Comportements collectifs : des agents sous influences.

Patrice Carle[†] , Anne Collinot, Eric Jacopin, Karim Zeghal

LAFORIA, Université Paris VI
4, Place Jussieu, case 169, 75252 PARIS Cedex 05
…@laforia.ibp.fr

Résumé

Ce travail se situe dans le cadre très général de la résolution distribuée de problèmes. Toutefois, il ne s'agit pas de présenter un nouveau système de résolution distribuée de problèmes, ni même une plateforme, mais une méthode permettant d'analyser et de concevoir des systèmes de résolution collective.

Lors d'une résolution collective, chaque entité participant à la résolution, il s'agit de spécifier cette résolution en terme de contrôle inter-entités. Notre méthode conduit à expliciter une distribution de ces contrôles en termes d'*influences*, et la mise en œuvre de ces influences définit les comportements collectifs locaux, et par composition le comportement du collectif. Nous obtiendrons ainsi une spécification d'un processus de résolution distribuée issue de la spécification des influences.

Cet article présente donc les différentes étapes de conception des comportements collectifs, au travers d'un exemple de régulation distribuée.

Abstract

This work takes place in the very general framework of distributed problem-solving. However the point is neither to present "yet another distributed problem-solving system" nor a new multi-agent framework, but a *collective* problem-solving method.

During a *collective* problem-solving, each individual participates to the problem-solving process, and therefore it is a matter of specifying the problem-solving process in terms of inter-individual control. Our method provides an explicit distribution of control onto individual behaviors in terms of *influences*. The implementation of these influences determines local collective behaviors and, therefore the behavior of the collectiveness. We thus are interested in defining a method to distribute the problem-solving process that rests upon the distribution of control onto the individuals.

This paper presents the necessary steps for the analysis and design of these behaviors. It is illustrated with an example of distributed regulation.

[†] ONERA, 29 Avenue de la Division Leclerc, BP 72, 92322 CHATILLON Cedex.

1. Introduction

Ce travail se situe dans le cadre très général de la résolution distribuée de problèmes. Toutefois, il ne s'agit pas de présenter un nouveau système de résolution distribuée de problèmes, ni même une plateforme, ce qui pose alors le problème de sa généralité : comment instancier la plateforme pour résoudre un problème ? Cette instanciation fait apparaître le problème de la méthodologie de conception de systèmes multi-agents :

Que repenser, et jusqu'où, quant à la notion de résolution collective de problèmes pour concevoir *avec méthode* de tels systèmes ?

Dans cet article, nous nous intéressons donc à la résolution des problèmes qu'il est possible de distribuer physiquement ou conceptuellement sous la forme d'entités autonomes ; on parle alors de résolution *collective* .

L'étude de la résolution collective, abordée dans d'autres travaux [Agre et Gasser 92] sous les noms d'intelligence en essaim [Deneubourg 89], de fonctionnalité émergente [Steels 91, Conte et Castelfranchi 92, Drogoul 93] ou de coopération multi-agents [Durfee et Lesser 87], pose la question principale qui est celle de la conception du comportement du collectif, c'est à dire la conception des comportements collectifs locaux :

- quel est le niveau de description adéquat qui permet d'exprimer un comportement collectif ?

- comment analyser puis spécifier un comportement collectif pour un problème ?

Par conséquent, chaque entité participant à la résolution, il s'agit de spécifier cette résolution en terme de contrôle inter-entités. Nous proposons une méthode qui explicite ces contrôles en termes d'*influences*. La mise en œuvre de ces influences définit les comportements collectifs locaux, et par composition le comportement du collectif. Nous obtiendrons ainsi une spécification d'un processus de résolution distribuée issue de la spécification des influences.

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux problèmes pouvant être caractérisés par des critères de satisfaction et des contraintes, qui fournissent une fonction d'évaluation de la solution. Partant d'une population d'entités et de cette fonction d'évaluation *globale* l'objectif est d'obtenir une spécification des comportements collectifs, *locale aux entités*. Le résultat de la « greffe » de ces comportements collectifs sur les entités ayant leurs comportements individuels, définit la notion d'*agent*. Ainsi, le résultat de la méthode proposée fournit des éléments pour choisir l'architecture des agents et du système.

Il ne s'agit donc plus de concevoir les agents du système multi-agents, mais les comportements collectifs locaux nécessaires à la résolution du problème. Cet article présente donc les différentes étapes de conception de ces comportements : (a) analyse statique et (b) analyse dynamique. Ces deux étapes d'analyse sont illustrées sur un exemple de régulation distribuée. La section 2 introduit l'exemple. La section 3 décrit l'étape d'analyse statique où il s'agit de décrire des comportements collectifs locaux par types d'entité. La section 4 décrit l'étape d'analyse dynamique où il s'agit de prendre en compte la formation dynamique de sous-ensembles d'agents sous influence pour permettre une meilleure cohérence du comportement du collectif.

2. Présentation de l'exemple

La base terrienne de Venus doit produire l'atmosphère nécessaire à la population. Elle est obtenue à partir d'un processus alchimique de transmutation, utilisant quatre composants miniers extrait du sous-sol vénusien et qui sont donc consommés au cours de la production. Ces composants sont :

- le Robur (densité 19,2 — proportion 4%)
- la Garåldite (capacité calorifique 12kJ / kg — proportion 78%)
- le Burèdre (conductivité surfacique à température vénusienne ambiante $1\mu\Omega$ / cm^2 — proportion 16%)
- le Hyazur (pH 0,5 — proportion 2%)

La consommation de la population est de 3,6 10^4 litres par heure. La présence du Souffre en grande quantité (servant d'ailleurs de catalyseur à la production) rend son atmosphère très corrosive, l'extraction et la collecte sont donc entièrement automatisées à l'aide de robots foreur et transporteur. Le temps de retour à la Base du robot le plus éloigné est au plus d'une heure, il est indispensable que la quantité totale de ces éléments ne soit jamais inférieure au seuil minimal de 3,6 10^3 kg (soit une autonomie de une heure). Et de plus, les bassins miniers ayant été localisé lors des premières missions d'exploration de vénus, les robots n'ont pas de mission de prospection.

Les robots produisent leur énergie de façon autonome à partir d'un processus électrochimique nécessitant une réaction entre le Souffre et l'atmosphère condensée sous forme liquide dans le réservoir du robot. De façon évidente, il est indispensable de minimiser la consommation atmosphérique nécessaire à l'extraction et la collecte.

Nous avons à disposition deux grands types de robots :

- les foreurs ZORGL-3 avec :
  - un microprocesseur 67010 à 0,5 Mhz
  - un trépans en diamant penta-compressés (à carbure de Zirconium)
  - une plateau de stockage cylindrique de capacité maximale de 10kg
  - un mécanisme de double chenille à différentiel Torsen et roues adhésives
  - un réservoir atmosphérique de 12 litres
  - consommation : 3 litres / heure
  - production : 10kg / heure
- les transporteurs SCRAM-2 avec :
  - un microprocesseur 8080 à 1,2Mhz
  - une benne en Kevlar de capacité maximale de 50kg
  - un mécanisme à chenille
  - un réservoir atmosphérique de 320 litres
  - un mécanisme de ravitaillement des ZORGL-3
  - consommation : 6 litres / heure

Du fait de contraintes physiques, il n'a pas été possible de construire des ZORGL-3 capables d'extraire indifféremment tous les types de minerai. Ils sont donc limités à un seul type, nommés :

- ZORGL-3R (Robur)
- ZORGL-3G (Garåldite)
- ZORGL-3B (Burèdre)
- ZORGL-3H (Hyazur)

En résumé, les robots sont déjà dotés de comportements individuels. Par exemple, les ZORGL-3 sont capables de se déplacer dans le bassin minier (*Aller-Base*, *Aller-Puit*) et de forer (*Forer*). Alors que les SCRAM-2 sont capables de récupérer les minerais des foreurs (*Récupérer-Minerai*) tout en remplissant son réservoir atmosphérique, d'aller à la Base et d'aller vers des foreurs d'un type donné (*Aller-Base*, *Aller-Foreur-de-type-donné*). Cependant, il faut noter que ces comportements individuels ne suffisent pas à assurer la résolution du problème de régulation de l'atmosphère. En effet, il faut en plus du forage et du transport des minerais assurer que la Base dispose des bonnes proportions en quantités suffisantes. Le problème est donc de contrôler les comportements individuels de manière à obtenir une régulation optimale, c'est-à-dire se rapprochant le plus possible du flux tendu.

L'antenne locale de l'ARCC (Analyse et Réalisation de Comportements Collectifs) a pour mission de spécifier les comportements collectifs des robots de façon à tendre vers cet optimal.

3. Première partie : analyse statique

Cette partie vise à spécifier les comportements collectifs par types d'entités. Elle permet donc de construire les agents du système, en greffant les comportements collectifs locaux sur les entités.

3.1. Etape 1

Méthode - étape 1 : identifier la fonction d'évaluation et les types d'entités requis étant donnée la décomposition du problème en termes de fonctionnalités.

Dans l'énoncé de l'exemple, il existe une fonction d'évaluation globale, composée d'une fonction de survie et d'une fonction de coût. Elle peut s'exprimer par :

$$\forall t,\ Q_R(t) \geq Q_{Rmin}$$
$$\forall t,\ Q_G(t) \geq Q_{Gmin}$$
$$\forall t,\ Q_B(t) \geq Q_{Bmin}$$
$$\forall t,\ Q_H(t) \geq Q_{Hmin}$$

où $Q_R(t)$, $Q_G(t)$, $Q_B(t)$ et $Q_H(t)$ sont respectivement les quantités disponibles à l'instant t de Robur, Garåldite, Burèdre et Hyazur, et Q_{Rmin}, Q_{Gmin}, Q_{Bmin} et Q_{Hmin}, les quantités minimales requises de Robur, Garåldite, Burèdre et Hyazur ; et par :

$$\forall t, \text{minimiser} \sum_{i=1}^{N} C_{Atm}(i,\ t)$$

où $C_{Atm}(i, t)$ est la consommation d'atmosphère pour le robot i à l'instant t.

L'identification des types d'entités est déjà donnée dans l'énoncé du problème.

Il s'agit maintenant de caractériser les entités dont on dispose afin d'identifier les caractéristiques pertinentes pour résoudre le problème, c'est-à-dire pour respecter et optimiser la fonction d'évaluation. En effet, pour spécifier les comportements collectifs et leur mise en œuvre, il faut déjà identifier les capacités individuelles des entités : cela revient dans notre méthode à identifier les caractéristiques comportementales et structurelles pour chaque type d'entité.

3.2. Etape 2

Méthode - étape 2 : répertorier les différentes caractéristiques structurelles et comportementales des entités. Pour une entité, l'ensemble de ces caractéristiques constitue son déterminant.

Dans le cas de notre l'exemple, l'ARCC doit donc répertorier les différentes caractéristiques structurelles et comportementales des robots.

Les ZORGL-3 sont capables de :

- percevoir leur type de minerai (R, G, B ou H)
- forer ce type de minerai
- le transporter
- retourner à la base

et connaissent le type et la quantité de minerai actuellement dans leur plateau.

Les SCRAM-2 sont capables de :

- transporter n'importe quel type de minerai
- se déplacer vers un foreur
- récupérer le minerai d'un foreur
- retourner à la base
- remplir le réservoir atmosphérique d'un foreur

et connaissent la quantité par type de minerai dans sa benne.

Les déterminants des robots ZORGL-3 et SCRAM-2 sont donc définis.

A ce stade, nous avons défini toutes les données du problème. A partir de là, il faut établir des liens entre ces données pour permettre une résolution collective. Il est clair que ces liens sont dépendants du problème à résoudre et donc de la fonction d'évaluation. Notre démarche consiste donc à distribuer la fonction globale d'évaluation sur chaque type d'entité. Une façon de réaliser cette distribution est d'établir des correspondances entre les caractéristiques des entités et les paramètres de la fonction d'évaluation. Les caractéristiques pour lesquelles une correspondance est identifiée constituent des indications, ou *indices*, pour la détermination des comportements collectifs controlant les comportements individuels.

3.3. Etape 3

Méthode - étape 3 : identifier les indices pour la définition du comportement collectif, c'est-à-dire les correspondances entre les paramètres de la fonction d'évaluation globale et les éléments

des déterminants individuels. Pour chaque type d'entité de la population on recherche les informations pertinentes pour la fonction d'évaluation (critère de satisfaction et contraintes)

Dans notre exemple, l'ARCC procède donc à l'analyse des robots foreurs et transporteurs et de la Base, à partir de la fonction d'évaluation (qui s'exprime en une fonction de survie et une fonction de coût). Les indices suivant ont ainsi pu être identifiés :

pour les foreurs :

- quantité de minerai
- coût de fonctionnement : 3 l/h

pour les transporteurs :

- quantité de minerai
- coût de fonctionnement : 6 l/h

pour la base :

- quantité de chaque minerai nécessaire

C'est la valeur de ces indices qui influe sur le comportement des autres. Il reste cependant à déterminer sur qui les influences opèrent, puis en déduire que les entités qui subissent ces influences doivent être capables de percevoir ces indices. Ces liens d'influence et de perception définissent deux réseaux duaux : le réseau de perception et le réseau d'influence. Le réseau de perception permettra de savoir quels sont les types d'entités qui doivent avoir des comportements collectifs et quels sont leurs paramètres.

3.4. Etape 4 : réseau d'influence

Méthode - étape 4 : construire le réseau d'influence. Une influence représente une forme de contrôle du comportement individuel par des informations sur des indices des autres agents.

Le réseau d'influence est un réseau dont les nœuds sont les entités et leurs indices, et les arcs sont les liens entre les entités et les indices nécessaires aux autres entités pour qu'elles puissent prendre en compte la fonction d'évaluation. Dans le contexte de la spécification des comportements collectifs, la perception est le mécanisme de récupération des indices. Les arcs inverses représentent donc la perception requise : ce sont les arguments des comportements collectifs. Les influences sont rendues opérationnelles par la perception des indices. Le réseau associé, dual du précédent, est le réseau de perception des indices.

Remarque : un cycle dans le réseau d'influence représente une interaction ; deux entités interagissent lorsqu'elles s'influent mutuellement, directement ou transitivement.

Dans notre exemple, l'ARCC a construit le réseau d'influence (figure 1), et le réseau de perception des indices (figure 2).

Cette étape détermine donc les capacités de perception nécessaires des robots.

Le transporteur doit pouvoir percevoir :

- les quantités nécessaires à la Base
- la localisation d'un foreur d'un type de minerai
- la quantité de minerai dans ce foreur

Le foreur doit percevoir la quantité de minerai de la Base.

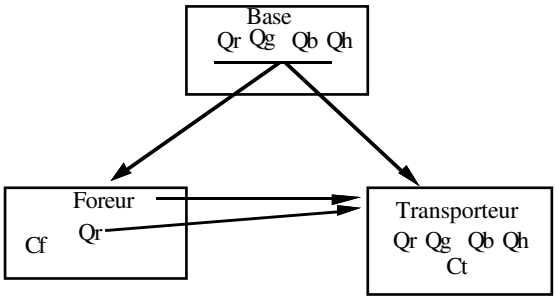

Figure 1. réseau d'influence.

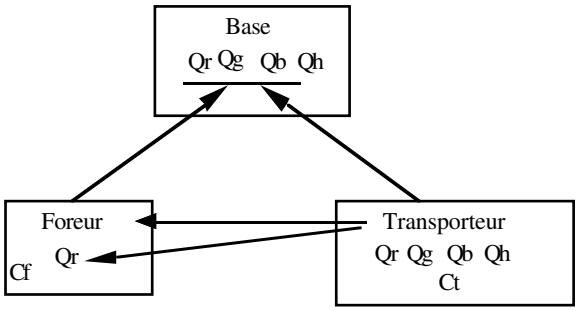

Figure 2. réseau de perception des indices.

A la fin de cette étape, le réseau de perception indique qu'au moins deux types d'entités doivent avoir des comportements collectifs, à savoir les foreurs et les transporteurs. Il faut maintenant spécifier ces comportements collectifs, c'est-à-dire opérationaliser les influences qui agissent sur les comportements individuels des ZORGL et des SCRAM.

3.5. Etape 5 : comportements collectifs

Méthode - étape 5 : à partir du réseau d'influence, spécifier les comportements collectifs des entités. Ces comportements ont des indices en entrée, et ont pour résultat d'activer les comportements individuels. Ils sont définis de manière à optimiser localement la fonction d'évaluation.

La spécification des comportements collectifs pour chaque type d'entité constitue une première étape pour la définition des agents. Le déterminant individuel d'un agent est le déterminant de l'entité à partir de laquelle il est construit, et son déterminant collectif est constitué par l'ensemble de ses comportements collectifs et des moyens de perception des indices.

Dans notre exemple, l'ARCC a spécifié les comportements collectifs suivants (il n'a pas été nécessaire d'ajouter des moyens de perception supplémentaires) à partir des comportements individuels (notés en italique) et des indices (notés en gras) :

Foreur :

tant que **plateau** non plein : *Aller-Puit* et *Forer*

si **plateau** plein et **type-de-minerai-requis** par la Base : *Retour-Base*

Transporteur :

tant que **benne** non pleine : *Aller-Foreur-de-type-donné* de **type-de-minerai-requis** par la Base

si **benne** pleine : *Aller-Base*

L'étape finale de l'analyse statique conduit à définir des types d'agent en greffant les comportements collectifs sur les entités, et à identifier les groupes d'agents du système. En effet, les agents dont les types appartiennent à une composante connexe du réseau de perception des indices, forment un groupe. Dans notre exemple, il existe deux composantes connexes, et donc deux groupes : celui formé par la base et les foreurs, et celui formé par la base, les transporteurs et les foreurs.

C'est seulement dans la limite de ces groupes d'agents que peuvent se former des *collectifs* (en d'autres termes les groupes fournissent une description intensionnelle des collectifs). La description du processus de formation des collectifs constitue l'objet de l'analyse dynamique.

4. Seconde partie : analyse dynamique.

A ce stade, la dynamique d'exécution des comportements collectifs n'ayant pas été prise en compte, la résolution peut ne pas être optimale. Cette partie s'intéresse à la dynamique d'activation de ces comportements et pour cela nous prenons en compte les individus, par opposition aux types.

Dans notre exemple de régulation, la résolution n'est pas optimale. Par exemple, dans le cas où un foreur a son plateau plein et qu'il se dirige vers la base, deux transporteurs peuvent chercher à le rejoindre pour le décharger, alors qu'un seul suffirait. Pour traiter ce problème, nous allons introduire les notions :

- de collectif d'agents
- d'effet d'un collectif, sur le comportement individuel des agents n'appartenant pas à ce collectif.

A un instant donné, des agents peuvent subir les influences d'autres agents, c'est-à-dire que les indices perçus sont pris en compte par les comportements collectifs. Ces influences sont alors dites *actives*.

> Exemple : un foreur retournant vers la base avec un minerai nécessaire à la base subit l'influence de la base. Le foreur à donc perçu un manque de minerai par l'indice de quantité-de-minerai-nécessaire ; cet indice est donc actif.

Les fermetures transitives des influences actives décrivent des instanciations du réseau d'influence, que l'on appellera *collectifs*.

> Exemple 1 : à un instant donné, un foreur dont le plateau est plein peut appartenir à un collectif formé :
>
> - de la base et de lui-même (il ramène son type de minerai manquant à la base)
> - de la base, du transporteur se dirigeant vers lui , et de lui-même.

> Exemple 2 : la base a besoin de 30 kg de Robur ; 4 transporteurs ont leur plateau plein et étant donné les comportements collectifs actuels, ils se dirigent vers la base. Pourtant seulement 3 transporteurs sont nécessaires.

Ce type de problèmes peut-être traité avec une approche de type contract net [Smith 80]. Nous proposons de résoudre ce type de problème sans faire intervenir une structure de contrôle supplémentaire (telle qu'une structure d'appel d'offre, même dynamique), mais en affinant le contrôle des comportements individuels (c'est-à-dire les comportements collectifs) en fonction de la formation des collectifs. La formation d'un collectif résulte de l'activation d'un réseau d'influences. Pour éviter certains conflits d'appartenance à des collectifs, il faut interdire temporairement certaine partie du réseau d'influence. Ce contrôle des influences définit l'engagement.

4.1. Notion d'engagement

Un agent peut appartenir, à un instant donné, à plusieurs collectifs. Cependant, la formation d'un des collectifs peut conditionner la formation des autres. Ces agents qui appartiennent à plusieurs collectifs, sont dits agents *sécants*. Pour un agent sécant, il faut considérer les effets de la formation du collectif sur la valeur de ses indices, que l'on appellera *engagement* dans ce collectif. Et l'engagement est alors la modification *dynamique* des valeurs de ces indices pour *anticiper* les effets du collectif. Pour l'exprimer, il peut être nécessaire d'identifier de nouveaux indices ou d'affiner les indices existants, et de définir des comportement supplémentaires de gestion de ces indices : on les appelle des *comportements d'engagement*.

Remarque : les comportements d'engagement ne peuvent être déclenchés que si il y a communication entre les agents appartenant à un même collectif.

Dans le cas de notre exemple, le réseau d'influence permet d'identifier deux agents sécants, le foreur et la base.

L'engagement de la base par rapport au collectif C_1 = {base, foreur} s'exprime par l'anticipation de l'apport de minerai à la base par le foreur. L'indice quantité nécessaire est remplacé par l'indice quantité demandée (Q_d), que l'on décrémente par la quantité apportée. On ajoute également à la base un nouvel indice qui est la liste des foreurs qui forment un collectif avec la base. La base se voit donc attribuer un comportement d'engagement :

Q_d devient $Q_d + Q_{foreur}$

Ajouter le foreur dans la liste

Il faut également lui attribuer un comportement de fin d'engagement :

Lorsque le foreur arrive à la base, il est retiré de la liste.

L'engagement de la base par rapport au collectif C_2 = {base, transporteur, foreur} s'exprime comme précédemment par l'anticipation de la quantité de minerai apportée par le transporteur. Cependant, il faut envisager le cas où le transporteur a pris le minerai d'un foreur déjà engagé avec la base. La base se voit donc attribuer un comportement d'engagement supplémentaire :

si foreur appartient a liste

le supprimer de la liste

Q_d devient $Q_d + Q_{foreur} - Q_{transporteur}$

sinon Q_d devient $Q_d - Q_{transporteur}$

L'engagement du foreur par rapport au collectif C_2 s'exprime par l'anticipation de la prise de minerai par le transporteur. L'indice *quantité de minerai* est remplacé par l'indice *quantité de minerai disponible*, que l'on décrémente par la quantité que le transporteur *va prendre*. Le foreur ne pourra apparaître dans deux collectifs C_2 que s'il a suffisamment de minerai.

Ces comportements d'engagement sont activés par le foreur dans le cas du collectif C_1 et par le transporteur dans le cas du collectif C_2. Il faut donc que le transporteur et le foreur puissent envoyer des messages et que la base et le foreur puissent recevoir des messages.

4.2. Dimensionnement du système

Il reste maintenant à déterminer le nombre d'agents par types, nécessaires à une résolution collective respectant la fonction d'évaluation. On mesure pour cela l'adéquation des comportements collectifs à la fonction d'évaluation. Dans l'état actuel de nos connaissances cette adéquation ne peut être déterminée que de façon expérimentale.

Nous proposons le protocole d'expérimentation suivant :

1- Construire une simulation du système avec le nombre d'agents déduit de la fonction d'évaluation en supposant que les flux sont tendus.

Exemple :

on a : $Z*(P_Z - C_Z) - S*C_Z \geq 3600$ kg

$Z*P_Z = S*P_S$

avec :

Z (resp. S) : nombre de ZORGL (resp. SCRAM), sans distinction de type

P_Z (resp. P_S) : production des ZORGL (resp. SCRAM)

C_Z (resp. C_S) : consommation des ZORGL (resp. SCRAM)

d'où : $Z*(10 - 0,3 - 3) \geq 3600$

soit : $Z = 538$ (avec la répartition : 22 Z_R, 420 Z_G, 87 Z_B, 11 Z_H)

et : $S = 108$

La production est 3827 kg.

2- Mesurer la moyenne et l'écart-type de *production réelle* par rapport à la production optimale (3827 kg). Si l'écart-type est supérieur à 0,5, les comportements collectifs sont inadéquats : une erreur s'est introduite dans l'analyse. Si l'écart-type est inférieur à 0,5, la valeur de la moyenne permet d'exprimer un degré de coopération. Dans ce cas, soit il est possible de détecter les situations de dysfonctionnement pouvant expliquer une mauvaise coopération, et dans ce cas il faut alors reprendre l'analyse ; soit on augmente ce nombre d'agents de manière intuitive (puisque l'on est parti d'un nombre d'agents minimal).

5. Conclusion

La méthode que nous proposons distingue trois types de comportements à définir lors de la conception d'un système multi-agents :

- les comportements individuels qui caractérisent les entités dont il faut disposer pour résoudre un problème donné ;
- les comportements collectifs qui permettent de construire des agents à partir des comportements individuels ;
- les comportements d'engagement qui permettent d'exprimer la formation dynamique de collectifs d'agents.

Cette décomposition fournit à notre avis un support prometteur pour gérer le cycle de vie d'un système multi-agents car il fournit un modèle conceptuel directement opérationalisable du paradigme de résolution collective de problème.

Il reste cependant à exprimer les autres approches de résolution collective à partir de notre méthode, ainsi qu'à réflechir à une utilisation possible de ce modèle pour analyser des phénomènes collectifs naturels.

Références

[Agre et Gasser 92]
P. Agre et L. Gasser, *Knowledge and Action at Social and Organizational Levels*, AAAI'91 Fall Symposium Series Reports, AI Magazine, vol. 13 n° 1, Spring 1992.

[Bond et Gasser 88]
A.H. Bond et L. Gasser, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan and Kaufmann Publishers, 1988.

[Conte et Castelfranchi 92]
R. Conte et C. Castelfranchi, *Mind is not enough: Precognitive bases of social interaction*, Proceedings of the Simulating Societies Symposium, University of Surrey, UK, 1992.

[Deneubourg 89]
J.L. Deneubourg et S. Goss, *Collective patterns and decision-making*, Ethology, Ecology and Evolution, vol. 1, pp. 295-311, 1989.

[Drogoul 93]
A. Drogoul, *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes*, Thèse de l'Université, Paris VI, 1993.

[Durfee et al. 87]
E.H. Durfee, V.R. Lesser et D.D. Corkill, *Coherent Cooperation among Communicating Problem Solvers*, IEEE Transactions in Computers, pp. 1275-1291, 1987.

[Hogeweg et Hesper 86]
P. Hogeweg et B. Hesper, *Knowledge seeking in variable structure models*, in: Elras, Oven et Zergler (eds.) Simulation in the artificial intelligence era, North Holland, 1986.

[Smith 80]
R.G. Smith, "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solving", in IEEE Transaction on Computers, C-29(12):1104-1113, 1980.

[Steels 91]
L. Steels, *Towards a Theory of Emergent Functionality,* From Animals to Animats, MIT Press, p. 451, 1991.