

Une Approche Bio-mimétique pour la Segmentation d'Images

Inspiration des Araignées Sociales

Safia Djemame ¹, Mohammed Batouche ²

¹ Département Informatique, Université Ferhat Abbas, Sétif 19000, Algérie

s_djemame@yahoo.fr

² Computer Science Department,

CCIS-King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia

batouche@ccis.edu.sa

Résumé. On explore le domaine de la vie artificielle qui ouvre de nouveaux horizons pour trouver des solutions bio-inspirées à des problèmes de traitements d'images. Outre les fourmis qui ont été utilisées avec succès, nous explorons une nouvelle approche basée sur l'interaction d'araignées sociales, où on adapte la construction collective de toile à une segmentation d'image en région. Les araignées ont été utilisées avec succès pour extraire des régions sur des images à niveaux de gris. Nous reprenons cette méthode et essayons de l'adapter pour une segmentation d'images. Les araignées qui sont considérées comme des agents simples, autonomes, à perception limitée, communiquent par stigmergie de la soie qu'elles tissent, et construisent ainsi plusieurs toiles assimilables à des régions sur une image.

Mots clés : segmentation d'images, vie artificielle, système multi-agents réactifs, bio-mimétisme, intelligence en essaim, stigmergie, araignées sociales.

1 Introduction

La segmentation des images constitue le cœur de tout système de vision et une étape importante dans le processus d'analyse des images. Elle a pour objectif de fournir une description des objets contenus dans l'image par l'extraction de différents indices visuels tels que les contours des objets, les régions homogènes, les objets 3 D. Ils seront exploités ensuite pour une description symbolique de la scène permettant une interprétation et éventuellement une prise de décision.

La phase de segmentation d'images n'est pas considérée comme un but en soi, mais dépend fortement aussi bien du type de traitement fixé par l'utilisateur sur les objets présents dans l'image, que de la nature de l'image (présence de bruit, présence de zones texturées, contours flous...), ainsi que des primitives que l'on cherche à extraire de l'image et qui dépendent des opérations situées en aval de la segmentation (localisation, calcul 3D, reconnaissance de formes, interprétation).

Ces aspects, ainsi que les contraintes d'exploitation (complexité algorithmique, aspect temps réel), justifient la multiplicité des techniques développées dans le domaine de la segmentation d'image. Jusqu'à ce jour, il n'existe pas de méthode universelle de segmentation d'images. Toute technique n'est efficace que pour un type d'image donné, pour un type d'application donné, et dans un contexte informatique donné. En raison de ces contraintes, les diverses stratégies de segmentation qui ont été proposées ont affirmé leurs insuffisances et leurs limitations, il est donc tout à fait normal d'explorer de nouveaux horizons et trouver de nouvelles méthodes plus souples et plus efficaces.

Le domaine de la complexité, la vie artificielle représente un nouvel axe de recherche pour plusieurs disciplines. En effet, les notions de chaos, non-linéarité, auto-organisation et propriétés émergentes ouvrent de nouveaux horizons de recherche dans le domaine du traitement de l'information. On cherche à modéliser des propriétés du vivant : faculté d'adaptation, l'apprentissage, l'intelligence... l'objectif étant de construire des systèmes robustes, dynamiques, capables de s'exécuter seuls, d'ajuster leurs comportements face à des circonstances variées, et de préparer leurs ressources pour gérer au mieux leur charge de travail [13].

2. La Vie Artificielle, Inspiration des Systèmes Naturels :

Le terme de vie artificielle a fait son apparition officielle en 1987 dans le premier séminaire ARTIFICIAL LIFE, où Christopher Langton présenta ses automates cellulaires, répliques artificielles de cellules vivantes, capables de se reproduire seuls pour former des structures organiques proches des colonies de coraux.

La vie artificielle est généralement appréhendée de deux manières [9] :

- D'une part, on utilise les méthodes et les outils informatiques pour les recherches en biologie, on analyse les systèmes naturels et on essaie de produire des modèles informatiques les représentant, exemple : la simulation évolutionnaire de la dynamique des éco-systèmes, changement de population dans un système prédateur-proie.
- D'autre part, il s'agit de concevoir de nouveaux types de calculs avec des techniques inspirées de la biologie, ainsi ont vu le jour des outils tels que : les réseaux neurone artificiels (ANN), les algorithmes génétiques (GA), les systèmes multi-agents (SMA), le calcul basé sur les essaims (swarm based computing). Ces nouvelles méthodes ont en commun les qualités héritées de leur source d'inspiration naturelle : la robustesse, la tolérance aux bruits, la dynamique, la flexibilité et l'adaptabilité.

2.1 Intelligence en Essaim

Depuis quelques années, les chercheurs informaticiens ont trouvé dans la vie artificielle une source d'inspiration pour la conception de nouveaux systèmes informatiques. Il s'agit de puiser dans les comportements des êtres naturels de nouvelles approches pour la résolution de problèmes difficiles. Le rôle de l'informaticien est d'observer et comprendre les mécanismes et processus qui régissent les comportements dits « intelligents » de ces individus pour la résolution des problèmes courants, puis extraire à partir de ces études des modèles implantables sur des machines dont les résultats pourront être validés par rapport à ceux observés dans la nature. En Biologie par exemple, de nombreux systèmes naturels composés d'individus simples autonomes exhibent des aptitudes à effectuer des tâches qualifiées de complexes sans contrôle global. De plus, ils peuvent s'adapter à leur milieu soit pour y survivre, soit pour améliorer le fonctionnement du collectif.

C'est le cas des colonies d'insectes sociaux [8] tels que les termites, fourmis, abeilles [3], ou araignées et rats [4] qui font effectivement preuve de remarquables capacités pour effectuer des tâches telles que : la construction de nids complexes, la construction de pont, la recherche de nourriture, la capture de proies... L'étude des déplacements collectifs de vols d'oiseaux migrateurs ou de bancs de poissons montre également le fait que la tâche collective est le résultat des interactions des individus autonomes [22]. Le fonctionnement du système immunitaire est lui aussi représentatif du fonctionnement d'un système complexe composé d'un ensemble d'agents autonomes. Tous ces systèmes naturels présentent un point commun : l'émergence d'un comportement global collectif et complexe à partir de simples interactions entre des individus simples dotés d'une intelligence très réduite et ne possédant qu'une vision très partielle de leur environnement [3]. Ce comportement émergent leur permet de résoudre collectivement des problèmes très complexes.

2.2 Stigmergie

Un des mécanismes de coordination globaux le plus puissant dans des systèmes distribués biologiques est la stigmergie, qui est d'origine de deux mots grecs stigma qui est " signe " et ergos qui est " travail ", ce mot a été

donné par Grassé [15] à l'occasion de l'étude de la construction du nid chez les termites. 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, l'état de la construction est le stimulus, et la réponse est l'activité de construction. Autrement dit, « l'œuvre guide l'ouvrier ». La stigmergie est observée en force chez les fourmis (phéromone), et chez les araignées (soie).

2.3 Travaux Inspirés des Systèmes Naturels :

Plusieurs modèles informatiques inspirés des sociétés d'animaux ont été élaborés et utilisés pour la résolution de problèmes, citons: [5]

- les colonies de fourmis pour l'optimisation (TSP), tri collectif, transport collectif, ont donné naissance aux algorithmes des colonies de fourmis (ACO)
- les nuages d'oiseaux et les bancs de poissons ont été une source d'inspiration pour la mise en place de comportements de déplacement dans l'animation vidéo par exemple, ils ont été à l'origine des algorithmes à essaims de particules
- les rats : allocation de ressources dans un réseau [10]
- d'autres modèles comme les colonies d'abeilles, les guêpes, ou les termites [15], les loups sont aussi cités dans la littérature.

3. Etat de l'Art, Travaux Connexes:

Les systèmes multi-agents (SMA) offrent une architecture permettant de faire travailler plusieurs entités autonomes sur un même problème (en coopération ou en parallèle) à l'aide de protocoles de communication et de processus d'échange d'informations. Le paradigme Multi-agents a été largement utilisé avec succès ces dernières années dans le domaine de traitement d'images en général et dans la segmentation en particulier.

La plupart des travaux ayant proposé des SMA en vision par ordinateur ont opté pour l'approche agents situés. Ce choix est motivé par le fait que l'information brute traitée en vision artificielle est locale, située au niveau des pixels. L'image représente l'environnement dans lequel les agents sont placés pour l'explorer à la recherche des différents objets qui représentent son contenu. Les agents parcourent l'image à la recherche d'informations géométriques bien définies, coopèrent pour échanger les informations manquantes, et prendre des décisions concernant les sites de l'image analysée. Cette approche est novatrice car elle va à l'encontre de la conception classique centralisée et planifiée des tâches d'analyse d'images. Elle met en relief la distribution du calcul, l'adaptation locale des traitements et la richesse des coopérations possibles entre les aspects contour et région.

Dans la suite, nous exposons quelques travaux utilisant l'approche multi_agent pour la segmentation d'images.

Bellet [1] propose un système multi-agents spécialisés pour la segmentation d'images tel que certains agents exécutent une croissance de régions alors que d'autres exécutent un processus de détection de contours. La coopération entre les deux types d'agents est dynamique et permet de propager une information quand elle devient nécessaire pour une prise de décision.

Dans le même ordre d'idée, Boucher [2] propose d'utiliser des agents spécialisés pour la segmentation et l'interprétation de séquences d'images cytologiques en mouvement. C'est une approche distribuée où chaque agent est spécialisé pour la reconnaissance d'un concept de l'image. Le modèle générique d'agents est composé de quatre comportements de base : perception croissance de région ou de suivi de contours), interaction fusion des primitives, différenciation interprétation des primitives, reproduction stratégie de focalisation des agents. Les agents du système sont asynchrones et concurrents. Un agent ne travaille que sur une composante d'une image et peut accéder à toutes les informations du système soit de sa propre image ou celle de l'image précédente. L'utilisateur interagit avec le système par le biais de séquenceur qui gère l'exécution des différents agents du système.

Germond propose une méthode de segmentation coopérative pour la segmentation des images IRM [14]. Une segmentation en régions de la matière grise et de la matière blanche est effectuée par des agents spécialisés à

partir d'un modèle déformable du cerveau construit au préalable. A l'issue de la segmentation en régions de ces tissus, le contour du cerveau plus précis est obtenu par des agents contours qui utilisent la méthode des contours actifs. A la fin, un retour complet sur le processus de segmentation est considéré cette fois initialisé par le contour reconstruit lors de la phase précédente.

Dans [18], la segmentation d'image est abordée sous l'angle des automates cellulaire. Il s'agit de générer une population d'agents réactifs et de l'adapter de génération en génération à la distribution de points rencontrés dans l'image. Les agents ont une perception très réduite de leur environnement et sont dotés de deux types de comportement : la diffusion et la reproduction de manière à s'adapter au mieux aux variations locales de l'image. Si un agent perçoit un stimulus dans son environnement, c'est à dire s'il est placé sur un pixel remplissant certains critères caractérisant l'appartenance à un contour ou à un segment homogène, il l'étiquette et déclenche un comportement de reproduction, de façon à poursuivre l'exploration de l'image par ses agents fils. S'il ne perçoit pas de stimulus, il déclenche un comportement de diffusion, au cours duquel il se déplace dans son environnement proche à la recherche d'un pixel satisfaisant ses critères. Ces idées sont reprises dans [7], qui propose de combiner une approche par croissance de régions dans les zones faciles à segmenter et l'approche génétique dans les zones plus délicates. La coopération consiste ici à choisir automatiquement, en fonction de critères d'homogénéité locaux, laquelle des deux méthodes l'agent va appliquer.

Duchesnay [12] s'appuie sur la structure de pyramide irrégulière pour gérer le processus de fusion de régions et assurer la convergence de la segmentation; une coopération région-région assez sophistiquée est mise en œuvre, mais qui ne tire pas suffisamment parti de l'information contour. Un des aspects intéressants de son approche est l'utilisation d'une procédure de décimation (récursive) pour le passage du niveau k au niveau k+1. La pyramide se construit en partant de la base qui représente l'image pré segmentée (par exemple avec l'algorithme Quadtree jusqu'au dernier niveau de la pyramide comportant le minimum d'information. Les niveaux de cette pyramide sont des graphes d'adjacence de régions.

D'autres systèmes multi_agents inspirés du comportement des animaux sociaux ont été proposés dans la littérature. On cite les travaux de Carden [9] qui propose une approche de segmentation d'images basée sur les idées de Reynolds [20], pour la détection des contours des régions dans une image simple.

Dans une autre approche, Ouadfel et Batouche [19] utilisent les systèmes fournis "Ant Colony Optimization or Ant System" comme un outil de modélisation pour concevoir un algorithme de segmentation d'images, basée sur les champs de Markov (MRF : Markov Random Fields), appelé ACS-MRF (AntClust Segmentation-Markov Random Fields). Dans cette approche, une colonie de fourmis artificielles recherche une solution globalement optimale selon la méthode d'estimation MAP(critère d'estimation Maximum A Posteriori). En fait, l'ACS-MRF est une approche distribuée basée sur une population des fourmis considérées comme des agents réactifs. Chaque agent (fourmi) construit un ensemble de solutions possibles en utilisant l'information de la phéromone accumulée par les autres fourmis dans une matrice commune appelée matrice de phéromone. Après un certain nombre d'itérations, la meilleure partition représentant la valeur optimale d'une fonction d'énergie MAP est déterminée. Un algorithme de recherche locale simple est utilisé dans le but d'améliorer la qualité de la solution trouvée par une des fourmis en rendant la convergence de l'algorithme plus rapide.

Dans [11], l'objectif est de segmenter des images à niveau de gris, par construction de régions homogènes et connexes en utilisant des agents situés qui coordonnent leurs activités et communiquent leurs résultats par des interactions stigmergiques. L'approche utilise deux types d'agents: détecteurs et système, les agents détecteurs se déplacent sur l'image et marquent leurs emplacement; au départ, déplacements non coordonnés(au hasard sur les pixels voisins), puis après l'apparition de quelques régions marquées, les déplacements deviennent guidés par le travail collectif et les réactions stigmergiques.les agents système gèrent la dynamique de phéromone, basée sur le modèle de croissance de régions.

4. Présentation de L'Approche Araignée

4.1 Le Modèle Biologique

Parmi les 35000 espèces d'araignées connues, il n'existe qu'une quinzaine d'espèces sociales. Toutes ces espèces, sauf une dont le caractère coopératif n'est pas clairement établi, tissent des structures soyeuses

communes, ce qui souligne le rôle de la soie dans la réalisation des tâches collectives. Ces araignées ne présentent aucune particularité morphologique par rapport aux espèces solitaires. Ces araignées présentent toutes les caractéristiques éthologiques des espèces solitaires et le phénomène social résulte simplement d'une coordination d'activités individuelles préexistantes chez les espèces ancestrales.

Les deux formes d'activités collectives les plus impressionnantes par leur efficacité et qu'on retient parmi les manifestations sociales de ces araignées (soins aux jeunes, défense contre les prédateurs, émigration, compétition intra-coloniale, adaptation du piège aux besoins de la colonie,..) sont la construction commune de toile et la capture des proies.

Les araignées sociales de Guyane, qui ne mesurent que 5mm, construisent des édifices soyeux dépassant souvent 100 m³ de volume (les dimensions extrêmes s'étendent de 1 litre à 1200 m³) [16]. En dépit de la variabilité des formes de ces structures, qui suggère une influence des contraintes physiques imposées par l'environnement végétal, on y décèle des règles architecturales simples mais immuables. Toutes ces colonies sont composées d'une nappe horizontale en forme de hamac, surmontée d'un réseau tridimensionnel de fils non gluants ayant pour fonction d'arrêter les insectes dans leur course (figure 1).



Figure 1 : toile d'araignées *Anelosimus eximius*

Dans un tel milieu, la modélisation par système multi-agents permet d'obtenir une nappe et un réseau en utilisant des algorithmes comportementaux simples [4]. L'araignée virtuelle se déplace au hasard de piquet en piquet en tissant un fil. Le fil est fixé aux sommets des piquets. Cependant la structure soyeuse obtenue occupe la totalité de l'espace virtuel disponible. L'introduction d'une règle supplémentaire, vérifiée chez les araignées sociales et solitaires, l'attraction que la soie exerce sur l'araignée, permet d'obtenir une toile de dimension finie n'occupant pas la totalité de l'espace virtuel. Cette attraction correspond à la probabilité qu'a l'araignée qui rencontre un fil déjà posé de suivre ce fil ou de le quitter. Les fils de soie posés correspondent à une modification de l'environnement assimilable à une " mémoire " des trajets déjà effectués qui incite l'araignée à rester dans le secteur déjà balisé de fils.

Ce comportement sera modélisé puis simulé dans la suite de ce travail.

4.2 Le Modèle Informatique

La construction collective de toile chez les araignées *Agelena Labyrinthica* a été transposée en modèle informatique et a été appliquée à une détection de régions dans des images à niveaux de gris [6]. Dans le paragraphe suivant, nous décrivons la modélisation et la simulation informatique de ce phénomène.

4.2.1 La modélisation:

L'environnement est une grille carrée composée de piquets de différentes hauteurs (figure 2). Initialement il n'y a pas de fils. L'ajout des fils tissés se fait dynamiquement.

- agent: araignée, possède 2 items comportementaux indépendants: déplacement de piquet en piquet, et pose de soie au sommet d'un piquet (figure 3).

Modélisation incrémentale du déplacement :

- Les étapes : -modèle 0 : aléatoire et insensible au contexte.
 - modèle 1 : choix probabiliste d'un type de mouvement : vers un piquet adjacent ou suivre un fil.
 - modèle 2 : choix probabiliste d'un mouvement donné (prise en compte du nombre de fils)
- Dynamique du système: coordination par stigmergie: déplacement influencé par la soie: plus il y a de la soie vers une position plus celle-ci a de la chance d'être choisie.

Pas de centralisation: dynamique valide pour les cas solitaire et social.

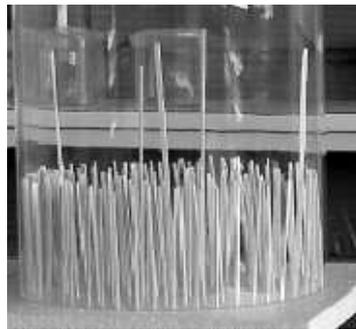


Figure 2. Dispositif expérimental

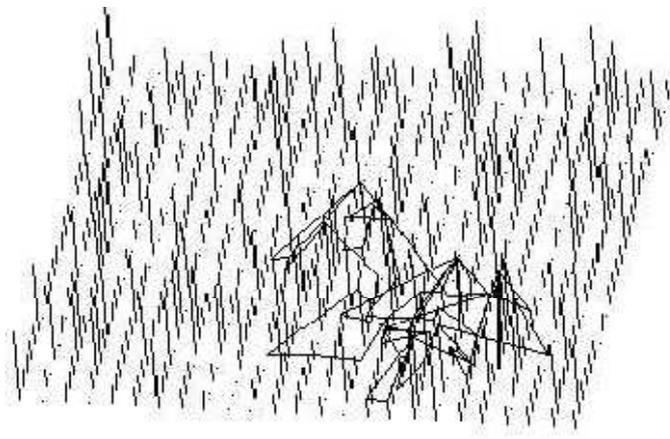


Figure 3. Vue d'une toile artificielle

Observations et Conclusion Partielle:

- c'est un modèle social original, la stigmergie est basée sur la soie (pas de phéromone), simple: peu d'états internes et peu d'items comportementaux, pas de castes (spécialisation);
- Rôle de l'attraction pour la soie: finitude ou non de la toile, densité en soie.

4.2.2 Expérimentation : Simulateur JAVA

a) environnement :

- image à niveaux de gris: tableau de pixels chacun avec son niveau de gris (image originale : fig 4)
- Fixation de fils de soie entre les pixels.

À la fin: région: ensemble de pixels, représentée par une toile.

b) agents: ce sont les araignées, ils ont 3 items comportementaux:

- mouvement: selon l'attraction pour la soie et le nombre de fils.
- Fixer la soie: selon le niveau de gris.
- Homing (retour sur la toile): probabilité constante, heuristique ajoutée pour restreindre l'exploration aux pixels connectés.

Etude de l'influence des Paramètres (figures 5 et 6) :

- pdragline: attraction pour la soie, influe sur la couverture de la toile/ taille de la région.
- level of reference : niveau de gris du pixel
- selectivity (fixer la soie): homogénéité de la région
- backprobability: retour sur la toile, obligatoire pour obtenir un ensemble connecté de pixels
- nombre d'araignées, nombre de pas de simulation.....

c) dynamique du mouvement : stigmergie par attraction de la soie.

Résultats bruts :

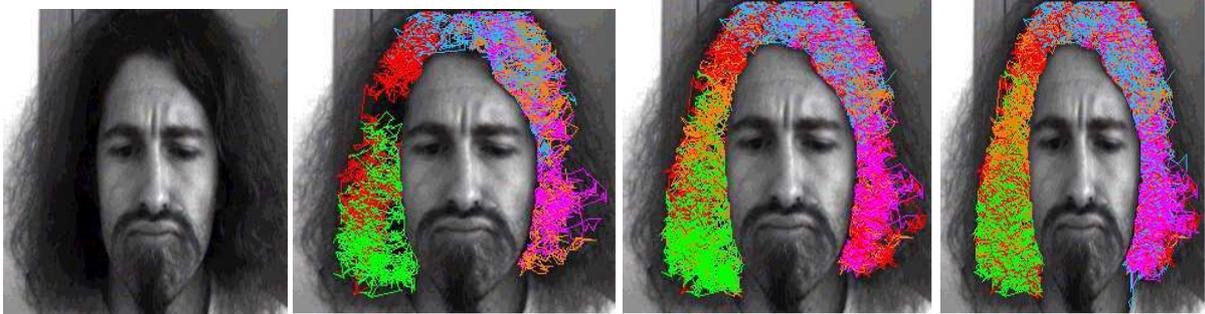


Figure 4 : image originale

Figure 5 : régions résultant de la simulation de tissage de toiles (5 agents chacun défini

reflevel 16 , selectivity 0.1, backproba 0.2, pdragline 0.1 après 5000 10000 20000 cycles)

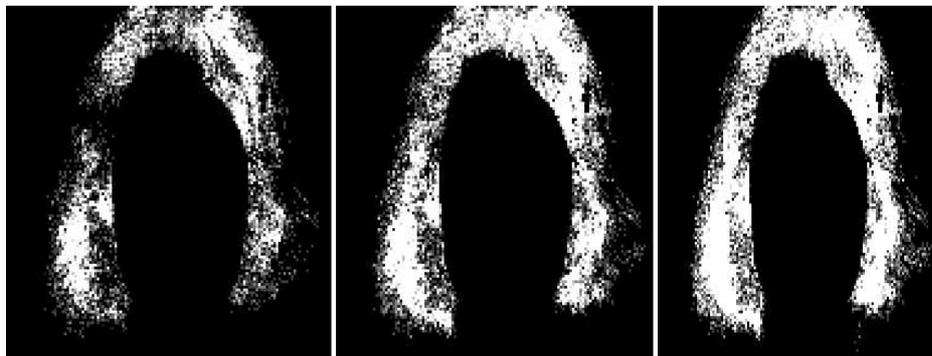


Figure 6 : les densités correspondantes

5. Commentaires:

Après cette expérience, nous sommes en mesure de faire les constatations suivantes :

- C'est un modèle de coordination simple, valide quel que soit le nombre d'individus
- Il est robuste face aux variations de l'environnement
- Ce sont des agents simples, peu évolués ----> la mise en œuvre peut se ramener à des règles de type stimulus-réponse probabilistes.
- capacité à extraire une région sur des images réelles et bruitées.
- Utilisation de quelques heuristiques pour fixer les paramètres
- capacité à détecter simultanément plusieurs régions;

Si cette méthode fournit des résultats satisfaisants avec des images variées, son principal défaut est qu'il est nécessaire de déterminer expérimentalement les valeurs de paramètres conduisant aux meilleurs résultats. En plus, il faut évaluer les résultats en les comparant avec d'autres méthodes de traitement d'images. Donc, ce travail constitue un premier pas et doit se poursuivre.

6. Notre Approche :

Nous avons présenté une approche nouvelle pour la résolution collective de problèmes, inspirée du mécanisme de tissage de toile chez les araignées sociales, qui a été adaptée avec succès à l'extraction de régions dans des images à niveau de gris. Cette approche mérite qu'on s'y penche davantage et qu'on y creuse encore plus pour trouver des solutions à d'autres problèmes. Parmi les perspectives intéressantes sur laquelle nous travaillons, c'est l'adaptation de cette méthode à une segmentation d'images. En effet, la distinction de la soie entre les individus peut être utilisée pour différencier ou fusionner des régions : deux toiles se recouvrant complètement pourront correspondre à une même région, deux toiles distinctes à deux régions différentes, pour un piquet appartenant à plusieurs toiles qui se chevauchent, les densités respectives des soies mesurent la probabilité d'appartenance du piquet à ces régions. De plus, la construction de régions par les agents araignées se fait pixel par pixel (piquet par piquet), ce qui est assimilable en termes de technique de segmentation d'images, à une construction par région, où la région sur l'image est obtenue par agrégation pixel par pixel, c'est cet aspect qui semble le plus pertinent pour être exploité pour segmenter une image, détecter des régions avec des textures différentes, ou dans des images en couleur. De plus on peut envisager l'extension du formalisme pour intégrer la stigmergie qualitative en introduisant des états internes dans l'agent. Ce travail est en cours.

Références

1. Bellet F. : Une approche incrémentale, coopérative et adaptative pour la segmentation des images en niveau de gris. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, juin (1998).
2. Boucher.A : Une approche décentralisée et adaptative de la gestion d'informations en vision. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble I. 15 Février (1999).
3. Bonabeau E. , Theraulaz G. : Auto-organisation et comportements collectifs : la modélisation des sociétés d'insectes, Auto-organisation et comportement, Editions Hermès, (1997).
4. Bourjot.C, Chevrier.V, Bernard.A, Krafft.B : Coordination par le biais de l'environnement : une approche biologique, In, actes des 7èmes JFIADSMA, St Gilles les Bains, pp 237-250, Hermès, (1999).
5. Bourjot.C, Chevrier.V : De la simulation de construction collective à la détection de régions dans les images à niveaux de gris : l'inspiration des araignées sociales, JFIADSMA, (2001).

6. Bourjot.C, Chevrier.V, Thomas.V: A new swarm mechanism based on social spiders colonies: from web weaving to region detection. *Web intelligence and agent systems: an international journal*, vol 1, pp 47-64, WIAS (2003).
7. Bureau.A, Garbay.C, Dojat.M : Coopération entre deux populations d'agents pour la segmentation d'images cérébrales. *ORASIS* (2001)
8. Camazine.S, Deneubourg.J.L , Franks.N.R , Sneyd.J , Theraulaz.G, Bonabeau.E : *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press,(2002).
9. Carden.T: *Image Processing with Artificial Life*, (2002).
10. Chevrier.V : Des phénomènes collectifs en biologie aux modèles de résolution collective de problème. *MCSEAI, 10^{ème} conference on software engineering and AI*, Oran, Algérie, (2008)
11. Djerou.L, Khelil.N, Batouche.M: La vie artificielle pour la segmentation d'images, *SETIT 2005 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 27-31,Tunisia* (2005)
12. Duchensnay.E : Agents situés dans l'image et organisés en pyramide irrégulière. Contribution à la segmentation par une approche d'agrégation coopérative et adaptative. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes-1 (2001).
13. Glize P. Bernon C., Camps V., Gleizes M.P. : La conception de SMA adaptatifs: contraintes et spécificités. Plateforme AFIA, Grenoble, juin (2001)
14. Germond.L : Trois principes de coopération pour la segmentation en imagerie de résonance magnétiques. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble I. 11 Octobre (1999).
15. Grassé.P.P : La reconstruction du nid et les interactions inter-individuelles chez les bellicocitermes natalenis et cubitermes, la théorie de la stigmergie - essai d'interprétation des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6 :41–81, (1959).
16. Krafft.B: Colony distribution of the social spider *Anelosimus eximius (Araneae, Theridiidae)* in French Guyana. *Insectes Sociaux* 36 : 173-182. (1989)
17. Langton.C: Preface. In C., editor, *Artificial Life II*, volume X of *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, pages xiii-xviii. Addison-Wesley, New York. (1992)
18. Liu.J, Tang.Y, Adaptive image segmentation with distributed behavior based agents, in: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21, No. 6, pp 544-551, juin (1999)
19. Ouedfel.S : Contributions à la Segmentation d'images basées sur la résolution collective par colonies de fourmis artificielles, thèse de doctorat de l'Université de Batna, juillet (2006).
20. Reynolds.C.W: Boids: Background and Update, in: *Boids (Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavioral Model)*, URL: <http://www.red3d.com/cwr/boids> 13th March (2002).
21. Richard.N, Dodjat.M, Garbay.C : Dynamic adaptation of cooperative agents for MRI brain scans segmentation. *Artificial Intelligence in Medicine - AIME'01* – p. 349-358 (2001).
22. Theraulaz.G, Spitz.F : *Auto-organisation et comportement*, Hermès, Paris, (1997).