

Coordination par le biais de l'environnement : une approche biologique

Christine Bourjot, Vincent Chevrier, Alexandre Bernard, Bertrand Krafft

► **To cite this version:**

Christine Bourjot, Vincent Chevrier, Alexandre Bernard, Bertrand Krafft. Coordination par le biais de l'environnement : une approche biologique. M.P. Gleizes, P. Marcenac. Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-agents, 1999, St Gilles les bains, La Réunion, Hermes, pp.237-250, 1999. <inria-00107820>

HAL Id: inria-00107820

<https://hal.inria.fr/inria-00107820>

Submitted on 19 Oct 2006

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

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

Coordination par le biais de l'environnement : une approche biologique

C. Bourjot^{*}, V. Chevrier^{*}, A. Bernard^{}, B. Krafft^{**}.**

^{*}LORIA, UMR 7503
BP 239, 54506 Vandoeuvre Cedex
{bourjot ; chevrier}@loria.fr

^{**}Laboratoire de Biologie et Physiologie du Comportement, UHP Nancy 1,
54500 Vandoeuvre Cedex
{Bertrand.Krafft ; Alexandre.Bernard}@scbiol.u-nancy.fr

RESUME. Cet article décrit un mécanisme de coordination par le biais de l'environnement et illustre sa mise en œuvre par la simulation de l'activité de construction de toile chez les araignées sociales. Il s'inspire des sociétés d'araignées qui constituent un modèle particulièrement propice à l'étude des caractéristiques individuelles nécessaires à l'apparition de la vie sociale.

Nous commençons par exposer les différentes motivations qui nous guident ainsi que l'état de l'art des recherches effectuées dans le domaine des systèmes multi-agents d'inspiration biologique. Nous présentons ensuite un exemple biologique de coordination d'activités par stigmergie dans le cadre de construction de toile par des araignées solitaires et sociales, puis nous détaillons une manière possible de la mettre en œuvre dans des systèmes d'agents artificiels.

ABSTRACT. This article describes a coordination mechanism through the environment and its implementation in the simulation of web building in a species of social spider. The work is grounded on societies of spiders which are an interesting model for the study of individual properties needed to make social life and cooperation to appear.

In this article, we begin by motivating the work and making a state of the art of the biological inspiration in multi-agent systems. Then, we present the stigmergy process and illustrate it on the building of web. We detail its implementation from the computer scientist point of view and apply it to the simulation of web building.

MOTS CLES : coordination réactive, stigmergie, simulation biologique.

KEYWORDS : reactive coordination, stigmergy, biological simulation.

1. Introduction

L'une des difficultés au sein des systèmes multi-agents est de concevoir des formes simples d'interaction entre les agents et leur environnement qui permettent l'observation de propriétés collectives complexes. Cette problématique fait actuellement l'objet de plusieurs travaux dans le cadre de systèmes décentralisés comme, par exemple, la simulation de phénomènes sociaux [EPS96] ou l'expérimentation de formes simples d'interactions [RES96]. L'étude des modèles biologiques est une manière d'aborder la résolution de problèmes par une approche décentralisée privilégiant un comportement individuel simple vis-à-vis des comportements collectifs observés.

1.1. Modèles biologiques d'intelligence collective

Les insectes sociaux ont été largement utilisés comme modèles d'étude dans le domaine de l'intelligence collective. Les mécanismes permettant l'émergence, la régulation et le contrôle décentralisé des activités collectives peuvent à bien des égards être considérés comme des processus cognitifs faisant intervenir un grand nombre d'entités en interaction. En particulier, les structures coopératives qui caractérisent l'activité globale des colonies peuvent être assimilées à des solutions aux divers problèmes posés par l'environnement [DEN 91].

Afin de valider aisément les hypothèses des éthologues ou des biologistes sur le comportement des individus, plusieurs catégories de modèles ont été proposées pour rendre compte des phénomènes d'intelligence collective [BON 97] en tenant compte des interactions entre individus (cf. chapitre 8 in [BON 94]). La modélisation sous forme de systèmes multi-agents constitue l'une de ces catégories et permet de mettre en relation des causes et des effets définis à des niveaux différents (local/global). Dans ce cadre de *simulation*, on peut citer le projet MANTA dont le but est de tester les hypothèses concernant l'émergence de structures sociales à partir de comportements et interactions individuels au travers de la modélisation d'une colonie de fourmis [DRO 93], ou encore la simulation de la dynamique des peuplements piscicoles [LE PAG 97].

En retour, la connaissance de l'organisation de ces sociétés a été exploitée pour l'élaboration de modèles multi-agents ou de systèmes multi-agents à des fins de *résolution collective de problèmes* [DRO 95], [DUR 98], [DOR 96], [FER 90], [FEN 98], même si comme le soulignent [DRO 98] certains travaux ou modèles font recours « à des métaphores biologiques vagues ».

1.2. Le modèle araignée comme alternative

Cependant, les modèles biologiques utilisés jusqu'à présent concernent principalement des structures « eusociales », caractérisées par l'existence de castes plus ou moins spécialisées et qui ont développé des mécanismes de communication

relativement spécialisés expliquant en partie les oeuvres collectives observées. En d'autres termes, ces sociétés sont composées d'individus dont les programmes éthologiques ont déjà subi une évolution en direction de l'amélioration du fonctionnement de ces structures sociales. On n'est donc pas certain d'y trouver les algorithmes individuels les plus simples, nécessaires et suffisants, pour la résolution des problèmes et l'adaptation rapide du système à toute variation imprévisible et brutale des contraintes de l'environnement.

En revanche, l'étude de l'évolution du solitaire au social nous paraît mieux adaptée et pose en particulier les questions suivantes :

- quelles modifications comportementales sont nécessaires à l'apparition de la vie sociale ?

- quelles sont les conséquences immédiates issues de la vie en groupe ?

Dans cette optique les araignées sociales dont la socialisation est moins achevée constituent donc un modèle particulièrement propice pour l'étude des caractéristiques individuelles nécessaires à l'apparition de la vie sociale et de la coopération.

Les araignées correspondent en effet à un modèle intéressant pour trois raisons :

- les individus ne présentent aucune spécialisation en castes morphologiques ou même éthologiques,

- une araignée sociale isolée présente des caractéristiques comportementales très proches des espèces solitaires.

- les araignées sociales manifestent des formes d'organisation et de coopération particulièrement spectaculaires, en particulier lors de la construction de leur toile, de la capture d'une proie ou du transport de celle-ci.

A notre connaissance ces modèles biologiques n'ont pas encore été exploités en tant que modèles de société dans les systèmes multi-agents. Dans cet article, nous illustrons l'un des intérêts de ce modèle en expliquant comment passer du comportement solitaire à un comportement de groupe au moyen d'un mécanisme simple de coordination et d'une hypothèse de tolérance réciproque des individus en groupe.

Dans un premier temps, nous présentons la stigmergie dans les modèles biologiques, puis son illustration dans la construction de toile chez les araignées. Ensuite, nous abordons une modélisation informatique possible de ce mécanisme et l'appliquons à la simulation de construction de toile. Enfin, nous tirons quelques enseignements de ce travail et concluons.

2. La stigmergie dans les modèles biologiques

2.1. La stigmergie comme moyen de coordination

Parmi les différentes logiques de coordination d'activités collectives chez les insectes sociaux la stigmergie [SAF 97] et l'auto-organisation [BON 94][DEN 89] ont été plus particulièrement étudiées ces dernières années. Il apparaît que les mécanismes impliqués dans les phénomènes de stigmergie sont très favorables à l'émergence d'une coopération.

La stigmergie a été définie par le biologiste Grassé dans le cadre de l'activité bâtitrice des termites et se résume ainsi: « *la coordination des tâches, la régulation des constructions ne dépendent pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui* » [GRA 59]

Le principe de ce mécanisme est que l'ébauche d'une construction par un individu est capable de déclencher et d'orienter le comportement bâtisseur des autres membres du groupe [FRA 92]. L'état de la construction est le stimulus, sa réponse est l'activité de construction. Un processus stigmergique est alors une suite de stimuli-réponses. La stigmergie peut être réalisée et implantée de deux manières très différentes [THE 97], la stigmergie qualitative et la stigmergie quantitative. La stigmergie qualitative correspond à une succession de stimuli-réponses qualitativement différents. Cette forme de stigmergie est utilisée par [THE 97] pour la simulation d'un processus de construction collective de nids de guêpes. Leur modèle se fonde sur un ensemble de règles comportementales déterministes (quelques dizaines de règles) associées à ce que les auteurs appellent à des configurations stimulantes. Dans la stigmergie quantitative, la répétition de stimuli-réponses diffèrent quantitativement. Il s'agit d'un mécanisme de feed-back positif ou amplificateur qui fait l'objet du travail exposé ici.

Des travaux [KRA] ont relevé certaines conditions nécessaires à l'instauration de ces processus stigmergiques que nous appliquerons pour la simulation de construction de toile chez une espèce d'araignée sociale :

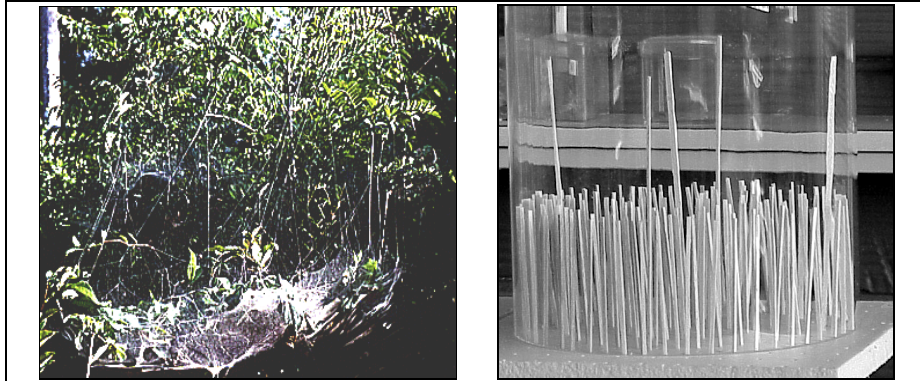
1. Les règles comportementales de chaque individu doivent être simples afin de garantir la plasticité et la robustesse du système face aux variations du milieu. Dans le cas informatique, le comportement d'un agent correspond à quelques règles générales de comportement et à la prise en compte de peu de paramètres ;
2. Les individus doivent présenter une certaine indépendance de leurs actes. Ceci afin que leurs actes ne suivent pas un enchaînement séquentiel « figé » mais qu'ils puissent adapter leur comportement aux stimuli du travail collectif. Dans le cas informatique, cela correspond à un comportement situé.
3. Le support physique du stimulus ne doit pas être spécifique à l'individu c'est-à-dire qu'un individu ne fait pas de différence marquée entre le produit de sa propre activité et celui de ses congénères.

Dans cet article, nous modélisons ces différentes notions en les appliquant à la simulation de construction de toile chez une espèce d'araignée sociale.

2.2. Un exemple : la construction de toile chez *Anelosimus eximius*

Anelosimus eximius est une espèce d'araignée sociale que l'on trouve en Guyane Française. L'architecture des toiles d'*Anelosimus eximius* obéit à des règles simples, mais strictes. La présence du hamac et du réseau sont deux constantes (figure 1). Ces structures sont cohérentes bien que construites par l'ensemble des individus et ne correspondent nullement à de simples juxtapositions de toiles individuelles. Mais en dépit de ces règles, la taille et la forme des pièges offrent une variabilité déconcertante à première vue. Elle suggère que les mécanismes de construction laissent une place importante aux contraintes du milieu (branchages, feuilles etc.), celui-ci imposant en grande partie les dimensions maximales et la forme à la structure.

L'hypothèse des biologistes est que les araignées sociales présentent, tout comme les insectes sociaux, des processus stigmergiques. Ces derniers ne nécessiteraient pas une modification des caractéristiques de l'animal social par rapport à l'animal solitaire, au moins en ce qui concerne la construction des structures soyeuses.



Figures 1 et 2 : Toile d'*Anelosimus eximius* ; Dispositif expérimental biologique.

Des résultats précédents [KRA] ont montré que la coordination et la coopération des individus reposent sur des comportements préexistants chez les espèces solitaires, mis à part la tolérance réciproque. Plus précisément, ils ont montré que plusieurs araignées solitaires peuvent se succéder dans la construction d'une même toile et obtenir un résultat équivalent à la construction d'une seule araignée. Ce résultat s'explique par l'attraction qu'exerce la soie sur les araignées [SAF].

Des expérimentations chez *Agelena labyrinthica* (araignée solitaire) ont été menées de la manière suivante : les araignées sont placées de manière successive dans un tube de Plexiglas qui contient un milieu artificiel constitué de bâtonnets de balsa de 2x2mm (de taille variable selon les groupes expérimentaux) et disposés selon le modèle de la figure 2. Ce choix se justifie par l'existence, au sein du genre *Agelena*, d'espèces solitaires et d'espèces sociales. Les résultats obtenus ont montré la possibilité de construction d'une toile par plusieurs araignées successives, et que *Agelena labyrinthica* présente une attraction pour la soie de ses congénères.

En ce qui nous concerne, nous modéliserons le comportement d'une araignée solitaire, *Agelena labyrinthica*, puis modéliserons le comportement d'une colonie d'araignées sociales comme étant un ensemble de comportements d'araignées solitaires soumises à un processus stigmergique et se tolérant mutuellement.

3. Modélisation informatique

3.1. Principe

Notre modèle se décompose de la manière suivante : (1) Le comportement de l'agent est supposé ne pas être spécialisé: tous les agents peuvent effectuer individuellement toutes les actions nécessaires à l'accomplissement de la tâche impartie au système ; (2) Le processus stigmergique correspond à une prise en compte dans ce comportement individuel des actions de l'agent et des autres agents par le biais des modifications de l'environnement qu'elles apportent.

3.2. Comportement d'un agent

Le comportement d'un agent isolé est modélisé sous la forme de couples action-probabilité. Soit A l'ensemble des actions que peut effectuer un agent ; $A = \{A_0, A_1, \dots, A_m\}$; et $P : A \rightarrow [0,1]$, la probabilité d'effectuer une action donnée ; le couple $(A_0, P(A_0))$ décrit la probabilité qu'à l'agent d'effectuer l'action A_0 à chaque étape de la simulation.

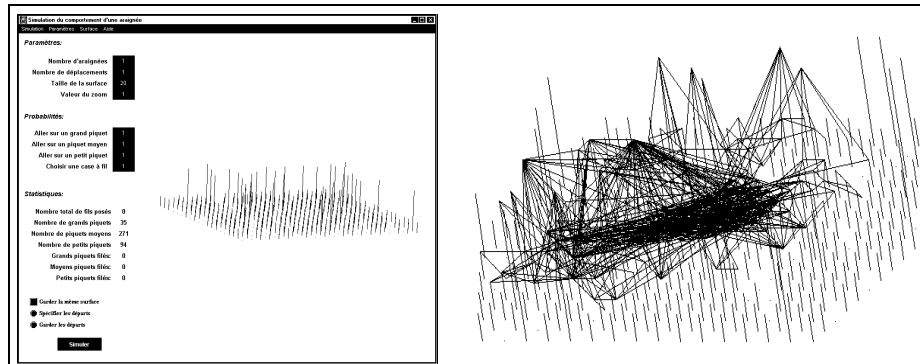
Pour tenir compte dans ce modèle de l'influence de l'environnement et modéliser le processus stigmergique, nous intégrons dans P un paramètre correspondant à l'état de l'environnement perçu par l'agent : $P : A \times E \rightarrow [0,1]$ où E est l'environnement perçu. Ainsi, les perceptions que l'agent peut avoir de son environnement modifient les probabilités associées à certaines actions pour rendre compte du fait que certaines sont défavorisées ou favorisées dans un contexte donné.

4. Mise en œuvre pour la construction d'une toile d'araignée virtuelle

Nous définissons le comportement d'un agent solitaire à partir de celui d'*Agelena labyrinthica*, et le paramétrons pour tenir compte de l'environnement. Dans un

premier temps, nous nous préoccupons d'un individu solitaire puis envisagerons le passage du solitaire au social.

L'environnement initial est modélisé sous la forme d'une grille carrée, chaque case étant associée à un piquet d'une certaine hauteur (cf figure 3). L'agent (ici une araignée) ne peut faire que deux types d'actions indépendantes (i.e., il peut faire ces 2 types d'actions en même temps) : se *déplacer* sur une case voisine et *poser un fil de soie*. Cette dernière action n'est pas sensible aux contraintes de l'environnement, nous nous focaliserons donc sur le déplacement. Une araignée pourra se déplacer de case en case. Les fils, lorsqu'ils sont posés, sont supposés l'être toujours au sommet du piquet.



Figures 3 et 4 : Interface du simulateur avec un environnement sans toile ; vue d'une toile artificielle.

4.1. Comportement individuel simple

Nous supposons le comportement réduit à huit actions équiprobables : les déplacements selon les huit cardinalités dans l'une des cases adjacentes ; ainsi qu'une action de probabilité constante dans le temps et dans l'espace : poser un fil.

En ce qui concerne notre modèle nous avons donc $A = \{\text{Nord, Sud, Est, Ouest, NordEst, NordOuest, SudEst, SudOuest}\}$ et $P(a) = 1/8 \quad \forall a \in A$.

De manière plus opérationnelle, le comportement lors de la simulation peut se ramener aux règles comportementales suivantes exécutées en séquence et indéfiniment :

R1 : choisir une direction au hasard et se déplacer d'une case.

R2 : poser aléatoirement un fil.

Ce comportement, bien qu'étant assez éloigné de la réalité biologique, nous permettra de mesurer l'impact de la stigmergie sur l'activité de construction.

4.2. Comportement stigmergique

Nous introduisons maintenant dans ce comportement l'influence de l'état de l'environnement. Lorsqu'un fil de soie est posé il permet de rejoindre une autre case pas forcément adjacente. Le comportement est alors décrit par des déplacements dans de « nouvelles directions ».

On introduit alors le fait que le comportement de l'araignée peut être de deux types : suivre un fil ou aller sur une case adjacente. Nous appellerons P_{fil} la probabilité d'avoir un comportement de type « *suivre un fil* », ce paramètre modélise l'attraction de la soie. On obtient alors un comportement qui est conditionné par le comportement antérieur de l'agent lui-même ou de ses congénères du fait de la présence des fils.

La nouvelle règle comportementale R'1 de déplacement est alors la suivante :

- 1) choisir aléatoirement en fonction de P_{fil} le type de comportement ;
- 2) dans le cas « *suivre un fil* » : choisir de manière équiprobable de suivre l'un des fils partant de la case courante ;
dans le cas « *aller sur une case adjacente* » choisir de manière équiprobable de se rendre sur l'une des cases adjacentes.

Dans le cas où il n'y a pas de fil ; on se ramène au cas de la règle comportementale R1.

4.3. Comportement social

Le comportement social ne demande aucune extension du modèle puisque l'attraction pour la soie n'est pas fonction de l'individu qui l'a produite. Il suffit donc au niveau de la simulation de permettre la présence simultanée de plusieurs agents dans l'environnement.

4.4. Expérimentation

Les résultats sont obtenus à partir d'un simulateur écrit en Java qui implante le comportement décrit par les règles R'1 et R2. Le comportement non contraint par l'environnement (règle R1) est obtenu en annulant P_{fil} .

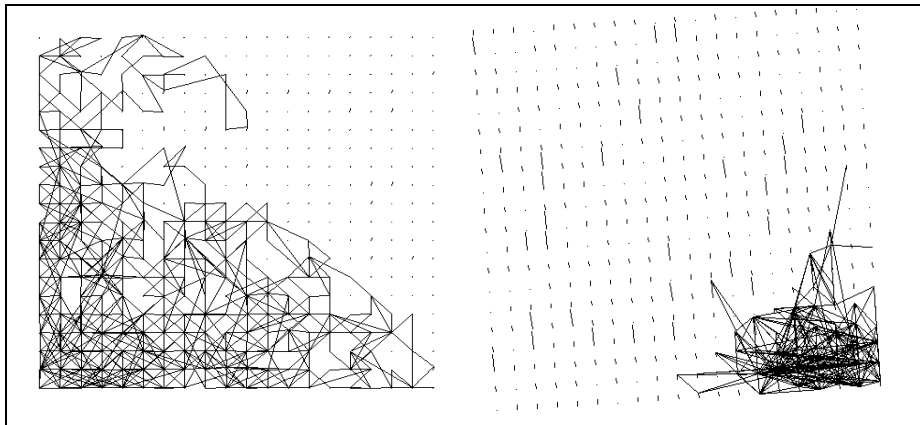
Les expérimentations ont été entreprises afin d'étudier l'impact du processus stigmergique sur la coordination d'activités et montrer que l'on peut (dans le cas des araignées sociales) obtenir des comportements collectifs à partir de comportements solitaires pour peu qu'il y ait une tolérance réciproque des individus.

Nous avons entrepris plusieurs séries d'expérimentations en faisant varier P_{fil} . La première série fut consacrée au cas solitaire, la seconde au cas de plusieurs araignées.

5. Résultats

5.1. Point de vue biologique

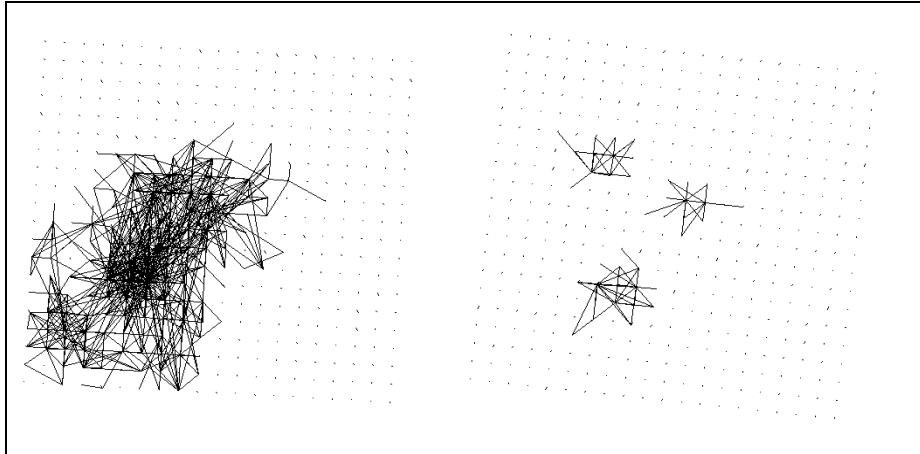
L'ensemble des résultats, que nous avons pour l'instant, est qualitatif mais non quantitatif, c'est à dire, que les résultats obtenus vont dans le sens des observations des biologistes mais il reste à mieux cerner l'influence des paramètres pour établir un lien plus précis entre simulation informatique et réalité biologique. La toile de la figure 4 est visuellement semblable pour un biologiste aux toiles observées réellement construites.



Figures 5 et 6 : Effet de l'attraction de la soie pour une araignée, vues de dessus avec $P_{fil}=0$ et $\frac{3}{4}$

La première série d'expérimentations met en évidence le rôle attractif de la soie sur le comportement de construction. Nous observons que la toile construite couvre plus ou moins l'environnement disponible (cf figures n° 5 et 6). L'attraction de la soie semble être l'un des facteurs qui explique la finitude de la toile (le second étant la probabilité de poser un fil). P_{fil} s'il est trop fort piège l'individu, la toile est alors trop peu étendue, s'il est trop faible la toile est trop étendue et peu cohérente selon les biologistes.

Concernant plusieurs individus, la construction d'une seule toile commune est possible ce qui va dans le sens des hypothèses biologiques. Cette construction est conditionnée par le facteur d'attraction de la toile. Lorsque P_{fil} est faible on retrouve des toiles non fonctionnelles, si P_{fil} est trop élevé, les individus sont piégés par leur propre toile et il y a juxtaposition de toiles (figures n° 7 et 8).



Figures 7 et 8 : Effet de l'attraction de la soie avec 3 araignées : $P_{fil} = \frac{3}{4}$ et 70/71.

5.2. Point de vue multi-agents

Les résultats précédents font apparaître un mécanisme simple de cohésion de groupe, à savoir l'attraction de la soie. Ce mécanisme est intéressant dans la mesure où il fait apparaître la notion de groupe social sans nécessiter de mécanisme de communication directe, d'attribution de rôles, de représentation interne du groupe dans l'agent. Cette propriété est le fruit de la mise en place dans l'environnement par les individus qui se déplacent, de structures finies. Ces structures en retour favorisent certains comportements de déplacement renforçant la structure.

Cette approche stigmergique de l'interaction entre les agents et l'environnement montre que l'environnement est une composante essentielle pour permettre à un ensemble d'agents de se coordonner et de s'auto-organiser. Dans ce cadre, la conception d'un système multi-agent ne peut se concevoir qu'en associant étroitement agent et environnement. L'apparition de structures (que l'on peut envisager comme une solution au problème posé au système) est conditionnée par l'ébauche d'une construction par un individu dans l'environnement, celle-ci déclenchant et orientant le comportement des autres membres du groupe.

L'avantage de ce modèle de coordination est sa simplicité, sa validité quel que soit le nombre d'individus et sa robustesse aux variations de l'environnement. De plus, il repose sur des modèles d'agents peu évolués puisque sa mise en œuvre peut se ramener à des règles de types stimulus-réponses probabilistes.

6. Conclusion

Nous avons présenté un mécanisme de coordination par le biais de l'environnement et avons illustré sa mise en œuvre par la simulation de l'activité de construction de toile chez les araignées. Les principales qualités de ce mécanisme sont sa simplicité, sa validité quel que soit le nombre d'individus, sa robustesse aux variations de l'environnement et la simplicité du modèle d'agents sous-jacent.

L'un des intérêts de ce travail est la proposition d'un modèle social original inspiré des araignées sociales. Ce modèle nous semble particulièrement propice à l'étude des caractéristiques individuelles nécessaires à l'apparition de la vie sociale et à la coopération. Le travail présenté ici constitue une étape dans une démarche méthodologique où l'on part de mécanismes simples pour aboutir à des résultats complexes. Nous continuons cette démarche par l'étude d'autres phénomènes biologiques chez *Anelosimus eximius*.

Actuellement, nous travaillons d'un point de vue biologique à l'obtention de résultats quantitatifs. Pour cela, nous utilisons le simulateur pour analyser et quantifier l'influence des différents paramètres du modèle (probabilité de poser un fil, coefficient d'attraction de la soie) sur les toiles construites (surface, densité de toile).

D'un point de vue multi-agent, les perspectives sont l'application de ce modèle pour de la résolution de problèmes tels que la coordination au sein d'un ensemble de robots mobiles ; et l'extension du modèle à la stigmergie qualitative.

7. Remerciements

Nous remercions Stéphane Clévenot pour la réalisation du simulateur et le GIS Sciences de la cognition pour son soutien dans le cadre du projet agrégation, synchronisation et coopération dans les systèmes multi-agents.

8. Bibliographie

- [BON 94] BONABEAU E. & THERAULAZ G., *Intelligence Collective*, Paris, Hermès, 1994.
- [BON 97] BONABEAU E., THERAULAZ G., *Auto-organisation et comportements collectifs : la modélisation des sociétés d'insectes*, Auto-organisation et comportement, Hermes , 1997.
- [DEN 89] DENEUBOURG J.L., GOSS S., *Collective patterns and decision making*, Ethol. Ecol. Evol., 1: 295-311, 1989.
- [DEN 91] DENEUBOURG J.L., GOSS S., BECKERS R., SANDINI G., *Collectively self-solving problems*, in Self organization, emergent properties and learning, ed. A. Babloyantz, Plenum, 1991.
- [DOR 96] DORIGO M, MANIEZZO M ., COLORNI A, *The ant system : optimization by a colony of cooperating agents*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics part B : cybernetics 26(1),pp29-41,1996.

- [DRO 93] DROGOUL A., *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes*, Thèse de l'Université P et M Curie, 1993.
- [DRO 95] DROGOUL A., *When ants play chess (or can strategies emerge from tactical behaviours ?)*, in From reaction to cognition, C Castelfranchi and JP Muller Eds., Lecture Notes in A.I., Springer, 1995.
- [DRO 98] DROGOUL A., FRENEAU D., *Métaphore du fourragement et modèle d'exploitation collective de l'espace sans communication ni interaction pour des colonies de robots autonomes mobiles*, pp99-114, Actes des JFIADSMA'98, Hermès, 1998.
- [DUR 98] DURY A., LE BER F., CHEVRIER V., *A reactive approach for solving constraint satisfaction problems: assigning land use to farming territories*, in Agents Theories, Architectures and Languages 98. Paris, juillet 1998.
- [EPS96] EPSTEIN J.M., AXTELL R., *Growing artificial societies*, MIT Press, 1996.
- [FEN 98] FENET S., HASSAS S., *Une approche multi-agent de résolution de problèmes par interaction : cas de l'équilibrage dynamique multi- critères*, pp115-132, Actes des 6èmes JFIADSMA, JFIADSMA'98, Hermès, 1998.
- [FER 90] FERBER J., JACOPIN E.. The framework of eco problem solving. In *Proceedings MAAMAW'90*, 1990.
- [FRA 92] FRANCK N., WILBY A., SILVERMAN B.W., TOFTS C., *Self organizing nest construction in ants: sophisticated building by blind bulldozing*. Anim . Behav., 44:357-375, 1992.
- [GRA 59] GRASSE P. P., *La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez Bellicositermes natalensis et Cubitermes sp., La théorie de la stigmergie : essais d'interprétation du comportement des termites constructeurs*. Ins. Soc. , 6: 41-84, 1959.
- [KRA] KRAFFT B., BERNARD A., *travaux non publiés*.
- [LE PAG 97] LE PAGE C., GINOT V., *Vers un simulateur générique de la dynamique des peuplements piscicoles*, pp189-209, Actes des JFIADSMA'97, Hermès, 1997.
- [RES96] RESNICK, M.). *Beyond the Centralized Mindset*. Journal of the Learning Sciences, vol. 5, no. 1, pp. 1-22., 1996.
- [SAF 97] SAFFRE F., KRAFFT B., DENEUBOURG J.L., *What are the mechanisms involved in the emergence of cooperativity ? The spider model*, Auto-organisation et comportement, Hermes, 1997.
- [SAF] SAFFRE F., FUREY R., KRAFFT B., DENEUBOURG J.L., *Collective choice and migration in social spiders*, Journal of Theoretical Biology (sous presse).
- [THE 97] THERAULAZ G., BONABEAU E., *La modélisation du comportement bâtisseur des insectes sociaux*", Auto-organisation et comportement, Hermès, 1997.