

Robotique Collective : Implémentation d'un comportement d'agrégation stratégique inspiré de comportement des Cafards

Nehnouh Chakib , Debbat Fatima

Département d'Informatique
Faculté des Sciences et Technologie
Université Mustapha Stambouli à Mascara
B.P. 305

{nahnouhc,debbat_fati}@yahoo.fr

Résumé. L'exploration et l'exploitation collectives d'un environnement inconnu par un ensemble de robots font partie des applications parmi les plus populaires en Intelligence Artificielle Distribuée. De nombreux modèles ont été développés pour trouver des règles simples permettant à des robots d'exploiter leur environnement pour des tâches d'agrégation ou bien d'exploration et collecte. La métaphore la plus invoquée est celle des insectes, en grande partie parce que ces animaux ont développé des techniques collectives assez étonnantes. Nous adopterons dans cet article l'approche réactive pour concevoir un comportement d'agrégation stratégique d'un groupe de robots autonomes. Le comportement des Blattes pour le choix du site d'abri et de regroupement a été pris comme métaphore pour concevoir le comportement similaire chez les robots.

Mots clés: Robotique collective ; Robotique en essaim ; Agrégation ; Auto-organisation ; Émergence, Stigmergie.

1 Introduction

À ses débuts, l'Intelligence Artificielle a puisé son inspiration dans le comportement individuel de l'être humain, en cherchant à reproduire son raisonnement. Mais dans la nature, on observe bien des formes d'intelligence. Pourquoi ne pas prendre en compte une intelligence qui ne serait plus individuelle, mais collective ?

Les comportements collectifs réalisés par les insectes sociaux sont parmi les plus impressionnants du règne animal. A la base de la plupart de ces comportements collectifs, on retrouve un comportement d'agrégation qui favorise les interactions et les échanges d'informations entre les individus d'un groupe, et permet ainsi l'émergence de comportements collectifs complexes.

La nature est en effet pleine d'espèces animales organisées en société et capables d'effectuer des tâches d'une complexité impressionnante. Citons entre autres les fourmis, les termites, les blattes, les araignées, les abeilles, les bancs de poissons, les oiseaux ou encore les humains. La robotique en essaim est un domaine où des comportements bio-inspirés sont reproduits avec des robots. Nous présentons une

étude du comportement collectif des robots dans leur environnement, qui fait appel au principe de l'auto-organisation sur le plan collectif, tout en conservant une réalité biologique et un comportement émergent qui possède certaines propriétés qui sont essentiellement la *robustesse*, l'*extensibilité* et la *flexibilité*.

La nature de notre problématique nous a suggéré alors, de faire appel à des approches et techniques :

- L'usage du paradigme des multi-agents situés et de l'intelligence comportementale.

- L'usage de l'émergence comme mécanisme de contrôle et de coordination distribuée. Ceci permet la mise en œuvre du non linéarité des interactions intra-niveaux et inter-niveaux.

Le but de ce travail est la conception et implémentation d'un comportement réactif d'agrégation stratégique d'un groupe de robots autonomes. En robotique l'agrégation auto-organisée a été utilisée pour permettre à des groupes de robots de récolter et de trier des objets dispersés dans l'environnement ou pour leur permettre des déplacements et des regroupements coordonnés. Ce processus peut également conduire un groupe de robots aux capacités cognitives et sensorielles limitées à réaliser une décision collective.

Dans cet article, nous avons montré qu'un ensemble de comportements individuels simples qui conduise les Blattes à une agrégation forte et rapide, peuvent également conduire un groupe de robots au choix collectif d'un site d'abri.

Nous présenterons d'abord le contexte du problème, après quoi nous décrivons les métaphores adoptés et la problématique ; nous passerons en revue les travaux liés ; nous discutons les résultats obtenus et enfin les conclusions de ce travail et ses perspectives.

2. Robotique en essaim

La robotique en essaim est actuellement l'une des applications primaires de l'Intelligence Artificielle en essaim, les essaims fournissent la possibilité accrue de réalisation d'une tâche (tolérance aux erreurs), ainsi qu'une faible complexité des unités et enfin un coût faible au regard des systèmes robotiques traditionnels. Les domaines d'application de ces robots sont variés : vaisseaux spatiaux, inspection /maintenance, construction, agriculture ou médecine.

La figure 1 montre la taxonomie de la robotique en essaim [1] selon les axes suivants à savoir ; la modélisation, la conception de comportement, la communication, les études analytiques et les problèmes rencontrés.

A. L'axe de modélisation est divisé en automates à base de détecteurs, microscopiques, macroscopiques et les automates cellulaires.

B. L'axe de conception de comportement est divisé en haches non adaptives, d'étude et d'évolution.

C. Tandis que l'axe de communication est divisé en "interaction par l'intermédiaire des capteurs", "interaction par l'intermédiaire d'environnement".

D. La formation de modèle, l'agrégation, la formation à chaînes, auto assemblément les problèmes d'éviter de trou, de fourragement et d'auto déploiement sont discutés à l'axe de problèmes.

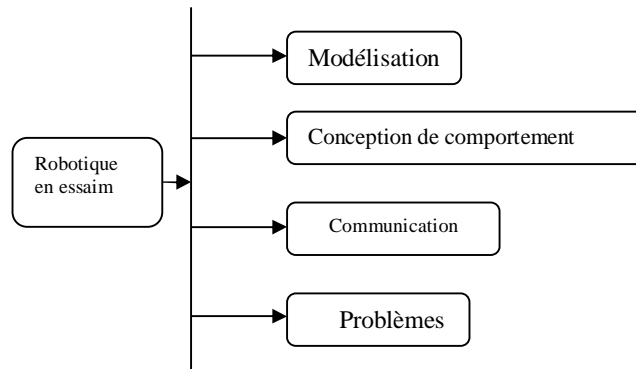


Fig. 1. Taxonomie de la robotique en essaim

2.1 Mécanismes de coordination :

Dans la robotique en essaim, il existe deux mécanismes de coordination qui sont : l'*auto-organisation* et *stigmergie*.

- **L'auto-organisation:** Souvent, dans beaucoup de systèmes adaptatifs complexes, les concepts d'émergence et d'auto-organisation sont utilisés conjointement [2]. L'émergence et l'auto-organisation, soulignent des caractéristiques différentes du comportement d'un système. Les deux phénomènes peuvent exister séparément, comme ils peuvent coexister dans un système dynamique.

L'émergence est donc un concept pluri-défini. Elle est généralement vue comme un phénomène où le comportement global d'un système résulte des interactions entre les parties locales de ce même système.

L'auto-organisation comme l'explique D. Sumpter [3], découle du fait qu'à partir de répétitions d'interactions simples entre individus et entre les individus et l'environnement, des comportements complexes au niveau du groupe peuvent émerger. Chaque individu, ne pouvant interagir qu'avec son environnement local, ne perçoit pas l'entièreté de la structure du groupe et ignore son rôle au sein de cette dernière. Bonabeau et al., cité dans [4], postule que « *n'importe quelle structure émergeant d'une série de répétitions d'interactions conduit à l'auto-organisation de celle-ci* ». *Les propriétés qui découlent de cette auto-organisation ne sont pas intrinsèques au système mais bien émergentes.*

Les deux concepts d'émergence et d'auto-organisation soulignent des propriétés différentes du comportement d'un système. Pour résumer, *l'essence de l'émergence est l'existence d'un comportement global nouveau par rapport aux composants du*

ystème. L'essence de l'auto-organisation est un comportement adaptatif qui acquiert et maintient d'une manière autonome un ordre croissant.

- **Stigmergie** : Le terme stigmergie fut introduit par le biologiste français Pierre-Paul Grassé en 1959, en référence au comportement des termites [5]. Grâce aux modifications de l'état de l'environnement (gradients de phéromones), les termites arrivent, sans régulation centrale, à communiquer et à coordonner leur action. Donc la stigmergie est une méthode de communication indirecte via l'environnement. D'autre part, il est surprenant de remarquer que des systèmes, quoique simples, peuvent afficher des comportements beaucoup plus complexes et de types très différents, en exploitant l'influence et les variations de l'environnement. La stigmergie est tout ce qui peut perturber, altérer ou modifier le comportement d'un individu selon des variations de l'environnement. Comme elle permet à une société d'animaux de s'organiser.

3. Métaphore d'agrégation

Plusieurs espèces d'animaux ont l'habitude de vivre en groupe, à certaines étapes ou pendant toute leur vie, durant certaines saisons ou pendant toute l'année. Les avantages de la vie en groupe sont relativement variés et nous pouvons signaler entre autres la défense contre la prédation, l'obtention de la nourriture et l'efficacité de la reproduction [6]. Cependant, il faut distinguer entre au moins deux types de collectivités vues dans la nature. L'agrégation d'un côté, est un regroupement d'animaux entre individus différents qui sont attirés par un endroit particulier ou par un stimulus précis de l'environnement. D'un autre côté, le gréganisme est la tendance des animaux à former des groupes sociaux comme dans les bancs de poissons, les bandes d'oiseaux et les troupes de mammifères, dont l'origine est l'attraction sociale [7]. Parmi les comportements collectifs auto-organisés, on trouve l'agrégation qui est certainement l'un des plus simples comportements. Les individus grégaires présentent une attraction réciproque ou inter attraction. Chaque espèce exerce une attraction spécifique sur ses congénères et reçoit d'eux en retour une attraction non moins spécifique.

Dans la robotique en essaim, on peut identifier un certain nombre de comportements simples qui sont à la base des comportements plus complexes et qui ont été traités d'une manière systématique: **dispersion, agrégation, mouvement collectif et décision collective** [8].

3.1 Travaux existants :

Agrégation: La majorité des applications en robotique en essaim demandent aux membres de robots de se regrouper.

Le problème est facile quand une approche de commande centralisée est employée mais le problème n'est pas insignifiant quand la commande distribuée est employée. Les robots devraient se comporter de façon autonome et devraient employer l'information locale pour agréger. L'agrégation a un rôle important pour beaucoup de systèmes biologiques parce qu'elle est à la base de l'apparition de diverses formes de

beaucoup de tâches collectives. Les exemples de l'agrégation dans les systèmes biologiques peuvent être trouvés dans [9].

Plusieurs travaux ont été réalisés on peut citer parmi eux :

1. Trianni et autres [10], ont essayé de résoudre le problème d'agrégation en utilisant un contrôleur probabiliste. Ils ont employé un de plus haut niveau de l'abstraction que les lectures de sonde et les commandes de déclencheur dont les éléments principaux s'appellent comme contextes (abstraction des données de sonde) et comportements (abstraction des commandes de déclencheur). Ils ont défini la probabilité du changement entre les comportements dans tous les contextes avec une matrice de probabilité et ont observé que l'agrégation est possible avec une matrice prédéfinie dans un environnement à base de détecteur simple de simulation.

2. Trianni et autres, [11] ont également employé des algorithmes génétiques pour évoluer le comportement d'agrégation en évoluant simplement les poids d'un perceptron. La fonction de forme physique de l'évolution est définie comme distance moyenne du groupe de robots de son centre de la masse pour chaque époque. Ils ont observé deux types de contrôleurs dans la population finale : celui qui crée un agrégat très compact et celui qui est plus lâche que le précédent mais se déplacent en tant que groupe. On observe que le dernier est plus extensible quand le nombre de robots sont augmentés dans les expériences.

3. Soysal et Sahin [12] ont exécuté des expériences systématiques en utilisant un contrôleur probabiliste. Il y a quatre comportements dans le contrôleur qui sont reliés à l'architecture de subsumption : l'action d'éviter obstacle, s'approcher, repousser et attendre. Approcher et repousser sont des comportements utilisent une sonde saine pour s'approcher ou repousser du bruit le plus fort. Les transitions entre *repousser-s'approcher* et *attendre-repousser* des états sont définies avec deux probabilités différentes. Une transition est réalisée quand un nombre aléatoire choisi entre zéro et un est plus grand que ces probabilités. Ils ont étudié les différences de comportement en examinant différentes valeurs de ces probabilités. Ils ont prouvé que la meilleure exécution est obtenue quand tous les deux paramètres égaux à 1 ce qui signifie que le robot essaye toujours de s'approcher à l'agrégat probablement le plus grand. Mais leur point est que cette approche aura le haut risque de la collision et aura la grande consommation d'énergie en raison du manque de l'utilisation de l'état d'attente.

4. Bahçeci et Sahin [13] pour réaliser le comportement d'agrégation en évoluant les poids d'un réseau neurologique avec 12 entrées et 3 sorties.

Tandis que les quatre premiers des neurones d'entrée codent la valeur saine obtenue à partir du haut-parleur, les neurones restants d'entrée codent les sondes infrarouges du robot. De même, le premier neurone de rendement utilisé pour commander le haut-parleur omnidirectionnel et les deux autres sont utilisés pour commander les roues. Ils ont utilisé la même sonde et émetteur pour estimer la direction du plus grand faisceau. La forme physique d'une évaluation simple est définie comme rapport du nombre de robots formant le plus grand faisceau à tout le nombre de robots dans l'expérience. La forme physique d'un chromosome est calculée de quatre manières différentes (la forme physique de moyenne, de médiane, de minimum et de maximum de toute fonction) pour la comparaison.

5. *Jeanson et autres*, [14] Ils ont essayé de montrer que les cancrelats exécutent l'agrégation globale des interactions locales. Pour faire ceci, ils ont mesuré les paramètres de système importants des expériences avec des larves de cancrelat comme la probabilité de l'arrêt dans un agrégat ou la probabilité de commencer à se déplacer. Ils ont créé un modèle numérique des comportements des cancrelats de ces mesures et ont essayé de valider leur modèle dans des simulations numériques. Bien que leur modèle numérique indique un désaccord quantitatif avec des expériences, ils ont réclaté qu'il offre également la preuve irréfutable que l'agrégation peut être expliquée en termes d'interactions entre les individus qui emploient seulement l'information locale.

6. *Mataric* a présenté la conception de l'agrégation dans [15]. Bien que l'auteur ait montré quelques photos de simulation comme exemples du succès des comportements et ait réclaté que les expériences sont examinées sur de vrais robots, sans fournir tout autre détail au sujet des expériences. Les détails des expériences ne sont pas fournis pour comprendre que les comportements globaux des robots et des interactions nécessaires entre d'autres comportements sont cachés.

3.2 Métaphore d'agrégation chez les Blattes :

Le processus d'agrégation cité en introduction est directement inspiré d'un modèle biologique de déplacement et d'agrégation développé à partir d'expériences sur les larves de premier stade de la blatte germanique *Blattella germanica*.

Ce modèle a été construit sur la base d'une quantification des déplacements et des comportements individuels de ces blattes à l'intérieur d'une arène circulaire homogène. Chacun de ces comportements individuels a été décrit de manière probabiliste, par une mesure de la distribution des probabilités d'apparition ou de disparition d'un comportement en fonction de l'environnement local de l'animal. Cette description empirique des comportements collectifs ne nécessite aucune connaissance des mécanismes physiologiques et neuronaux sous-jacents.

Les caractéristiques principales de ce modèle d'agrégation sont les suivantes: la probabilité pour un individu de s'arrêter à chaque pas de temps augmente avec le nombre de congénères arrêtés dans son voisinage proche ; au contraire, la probabilité de repartir diminue avec ce nombre. Ce double feed-back positif conduit alors à la formation rapide d'agrégats [16,17]

4. Architecture du Contrôleur adopté pour des robots:

Nous avons essayé de mettre en évidence un système multi-agents sur lequel repose notre étude, dont le but est de diminuer la complexité de navigation d'un ensemble de robots dans un environnement totalement inconnu. Chaque agent est doté de faculté d'autonomie et de s'interagir dans le groupe. Pour ces raisons, nous avons choisi d'adopter pour un agent-robot une architecture de subsumption de structure horizontale, cette architecture est composée de trois principaux modules : **module de perception, module d'action** et un dernier **module pour la communication**.

Chaque robot mobile est composé des modules suivants (Figure 2) :

- **Module de perception** : la fonction de perception permet à l'agent-robot de percevoir l'état de son environnement (les autres robots).
- **Module de communication** : Il permet l'échange d'informations utiles entre les agents-robots.
- **Module d'action** : les capacités de raisonnement de l'agent constituent le centre de décision des différentes compétences de l'agent.

En fonction du comportement déclenché, un module d'action associé à un comportement donné détermine une réponse adaptée à la situation dans laquelle se trouve l'agent-robot. La réponse de l'agent robot est fonction de la granularité du comportement. Dans notre application, ce module se compose des comportements suivants : Sélection chemin, Eviter obstacle, Agrégation :

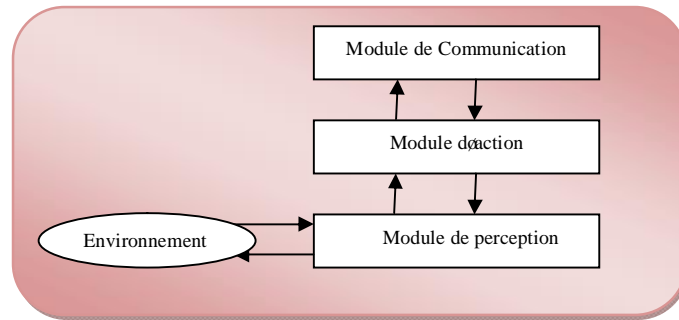


Fig. 2. Architecture du robot

4.1 Module de perception :

Le module de perception assure une fonction double : Détecter la présence des obstacles (statiques et dynamiques) ou les robots tombant en panne à l'aide des capteurs et tester la nouvelle position de l'agent robot

4.2 Module de communication :

Le module de communication est composé (Figure 3) de :

- File d'attente des messages émis : elle permet de stocker les messages que l'agent veut envoyer aux autres agents.
- File d'attente des messages reçus : elle contient les messages envoyés par les autres robots.

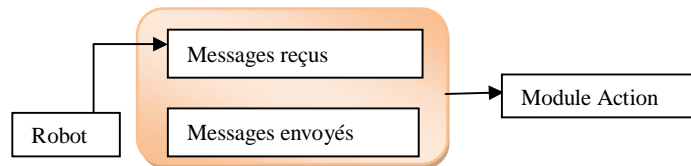


Fig. 3. Module de communication

4.3 Module d'action :

C'est une collection de comportements prédéfinis (Figure 4), tel que déplacement, agrégation, évitement obstacle. Ces comportements sont nécessaires pour le déplacement d'un robot. Toute en respectant un ordre de priorité : dans le cas où l'agent robot est confronté entre deux cas : atteindre le but (zone d'agrégat) et l'évitement d'un obstacle, dans ce cas le robot doit premièrement éviter l'obstacle, ensuite continuer le déplacement (*Approche de subsumption*).

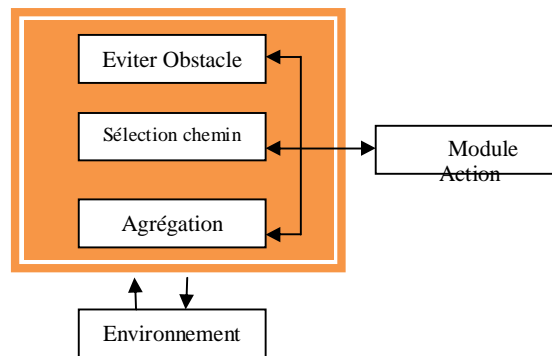


Fig.4. Module Action

- **Comportement sélection chemin :**

Chaque robot du groupe se déplace aléatoirement dans l'espace de recherche depuis sa position initiale. Le but de ce comportement est la recherche d'un site d'abri tout en évitant les obstacles statiques et dynamiques (les autres robots). L'environnement pour le robot est totalement inconnu.

- **Comportement Eviter Obstacle :**

L'évitement d'obstacles est un comportement de base présent dans quasiment tous les robots mobiles. Il est indispensable pour permettre au robot de fonctionner dans un environnement dynamique. Il permet d'éviter les obstacles apparus dans le champ de vision du robot, pour cela le robot doit déterminer un autre chemin (via le comportement sélection chemin). Le comportement d'évitement d'obstacle est déterminé par l'agent-robot selon l'environnement dans lequel il évolue et selon sa position par rapport aux obstacles rencontrés. La méthode qu'on va utiliser est efficace à condition d'avoir une perception correcte de l'environnement c'est la méthode **VFH (Vector Field Histogram)**.

Cette Méthode utilise l'environnement perçu afin de générer un mouvement à exécuter sur un pas de temps, à la suite duquel un autre mouvement est généré et ainsi de suite. Ces mouvements sont appelés "*mouvements partiels*". Pour cela, l'environnement représenté par la grille d'occupations est discrétisé en secteurs angulaires pour lesquels la somme des valeurs des cellules d'occupation de chaque secteur est calculée. Cette somme représente une "*densité polaire d'obstacle*" ou *DPO* qui est proportionnelle à la proximité d'un obstacle et à la certitude qu'il existe

dans la direction représentée par le secteur. Chaque direction autour du robot est donc représentée par une "barre de l'histogramme" dont la hauteur est proportionnelle à la probabilité d'être proche d'un obstacle. (Figure 5)

Ces comportements sont des unités de traitement ou des formes d'actions qui transforment des sensations en actions par un processus réactif. Pour implémenter un comportement, nous utilisons une série de règles de décisions floues. Il est possible que deux comportements, ou plus, préconisent au même moment des actions opposées, par exemples, tourner à droite et tourner à gauche. Pour résoudre ce problème, nous avons introduit la notion de contexte. Les contextes nous permettront de déterminer quel comportement doit être activé en fonction d'une situation donnée de l'environnement. Ainsi, nous associerons à chaque comportement un contexte d'applicabilité exprimé sous forme d'une règle floue :

SI contexte i alors comportement i

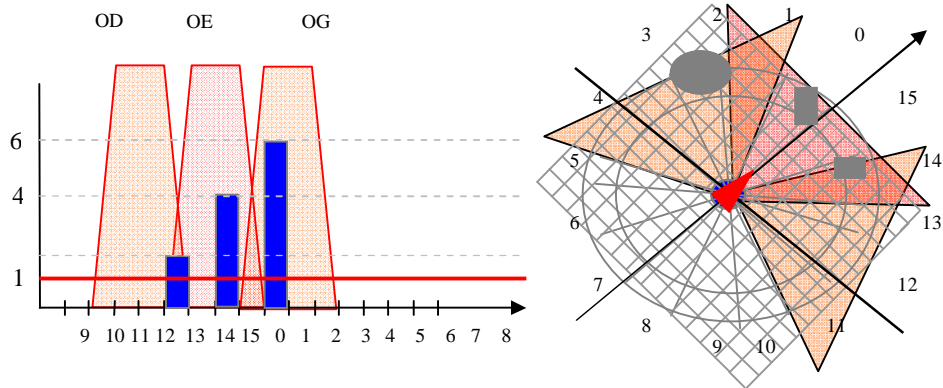


Fig. 5. les variables d'entrée : OE (obstacle frontal), OG (obstacle gauche) et OD (obstacle droit).

Les densités polaires calculées par la méthode décrite dans la section précédente, sont comparées à un seuil permettant de tolérer un certain bruit ; ce seuil est utilisé pour déterminer les directions possibles pour le robot : toutes les directions dont la valeur est inférieure à ce seuil sont acceptées.

Si OE ou OG ou OD alors <Déclencher le comportement d'évitement d'obstacle>

Si <Déclencher le comportement d'évitement d'obstacle> alors :

- Si OE et OG et OD alors < tourner $\alpha + \pi/2$ >*
- Si OE et OG et \neg OD alors < tourner α_g >*
- Si OE et \neg OG et OD alors < tourner α_d >*

- **Comportement Agrégation :**

Ce comportement permet d'arrêter le déplacement de tous les robots, en annulant leurs vitesses, lorsque l'agrégation est accomplie.

4.4 Algorithme du comportement d'agrégation :

- La probabilité pour un robot de s'arrêter à chaque pas augmente avec le nombre de congénères arrêté dans son voisinage.
- La probabilité de repartir diminue avec ce nombre.
- La probabilité d'arrêt dépend aussi des caractéristiques de chaque cellule dans l'environnement.

Compter le nombre de robots : chaque robot émettait un numéro d'identification spécifique et compter le nombre de robots possédant un numéro différent dans son voisinage.

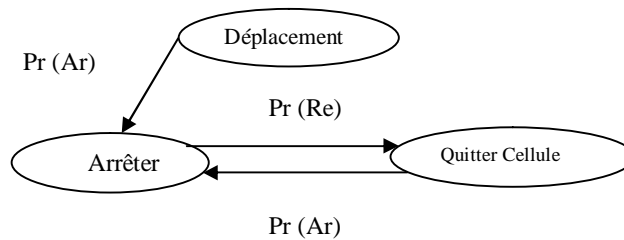
La cellule d'agrégat doit porter quelques caractéristiques qui ressemblent à la nature (L'humidité, ombré, etc.)

N : Le nombre total de robots ;
I : identification de chaque robot ;
NA : Nombre de robots dans la zone d'agrégat.

CC : Caractéristique de la cellule $\begin{cases} 1 & \text{Si la cellule d'agrégat} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

Pr_{Ar} : Probabilité d'arrêter ;

Pr_{Re} : Probabilité de repartir



$$Pr_{Ar}(T_0+1) = Pr_{Ar}(T_0) + (NA*CC)/N. \tag{1}$$

$$Pr_{Re}(T_0+1) = Pr_{Re}(T_0) + CC/N. \tag{2}$$

5. Simulation et résultats :

Nous avons construit un simulateur avec le langage Java Eclipse pour modéliser le comportement de nos robots. Les figures ci-dessous montrent les étapes à suivre par les agents-robots depuis le démarrage (Figure 6) des robots jusqu'à la fin de simulation (Figure 7).



Fig.6. Démarrage

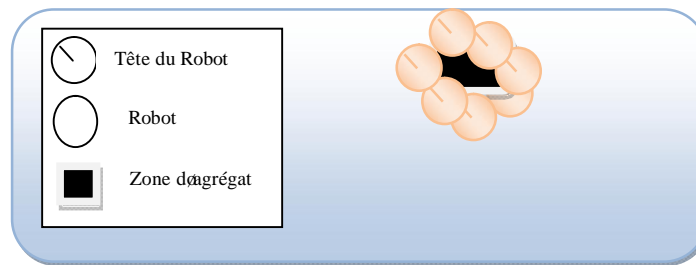


Fig.7. Fin de la simulation

6. Conclusion

Au cours de ce travail, nous avons mis au point un processus de décision collective à partir d'un modèle biologique d'agrégation très simple. Nous avons montré qu'une agrégation associée à une préférence naturelle (caractéristiques de l'environnement) peut conduire un groupe de robots aux capacités sensorielles et cognitives limitées, à réaliser un choix collectif pour un site d'agrégation. L'aspect le plus intéressant de ces résultats est qu'aucun des robots utilisés n'est capable individuellement de telles performances, à cause notamment de leur faible appareillage sensoriel et de leur capacité de traitement limitée.

Ce travail ouvre déjà quelques perspectives intéressantes pour la robotique collective dont le plus important est l'expérimentation de ce comportement sur un groupe de robots réels.

7 Références

1. Levent BAYINDIR and Erol SAHIN, "A Review of Studies in Swarm Robotics". Turk J Elec Engin, VOL.15, NO.2 2007.
2. Dewolf, T. et Holvoet, T (2004). Emergence and self-organisation: a statement of similarities and differences. In Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications, pages 966-110.
3. Sumpter D. The principles of collective animal behaviour. In Philosophical transactions-Royal Society of London. Biological sciences, pages 5-22, London, UK, 2006. Royal Society of London.
4. Holland O. and Melhuish C. Stigmergy, self-organisation, and sorting in collective robotics. Artificial Life, 5, No 2 :173-202, 1999.
5. Grassé, P. (1959). La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie. essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. Insectes Sociaux, 6:41-681.
6. Guillot A. Ethologie. Dans : Anthologie des Sciences de l'Homme. Tome II. Filloux J.C., Maisonneuve J. (eds), pp. 321-349. Dunod. (1997).
7. McFarland D., Besser T. Intelligent Behavior in Animals and Robots. MIT Press, USA. (1993).
8. A. Martinoli & J. Nembrini "Robotique en Essaim, Récents résultats et Directions Futures" 2007
9. S. Camazine, J. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz, E. Bonabeau, "Self-Organization in Biological". Systems, Princeton University Press, 0691012113, 2001.
10. V. Trianni, T. Labella, R. Grob, E. Sahin, M. Dorigo, J. Deneubourg, "Modeling Pattern Formation in a Swarm of Self-Assembling Robots" , Technical Report TR/IRIDIA/2002-12, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium, May 2002.
11. V. Trianni, R. Grob, T. Labella, E. Sahin, M. Dorigo, "Evolving Aggregation Behaviors in a Swarm of Robots" In W. Banzhaf, T. Christaller, P. Dittrich, J. T. Kim and J. Ziegler, editors, Advances in Artificial Life Proceedings of the 7th European Conference on Artificial Life (ECAL), Lecture Notes in Artificial Intelligence 2801, pages 865-874, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 2003.
12. O. Soysal, E. Sahin, "Probabilistic Aggregation Strategies in Swarm Robotic Systems" , Proc. of the IEEE Swarm Intelligence Symposium, Pasadena, California, 2005.
13. E. Bahçeci, E. Sahin, "Evolving Aggregation Behaviors for Swarm Robotic Systems : A Systematic Case Study" ,Proc. of the IEEE Swarm Intelligence Symposium, Pasadena, California, 2005.
14. R. Jeanson, C. Rivault, J. Deneubourg, S. Blancos, R. Fourniers, C. Jost, G. Theraulaz, "Self-Organized aggregation in cockroaches", Animal Behaviour, 69, 169-180, 2005.
15. M. Mataric, "Designing Emergent Behaviors : From Local Interactions to Collective Intelligence", Proceedings, From Animals to Animats 2, Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB- 92), J.-A. Meyer, H. Roitblat and S. Wilson, eds., MIT Press, 432-441, 1992.
16. Jeanson, R., Blanco, S., Fournier, R., Deneubourg, J. L., Fourcassié, V., et Theraulaz, G. (2003). A model of animal movements in a bounded space. Journal of Theoretical Biology, 225(4) :443-451.
17. Jeanson, R., Rivault, C., Deneubourg, J.-L., Blanco, S., Fournier, R., Jost, C., et Theraulaz, G. (2005). Self-organized aggregation in cockroaches. Animal Behaviour, 69(1) :169-180.