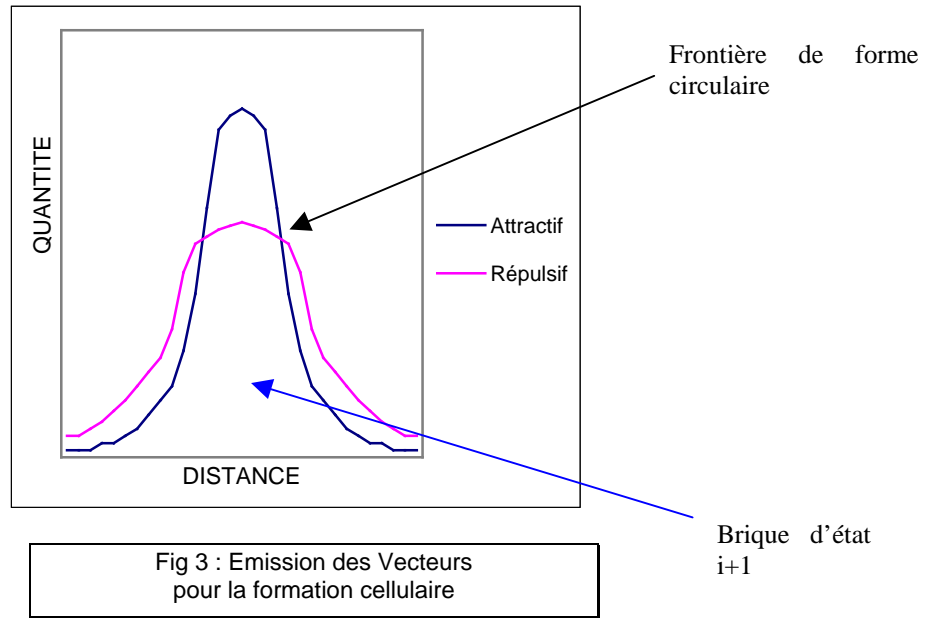


Fig 4 : Répartition des gradients attractifs / répulsifs

## 4.1.2 paramétrage et adaptation du modèle

Le paramétrage est primordial pour un fonctionnement correct de la simulation. Les informations présentées ici ont été déterminées expérimentalement. Nous présentons également les modifications qui ont été apportées au modèle dans le cadre d'une implémentation.

### ◆ *ENVIRONNEMENT ET INFORMATIONS*

L'environnement et les Vecteurs ont le même comportement que celui présenté dans le modèle. Certains essais ont été néanmoins réalisés en monde clos (carré ou rectangulaire) n'apportant que très peu d'intérêts aux simulations.

### ◆ *LES AGENTS*

Les agents sont placés en début de simulation de façon aléatoire dans l'environnement. Chaque agent est initialisé à l'état 0.

#### *Perception*

A chaque tour, chaque brique perçoit dans les cases connexes et sur sa case les quantités d'information pour l'ensemble des Vecteurs qu'elle connaît (dépend de son état). Elle peut alors effectuer des opérations telle qu'une moyenne ou une somme sur ces données.

#### *Mutation*

Afin de faciliter l'observation rapide des phénomènes lors des simulations, quelques petites modifications ont été apportées au niveau de la mutation des agents dans le modèle. Pour accélérer la mutation, fortement dépendante de la perception qu'une brique a des autres agents dans le même état qu'elle, nous avons fait dépendre les seuils de mutation  $\delta$  et  $\epsilon$ , du niveau de l'agent (les données sont fournies pour chaque simulation en Annexe). Les seuils  $\delta$  et  $\epsilon$  représentent la quantité d'information que doit percevoir une brique sur les agents de l'environnement dans le même état qu'elle pour pouvoir muter. Or, une brique d'état  $i$  élevé appartient à une structure de taille importante et met donc plus de temps à percevoir les informations provenant des autres briques dans le même état qu'elle (Vecteur  $Pr_i$ ). La brique continuant elle-même à émettre des Vecteurs  $Pr_i$ , de fortes concentrations d'informations s'accumulent autour d'elle ; il est donc nécessaire d'augmenter les seuils en fonction de l'état de la brique.

Une autre modification a été apportée pour stabiliser le système. La mutation vers le niveau supérieur ne dépend plus uniquement des Vecteurs de présence mais également des Vecteurs attractifs et répulsifs, ce qui fournit une information plus riche sur les populations de briques de niveau supérieur. Une approche similaire pour la mutation inverse n'est pas envisageable car une brique ne perçoit pas les attractifs et répulsifs des niveaux inférieurs.

De même, dans un souci de stabilisation rapide du système pour l'observation, nous avons rajouté un paramètre d'inhibition de la mutation. Une brique qui vient de muter, ne peut pas muter de nouveau dans les  $\chi$  tours à venir,  $\chi$  étant fonction de l'état de la brique  $i$ . Expérimentalement, nous avons supposé :

$$c = 10 \times i$$

Cela permet d'empêcher que des briques venant de muter se retrouvent immédiatement dans une situation propice à une mutation inverse.

Au niveau du caractère récursif de l'agent, une approche sensiblement différente du modèle a été adoptée, imposée par l'environnement de développement TurtleKit (cf 4.4). Lors d'une mutation, les agents ne recréent pas les Vecteurs des niveaux inférieurs et supérieurs. Ceux-ci sont codés en dur dans l'environnement et donc les agents ont une connaissance exhaustive de l'ensemble des Vecteurs. Ils deviennent donc artificiellement sensibles à un sous ensemble de l'ensemble total des Vecteurs. Cette méthode reste néanmoins conforme au modèle car l'ensemble des Vecteurs est généré sur le modèle récursif de la fonction  $f$  et chaque agent n'est sensible à un instant donné qu'aux Vecteurs qui le concerne.

### *Emission*

Pour faciliter le fonctionnement général du système, la quantité de Vecteur émis a été harmonisée quelque soit l'agent ou le type de Vecteur. Nous avons vu qu'une brique émettait deux fois plus d'attractif que de répulsif. Une brique émet donc à chaque tour, une quantité  $\theta$  de Vecteur de présence, une quantité  $\theta$  de Vecteur attractif et pour finir une quantité  $2\theta$  de Vecteur répulsif.

Néanmoins, une modification a été apportée à ce fonctionnement pour certaines simulations. Dans le cadre d'une étude plus directe des interactions entre une brique de niveau  $i+1$  et les briques de niveau  $i$  qui l'entourent, nous avons utilisé un modèle dynamique pour l'émission du répulsif. Le principe est le suivant : la brique d'état  $i+1$  perçoit la présence des briques d'état  $i$  ; la brique compare cette quantité de Vecteur  $Pr_i$  avec la quantité du même Vecteur au tour précédent ; si la différence dépasse un certain seuil  $\beta$ , alors la brique augmente – ou diminue - d'un certain pourcentage la quantité de répulsif émis.

Nous utilisons un principe perception / réaction par seuil. Une approche qui fait dépendre directement la quantité de répulsif émis de la quantité de Vecteur de présence perçu, a été délaissée. Elle produit en effet des phénomènes d'oscillation inhérent à l'inadéquation du principe avec un modèle discret. C'est pourquoi une approche par seuil et par pourcentage d'augmentation / diminution d'émission a été préférée.

### *Déplacement*

Les seules modifications apportées au système ont été réalisées dans le but d'améliorer la qualité des simulations. Tout d'abord, au niveau du coefficient  $\kappa$  qui a trait au nombre de tours entre deux déplacements d'un agent (cf 3.2.3). Ce coefficient a été introduit pour permettre une cohésion des structures formées, comme dans le cas de la mutation. Un brique ne peut se déplacer que tous le  $\kappa$  tours.  $\kappa$  dépend de l'état  $i$  de la brique et a été fixé expérimentalement comme suit :

$$k_i = \gamma^i \times k_0$$

On peut remarquer que ce paramètre peut être aisément inclus dans le modèle récursif de l'agent. Ce paramètre oblige donc les briques d'état élevé, initiatrices et contrôleuses de structures complexes à bouger moins souvent. Cela permet un maintien de l'organisation. Ce paramètre reste néanmoins facultatif dans le cadre d'une simulation pour laquelle le facteur de cohésion – le Vecteur - serait diffusé plus rapidement parmi les agents. La croissance de ce paramètre est exponentiel, ce qui permet de rester proche du comportement des structures émergentes mais handicape l'observation des simulations.

Une dernière modification, elle aussi facultative a été effectuée au modèle de déplacement. Les briques qui viennent de muter, ne peuvent se déplacer dans les premiers tours après leur mutation. Cela permet une formation plus rapide des structures émergentes, ce qui n'a pas d'intérêt hors d'un contexte simulation.

## 4.2 Simulation

Les simulations ont été réalisées sous l'environnement de développement MADKit. Elles utilisent l'outil TurtleKit qui sera présenté plus loin.

### 4.2.1 La visualisation

L'observation des simulations se fait grâce à des fenêtres appelées Viewers. Ils permettent de visualiser l'environnement ainsi que les agents qui s'y trouvent. Un Viewer permet également de percevoir différents Vecteurs par des couleurs différentes. C'est la représentation que nous utilisons, une couleur marquée représentant une forte concentration, une couleur atténuée une concentration faible.

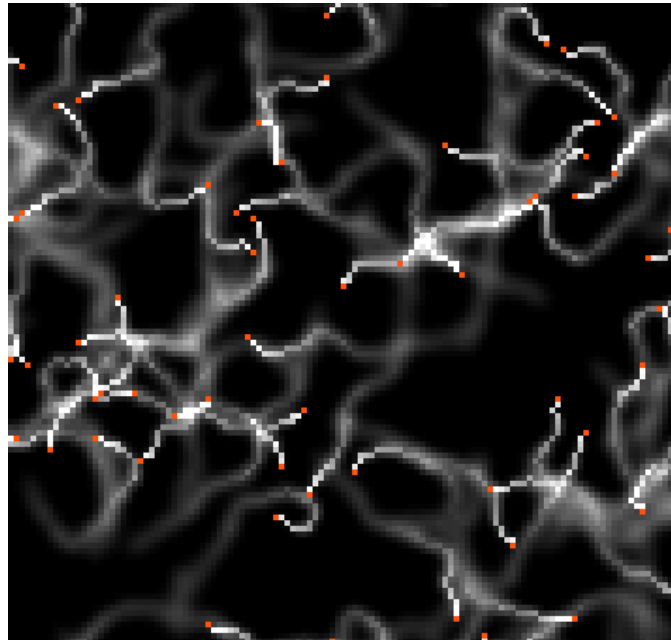


Fig 5 : Visualisation de la simulation

Nous voyons ici un ensemble de briques d'état 0 – en rouge - qui émettent le Vecteur  $Pr_0$  – en blanc. Les briques se déplaçant plus rapidement que ne se produit la diffusion des Vecteurs, on constate l'apparition de traînées d'informations.

### 4.2.2 Caractérisation de l'attracteur

Nous présentons en figure 6 une organisation émergente cellulaire. Une brique d'état 1 – en orange, attire autour d'elle des briques d'états 0. Ces briques sont soit des briques membranaires – en blanc - sur une frontière entre attractif et répulsif, soit des briques qui ne sont pas encore sur la frontière – en rouge. Ce viewer permet également de visualiser les Vecteurs attractifs et répulsifs de niveau 1. Lorsqu'il y a plus de répulsif que d'attractif, on visualise le répulsif – en bleu, et lorsqu'il y a plus d'attractif que de répulsif, on visualise l'attractif – en vert.

On peut donc aisément distinguer une structure cellulaire, composée d'un noyau – la brique d'état 1, et d'une membrane – les briques d'état 0.

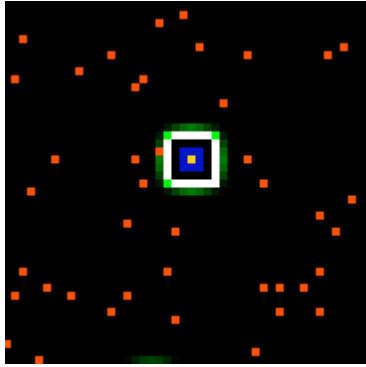


Fig 6 : Visualisation d'une structure de niveau 1

### 4.2.3 L'émergence multiple

La simulation permet également d'obtenir des structures émergentes de niveau supérieurs au niveau 1, c'est à dire une cellule dont la membrane est composée de cellules... Nous visualisons sur la figure 7 une structure de niveau 2. On voit au centre de la structure, la brique initiatrice dans l'état 2 – en bleu, entourée des structures de niveau 1, composées de briques d'état 1 membranes – en orange, de briques d'états 1 situés hors de la frontière attractif-répulsif– en vert, et de briques d'états 0 membranes – en blanc et non membranes – en rouge. On voit également, comme précédemment, l'attractif de niveau 2 – en mauve, et le répulsif de niveau 2 – en bleu clair.

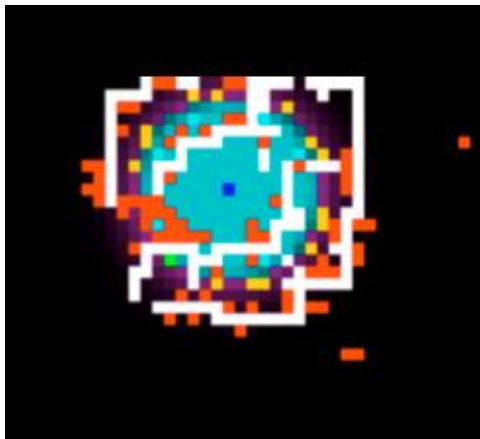


Fig 7 : Visualisation d'une structure de niveau 2 colorée

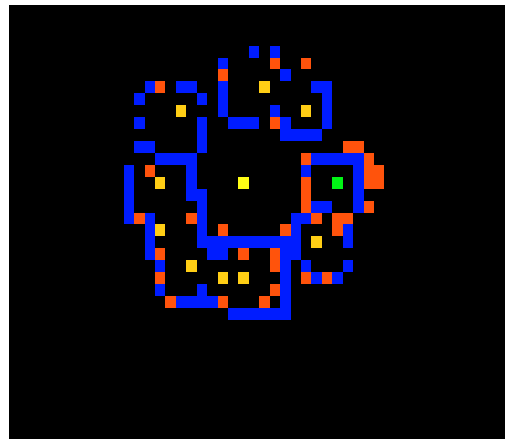


Fig 8 : Visualisation d'une structure de niveau 2

Sur la figure 8, une émergence plus nette, sans visualisation de l'information est présentée.

## 4.3 Analyse

Les expérimentations nous permettent d'extraire certaines propriétés du modèle. Nous allons maintenant les présenter.

### 4.3.1 L'émergence multiple

L'émergence de structures dans la simulation est un phénomène spontané et imprédictible. On peut néanmoins quantifier quelques une de ses propriétés. Deux aspects de cette émergence sont en effet aisément mesurables : les temps d'apparition des structures et les populations d'agents concernée.

Tout d'abord, au niveau du temps d'apparition des structures émergentes (relatif à la simulation), nous avons réalisé une centaine de simulations, avec des environnements et des populations différents (cf Annexe). Nous avons obtenu pour l'ensemble des simulations des rapports sensiblement similaires entre les temps d'apparition des structures et le niveau de la structure. Nous les présentons ci-dessous :

Simulation	Taille de l'env	Nb Briques	Nombre de simulations	Tour d'apparition niveau 1	Tour d'apparition niveau 2
Simu 1	100x100	500	35	19	130
Simu 2	50x50	250	48	12	128
Simu 3	300x300	2000	13	23	190

Tableau 1 : données sur l'émergence dans diverses simulations

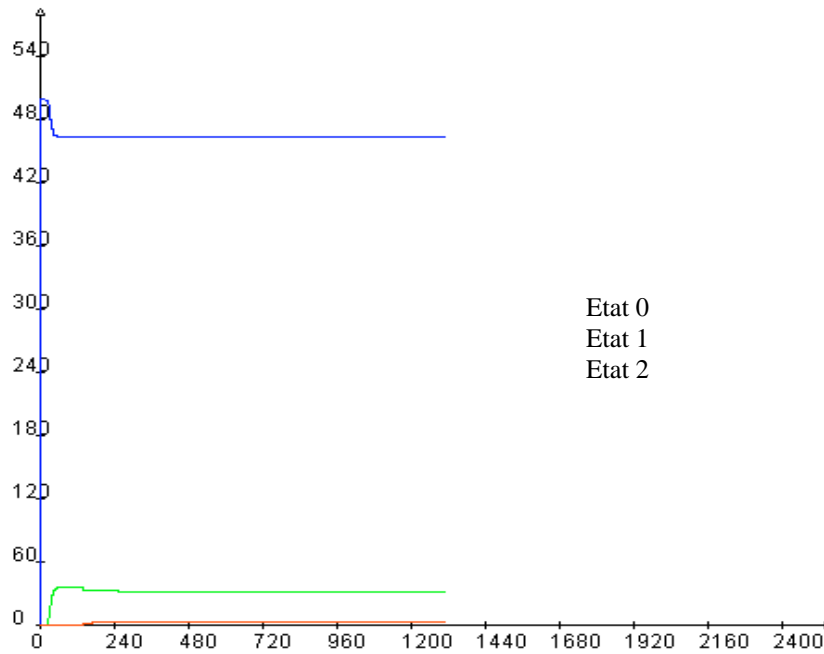
Quelques expérimentations menées jusqu'à l'apparition de structures de niveau 3 ont fourni des résultats analogues avec des temps d'apparitions pour les structures de niveau 3 proches de 1500.

Nous retrouvons ici le rapport exponentiel qui existe dans le modèle (cf 3.2.4) entre le niveau de la structure formé et le temps d'apparition de celle-ci. Cela s'explique de deux façons très liées :

- Tout d'abord, par la nature de la récursivité sur le coefficient de déplacement  $\kappa$  de l'agent (cf 3.2.3). Celui-ci augmente en effet de façon exponentielle pour conserver la cohésion des structures formées.
- Ensuite par le modèle de diffusion de l'information. La quantité d'information diffusée décroît en effet de façon beaucoup plus rapide lorsque la surface augmente.

Le deuxième aspect aisément observable concerne les populations d'agents impliqués dans le phénomène émergent. On peut distinguer deux types d'observations de cette nature. Une observation globale concernant les états des agents dans l'environnement et une observation au sein de chaque structure formée. Nous verrons plus loin ce qui concerne le deuxième cas.

Les quantités d'agents pour chaque état possible sont primordiales pour la stabilité de l'organisation. Nous présentons ci-dessous une courbe présentant les quantités d'agents dans l'état 0, 1 et 2 en fonction du temps, pour une simulation type simu1 (cf Annexe).



Courbe 1 : Populations d'agents en fonction du temps

Le rapport entre chaque quantité d'agent d'un état donné dépend essentiellement de la nature de la structure formée au cours de l'émergence. En effet, celui-ci dépend de la quantité d'agents dans l'état  $i$  en interaction avec l'agent dans l'état  $i+1$ . Cela ne présente donc qu'un faible intérêt dans un cadre général. Nous pouvons néanmoins en tirer une conclusion primordiale. Le système étant récursif, le rapport de population entre les briques d'état  $i$  et les briques d'état  $i+1$  est identique quelque soit le niveau de la structure. Nous pouvons donc facilement calculer le niveau de la structure de taille maximale pouvant émerger à partir d'un nombre donné de brique d'état 0.

Dans le cas d'une approche par structures cellulaires, nous avons calculé pour une vingtaine de simulations des types présentés en annexe le rapport  $\Delta_\alpha$  suivant :

$$\Delta_\alpha = \frac{\text{nombre } a_i}{\text{nombre } a_{i+1}} = 13 \pm 2$$

Cela signifie qu'une structure émergente est composée en moyenne d'un agent d'état  $i+1$  pour 13 agents d'états  $i$ . Il est clair qu'une étude calculatoire des phénomènes de diffusion et du modèle permettrait de trouver ce rapport directement à partir du modèle et de la structure émergente.

On peut donc, par ce rapport, déterminer le niveau maximum d'émergence qui apparaîtra dans un système en connaissant le nombre initial d'agents.

Soit  $N\alpha_0$  le nombre d'agents initialement dans l'environnement. Soit  $n$  le niveau potentiel maximal d'émergence. Alors,

$$N\alpha_0 = \Delta^n$$

$$\log(N\alpha_0) = \log(\Delta^n)$$

$$\log(N\alpha_0) = n \times \log(\Delta)$$

d'où,

$$n = \frac{\log(N\alpha_0)}{\log(\Delta)}$$

Néanmoins, les facteurs limitatifs de l'émergence dans la simulation sont encore nombreux. Pour qu'elle se produise, de nombreux paramètres entrent en jeu : les probabilités de mutations des agents, la diffusion dans le milieu de l'information, les seuils de perceptions pour lesquels la mutation est possible... Le rapport entre populations de briques, s'il est restrictif quant à la quantité de paramètres pris en compte, reste néanmoins une méthode expérimentale sûre pour déterminer les structures pouvant apparaître.

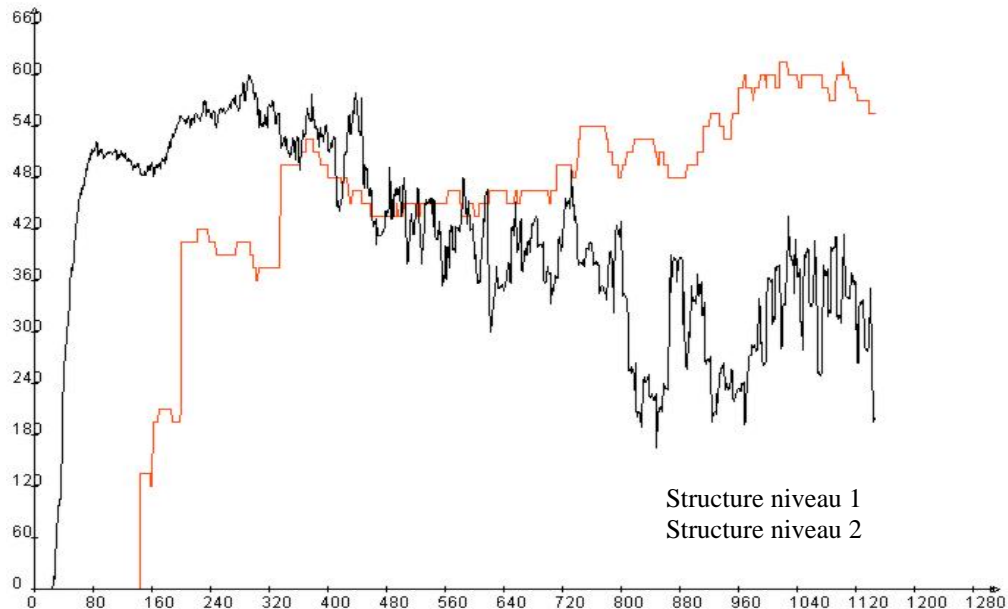
Nous avons vu qu'il existait de très nombreux facteurs limitatifs à l'émergence dans les simulations. A ceux-là, s'ajoutent les facteurs liés à la puissance de calcul des machines utilisées. Les temps d'apparition pour des structures sont exponentiels en la complexité de la structure, la taille de l'environnement est restrictive si la taille de la structure émergente est plus grande que l'environnement lui-même et enfin, la quantité d'agents dans l'environnement détermine le niveau d'émergence potentiel. Tous ces paramètres représentent un handicap certains au niveau matériel (mémoire, temps d'exécution, puissance de calcul) pour les simulations. C'est pourquoi, comme nous le verrons par la suite, les simulations ont permis de valider le modèle jusqu'à une émergence de niveau 3.

A titre indicatif, nous dirons que la machine utilisée supportait des simulations comportant jusqu'à 5000 agents, ce qui limite au niveau du nombre d'agents l'émergence à un niveau 3, et que pour atteindre l'émergence maximale du système il fallait au moins 1500 tours à raison d'environ six secondes de calcul par tour.

### 4.3.2 Mesure de complexité du système

Le système, via les émergences successives, devient de plus en plus complexe. L'apparition de structures de plus en plus grandes entraîne pour les briques une organisation grandissante. L'augmentation de complexité dans le système se traduit visuellement par trois phénomènes : une densité spatiale localement plus élevée (structures), une plus petite surface occupée dans l'environnement et enfin des échanges entre les structures plus importants.

Les premières mesures qui ont été effectuées, concernent l'organisation au sein des structures émergentes. Nous avons mesuré les populations de briques d'états  $i$  qui se trouvent en périphérie des briques d'états  $i+1$ . Les résultats sont présentés sur les courbes ci-dessous.



Courbe 2 : Complexité des structures émergentes en fonction du temps

Ces courbes représentent en noir, la quantité de briques d'état 0 en périphérie d'une brique d'état 1 – structure de niveau 1 - et en rouge, la quantité de briques d'état 1 en périphérie de briques d'état 2 – structure de niveau 2 - en fonction du temps. Ce sont des courbes représentatives de l'ensemble des simulations qui ont été réalisées. On distingue clairement deux phénomènes .

Tout d'abord, on constate que pour un niveau donné d'émergence, le niveau 1 par exemple, l'organisation des agents se fait très rapidement. Un maximum est très vite atteint, puis après une phase de stabilisation des structures, l'organisation devient moins distincte. En contrepartie, durant cette baisse de l'organisation, on observe un augmentation de l'organisation des structures du niveau supérieur. Cela s'explique simplement. Lorsqu'il y a émergence d'une structure de niveau  $i+1$ , les structures de niveau  $i$  migrent vers celle-ci. Se produit alors deux phénomènes. Tout d'abord, le déplacement désorganise les structures de niveau  $i$ . Ensuite, lorsque ces structures arrivent à la périphérie de la brique d'état  $i+1$ , initiatrice de l'émergence de niveau  $i+1$ , il apparaît une forte densité de structures de niveau  $i$ . Cela entraîne une augmentation des concentrations de répulsifs émis par les briques de niveau  $i$  et rend donc les structures de niveau  $i$  plus instables. Cela n'est néanmoins pas suffisant pour désagréger les structures déjà formées mais entraîne une baisse d'organisation des structures de niveau  $i$ . Nous verrons par la suite que c'est un phénomène essentiel pour l'autopoïèse du système. On a donc au sein du système une augmentation croissante de la complexité des structures formées, complexité qui croît par paliers avec l'émergence de nouveaux niveaux structurels. En opposition, la complexité de chaque agent – connaissance, perception, comportement - reste la même.

Un autre phénomène, très lié au précédent, est l'augmentation des échanges entre structures émergentes. Ce phénomène est malheureusement impossible à quantifier. En effet, les agents n'ont aucune conscience de la structure à laquelle ils appartiennent et il est donc impossible d'évaluer une migration entre structures lorsqu'elle se produit. Néanmoins, des observations visuelles ont permis clairement d'identifier ce phénomène. Il s'explique facilement par la concentration des structures de niveau  $i$  à la périphérie d'une brique de niveau  $i+1$ . Cette « agglomération » permet un chevauchement des zones membranaires / frontières attractif-répulsif, et donc un passage aisé des briques entre des membranes appartenant à des structures différentes. Ainsi, les briques n'ont plus uniquement un rôle d'agent mais deviennent un nouveau vecteur d'information qui se superpose aux vecteurs standards, les Vecteurs. Apparaissent alors de nouveaux phénomènes émergents tels que la propagation de la pulsation d'une membrane aux membranes voisines, des échanges entre l'intérieur et l'extérieur des structures, etc. Ces phénomènes qui ne seront pas présentés ici plus en détail, faute de place, sont néanmoins très importants. Alors que nombre d'entre eux sont inhérents au modèle et apparaissent quelque soit le niveau d'émergence considéré, certains n'apparaissent que dans des structures d'un niveau donné.

Le dernier phénomène qui dénote une augmentation de la complexité au fur et à mesure des émergences successives, est la diminution spatiale de la surface occupée par le système. Les figures 9 ci-dessous nous présentent une simulation à deux instants différents. Celle de gauche a été capturée durant la phase d'émergence des structures de niveau 1. Celle de droite durant la formation des structures émergentes de niveau 2. En blanc, nous pouvons voir les quantités d'informations, sous forme de Vecteur, présente dans l'environnement.

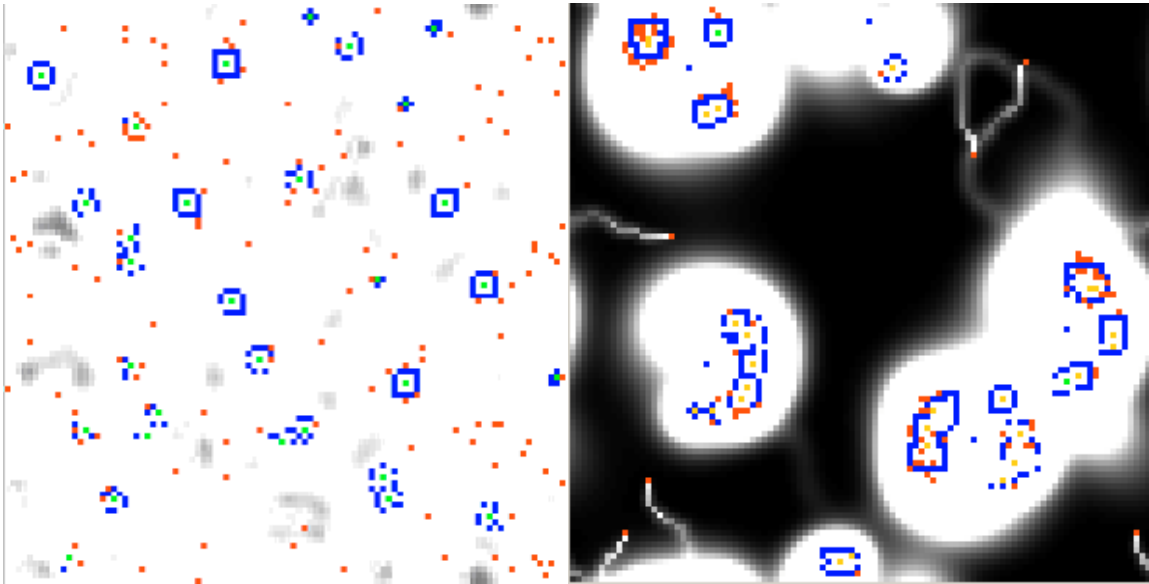


Fig 9 : Visualisation d'îlots d'informations

On voit clairement que dans un système jeune, en cours de formation, que l'information recouvre l'ensemble de l'environnement. Les agents sont dispersés et malgré la présence d'organisations, le système reste désordonnée. Dans le système évolué, on constate une concentration des briques et de l'information dans des zones clairement délimitées au delà desquelles il n'y a rien. L'information émise par les briques se concentre alors exclusivement au niveau des structures émergentes renforçant encore la cohésion des structures.

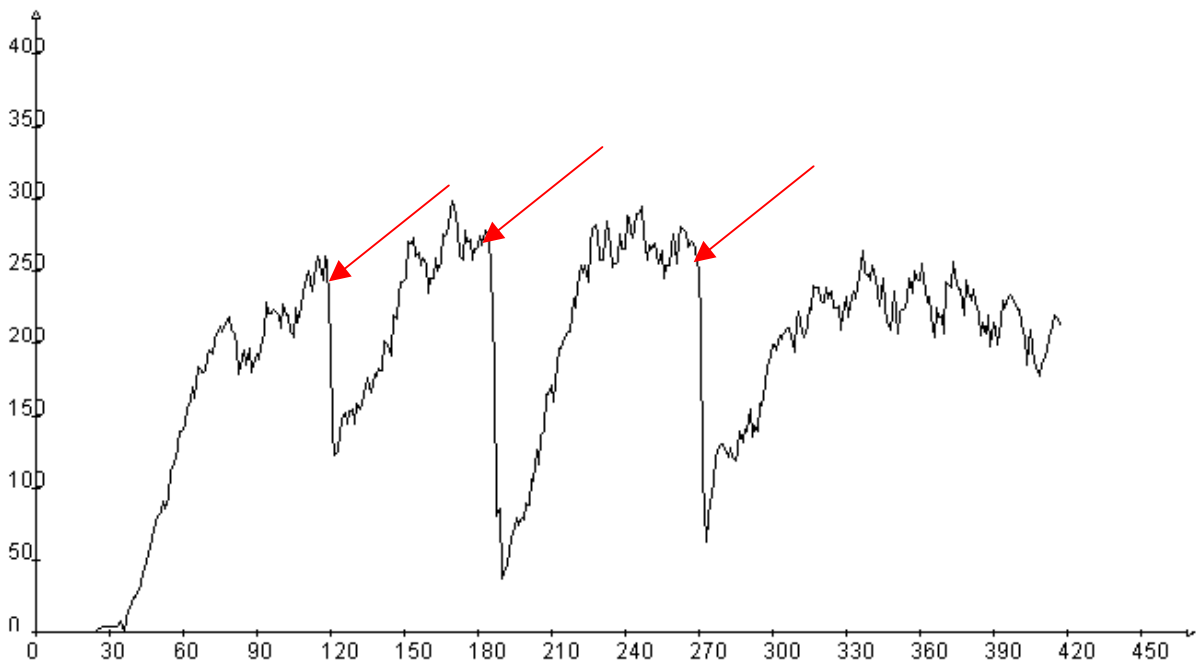
### 4.3.3 Un système autopoïétique

Le système que nous présentons est autopoïétique. Nous avons vu (cf 2.1) que les deux notions à retenir de l'autopoïèse sont l'attribut d'auto-entretien du système et la notion d'interaction préférentielle dans un réseau fermé.

La deuxième notion a été exposée dans la partie précédente. On voit en effet que l'augmentation de la complexité du système produit des îlots fermés d'informations au sein desquels les briques interagissent entre elles de façon préférentielle. Le système répond donc clairement à ce critère.

Le deuxième critère, l'auto-entretien du système, peut être abordé de plusieurs façons. Nous allons voir à cet effet, trois comportements spécifiques des simulations : la résistance aux perturbations, la mutation inverse, l'entretien des structures de niveaux supérieurs.

Plusieurs expérimentations ont été réalisées pour tester la résistance du système et en particulier des structures formées, face aux perturbations. La courbe 3 ci-dessous présente un exemple typique de résultat. Ce diagramme représente une mesure de complexité des structures de niveau 1 en fonction du temps. Nous avons accompli durant la simulation, trois perturbations, marquées par des flèches rouges.



Courbe 3 : Rigidité du système face aux perturbations

Les perturbations consistent à faire se déplacer chacune des briques dans une direction aléatoire pendant 10 tours. Pour chaque perturbation, on observe dans les tours qui suivent immédiatement, une très forte diminution de l'organisation des structures qui atteint son minimum très rapidement. Viens ensuite une phase de restructuration, sensiblement identique à la phase de naissance des structures. Des expériences similaires ont été réalisées avec des structures de niveau 2 fournissant des résultats identiques à l'échelle de temps prés. Le système fait donc preuve d'une grande rigidité face aux perturbations.

Le deuxième caractère typiquement autopoïétique du système apparaît très tôt dans le modèle. Il provient de la capacité des briques à muter vers les états supérieurs et inférieurs. En effet, une brique qui n'a plus de « rôle » dans l'état dans lequel elle se trouve, peut muter pour l'état inférieur. On a donc, au sens de l'autopoïèse, une régénération du système de production de l'émergence, par la réapparition de briques aux niveaux inférieurs.

Enfin, un troisième caractère typiquement autopoïétique se produit lors de la création de structures de « haut niveau ». Nous avons vu que la formation de structures de niveau 2 entraînait une instabilité des structures de niveau 1 qui la compose. Cette instabilité, provoquée entre autre par des concentrations localement importantes de répulsif, a pour conséquence de faire fuir une partie des briques d'état 0 des structures de niveau 1. Nous pouvons voir une illustration de ce phénomène sur la figure 10 ci-dessous.

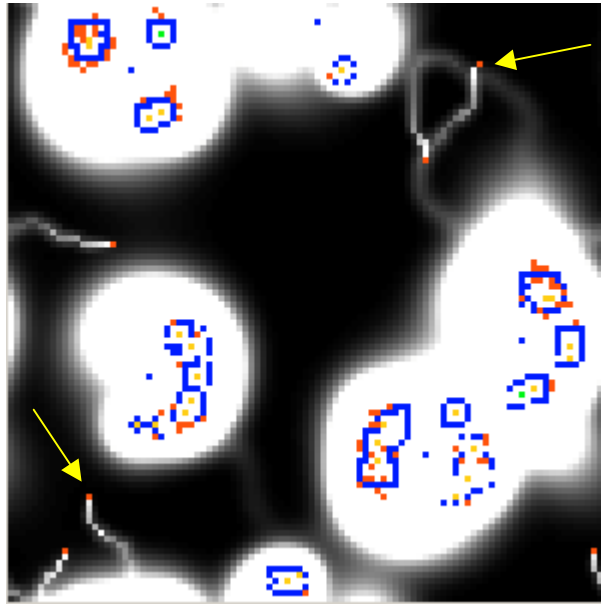


Fig 10 : Migration de briques

Ces briques abandonnent donc les structures auxquelles elles appartiennent pour « migrer » à travers l'environnement. Lorsque l'instabilité est importante, les briques qui quittent leur structure sont nombreuses et produisent de nouvelles zones informationnelles dans l'environnement. Il se produit alors l'émergence de nouvelles structures de faible complexité qui peuvent à leur tour entretenir la formation de structure de plus hauts niveaux déjà existantes ou produire de nouvelles émergences de structures complexes. Nous pouvons en voir un exemple sur la figure 11.

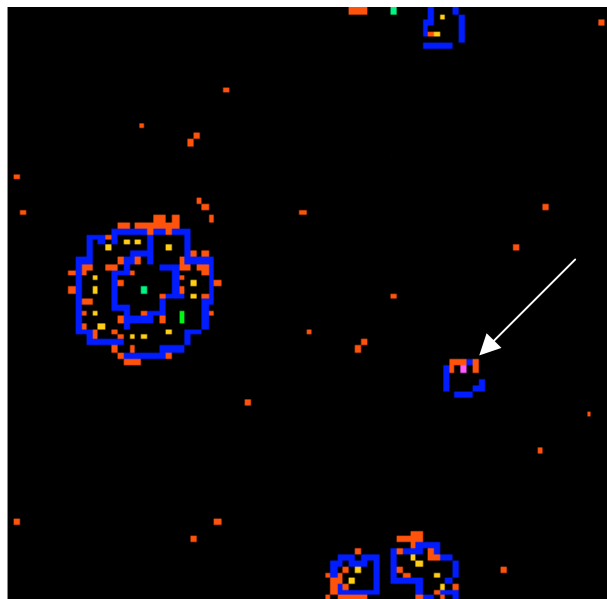


Fig 11 : Formation autopoïétique d'une structure de niveau 1

Ce phénomène peut également être observé aisément sur la courbe 2 (4.3.2). On voit clairement sur ces deux tracés une diminution de la complexité moyenne des structures de faible niveau au profit des structures du niveau supérieur.

Les systèmes autopoïétiques « standards », si l'on considère une approche émergentiste, régénèrent la machine de production du système à un niveau donnée. Le phénomène décrit ci-dessus, quant à lui, régénère les éléments nécessaires à la formation et l'entretien de structures de plus haut niveau. Le système est donc son propre moteur d'amélioration en terme de complexité, régénérant les éléments nécessaires à ses émergences.

#### 4.3.4 Correspondance biologique

Le travail qui a été réalisé en simulation n'a pas pour but de fournir un cadre d'étude de phénomènes biologiques. Cependant, le modèle s'inscrit dans une approche morphogénétique de l'émergence et produit donc des phénomènes qui peuvent être intéressants dans une approche vie artificielle. Jari Vaario [Vaa 94] définit l'émergence morphogénétique de la façon suivante: « l'organisme émerge des interactions locales d'un nombre important d'entités indépendamment d'un contrôle global ». Cette approche de l'émergence en vie artificielle s'oppose à l'ontogénétique (modification du comportement via un réseau de neurones par exemple), la phylogénétique (processus évolutionniste) et la culture (transmission entre générations). Via cette approche nous avons obtenu des résultats que l'on peut rapprocher de phénomènes naturels. Nous allons en présenter quelques uns ; notre propos n'étant pas d'expliquer les phénomènes biologiques mis en œuvre mais de caractériser la nature intrinsèque du modèle implémenté.

Une des premières manifestation surprenante de la simulation apparaît avec le premier niveau d'émergence. Les structures formées, que nous nommerons cellules, se déplacent dans un mouvement amiboïde. Ce mouvement est très courant chez les protozoaires (organismes unicellulaires) et en particulier chez les amibes. Il consiste en une déformation de la forme cellulaire pour le déplacement. Le contact avec un support est nécessaire pour fournir à la fois un point d'appui qui permet une déformation de l'avant de la cellule dans la direction du mouvement et un point d'ancrage à partir duquel l'arrière de la cellule peut être tiré vers l'avant. Dans la simulation, la point d'appui et le point d'ancrage ne sont pas d'ordre physique mais d'ordre informationnel.

Un exemple du mouvement est présenté sur la figure 12, ci dessous sur une structure de niveau 1.



Fig 12 : Mouvement amiboïde

On peut décomposer ce mouvement en trois phases présentées sur les cinq images ci-dessus. La première phase est le déplacement du noyau de la cellule. Ce déplacement produit un changement des gradients d'informations entraînant la déformation de la cellule et produisant une concentration d'attractif importante à l'arrière de la cellule, le point d'appui. Puis, le noyau continuant à émettre des Vecteurs, la concentration d'attractif augmente à l'avant de la cellule créant un point d'ancrage. Lorsque les concentration d'attractif et répulsif retrouvent leur niveau initial, la cellule retrouve sa structure de départ.

Deux autres phénomènes du monde cellulaire trouvent une correspondance dans la simulation, l'endocytose et le métabolisme protoplasmique (activité interne de la cellule). Ces deux phénomènes, pourtant différents trouvent les mêmes origines dans la simulation.

L'endocytose désigne le processus par lequel les cellules « internalisent » diverses substances présentes dans le milieu environnant, soit sous forme de particules solides - on parle dans ce cas de phagocytose -, soit sous forme de gouttelettes - on parle alors de pinocytose -, en leur faisant franchir la membrane lipoprotéique qui enveloppe lesdites cellules. Ce phénomène se retrouve, exclusivement sous la forme de phagocytose dans les simulations. Nous pouvons en voir des exemples ci-dessous :



Fig 13a : Début de la Phagocytose

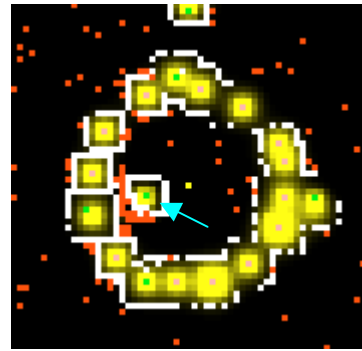
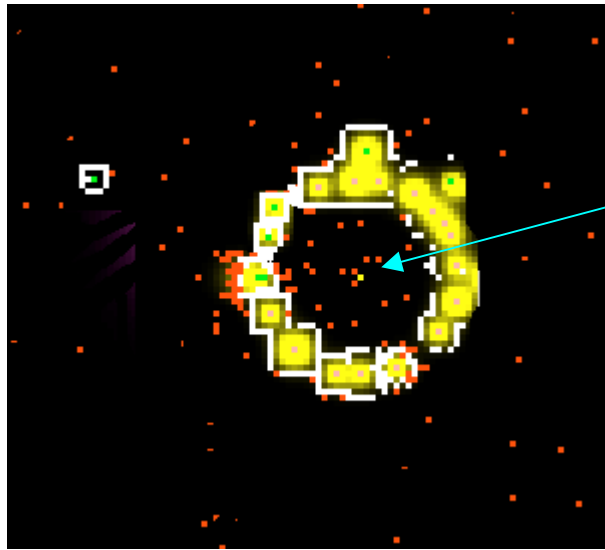


Fig 13b : Cellule de niv 1 ingérée complètement

Ce phénomène peut être expliqué aisément. Les briques d'état  $i$  n'ont aucunes perceptions des informations émises par des briques d'état  $i+2$ . Des structures de niveau 1 par exemple, « contrôlées » par des briques d'état 1 ne sont donc ni attirées, ni repoussées par le noyau de structures de niveaux 3. Il arrive donc que des structures de niveau 1 se retrouvent « emprisonnées » au sein d'une structure de niveau 3. Ce phénomène se produit également entre des structures de niveau 2 et des briques d'état 0. Il arrive alors qu'un ensemble de briques se retrouve piégé au sein d'une structure jouant ainsi le rôle de vecteur d'information interne à la cellule.



Briques intégrées dans le métabolisme de la cellule

Fig 14 : Métabolisme cellulaire

Le déplacement de ces briques s'effectue alors entre les structures de niveau 1 de la membrane, qui les attire et les repousse, au sein du milieu intracellulaire. Ces briques ne peuvent sortir de la cellule, car la membrane les repousse ou les assimile et deviennent partie intégrante du fonctionnement de la structure, une sorte de métabolisme au sens biologique du terme. Des expérimentations ont été réalisées dans le but de comprendre mieux ce phénomène et ses conséquences ; en modifiant les perceptions des briques pour favoriser leur intégration dans la structure par exemple. Cependant une présentation plus détaillée de ce travail dépasse le cadre de ce rapport.

### 4.3.5 Un résultat fractal

Une fractale est un objet mathématique de structure complexe dont la création ou la forme met en jeu des règles utilisant le fractionnement. Certaines de ces fractales, les fractales à homothétie interne, ont en outre comme propriété d'être identiques à elles-mêmes quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe ; c'est la propriété d'autosimilarité. De nombreuses études sur le fonctionnement des organismes vivants et en vie artificielle font appel aux modèles fractals. Citons en particulier les travaux de Lindenmayer, qui a développé des modèles de croissance de plantes et de développement cellulaires, de P. Prusinkiewicz qui a développé des modèles de modélisation de structures biologiques [Pru 94], de Taylors, etc...

Les fractales sont souvent construites par itérations successives. Dans le cas des fractales autosimilaires, la transformation appliquée à l'objet mathématique à chaque itération reste identique quelque soit l'itération. Dans une approche discrète, la construction peut donc se rapporter à une récursivité sur l'objet mathématique.

Le modèle que nous avons présenté est récursif. On peut décomposer aisément son fonctionnement en une suite d'itérations pour chacune desquelles se produit une émergence et une structuration. Nous avons donc pensé pouvoir observer lors des simulations l'apparition de structures fractales. Pour confirmer la nature des structures émergentes nous les avons reproduite par une méthode de construction typique de fractales auto-similaires : l'Iterative Function System.

Un IFS est un ensemble de  $n$  transformations contractantes linéaires définies dans un espace métrique donné. Les transformations composant un IFS sont des transformations affines. Ces transformations peuvent être décrites comme une combinaison de rotation, de réduction d'échelle et de translation de coordonnées des axes dans un espace à  $n$ -dimension(s). Un IFS possède un attracteur qui est égal à l'union de  $n$  copies de lui-même transformées par les  $n$  transformations. Une définition plus formelle des IFS est fournie en Annexe. Plus clairement, un IFS est un dispositif qui prend un motif, le réduit et le reproduit selon un schéma donné dans un espace défini, le schéma représentant l'attracteur de l'IFS. Puis il prend le résultat de la première étape et recommence.

Nous avons utilisé cette méthode pour construire par une approche fractale les structures créées lors des simulations. Les résultats sont les suivants.

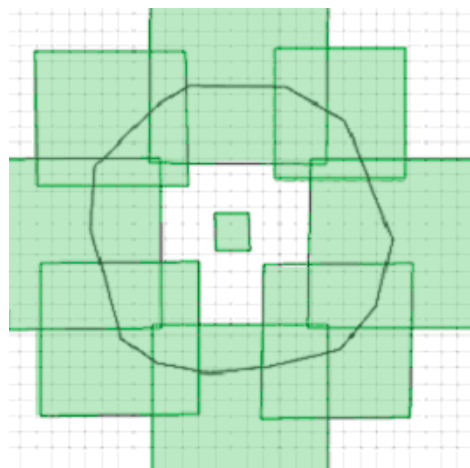


Fig 15 : IFS équivalent au modèle



Fig 16 : Emergence de niveau 3

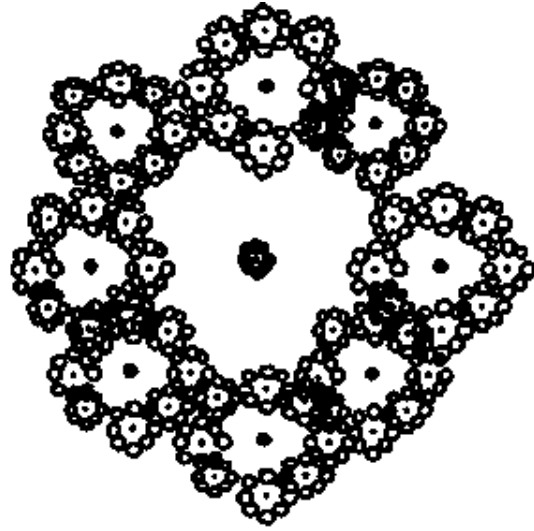


Fig 17 : IFS à la troisième itération

On voit clairement sur ces images dont les couleurs ont été retouchées la ressemblance entre le système à gauche et la fractale à droite. Si l'apparition de ces structures fractales est inhérente à la nature réursive du modèle, elle demeure cependant très intéressante. En effet, l'essence même d'un phénomène émergent provient du fait qu'il ne peut être expliqué directement par le fonctionnement des parties qui le compose. Or, nous supposons que l'aspect fractal de la simulation peut nous permettre de décrire le futur comportement du système, indépendamment du vocabulaire qui décrit l'émergence. Toutefois, un travail plus approfondi sur cette propriété serait nécessaire pour pouvoir en tirer de plus amples conclusions.

Nous citerons, pour conclure, Laurent Nottale [Not 00], directeur de recherche au CNRS:

*« Les fractales seraient, dans le cas où elles interviennent à un niveau fondamental [...] la manifestation structurelle de la non-différentiabilité de la Nature ».*

## 4.4 L'environnement de simulation et l'implémentation

L'ensemble des simulations accomplies dans le cadre de ce travail de DEA a été réalisé sous la plateforme de développement multi-agents MADKit. C'est une plate-forme générique de production et de conception de systèmes multi-agents [Gut 00]. MADKit utilise le modèle AGR (Agent-Groupe-Rôle) comme principe d'architecture de la plate-forme et comme modèle de conception de SMA. Les expérimentations ont été réalisées avec l'outil TurtleKit développé par Fabien Michel [Mic 00]. TurtleKit est un environnement de simulation synchrone pour agents réactifs, inspiré par le logiciel StarLogo.

Il fournit les outils nécessaires à la simulation d'agents réactifs à savoir :

- Un environnement 8-connexe aisément configurable (taille, plongement...)
- Une intégration simple et complète des agents dans le système
- Un modèle informationnel de type envoi de message ou diffusion d'information
- Des outils de visualisations des simulations : visualisation directe via une vue sur l'environnement, les agents et les Vecteurs ou visualisation indirecte par des outils d'observations comme les traceurs de courbes.

L'implémentation a consisté à concevoir et développer plusieurs agents :

- Les agents réactifs du système qui ont été implémentés à partir du modèle
- L'outil de paramétrage de la simulation ( lancer quoi et quand ?)
- Les outils d'initialisation et de paramétrage de l'environnement
- Les fonctions et outils d'observations du système

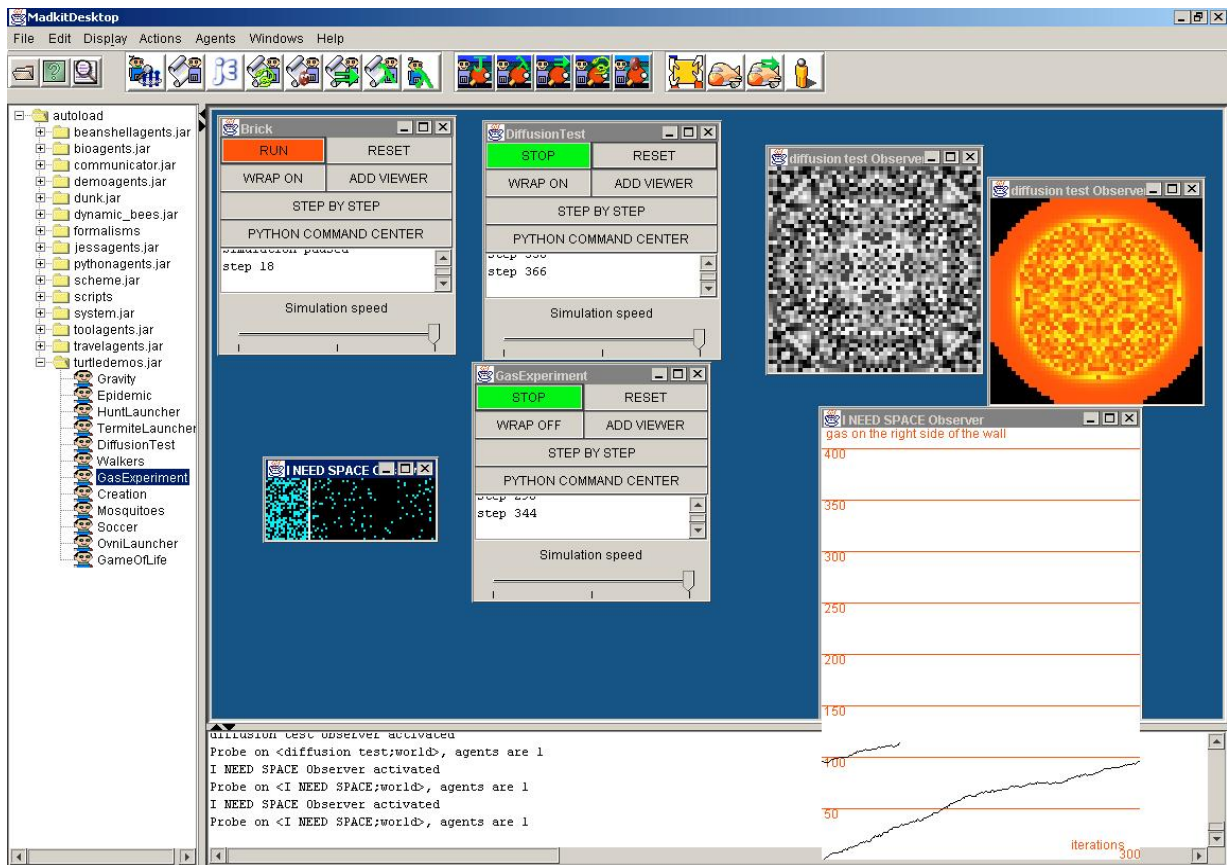


Fig 18 : interface de MadKit qui présente des outils de TurtleKit

# Chapitre 5

## Conclusion et Perspectives

### 5.1 Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de ce rapport a eu pour but d'étudier les interactions entre structures émergentes dans des systèmes complexes et par la même l'émergence multiple. Une approche générale d'inspiration Vie Artificielle a été adoptée pour développer un modèle générique de l'émergence multiple qui puisse permettre de réaliser des simulations afin d'extraire expérimentalement les propriétés des systèmes implémentés. Cette approche, orientée Systèmes Multi-Agents, a eu pour but de fournir une meilleure compréhension des systèmes complexes dans plusieurs disciplines : la Vie Artificielle, les SMA, les systèmes auto-organisés et dans un cadre général les systèmes dont la dynamique est soumise à l'interaction d'un grand nombre d'entités de micro-niveau.

Dans un premier temps nous avons développé un modèle formel de système multi-agents récursif. Nous avons abordé le problème de l'émergence unique en tentant de caractériser au niveau micro (au niveau des entités en interactions), un comportement entraînant un résultat au niveau macro (au niveau des structures émergentes) . Cette approche est délicate car le principe même de l'émergence repose sur le fait que le niveau macro ne peut être directement compris par la description du niveau micro. Il a donc fallu produire à cet effet un modèle le plus générique possible. L'inclusion ensuite de l'aspect récursif dans le modèle s'est faite dans la perspective de réaliser l'émergence multi-niveaux en conservant « l'esprit » qui a conduit au développement du modèle pour une émergence unique.

Cette approche a donc permis de caractériser des structures émergentes de divers types (cellules...) en conservant un caractère multi-niveaux, inhérent aux systèmes complexes naturels.

Les propriétés que nous avons exprimés dans le modèle sont les suivantes :

- Le modèle est simple, abstrayant les dynamiques de bas-niveau en définissant dans un cadre le plus général possible le rôle de l'information, le rôle de l'environnement et le rôle des agents.
- Le modèle fait preuve de flexibilité et d'adaptabilité : En ce qui concerne les entités mises en œuvre – le comportement des agents réactifs peut aisément être modifié. Pour ce qui se rapporte aux vecteurs d'interactions entre les parties du systèmes – le modèle par diffusion d'attractifs et de répulsifs est élémentaire et peut être changé pour une approche différente (par champs de force par exemple).
- Il présente un environnement complètement indépendant des agents. Cela permet une adaptabilité importante pour une portabilité dans un modèle continu ou n-connexe.
- Enfin, il met en œuvre des agents purement réactifs. Leur comportement est décrit par un modèle stimuli – réaction qui permet une évolutivité et une flexibilité importante.

Par de multiples implémentations et simulations nous avons pu ensuite étudier plusieurs propriétés du système développé :

- Le système est autopoïétique. Il est robuste face aux perturbations de l'environnement et régénère de lui-même sa « machine » de production de l'émergence. Cela crée une dynamique évolutionniste en ce qui concerne la complexité du système.
- Il présente des analogies avec les processus biologiques. De nombreux phénomènes propres aux systèmes complexes biologiques comme les cellules, ont été mis en évidence et étudiés. Certains d'entre eux n'ont pas été présentés faute de place – citons la formation d'une membrane bicouche. D'autres comme la mitose cellulaire, peuvent être aisément provoqués.

- Le système subi un accroissement continu de sa complexité structurelle. Cette augmentation est fonction de nombreux paramètres qui ont été présentés. Des méthodes de calcul des limites de l'émergence ont été proposées, fonction en particulier du nombre d'entités initialement dans le système. Les limites de la structuration des phénomènes émergents ont également été exposées en mettant en avant leur caractère exponentiel.
- L'émergence de structures dans le système a des correspondances avec le monde des objets fractals. Une comparaison a été réalisée avec une fractale générée par IFS ainsi qu'une présentation des phénomènes que l'on peut attendre de cette propriété. Un travail sur cette propriété pourrait permettre l'étude de la dynamique globale du système indépendamment du vocabulaire qui décrit l'émergence à un niveau donné.
- Enfin, nous avons pu montrer qu'une approche par champs de force, utilisé par Vaario [Vaa 95] permettrait d'éviter le caractère exponentiel de la formation des structures mais entraînerait inévitablement une instabilité – que Jari Vaario [Vaa 95] traite par l'utilisation de lois d'adhésion.

Le travail effectué nous a permis de mieux cerner le phénomène de l'émergence multiple. Néanmoins, l'étude réalisée est loin d'être exhaustive et même si l'ensemble du travail réalisé dans le cadre du stage n'a pas été présenté intégralement dans ce rapport, de nombreuses extensions peuvent être apportées au système.

## 5.2 Perspectives

### 5.2.1 Les voies de recherches futures

Afin de cerner les possibilités du modèle, il est important de savoir quels sont les paramètres qui le modifie et quels en sont les impacts sur le système.

#### ◆ *L'INFORMATION*

Une étude précise de l'information – Vecteurs dans le modèle – serait nécessaire pour identifier son influence sur le système.

Plusieurs voies d'études sont envisageables :

- *L'identification des ensembles de classes d'informations (attractifs, répulsifs...) nécessaires au fonctionnement du système.* A cet effet, on peut distinguer une approche de minimalisation de cette ensemble pour une simplification du modèle et une approche d'investigation de nouvelles classes pour la simulation de nouveaux comportements. Dans les deux cas, des ébauches d'expérimentations ont été réalisées. Pour la première approche, en conservant uniquement la classe d'attractif, pour la seconde, en ajoutant une nouvelle classe de répulsifs inspirée par le modèle satisfaction-altruisme de O. Simonin [Sim 01].
- *L'exploration de nouveaux vecteurs d'informations.* Une étude détaillée de l'utilisation, de champs de potentiels, de transmission de signaux, d'émission de messages ou même d'agents messagers permettrait de caractériser le rôle du vecteur d'information dans le phénomène de l'émergence.
- *La modification des paramètres du modèle par diffusion.* Des expérimentations plus complètes sur les modifications des paramètres de diffusion permettrait d'identifier clairement leurs rôles dans la formation des structures. Des tentatives ont été faite, sur l'évaporation en particulier, faisant apparaître de nouvelles structures de type serpentiforme (cf fig 18).
- *La prise en compte du facteur ressource.* Une étude du phénomène de l'émergence multiple en limitant la quantité d'information utilisable dans les interactions permettrait de quantifier les échanges minimaux nécessaires à l'apparition des phénomènes émergents.
- *Une information unique.* Enfin une étude du système en utilisant des éléments uniques comme vecteurs d'informations s'agençant via une machine chimique par exemple, permettrait de caractériser la diversité informationnelle nécessaire à l'apparition des phénomènes émergents multi-niveaux.

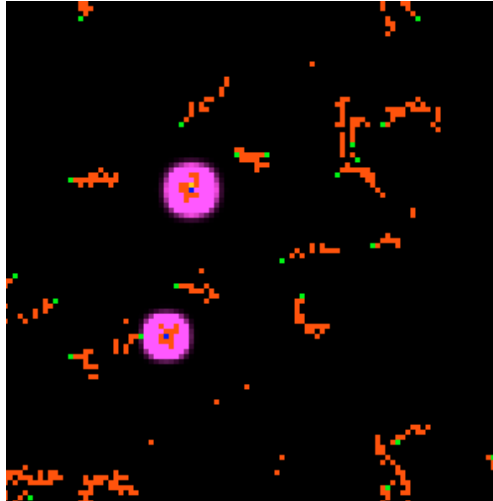


Fig 19 : Une émergence serpentiforme

#### ◆ *LES AGENTS*

Comme dans le cas de l'information, une étude plus précise du rôle et du comportement des entités / agents, mis en œuvre dans le modèle serait nécessaire pour identifier leurs influences sur le système et plus particulièrement sur le phénomène de l'émergence. Là encore, plusieurs approches sont envisageables :

- *Des agents moins réactifs.* Des expérimentations mettant en œuvre des agents plus évolués pourrait permettre d'étudier le rôle du comportement primitif dans l'émergence et les possibilités structurelles d'un système plus « intelligent ». Pour une approche orientée SMA, on peut imaginer des agents plus cognitifs, alors que dans une approche Vie Artificielle, on imaginera plus facilement l'intervention des phénomènes d'émergence évolutionnaire via l'utilisation d'apprentissage ou d'algorithmes génétiques par exemple.
- *Un système hétérogène.* Un aspect important du modèle provient du fait qu'il met en présence des agents homogènes. Un travail sur un système hétérogène, plus proche des systèmes complexes naturels, permettrait d'étudier plus en avant la nature des interactions nécessaires à l'émergence.
- *Des perceptions différentes.* Les perceptions sont primordiales dans le rapport entre les entités du système et l'environnement, mais également au niveau de l'aspect récursif du modèle présenté. Un travail sur l'impact de perceptions plus restrictives ou plus complètes permettrait d'identifier les relations entre les parties du système et l'environnement nécessaire à l'apparition de l'émergence.
- *Un système moins dynamique.* La dynamique du système est primordiale pour l'apparition de l'émergence. Une étude sur le rôle des déplacements des agents dans le phénomène émergent, que ce soit la vitesse ou le choix de l'orientation, permettrait de qualifier la dynamique génératrice de structures. Quelques expérimentations ont été réalisées à cet effet provoquant souvent des systèmes chaotiques et instables et parfois de nouvelles structures, telles que la structure à flagelles – mélange entre la structure cellulaire et la structure serpentiforme.
- *La pression de la « vie ».* Nombre de systèmes en Vie Artificielle intègrent le principe de ressource et donc de vie et de mort au sein des entités simulées. Une approche de ce type pourrait être intéressante pour étudier le comportement du phénomène émergent sous la pression de la « survie ».

## ◆ L'ENVIRONNEMENT

Enfin, une étude de l'environnement serait nécessaire pour qualifier son rôle dans le phénomène de l'émergence. Nous voyons deux approches envisageables :

- *L'environnement hétérogène.* Le modèle présenté dans ce rapport est basé, dans le cadre d'une approche simple et générale du phénomène de l'émergence multiple, sur un environnement au rôle faible, indépendant des agents et homogène. Il pourrait être intéressant, pour étudier plus en avant son rôle et ses caractéristiques, de le rendre hétérogène, en favorisant le transport d'information à certains endroits, en plaçant des obstacles à d'autres, etc.
- *Environnement dynamique.* Dans la même optique, on pourrait imaginer un environnement qui évolue dynamiquement, par l'intermédiaire de nouveaux facteurs tels que les ressources par exemple. Cette approche, en plus de fournir un cadre d'étude pour le rôle de l'environnement, permettrait également de mettre en exergue des propriétés du système telle que l'autopoïèse.

### 5.2.2 Applications futures

Nous avons vu de nombreuses voies de recherches à développer à partir du modèle proposé dans ce rapport afin de mieux comprendre le phénomène de l'émergence multiple. La compréhension de ce phénomène va de pair avec la compréhension des systèmes complexes qui sont primordiaux dans la science contemporaine.

Au delà des applications liés exclusivement à la discipline des SMA, pour laquelle on pourrait imaginer une approche orientée vers la conception de systèmes multi-agents de résolution de problème par émergence multiple, ou liés à la Vie Artificielle, pour laquelle une compréhension de l'émergence multiple pourrait apporter une brique de plus à la construction pharaonique qu'est la compréhension du vivant, de nombreux domaines sont concernés.

Les systèmes complexes, avec l'évolution des technologies de l'information et de la miniaturisation, sont appelés dans les années à venir – et si ce n'est déjà fait, à peupler le quotidien de tout un chacun. Une compréhension des interactions nécessaires à l'organisation et la structuration émergente de ces populations d'agents logiciels, de robots explorateurs ou de dispositifs issus de la nanotechnologie est donc fondamentale pour l'évolution des disciplines scientifiques concernées.

# Bibliographie

Certaines publications référencées ci-dessous n'ont pas été citées dans le cadre du rapport. Elles sont cependant présentées ci-dessous car elles ont d'une manière ou d'une autre orienté le travail qui a été réalisé dans cette étude.

[Ali 98] Ali, S.M., Zimmer, R.M., Elstob, C.M., « The Question Concerning Emergence: Implications for Artificiality. In *Computing Anticipatory Systems: CASYS - First International Conference*. Edited by Dubois, D.M. AIP Conference Proceedings 437, pp.138-156. 1998.

[Ada 94] Adami C., « On Modeling Life », In *Artificial Life IV*, ed Rodney Brooks, Pattie Maes, p269-276, 1994.

[Baa 94] Baas A. Nils, « Emergence, Hierarchies, and Hyperstructures », In C. G. Langton, *Artificial Life III*, p.515-537 . Redwood City, CA: Addison Wesley. 1994.

[Bar 01] Barfoot T.D., D'Eleuterio G., « Multiagent Coordination by Stochastic Cellular Automata », *Presented at the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Seattle, USA, 2001.

[Bec 92] Bec L., « Eléments d'Epistemologie Fabulatoire », In *Artificial Life II*, Vol X. Addison-Wesley, p799-812, 1992.

[Bed 96] Bedau M.A., « Philosophical Aspect of Artificial Life », In F.Varela and P.Bourguine, eds., *Towards A Practice of Autonomous Systems*, Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press, 1992.

[Bed 99] Bedau M.A., « Can Unrealistic Computer Models Illuminate Theoretical Biology? », In *Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program*, Orlando, Floride, eds. Annie S. Wu, p20-23, 1999.

[Bon 94] Bonabeau E., Theraulaz G. (Eds.), « Intelligence Collective », Ed. Hermes, 1994.

[Bou 99] Bourjot C., Chevrier V., Bernard A., Krafft B., « Coordination par le biais de l'environnement: une approche biologique », JFIADSMA'99, p237-249, 1999.

[Bro 95] Brooks R., « Intelligence Without Reason », In *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence*, ed. Luc Steels, Rodney Brooks, chapter 2, 1995.

[Bul 97] Bull L., « On the Evolution of Multicellularity. » In P. Husbands & I. Harvey (eds) *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*. MIT Press, pp190-196. 1997.

[Cha 96] Channon A.D., Damper R.I., « Perpetuating Evolutionary Emergence », In *From Animals to Animats 5: Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB98)*, Zurich, 1998.

[Cha 96b] Channon A.D., « The evolutionary Emergence route to Artificial Intelligence », Master 's thesis, School of Cognitive and Computing Sciences, University of Sussex, 1996.

[Car 91] Cariani P., « Emergence and Artificial Life ». In C. G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, and S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II*, p.775-797. Redwood City, CA: Addison Wesley. 1991.

[Dam 99] Damper R.I., « Emergence and Levels of Abstraction ». Editorial for the Special Issue on 'Emergent Properties of Complex Systems'. In *International Journal of Systems Science*. 1999.

[Dar 94] Darley V., « Emergent Phenomena and Complexity », In *Artificial Life IV*, ed Rodney Brooks, Pattie Maes, p411-416, 1994.

- [Dem 00] Dempster B., « Sympoietic and Autopoietic Systems: A New Distinction for Self-Organizing Systems », In *Proceedings of the World Congress of the Systems Sciences and ISSS 2000*, eds. J.K. Allen and J. Wilby, 2000.
- [Den 94] Beckers, R.; Holland, O. E.; and Deneubourg, J. L.. From local actions to global tasks: Stigmergy in collective robotics. In *Artificial Life IV*, 181--189. MIT Press, 1994.
- [Dro 93] Drogoul A., « De la Simulation Multi-Agents à la Résolution Collective de Problèmes », Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1993.
- [Dro 95] Drogoul A., Corbara B., Lalande S., « MANTA: New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ant Societies », In *Simulating Societies'93*, Siena (Italie), N. Gilbert & J. Doran (Eds.), UCL Press, London, 1995.
- [Emm 96] Emmeche C., « Life as an Abstract Phenomenon: Is Artificial Life Possible ? » In F.Varela and P.Bourgine, eds., *Towards A Practice of Autonomous Systems*, Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press, 1992.
- [Fer 95] Ferber J. « Les systèmes multi-agents », InterEditions. 1995.
- [Fle 93] Fleischer K., Baar H. A., « A Simulation TestBed for the Study of Multicellular Development : The multiple Mechanisms of Morphogenesis », In *Artificial Life III*, Addison-Wesley, 1993.
- [Fon 94] Fontana W., « On Organization », combination of talks given at the conference “The future of science has begun. Approaches to Artificial Life and Artificial Intelligence”, 1994, and at the conference “The Dynamic Emergence of Individuals and Cognition”, 1996.
- [For 89] Forrest S., « Emergent Computation: self-organizing, collective, and cooperative phenomena in natural and artificial computing networks ». In *Emergent Computation*. p.1-11. Forrest, Editor, 1989.
- [Fur 98] Furusawa C., Kaneko K., « Emergence of Rules in Cell Society: Differentiation, Hierarchy, and Stability », In *Bulletin of Mathematics and Biology*, n°60, 1998.
- [Gol 99] Goldstein J., « Emergence as a Construct: History and Issues », In *Emergence Volume One, A journal of Complexity Issues on Organizations and Management*, 1999.
- [Gie 72] Gierer A., Meinhardt H., « A Theory of Biological Pattern Formation », In *Kybernetik*, 1972.
- [Gre 94] Green, D., « Emergent behavior in biological systems », In *Complexity International*, Volume 1, 1994.
- [Gut 98] Gutknecht O., Ferber J., « A Meta-Model for the Analysis and Design of Organizations in Multi-Agent Systems ». In *3<sup>rd</sup> International Conference on Multi-Agent Systems*, 1998.
- [Han 96] Hannoun H., « Emergence et coopération d'organisations dans un système multi-agents réactif », Rapport de stage DEA IARFA, 1996.
- [Hey 89] Heylighen F., « Self-Organization, Emergence and the Architecture of Complexity ». In: *Proceedings of the first European Conference on System Science*, p. 23-32, AFCET, Paris, 1989.
- [Hey 96] Heylighen F., « The Growth of Structural and Functional Complexity during Evolution », In *The Evolution of Complexity*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [Hey 99] Heylighen F., « The science of self-organization and adaptivity », In: *The Encyclopedia of Life Support Systems*, 1999.
- [Hey 00] Heylighen F., « The Global Superorganism: an evolutionary-cybernetic model of the emerging network society », *Journal of Social and Evolutionary Systems*, *Soumission*.

- [Kay 84] Kay J. J., « Self-Organization and the Thermodynamics of Living Systems: a Paradigm », Ph. Thesis. Systems Design Engineering, 2<sup>nd</sup> Chapter, University of Waterloo, 1984.
- [Lan 89] Langton C.G., « Artificial Life », The proceedings of an interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems. Addison-Wesley, 1989.
- [Lan 92] Langton C.G., « Life at the Edge of Chaos », In *Artificial Life II*, Vol X. Addison-Wesley, p41-92, 1992.
- [Lan 98] Lansing J.S., Kremer J.N., Smuts B.B., « System-dependent selection, ecological feedback and the emergence of functional structure in ecosystems », In *Journal Theoretical Biology*, p337-391, 1998.
- [Mae 95] Maes P., « Artificial Life meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents », In *Special Issue on New Horizons of Commercial and Industrial AI*, Vol 38, n°11, 1995.
- [Mar 00] Marion R., Bacon J., « Organizational Extinction and Complex Systems », In *Emergence*, Vol 1, Issue 4, 2000.
- [Mat 95] Mataric M., « Designing and Understanding Adaptive Group Behavior », 1995.
- [Mat 96] Fontan, M. S., & Mataric, M. J. « A Study of Territoriality: The role of critical mass in adaptive task division. » In Maes, P., Mataric, M. J., Meyer, J. A., Pollack, J., & Wilson, S. (Eds.), *From Animals to Animals 4: Proceedings of the 4th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 553--561 Cambridge, MA. MIT Press. 1996.
- [McM 97] McMullin B., « Computational Autopoiesis: The Original Algorithm », Working Paper Number: 97-01-001
- [Min 86] Minsky M., « The Society of Mind », Simon and Schuster, New York, 1986.
- [MRJ 97] Groupe de travail « Collectif » IAD/SMA AFCET/AFIA, « Emergence et SMA ». JFIADSMA, Nice, Avril 97, p.323-342.
- [Mül 98] Müller J-P., « Vers une méthodologie de conception de systèmes multi-agents de résolution de problème par émergence », JFIADSMA'98, Pont-à-Mousson, Hermès, 1998.
- [Not 00] Nottale L., « La relativité dans tous ses états », Hachette Littératures, Pluriel, 2000.
- [Pan 98] « The Gurus Speak : Complexity and Organizations. », A panel discussion at the second international conference on complex systems, In *Emergence*, Vol 1, Issue 1, 1998.
- [Pru 94] Prusinkiewicz P., « Visual Models of Morphogenesis ». In *Artificial Life I*, p67-74, 1994.
- [Qui 99] Quinqueton J., Hamadi Y., « Communication et émergence: une épidémie chez les termites », JFIADSMA'99, p226-235, 1999.
- [Schu 96] Schuster P., « How does Complexity Arise in Evolution? - Nature's recipes for mastering scarcity, abundance, and unpredictability », In *Santa Fe working papers*, 1996.
- [Sim 62] Simon H.A., « The architecture of Complexity », *Proceedings of the American Philosophical Society 106*, p.467-482, 1962.
- [Sim 01] Simonin O., « Le modèle satisfaction-altruisme: coopération et résolution de conflits entre agents situés réactifs, application à la robotique », Thèse de Doctorat, 2001.
- [Sip 95] Sipper M., « Studying Artificial Life Using a Simple, General Cellular Model », In *Artificial Life II*, Number 1, MIT Press, p1-35, 1995.
- [Sta 01] Standish R.K., « On Complexity and Emergence », In *Complexity International*, Volume 09, 2001.

- [Ste 91] Steels L., « Towards a Theory of Emergent Functionality », In *From Animals to Animats (SAB'91)*, Ed. J.E. Meyer, S.W. Wilson, p451-461, MIT Press, 1991.
- [Üns 93] Ünsal C., « Self-Organization in Large Populations of Mobile Robots », Master of Science, Virginia Polytechnic Institute, 1993.
- [Vaa 93] Vaario J., « Emergent Intelligence », In *Japanese Artificial Life Newsletter*, 1993.
- [Vaa 94] Vaario J., « Introduction to Artificial Life », In *Robomec'94 Tutorial: Bionic Systems and Artificial Life*, Japanese Society of Machinery, 1994.
- [Vaa 94b] Vaario J., « Modeling Adaptative Self-Organization », In *Artificial Life IV*, 1994.
- [Vaa 94c] Vaario J., « Modeling Biological Adaptation », In Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Bionic Systems and Artificial Life, 1994.
- [Vaa 95] Vaario J., « On formation of Structures », In *F. Moran et.al. (eds): Advances in Artificial Life*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1995, pp. 421-435.
- [Vaa 95b] Vaario J., « A Synthetic Approach From Simple Rules to Complex Behavior », In *New Directions in Cognitive Science*, p227-244, 1995.
- [Vaa 96a] Vaario J., « Emergent Scheduling based on the Method of local Attraction Fields », In *The third biological Engineering Systems Group Meeting*, 1996, Japon.
- [Vaa 96b] Vaario J., « Biological concept of self-organisation in flexible automaton systems », *Proceedings of APMS'96 (Advanced Product Management Systems)*, 1996, Japon.
- [Vaa 97] Vaario J., Ueda K., « An emergent Modeling method fo dynamic scheduling », In *The second world Congress on Intelligent Manufacturing Processes and Systems*, 1997, Hongrie.
- [Var 97] Varela F.J., McMullin B., « Rediscovering Computational Autopoïesis », *Presented at ECAL-97*, Brighton, UK July 1997.

# Annexes

## ◆ CARACTERISTIQUES DES SIMULATIONS PRESENTEES

### *Simulation n°1 :*

**M** = 100x100

**Pr**<sub>0</sub> = <Pr<sub>0</sub>, 1 , 0.01>

**Att**<sub>0</sub> = <Att<sub>0</sub>, 1 , 0.2>

**Rep**<sub>0</sub> = <Rep<sub>0</sub>, 1 ,0.38>

Nb Agents = 500

### *Simulation n°2 :*

**M** = 50x50

**Pr**<sub>0</sub> = <Pr<sub>0</sub>, 1 , 0.01>

**Att**<sub>0</sub> = <Att<sub>0</sub>, 1 , 0.2>

**Rep**<sub>0</sub> = <Rep<sub>0</sub>, 1 ,0.38>

Nb Agents = 250

### *Simulation n°3 :*

**M** = 300x300

**Pr**<sub>0</sub> = <Pr<sub>0</sub>, 1 , 0.01>

**Att**<sub>0</sub> = <Att<sub>0</sub>, 1 , 0.2>

**Rep**<sub>0</sub> = <Rep<sub>0</sub>, 1 ,0.38>

Nb Agents = 2000