
Un modèle de Système Multi-Agents pour l'Émergence Multi-Niveaux

Grégory Beurier¹, Olivier Simonin² et Jacques Ferber¹

¹ LIRMM - Université Montpellier II / CNRS 161
rue Ada 34392 Montpellier cedex 5 France

² SeT - Université Technologique de Belfort-Montbéliard 90010 Belfort cedex France
beurier@lirmm.fr - olivier.simonin@utbm.fr - ferber@lirmm.fr

RÉSUMÉ. Ce papier aborde le problème de l'émergence multi-niveaux. Il présente, comme cadre d'étude, un modèle générique de système multi-agents qui assure l'émergence multiple de structures. Ce modèle met en oeuvre des agents réactifs au comportement récursif. Plusieurs simulations de ce système sont ensuite présentées et analysées afin de présenter l'intérêt d'un tel travail pour l'étude du phénomène émergent et la modélisation de systèmes complexes comme les systèmes multi-agents.

ABSTRACT. This paper deals with the problem of multi-level emergence. For this purpose, a multi-agent system model is developed as a framework to produce multi-level emergence of structures. This model is based on reactive agents with a recursive behavior. Several simulations are then presented. To conclude, we discuss the potential of such a work for the study of multi-level emergence and the applicative possibilities for complex systems modelization.

MOTS-CLÉS: Émergence Multi-Niveaux, Systèmes Multi-Agents, Vie Artificielle

KEYWORDS: Multi-Level Emergence, Multi-Agent Systems, Artificial Life

1. Introduction

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. La notion d'émergence[TRA 97] 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 multi-échelle issue d'émergences multi-niveaux (ou multiples) [HEY 89]. Cela se traduit par l'apparition d'une émergence au sein d'un système dont les parties sont elles-mêmes le produit d'émergences passées. Que ce soit dans une approche Systèmes Multi-Agents pour caractériser la nature, le fonctionnement et les résultats des interactions entre agents, dans une approche Vie Artificielle¹, pour comprendre les mécanismes intrinsèques des structures biologiques ou encore dans une approche Systèmes Auto-Organisés pour interpréter les organisations inhérentes aux interdépendances des parties d'un système ; la compréhension du phénomène de l'émergence multiple est fondamentale pour l'étude de l'organisation et de la structuration des systèmes. Il existe de nombreux travaux sur l'émergence [EPS 96] [VAA 96], néanmoins, les études développées présentent généralement la vision d'un unique macro-niveau ou s'orientent alors vers la génération de motifs complexes[DEN 89]. Ce papier, quant à lui, expose une étude constructive du phénomène de l'émergence multi-niveaux. Nos objectifs sont de définir un modèle de Systèmes Multi-Agents(SMA) qui assure l'émergence multiple de structures et la caractérisation claire des interactions entre entités. Ce système doit permettre de distinguer chacun des niveaux de structurations de l'émergence et doit être capable de générer plusieurs types de structures afin de fournir un cadre d'étude le plus général possible du phénomène. A cet effet nous utilisons une approche Vie Artificielle pour la gestion de l'information, basée sur des échanges de phéromones favorisant le caractère auto-organisateur et émergent du système[VAN 89]. Le système doit également être le plus simple possible dans une optique d'adaptabilité à l'ingénierie Multi-Agents. En effet les simulations Multi-Agents, composées généralement d'un grand nombre d'entités, se caractérisent souvent par l'apparition de phénomènes émergents mais ne sont usuellement pas conçus dans le but de manipuler ces phénomènes.

Nous proposons donc dans ce papier (Section 2), un modèle générique de Système Multi-Agents, basé sur des agents réactifs au comportement récursif évoluant dans un monde 2D. Puis nous présentons (Section 3.1) des instances et simulations de ce modèle. Nous analysons ensuite certaines des propriétés du système telles que la structuration par agrégation ou l'autopoïèse (Section 3.3, 3.4). Finalement, nous concluons en donnant les perspectives d'un tel travail en matière d'étude de l'émergence et de modélisation de systèmes complexes.

1. Discipline fondée par Langton [LAN 89] qui a pour but d'étudier des systèmes artificiels exprimant des caractéristiques du vivant

2. Le Modèle

Le modèle proposé est un modèle multi-agents basé sur la définition de règles d'interactions locales entre entités capables de produire une émergence multi-niveaux. Ce modèle a été arbitrairement défini pour permettre, à partir de propriétés minimales, l'émergence de structures complexes, et leur étude via une caractérisation claire des interactions entre entités du système.

2.1. Vue d'ensemble

Le modèle que nous proposons est défini comme un système multi-agents formel. On considère un ensemble fini d'agents évoluant et interagissant dans un environnement discret et suivant une discretisation du temps. Formellement, le système est composé de :

- Un environnement discret, noté $E_{(t)}$ à l'instant t , et défini par une matrice 2D $M[n][m]$. Chaque élément de M peut contenir des agents et les informations qu'ils émettent.
- Des agents situés dans E par leurs coordonnées dans M , et possédant un niveau i (son état, cf. Section 2.3). L'ensemble des agents $A_{(1)}...A_{(n)}$ présents dans M est noté ψ .
- Des informations émises ou perçues par les agents, notées K , et définies par des couples (*nom, quantité*) situés dans M .

Ainsi, l'état du système à un temps t , note $S_{(t)}$, est caractérisé par l'ensemble ψ des agents dans l'environnement E . L'évolution du système (chaque pas de simulation) est donné par :

$$S_{(t)} = (E_{(t)}, \psi) \quad \rightarrow \quad S_{(t+1)} = (E_{(t+1)}, \psi) \quad [1]$$

2.2. L'environnement et la gestion de l'information

Les agents perçoivent et émettent des substances/informations, appelées " phéromones " [VAN 89], propagées dans l'environnement via un modèle de diffusion. L'environnement sert essentiellement de gradient d'interaction entre agents.

Modèle de diffusion : La quantité de phéromone dans une case (l'unité spatiale relative à un élément de M) fluctue entre chaque pas de simulation en fonction de (Fig 1) : l'importation de phéromones en provenance des 8 cases connexes, l'exportation de phéromones vers ces 8-cases connexes, l'évaporation des phéromones, le dépôt de phéromones par un agent.

Une phéromone est définie par trois propriétés :

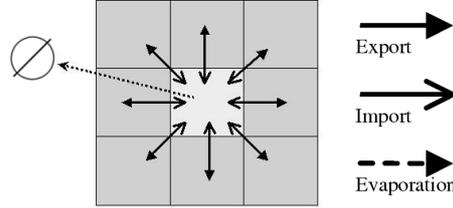


Figure 1. Schéma du modèle de diffusion

– un nom τ qui est une chaîne de caractère résultante de la concaténation de son type et de son degré (le degré d'une phéromone est donné par l'état de l'agent qui l'émet) $\tau_i = \text{"type"} + (i)$,

– un coefficient de diffusion, $\rho \in [0, 1]$ qui représente la quantité de phéromone importée et exportée à chaque pas de simulation²,

– un taux d'évaporation, $\sigma \in [0, 1]$ qui représente la quantité d'information qui disparaît à chaque pas de temps de l'environnement³.

On peut donc formaliser le modèle de diffusion de la façon suivante :

– Soit P une phéromone définie par $\langle \tau, \rho, \sigma \rangle$,

– Soit Q_c la quantité de P dans une case C de l'environnement,

– Soit μ le nombre de voisins de C et $C_{[0, \dots, \mu]}$ ces cases,

– Soit t le temps.

Alors,

$\forall P, \forall C,$

$$(Q_c)_t = \left(\sum_{i=1}^{\mu} \frac{(Q(c_i))_{t-1} \cdot \rho}{\mu} \right) - ((Q(c))_{t-1} \cdot \rho) - ((Q(c))_{t-1} \cdot \sigma) \quad [2]$$

2.3. Les agents

Les agents impliqués dans le modèle sont des " agents agrégatifs ". A chaque pas de simulation, ces agents perçoivent et émettent dans l'environnement trois types sémantiquement différents de phéromones : Présence (Pr), Attractive (Att), Répulsive (Rep). La perception de phéromones de présence fournit des informations sur les

2. Dans le cadre des simulations présentées dans ce papier ce coefficient est considéré constant. Il représente 50% de la quantité de la phéromone dans une case.

3. sa valeur diminue en fonction du degré de la phéromone suivant $\sigma = \frac{\sigma_0}{\varpi^i}$ (ϖ est une constante supérieure 1).

agents évoluant dans l'environnement "proche", les phéromones attractives et répulsives, respectivement attirent et repoussent les agents qui les perçoivent. Simonin et Ferber ont en effet montré dans [SIM 00] que des influences d'attraction et de répulsion sont suffisantes pour organiser les interactions d'agents situés et pour permettre, par exemple, la formation de structures par agrégation (Cf. 3.2). Les informations de présence prennent, quant à elles, un rôle dans le processus d'émergence (Cf. suite).

Définition Un " agent agrégatif " est défini par :

- un état - entier i égal ou supérieur à 0 qui représente son niveau d'interaction avec les agents de son voisinage,
- la capacité de changement d'état en fonction de ses perceptions (la mutation),
- la capacité d'émettre des phéromones (Pr, Att, Rep) en fonction de son état,
- la capacité de percevoir des phéromones en fonction de son état,
- la capacité de se déplacer dans l'environnement.

L'état d'un agent est primordial pour le phénomène de production de l'émergence multi-niveaux. Il définit quelles informations un agent peut percevoir ou émettre. Ces deux comportements sont locaux : un agent dépose des phéromones dans la case où il se trouve et perçoit les phéromones présentes dans sa case ainsi que dans les cases adjacentes. L'interdépendance entre l'état d'un agent et son comportement d'émission/perception est représentée par la relation 3.

$$\alpha_i \quad se.comporte \quad \iff \quad \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & \textit{Perçues} & \\ & \textit{Pr} & \textit{Att} & \textit{Rep} \\ \textit{Pr}_{i-1} & \emptyset & \emptyset & \\ \textit{Pr}_i & \emptyset & \emptyset & \\ \textit{Pr}_{i+1} & \textit{Att}_{i+1} & \textit{Rep}_{i+1} & \end{array} & \begin{array}{ccc} & \textit{Emises} & \\ & \textit{Pr} & \textit{Att} & \textit{Rep} \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \\ \textit{Pr}_i & \textit{Att}_i & \textit{Rep}_i & \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \end{array} \end{array} \quad i \downarrow \quad [3]$$

Exemple : Un 1-agent (agent dans un état 1) perçoit uniquement les phéromones attractives et répulsives de degré 2 émises par les 2-agents. Il est donc uniquement attiré et repoussé par des agents d'état directement supérieur au sien. Il perçoit également les phéromones de présence émises par les agents dans les états, 0, 1, 2. Il a donc des informations sur les populations d'agents d'états adjacents ou égaux au sien qui se trouvent dans l'environnement proche. Un 1-agent émet à chaque pas de simulation des phéromones de chaque type avec un degré égal à son état (Pr_1, Att_1, Rep_1) et à une quantité constante.⁴

La relation 3 exhibe l'aspect le plus important du modèle : les émergences au sein du système sont structurées par des interactions entre agents dans des états égaux ou adjacents. On peut alors artificiellement distinguer, pour une échelle d'observation⁵,

4. Les phéromones de degré -1 n'existant pas, les 0-agents sont donc limités en perception et émission de phéromones (la première ligne de la relation 3 n'est alors pas utilisée).

5. on considère exclusivement l'observation d'agents dans deux états adjacents (ie.1 et 2)

deux types d'agents : les agents " influents " et les agents " influencés ". Les premiers attirent et repoussent les seconds. Dans le cas de structures de haut niveau composées, les agents influencés peuvent également être influents au sein de plus petits agrégats. Le niveau de l'ensemble formé est alors équivalent à l'état le plus élevé parmi les agents de la structure.

Mutation vers l'état directement supérieur ou directement inférieur : un agent peut changer d'état modifiant ainsi ses perceptions et émissions d'informations afin de favoriser le processus de structuration de l'émergence. Ce mécanisme basé sur la perception des phéromones de présence émises par les autres agents, fonctionne de la façon suivante :

- si un i -agent est entouré par un nombre important d' i -agents et par peu de $i+1$ -agents⁶, il a une probabilité de changer son état pour l'état supérieur,
- sinon, si un i -agent ne perçoit pas beaucoup de $i-1$ -agents, il a une probabilité de changer son état pour l'état inférieur.⁷

Cela signifie que lorsqu'il existe une zone où la population d'agents est propice à l'initiation d'une structuration par attraction/répulsion à un niveau i , un i -agent a la possibilité de muter vers l'état $i+1$ afin d'initier cette structuration en devenant influent. Inversement, lorsqu'un agent " considère " son rôle d'influent obsolète - par manque d'agents à influencer dans son entourage - il peut muter pour redevenir un agent d'état inférieur.

Déplacement : chaque agent se déplace une fois par pas de simulation vers une des huit cases connexes. Il choisit parmi ces cases la plus attractive - celle où la quantité de phéromones attractives qu'il perçoit⁸ est la plus importante. Néanmoins si les cases qu'il perçoit ne sont pas attractives (plus de phéromones répulsives que de phéromones attractives), il choisit la case la moins répulsive.

Les agents agrégatifs sont des entités réactives. Nous allons montrer maintenant que leur comportement est également récursif (en fonction de leur état i). Lorsqu'un agent α_i mute pour un état supérieur ou inférieur, la relation 3 qui détermine ses perceptions/émissions reste la même à l'exception de la valeur i^9 - qui est alors incrémentée ou décrétementée. Afin d'évaluer la relation entre un i -agent et un $i+1$ -agent nous avons montré que chaque paramètre des phéromones (Cf. 2.2) a une définition récursive. En effet, on peut exprimer les paramètres de la façon suivante :

$$\tau_{i+1} = \text{"type"} + (i + 1) \quad \rho_{i+1} = \rho_i \quad \sigma_{i+1} = \frac{\sigma_i}{\varpi}$$

6. l'agent perçoit une quantité importante de phéromones de présence de niveau i et peu de phéromones de niveau $i+1$

7. Les seuils de perceptions sont définis en fonction des quantités d'informations initialement émises par les agents. Les probabilités de mutation varient expérimentalement de 0,5 à 0,001.

8. Att de niveau $i+1$ pour un i -agent

9. i qui représente l'état de l'agent ainsi que le degré de phéromones qu'il émet/perçoit

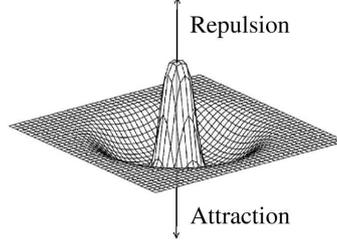


Figure 2. Représentation 3D des zones attraction/répulsion autour de l'agent

Nous pouvons donc définir F , la fonction récursive sur l'ensemble des propriétés des phéromones. Soit Rep_i un phéromone répulsive de degré i , émise par un agent dans l'état i :

$$Rep_{i+1} = \langle \tau_{i+1}, \rho_{i+1}, \sigma_{i+1} \rangle = F(\langle \tau_i, \rho_i, \sigma_i \rangle) = F(Rep_i) \text{ et } Rep_i = F^{-1}(Rep_{i+1})$$

On peut donc définir la capacité de mutation d'un état à un autre comme une application H de la fonction récursive F sur l'ensemble des phéromones émises et perçues par les agents (relation 3) : Soit α_i un i -agent,

$$\alpha_{i+1} = H(\alpha_i) \text{ and } \alpha_{i-1} = H^{-1}(\alpha_i)$$

Chaque agent du système a donc le même comportement à l'exception de l'information nécessaire à leur interaction. Le modèle permet donc d'instancier un nombre important d'agent à partir d'une unique fonction et ce, sans augmenter la complexité globale du système.

3. Expérimentations

3.1. Plateforme et Simulation

Le modèle d'émergence multi-niveaux a été simulé avec l'outil TurtleKit de la plateforme multi-agents MadKit [GUT 98]. Turtlekit est un moteur qui fournit un environnement de simulation pour des agents évoluant dans un monde discret. Dans un modèle de diffusion en environnement homogène, la répartition de l'information est circulaire. Nous avons utilisé cette propriété pour produire lors des premières simulations des structures de forme cellulaire (fig 3.1)¹⁰. Une structuration de ce type a l'avantage de délimiter deux zones : l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Cela permet une étude claire des interactions au sein de la structure émergente, et une vision nette des interactions externes entre structures. Les simulations ont été réalisées avec des en-

10. Il faut noter que la généralité du modèle nous a permis de produire d'autres attracteurs mais leur présentation dépasse le cadre de ce papier.

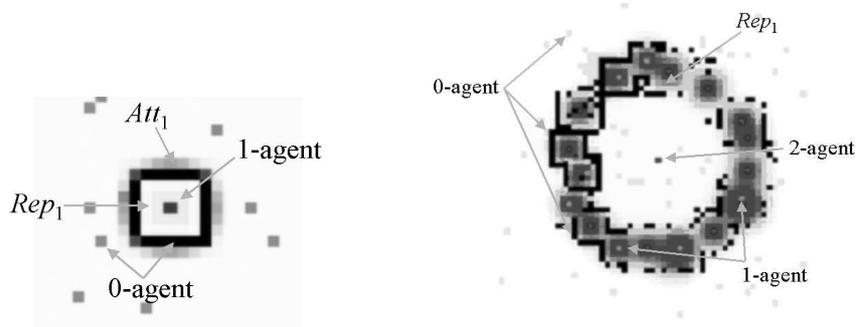


Figure 3. 1. Structure émergente de nv 1 2. Structure émergente de nv 2

vironements rectangulaires, plongements de tores dans un espace à deux dimensions, de tailles comprises entre [50][50] et [200][200] avec des populations d'agents comprises entre 250 et 3000 agents. Les agents ont été répartis par une distribution aléatoire uniforme et initialisés à l'état 0. Nous allons présenter maintenant certains des principaux résultats des simulations réalisées : l'obtention de structures émergentes multi-niveaux, une analyse de la complexité du système et enfin le comportement autopoïétique du système.

3.2. Structuration de l'Emergence

Lors des simulations, il y a formation de structures émergentes circulaires. Ces structures sont émergentes car leurs positions, leurs déplacements et leurs interactions ne peuvent être directement prédits à partir des conditions initiales du système et que chacun de ces comportements n'est pas préprogrammé dans les agents (réductible au fonctionnement interne des agents).

La figure 3.1 présente une structure émergente de niveau 1. Un 1-agent attire - et repousse - via l'émission de phéromones attractives et répulsives de niveau 1, des 0-agents présents autour de lui qui s'organisent de façon circulaire en suivant le gradient de phéromones. La figure 3.2 montre un autre exemple de structure émergente. Cette structure de niveau 2 (composée de structures de niveau 1 ayant déjà "émergées") a été obtenue avec 300 agents dans un environnement [70][70] après environ 140 pas de simulation. Au centre de la figure, un 2-agent (représenté par le gris le plus clair) attire des 1-agents (en gris foncé). Ces 1-agents attirent quant à eux des 0-agents (en noir). La structure formée est donc composée de structures circulaires de plus bas niveau. On peut donc distinguer clairement deux niveaux structurels correspondant à deux émer-

gences¹¹. Dans un cadre général, il y a stabilisation des structures après leur formation. Celles-ci ne varient alors que par leurs positions dans l'environnement. Le niveau maximal d'émergence obtenu en simulation n'est actuellement que le troisième. Cela s'explique simplement : dans ces structures, le ratio entre les agents influents (i+1-agents) et les agents influencés (i-agents) est quasi-identique quelque soit le niveau d'émergence atteint. Il est donc possible de calculer le niveau maximal d'émergence d'un système à partir de ce ratio - le ratio structurel et du nombre d'agents initial (et vice-versa). Soit Δ_α ce ratio, α_i un i-agent et N_{α_0} le nombre initial d'agents présent dans l'environnement. On peut alors déduire le niveau d'émergence maximal n :

$$\Delta_\alpha = \frac{Card(\alpha_i)}{Card(\alpha_{i+1})} \quad \text{et} \quad N_{\alpha_0} = \Delta_\alpha^n \quad \text{alors} \quad n = \frac{\log(N_{\alpha_0})}{\log(\Delta_\alpha)}$$

La principale limite provient donc du nombre d'agent présent initialement dans l'environnement et par la même des capacités des machines ayant réalisé les simulations (CPU, mémoire...) et de la plate-forme de simulation elle-même. Pour obtenir une émergence de 4ème niveau qui nécessite 28000 agents¹², le temps entre chaque cycle de la simulation est de 12 minutes en moyenne soit environ 100 jours pour obtenir l'émergence souhaitée. Nous travaillons actuellement sur des optimisations possibles pour atteindre des niveaux plus élevés d'émergence.

3.3. Mesure de complexité du système

Les émergences successives au sein du système produisent une augmentation de la complexité¹³ sans augmentation de la complexité des entités qui le compose (Cf. 2.3). L'étude de ce phénomène est primordiale pour la compréhension temporelle et qualitative de l'émergence et des applications possibles du modèle. Nous allons présenter maintenant deux de ces aspects : la complexité structurelle et la complexité spatiale.

Complexité structurelle

De nombreuses mesures utilisant différentes méthodes ont été faites pour étudier l'organisation des agents au sein des structures émergentes. La figure 3.3 présente une de ces mesures. Ces courbes montrent la qualité/complexité des structures formées lors des émergences de niveau 1 et niveau 2 en fonction du temps. Cette mesure représente le rapport entre le nombre d'agents influents et le nombre d'agents influencés impliqués dans des structures stabilisées. La naissance et la structuration des différentes émergences est un phénomène rapide (à l'échelle de la simulation). Quel que

11. Nous avons également généré lors des simulations des structures dont l'attracteur varie selon le niveau d'émergence (i.e. ruban de niv 2 composé de structures circulaires de niv 1.)

12. Nous avons pour la simulation 3.1, un ratio structurel déterminé expérimentalement égal à 13.

13. le terme de complexité n'est pas pris ici au sens algorithmique, il représente une mesure de l'organisation globale du système et des interactions entre agents

soit le niveau de l'émergence, une valeur maximale d'organisation est rapidement atteinte (en A). Ensuite, les structures de plus bas niveau se désorganisent au profit des structures de plus haut niveau. En effet, durant l'émergence des structures de niveau $i+1$ (niv 2 ici), les structures de niveau i (niv 1 ici) sont attirées. Cela produit tout d'abord une désorganisation due au mouvement de ces dites structures puis cette migration produit une forte augmentation de la concentration d'information à la périphérie de la structure de haut niveau. Cela induit des instabilités et donc une diminution de la complexité des structures de bas niveau. Au même moment, la structure de haut niveau assimile ces structures de bas niveau et sa complexité augmente.

Complexité spatiale

Un autre aspect de l'augmentation de la complexité globale du système provient de la nature de la structuration des émergences. L'organisation des agents par agrégation produit lors des simulations une concentration de l'activité au sein de petites zones. Ce phénomène est illustré en figure 5. Les aires blanches représentent l'ensemble de l'information présente dans l'environnement ; leur intensité est fonction de la quantité. La première capture (à gauche) a été réalisée dans les premiers instants d'une simulation (30ème cycle). De nombreuses structures de niveau 1 ont émergé et l'environnement est saturé d'information. La seconde capture montre le même système dans un état plus avancé (110ème cycle). Des émergences du deuxième niveau se structurent et la majorité des agents et de l'information est concentrée dans des zones isolées. Lors des simulations, la surface couverte par les agents et les phéromones qu'ils émettent diminue jusqu'à la formation d'îlots d'interactions isolés. Cette formation de zones nettes est accompagnée par une augmentation de complexité en leur sein, caractérisée par des quantités d'informations plus importantes et par la perception de la part des agents d'un plus grand nombre de phéromones. Cette propriété du système illustre un autre comportement qui apparaît lors des simulations : le caractère autopoïétique.

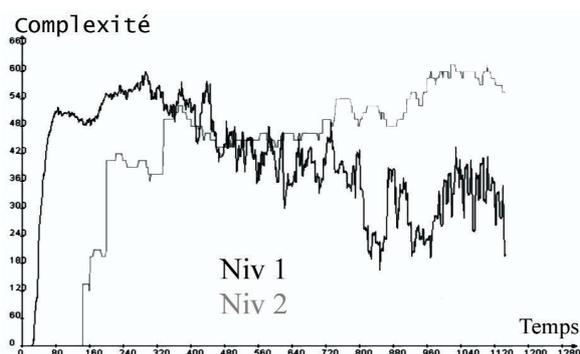


Figure 4. *Mesure de la complexité structurelle*

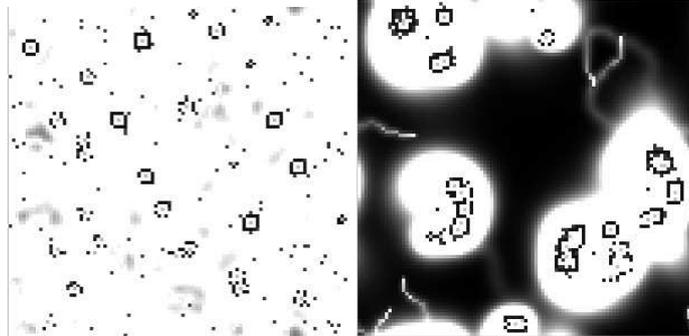


Figure 5. *Complexité Spatiale : évolution d'une simulation*

3.4. Autopoïèse

Le système proposé montre lors des simulations un comportement autopoïétique qu'il est intéressant de présenter dans une perspective d'application du modèle. Le concept d'autopoïèse a été initié au milieu des années 70 par Humberto Maturana et Francisco Varela [VAR 97], initialement pour décrire le vivant. 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 production d'éléments qui a) à travers leurs interactions, régénèrent 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. La seconde notion a été clairement exprimée lors de l'étude de la complexité spatiale. Lors des simulations, il y a formation de zones isolées dans lesquelles se concentre l'ensemble de l'information émise par les agents. Ces zones deviennent le seul lieu d'interaction, produisant ainsi une frontière avec le milieu extérieur. Nous abordons maintenant la notion d'auto-entretien du système par deux aspects : la résistance aux perturbations et la régénération de l'émergence.

Résistance aux perturbations : De nombreuses simulations ont été réalisées pour tester la robustesse du système. Un cas typique de test est décrit en figure 3.4. Cette figure représente la complexité globale du système (au sens de " Complexité structurelle ") en fonction du temps. Durant cette simulation, le système a été perturbé à trois reprises en faisant se déplacer les agents dans une direction aléatoire pendant 10 pas de simulation. Chacune des perturbations est suivie d'une importante réduction de l'organisation. La mesure de complexité atteint alors rapidement un minimum. Puis, une rapide réorganisation du système se produit et la mesure de complexité revient à son niveau précédent. Le système s'auto-répare en reformant les structures émergentes altérées.

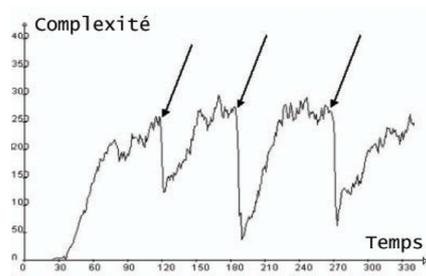


Figure 6. *Résistance aux perturbations*

La Régénération de l'Émergence : Le deuxième aspect qui confirme le caractère d'auto-entretien du système est lié au phénomène d'émergence multiple. Le comportement de mutation des agents induit une grande versatilité. Décrivons un exemple. Lorsqu'une structure de niveau 2 est formée, des instabilités apparaissent, induites entre autres par des quantités importantes d'information (Cf. 3.3). Pour étudier cette désorganisation, cet effet est accentué volontairement en simulation par une augmentation de la quantité de phéromones répulsives dans les zones périphériques des structures. Il en résulte une importante expulsion d'agents hors de la structure. La concentration de 0-agents exclus dans l'environnement augmente alors rapidement, produisant de nouvelles émergences et structurations de niveau 1. Celles-ci sont alors attirées et assimilées par la structure de plus haut niveau (niveau 2). Il y a alors restauration et stabilisation des frontières de la structure de niveau 2. D'un point de vue émergentiste, les systèmes autopoïétiques " standards " régénèrent le réseau de production à un niveau donné [HEY 89]. Le système présenté, quant à lui, régénère les éléments nécessaires à l'émergence et à l'entretien de structures sur plusieurs niveaux. Il fournit aux structures de niveaux élevés, les éléments de plus bas niveaux susceptibles d'être intégrés. Le système présenté est donc son propre moteur en terme d'émergence et d'augmentation de complexité.

4. Conclusion

L'étude présentée dans ce papier a pour but une meilleure compréhension des interactions entre structures émergentes dans des systèmes complexes. Une approche générale d'inspiration Vie Artificielle a été adoptée pour développer un modèle générique de l'émergence multiple. Cette approche, orientée SMA, a mis en oeuvre la définition au niveau micro d'agents réactifs au comportement récursif qui interagissent avec un ensemble minimal d'informations. Cela dans le but de caractériser au niveau macro, la formation de structures émergentes multi-niveaux. De multiples implémentations et simulations du modèle théorique nous ont permis d'en extraire plusieurs propriétés. Le système est capable de produire des émergences sur plusieurs niveaux. La structuration par agrégation de ces émergences est très dépendante de la défini-

tion récursive des agents - ce papier présente une structuration cellulaire qui utilise les propriétés inhérentes du modèle de diffusion de l'information. Ces structures possèdent des propriétés fortes d'auto-organisation et de résistances aux perturbations. De plus, ces comportements d'auto-entretien interviennent à plusieurs niveaux de l'émergence. Un tel système ouvre de nombreuses perspectives tant au niveau d'une étude théorique de l'émergence multiple, qu'au niveau de la modélisation de systèmes complexes, et en particulier multi-agents. Grâce à la caractérisation nette des structures formées, nous avons commencé à étudier plus en détail le rôle des différents éléments du système (information, environnement, agents...). Ce travail porte également sur la définition récursive des agents qui nous a permis de développer de nouveaux types de structures et des attracteurs capables de varier en fonction du niveau d'émergence. Nous envisageons également d'étudier l'utilisation des propriétés du système pour la résolution multi-émergente de tâches, en introduisant des capacités limitées aux agents. Enfin l'étude de la complexité du système et de son caractère autopoïétique nous permet d'envisager, dans un cadre plus général, d'appliquer ce travail à la modélisation de systèmes adaptatifs et complexes basés sur les nanotechnologies, les robots collectifs, l'ingénierie cellulaire, etc.

5. Bibliographie

- [DEM 00] DEMPSTER B., « Sympoietic and Autopoietic Systems : A New Distinction for S.O.S. », *World Congress of the Systems Sciences and ISSS 2000*, Allen and Wilby, 2000.
- [DEN 89] DENEUBOURG J., GOSS S., « collective patterns and decision-making », *Ethol. Ecol. Evol.*, vol. 1, Japon, 1989, p. 295-311.
- [EPS 96] EPSTEIN J., AXTELL R., *Growing Artificial Societies*, Brookings Institution Press, Washington D.C., 1996.
- [GUT 98] GUTKNECHT O., FERBER J., « A Meta-Model for the Analysis and Design of Organizations in MAS », *3rd International Conference on Multi-Agent Systems*, 1998.
- [HEY 89] HEYLIGHEN F., « Self-Organization, Emergence and the Architecture of Complexity », *first European Conference on System Science*, AFCET, 1989, p. 23-32.
- [LAN 89] LANGTON C., « Artificial Life », *Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, 1989.
- [MIN 86] MINSKY M., *The Society of Mind*, Simon and Schuster, 1986.
- [SIM 00] SIMONIN O., FERBER J., « Modeling Self Satisfaction and Altruism to Handle Action Selection and Reactive Cooperation », *SAB 2000, From animals to animats*, 2000.
- [TRA 97] GROUPE DE TRAVAIL IAD/SMA ., « Emergence et SMA », *JFIADSMA*, , 1997, p. 323-342.
- [VAA 96] VAARIO J., « Emergent Scheduling based on the Method of local attraction Fields », *Third biological Engineering Systems Group Meeting*, Japon, 1996.
- [VAN 89] VAN DYKE PARUNAK H. BRUECKNER S., « Artificial Life », *Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, 1989.
- [VAR 97] VARELA F., MCMULLIN B., « Rediscovering Computational Autopoiesis », *ECAL-97*, UK, 1997.