

Vers une coopération des collectifs de systèmes multi-agents hétérogènes

A. Khenifar Bessadi¹

J-P. Jamont²

M. Occello²

M. Koudil¹

¹ Laboratoire de Modélisation et de Conception des Systèmes (LMCS),
Ecole Nationale Supérieure d'Informatique (ESI), Alger, Algérie

² Université Grenoble Alpes, LCIS, F-26000 Valence, France

BP 68M OUED SMAR, 16309 El Harrach Alger Algérie.
a_khenifar@esi.dz

Résumé

La coopération de différents Systèmes Multi-Agents (SMA) permet d'exploiter les produits collectifs de chacun d'entre eux afin de résoudre des problèmes complexes, améliorer leur résilience ou la qualité des services qu'ils fournissent. L'interaction de ces SMA, vus au niveau macroscopique comme des entités uniques, permet de diminuer la complexité en augmentant l'intelligibilité de la solution globale. Cependant, l'hétérogénéité des systèmes rend difficile l'interaction directe entre ces SMA. Nous exposons dans cet article le problème de la coopération de collectifs produits par différents SMA et notre démarche méthodologique pour permettre la conception de SMA coopérants.

Mots clef

Systèmes Multi-Agents, coopération, interopérabilité, niveau collectif, méthode, conception.

Abstract

The cooperation of different Multi-Agent Systems (MAS) allows exploiting the collective products of each of them in order to solve complex problems, improve their resilience or the quality of services they provide. The interaction of these MAS seen at the macroscopic level, each as a single entity, allows decreasing the complexity by increasing the intelligibility of the overall solution. However, systems heterogeneity makes difficult the direct interaction between the MAS. We expose in this article the problem of MAS collectives' cooperation and our methodological approach to enable the design of cooperating MAS.

Keywords

Multi-Agent Systems, cooperation, interoperability, collective level, method, conception.

1 Introduction

Contexte Les Systèmes multi-agents (SMA) proposent un ensemble d'approches, de modèles et d'architectures pour résoudre des problèmes complexes en mettant en œuvre la coopération de différents agents. La coopération permet aux différentes entités

autonomes d'atteindre des objectifs communs en partageant leurs connaissances et/ou leurs savoir-faire. Plus loin, la coopération d'agents appartenant à des SMA différents permet à un SMA d'atteindre ses propres objectifs en exploitant de manière opportuniste les compétences disponibles dans d'autres SMA. Cependant, mettre en œuvre une telle coopération de SMA est un défi identifié depuis longtemps [16] et toujours d'actualité [6]. Ces problèmes d'interopérabilité peuvent être vus aux différents niveaux de description d'un SMA : celui des modèles, des architectures et des implantations.

Dans le cadre des SMA embarqués qui nous intéressent plus particulièrement, un même environnement physique peut être partagé par plusieurs SMA. L'interaction et la coopération de ces SMA peut apporter une valeur ajoutée aux différentes organisations et aux utilisateurs qu'ils servent (augmentation de l'adaptation, de la résilience, de la qualité de service rendue, etc.).

Problématique Les travaux sur l'interopérabilité des SMA reformulent souvent le problème de la coopération de SMA en un problème de coopération d'agents de ces SMA [1, 3, 10, 11]. Nous appelons cette démarche qui fait appel aux composants du plus bas niveau «coopération de niveau micro». Les agents des différents SMA sont amenés à coopérer pour atteindre leurs propres objectifs individuels. Ainsi, cette coopération ne se concentre ni sur l'objectif global du SMA ni sur comment l'atteindre mais sur une sous-tâche du système (qui peut éventuellement lui permettre d'atteindre l'objectif global). Dans ce sens, la plupart des travaux visent à identifier les agents qui sont adéquats pour accomplir la coopération.

L'objet de notre étude est quant à elle dirigée par l'objectif global du SMA et sur les services qu'il peut effectuer en totalité. En effet, plusieurs niveaux de coopération existent entre deux systèmes intelligents [17]. Dans notre étude, nous nous intéressons au niveau de coopération le plus élevé. Ainsi, chaque SMA est vu comme une entité autonome, indépendante éventuellement préexistante au système à concevoir. Un SMA peut décider lui-même de coopérer avec un autre si cela lui permet d'atteindre son objectif global. Nous appellerons cette approche centrée sur la

coopération des produits collectifs fournis par le SMA «coopération de niveau macro». Notre conviction est qu'elle permettra :

- une meilleure résolution collective des problèmes tout en préservant l'indépendance opérationnelle et l'autonomie de gestion des systèmes mis-en-jeu,
- une meilleure dynamique d'adaptation à l'environnement : possibilité d'un développement évolutif basé sur l'ajout/suppression de SMA, meilleure distribution spatiale/temporelle des SMA pour réagir aux dynamiques de l'environnement, meilleure utilisation de ressources partagées etc.
- une meilleure intelligibilité du produit collectif qui répond aux objectifs à atteindre en masquant la complexité interne de chacun des SMA : la décomposition du processus de résolution du problème sera alors plus compréhensible par un observateur externe qu'il soit humain ou artificiel.

Il est difficile pour un concepteur d'application de construire un tel système faisant coopérer des collectifs. Si l'on considère à titre d'exemple les nombreux travaux apparaissant à la frontière des SMA et des services web [8, 12, 20], il est plus facile pour le concepteur d'approcher le système en se plaçant au niveau des individus et donc de faire coopérer des agents qui effectuent des sous-services (un agent *shopbot* qui cherche les profils des malades en urgence et un agent *messagerie* du médecin [14]) que de considérer le problème au niveau des services globaux (un service d'alerte du médecin et un service de gestion patients vu comme des entités indépendantes en faisant abstraction de l'implantation à base d'agents). Toutefois, faire interagir les services rend la solution plus intelligible pour créer un nouveau service car il n'est alors pas indispensable de comprendre le détail d'implantation des solutions afin de pouvoir produire un nouveau service.

Contribution Nous proposons une approche méthodologique qui prend en considération les caractéristiques spécifiques lorsqu'on travaille au niveau macro de la coopération. Les contributions de ce travail sont :

- une approche méthodologique que le concepteur suit pour développer des SMA coopératifs au niveau collectif en éclaircissant les différentes caractéristiques à prendre en considération à un tel niveau de coopération;
- un outil d'analyse qui doit être renseigné par le concepteur désirant mettre en œuvre une coopération au niveau collectif de SMA pour analyser les SMA existants ou développer de nouveaux SMA afin de répondre à l'objectif du SoMAS qu'il veut construire.

Organisation de l'article Dans un premier temps

(section 2) nous présentons le contexte et les motivations de la coopération des collectifs des SMA hétérogènes notamment à l'aide d'un scénario d'illustration. Nous présentons ensuite (section 3) la démarche que nous proposons pour concevoir des SMA coopérants au niveau collectif. Nous concluons cet article en présentant les perspectives de ce travail de recherche.

2 De l'interopérabilité des collectifs de SMA

2.1 Définitions préliminaires

Un phénomène collectif est le résultat observable des interactions d'un ensemble d'agents entre eux (et éventuellement avec leur environnement), dans le but d'atteindre un objectif commun.

Un phénomène collectif est a priori pré-planifié par le concepteur bien que les interactions inter-agents qui le font apparaître soient imprévisibles dans la mesure où on ne peut pas pré-planifier ces interactions qui le font apparaître. C'est le phénomène global d'un SMA créé pour répondre à certaines intentions ou buts [4] mais qui n'a pas nécessité la description d'un plan global d'exécution.

La coopération des collectifs est nécessaire lorsqu'un SMA ne peut pas complètement ou partiellement accomplir une tâche. Il va alors confier toute ou partie de l'exécution d'une tâche à un autre SMA qu'il juge capable d'accomplir. Chaque SMA peut alors être vu comme une entité autonome et indépendante qui exécute une tâche. Une tâche exécutée par un SMA est un phénomène collectif résultant des interactions entre les différents agents qui le composent. Les motivations d'un SMA pour coopérer proviennent de la nécessité qu'il éprouve à agir sur l'environnement, à maintenir un état (assurer la résilience) ou à se confronter un autre point de vue en acquérant une compétence existante ou en créant une nouvelle compétence (qui peut être qualifiée de collective).

Système de Systèmes Multi-Agents Cette volonté d'assurer la coopération des collectifs nous conduit à la notion de *Système de Systèmes Multi-Agents* (SoMAS) dont l'objectif global ne pourra être atteint qu'à travers la coopération de chacun des SMA qui le constituent. Un produit collectif global (un comportement, une structure, une propriété) émergeant des interactions entre différents SMA peut être considéré comme un observable d'un Système de Systèmes Multi-agents (SoMAS) [2]. Le phénomène résultant de la coopération des collectifs de SMA sera donc l'accomplissement d'un objectif global du SoMAS. Les SoMAS partagent de nombreuses caractéristiques avec les Systèmes de Systèmes (SoS) [18] :

- *Chacun des SMA composant le SoMAS est indépendant* que ce soit au niveau « opérationnel » (chaque SMA a ses propres objectifs et fonctionne indépendamment pour les atteindre), au niveau dit « gestionnaire » (chaque SMA peut être introduit/retiré indépendamment des autres) ainsi qu'au niveau « évolutionnaire » (introduction, suppression ou modification de fonctionnalités de chacun des SMA).
- *Des phénomènes émergents au niveau du SoMAS* d'une manière similaire à ce qui se produit pour un SMA. L'interaction entre les collectifs des SMA du SoMAS engendre en effet l'apparition de nouveaux produits collectifs qui ne peuvent pas être associés spécifiquement à l'un des SMA. Ces phénomènes émergents ne sont pas nécessairement anticipés pendant la conception du SoMAS.
- *Un environnement différent pour chaque SMA* composant le SoMAS qui rend nécessaire l'existence de moyens d'interaction entre eux. Les SMA d'un SoMAS interagissent principalement par l'échange direct d'informations mais peuvent aussi interagir via l'environnement partagé.
- *Une hétérogénéité des systèmes* qui le compose. Répondre à un besoin au niveau du SoMAS nécessite des compétences et des connaissances de divers systèmes qui interagissent. La diversité des compétences est donc bénéfique pour le SoMAS. La contrepartie est que l'hétérogénéité des SMA complexifie le processus de conception car il faut permettre leur interaction. Le caractère opportuniste évoqué précédemment de ces interactions nécessite de développer des interfaces d'interaction pour faire face aux hétérogénéités et à la dynamique d'introduction/retrait de SMA.
- *Des systèmes vus comme des réseaux* car le SoMAS est composé de SMA imbriqués bien qu'ils ne soient pas nécessairement tous présents lors du déploiement initial (propriété d'ouverture). Ces réseaux émergent au fil du temps suite à l'adaptation des systèmes notamment aux instabilités de l'environnement

En plus des caractéristiques des SoS, la conception des SoMAS fait intervenir des caractéristiques issues des SMA:

- *Une automatisation du processus de coopération des collectifs au niveau de chaque SMA* car un SMA doit être capable d'observer, d'initier et de mettre fin à une phase de coopération des collectifs avec n'importe quel autre composant du SoMAS. Aussi, un SMA doit être observable et sollicitable pour permettre la coopération des collectifs accomplissant une fonction du SoMAS.
- *L'autonomie de chaque SMA*, car comme pour un agent, cette caractéristique est essentielle pour assurer le découplage des systèmes et permettre la mise en œuvre d'une intelligence collective. Chaque SMA doit s'adapter, apprendre et

éventuellement évoluer pour accomplir ses tâches. Le degré d'autonomie d'un SMA peut être mesuré en prenant en compte sa capacité à accomplir ses propres tâches par lui-même.

- *Une dynamique de gestion de la coopération des collectifs par chaque SMA* car chaque SMA modifie dynamiquement son degré d'altruisme pour s'adapter aux besoins du SoMAS. Ce degré d'altruisme dépend de divers paramètres que le système contrôle comme le temps moyen passé aux activités consacrées à l'accomplissement des fonctions du SoMAS qui peut être au détriment du temps passé à répondre à ses objectifs individuels.

2.2 Motivations

Au niveau conceptuel, de par l'autonomie des agents, il n'est pas possible de prévoir à l'avance quelles sont les compétences que les agents peuvent nécessiter pour atteindre leurs objectifs individuels. En outre, il est difficile de spécifier a priori les contextes dans lesquels un agent pourrait avoir besoin d'interagir avec un autre pour satisfaire ses besoins en services [11]. Le problème de la coopération au niveau micro réside dans la vue locale de chaque agent. En effet, un agent coopère avec un autre agent pour répondre à ses propres besoins (les besoins collectifs étant souvent exprimés explicitement au sein de chaque agent). Les travaux qui ont traité de ce sujet pour les SMA se sont concentrés sur :

- la façon dont un agent pouvait interagir avec un autre agent hétérogène, en faisant abstraction du SMA auquel il appartenait (comme dans [9]).
- le choix du bon agent qui doit coopérer afin que la coopération soit bénéfique au SMA global comme c'est le cas dans [3].

Il est difficile d'imaginer pour toutes les applications l'introduction d'une ou plusieurs entités (agents) résumant tout le système (exposition des connaissances et de l'ensemble des compétences). Dans le même contexte, les auteurs dans [21] défendent l'idée que tous les agents de tous les SMA soient égoïstes : ils ne cherchent en fait que la satisfaction de leurs propres objectifs et pas l'objectif global du SMA. Beaucoup de travaux des SMA se limitent à la recherche par un seul agent d'une compétence requise au nom de son groupe [5, 7, 13, 19, 22, 23] et se reposent donc sur une coopération au niveau micro. Nous favorisons donc le niveau collectif de coopération qui se concentre plutôt sur l'objectif global du SMA.

2.3 Cas d'étude

Pour illustrer l'intérêt et les motivations de la coopération de niveau macro, considérons trois SMA qui œuvrent à la surveillance de feux de forêts (figure 1). Le premier SMA (SMA1 : Surveillance au sol) est

constitué d'agents capteurs qui doivent mesurer (périodiquement ou à la demande) la température au sol et l'envoyer vers une station de base qui collecte et traite l'ensemble des données. Le deuxième SMA (SMA2 : Surveillance aérienne) est constitué de drones qui survolent les espaces boisés à la recherche d'un départ d'incendies (caméra IR) et qui participent à leur extinction le cas échéant via un dispositif de dispersion de poudre extinctrice. Le troisième SMA (SMA3) est constitué d'agents humains instrumentés (les pompiers), des véhicules d'intervention, et d'un centre final de traitement. Les appareils de surveillance détectent le feu et envoient l'alarme au centre final de traitement le plus proche. Ce dernier planifie la mission d'extinction du feu en affectant des rôles aux véhicules de fonction.

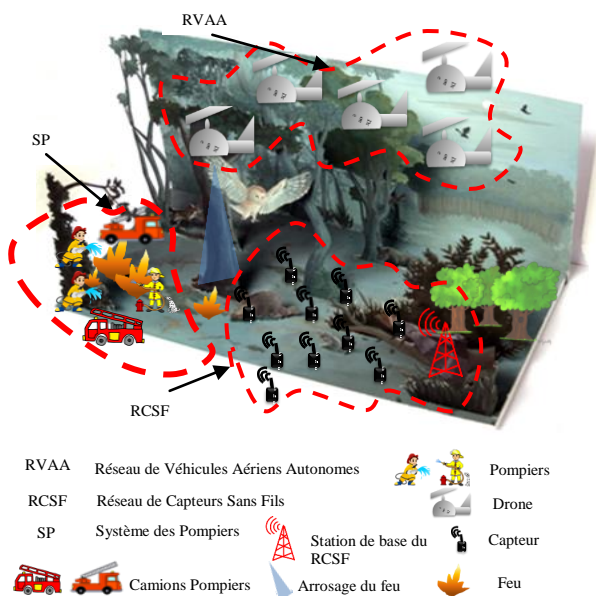


FIG. 1–Cas d'étude de surveillance de feux de forêts.

Chacun de ces SMA est déjà opérationnel et accomplit une tâche de surveillance de feux de forêts d'une façon autonome (en comptant sur ses propres compétences). L'objectif global de chacun des trois SMA est donc « le contrôle d'incendies des forêts ».

Considérons maintenant les services collectifs (i.e. compétences) produits par chacun des SMA et indépendamment des autres :

- Service collectif fourni par le SMA1 : acheminement de mesures des capteurs vers la station de base.
- Services collectifs du SMA2 : acheminement de messages entre les drones, extinction du feu.
- Service collectif du SMA3 : acheminement de données des véhicules au QG, extinction du feu.

Supposons que le SMA1 ne puisse plus acheminer l'information de déclenchement du feu à la station de base en raison d'un capteur défaillant. Cette panne provoque une partition du réseau de communication interne au SMA1. La figure 2 illustre ce

partitionnement en 2 régions distinctes du SMA1.

Un agent du SMA1 détecte la coupure de connexion avec les autres capteurs permettant d'atteindre la station de base. Dans le cas de la coopération au niveau micro entre SMA, cet agent sollicite un agent (un drone ou un camion de pompiers) en ignorant s'il appartient ou non à son propre SMA et s'il est le bon agent (celui qui permettra de rétablir le service de communication).

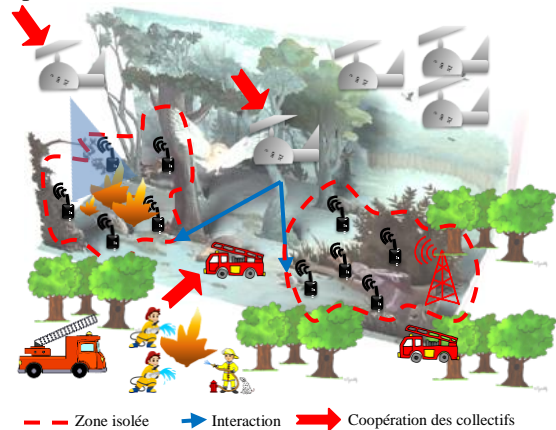


FIG. 2– Scénario de coopération des collectifs.

Du point de vue de la coopération au niveau macro, la requête du rétablissement du lien ou celle d'extinction du feu est remontée par l'agent qui détecte la panne au niveau collectif du SMA1. Il suffit donc que le SMA1 puisse observer un produit collectif d'un autre SMA, qu'il juge compatible avec son besoin, et le solliciter pour que le lien soit rétabli et le feu éteint. Ainsi, le SMA1 peut renforcer une compétence qu'il avait déjà (l'acheminement des données). Il peut acquérir une nouvelle compétence qui est l'extinction du feu et qui répond à son objectif global : le contrôle d'incendies des forêts. De cette façon, nous concevons un SoSMA à partir de SMA déjà fonctionnels afin de répondre à un objectif commun.

3 Approche méthodologique proposée

Démarche Avant de permettre l'utilisation du collectif d'un SMA par un autre, ce dernier doit prendre connaissance de l'existence de ce collectif. Les questions qui se posent sont : Comment se présente un collectif ? Comment l'observer ? Où l'observer ? Est-ce qu'il est observable par tous les autres collectifs ? Que produit ce collectif ?

Une fois que le SMA solliciteur arrive à identifier le collectif et à juger de son utilité pour atteindre son propre objectif, il essaye de coopérer avec le SMA correspondant. On s'intéresse alors aux questions suivantes : où coopérer ? Par quel médium ? Faut-il remonter une requête du niveau micro au niveau collectif pour déclencher la coopération des collectifs ? Sous quelle forme ? En utilisant quel sous-ensemble d'agents ? Quelles sont les informations échangées durant une phase de coopération des collectifs ?

Après avoir fait coopérer deux SMA au niveau collectif, il est alors important que le SMA qui l'exploite évalue la qualité du service qu'il a rendu. Une réponse aux questions suivantes est nécessaire: Quel a été l'apport/l'impact de la coopération des collectifs sur le fonctionnement du SMA solliciteur/sollicité? Comment le SMA peut-il évaluer la phase de coopération au niveau macro ?

Cette réflexion nous amène naturellement à diviser méthodologiquement la coopération des niveaux collectifs de SMA en trois principales phases comme l'illustre la figure 3 :

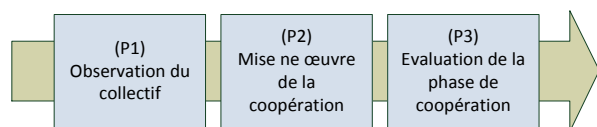


FIG. 3 – Les phases du processus de coopération des collectifs.

P1 : Cette phase consiste à permettre l'identification, le nommage et la compréhension d'un collectif. Nous avons défini une grille d'analyse qui pose différentes questions permettant de fixer les limites de l'étude et de faire la synthèse des collectifs. Elle peut être utilisée à différents niveaux du cycle de vie du SMA :

- L'étape d'analyse par un concepteur : la grille agit comme une check-list des questions à se poser pour chacun des SMA afin de comprendre les collectifs.
- L'étape d'identification automatique des collectifs par d'autres SMA: cette grille est alors exposée par un collectif pour se présenter ou être complétée de manière automatique par un collectif observant en utilisant des techniques de reconnaissance d'intentions, d'activités etc.

P2 : Les collectifs sont identifiés (P1), on sélectionne les collectifs pertinents pour la coopération (il faudra pour cela être sûr de la compatibilité des objectifs des différents collectifs dans P1) et on applique alors la stratégie de coopération.

P3 : La stratégie de coopération et le produit collectif sont évalués (analyse de retour d'expérience) par l'utilisateur, qu'il soit humain ou artificiel, afin de juger de sa pertinence.

Une fiche de conception Afin d'aider les concepteurs à se poser les bonnes questions lorsqu'ils souhaitent faire coopérer des SMA au niveau collectif, nous proposons une fiche de conception. Cette fiche contient les possibilités de conception pour le niveau micro (agents) et pour la formation du SoMAS. Elle permet aussi de mettre à disposition du concepteur les

caractéristiques d'un collectif et de la coopération des collectifs classées dans les trois phases déjà proposées. Plus loin, cette fiche pourrait être utilisée par un SMA pour analyser un autre.

Nous exposons à titre d'exemple certaines des questions soulevées qui figurent dans la fiche que nous avons définie, en illustrant chacune d'elle à l'aide du scénario exposé:

- **Q1.** *Pourquoi faire coopérer les SMA au niveau collectif (P2, P3) ? – Pour agir sur l'environnement, maintenir un état ou assurer la résilience, se confronter avec un autre point de vue, renforcer une compétence, créer une nouvelle compétence.*

Cette question porte sur la motivation des SMA à coopérer (les besoins). Pour le SMA1, soit il peut s'agir de renforcer une compétence déjà existante (l'acheminement des données) soit acquérir une nouvelle compétence (l'extinction du feu). Dans ce cas SMA1 tente de coopérer avec SMA2 et SMA3 respectivement pour maintenir l'interconnexion de l'ensemble des nœuds qui le composent et éteindre un feu qu'il détecte.

- **Q2.** *Quels types de phénomènes collectifs met en jeu la coopération des collectifs des SMA (P1, P2) ? Structures, propriétés, comportements/services.*

Cette question s'intéresse à la nature des produits collectifs existants. SMA1 propose par exemple un service global d'acheminement de messages mais aussi une structure de groupes issue de l'application d'un processus d'auto-organisation inhérent (utilisation de MWAC [15] par exemple) qui peut être détournée de son utilisation première pour caractériser des zones géographiques.

- **Q3.** *Comment peuvent interagir les deux SMA afin de coopérer au niveau collectif (P1, P2) ? [10] – Communication, Action directe, Interaction par l'environnement.*

A ce stade, le concepteur identifie les capacités d'interaction des SMA. Par exemple si les protocoles réseaux sans fil des capteurs et des drones sont les mêmes, ils pourront interagir directement en communiquant et pallier la partition du réseau sera plus aisé que s'il usurpait l'identité du nœud défaillant. Un drone qui détecterait un départ de feu mais qui ne pourrait pas communiquer, pourrait artificiellement augmenter la température au voisinage d'un nœud pour simuler un départ de feu (action par l'environnement).

- Nous avons défini de nombreuses autres questions que nous ne pouvons détailler ici. Comment un SMA peut observer et inscrire un phénomène collectif d'un autre SMA (P1) ? – Par observation d'échange de messages entre individus, observation de motifs d'interactions physiques, observation d'un réseau social/d'accointance. Comment un SMA peut guider

un collectif d'un autre SMA (P2) ? – En contactant un agent particulier, en déposant des marques dans l'environnement, en rejoignant une organisation. Quelle influence va avoir l'utilisation du collectif (P2, P3) ? Quel est le design du processus de coopération collective (P2) ? [10] – Explicite, par évolution ou par adaptation. Quel est le degré d'altruisme des SMA (P1, P2, P3) ? [10] Quel est le coût d'utilisation du service par l'utilisateur ? Quel est le coût du produit collectif pour le système participant ? Quel est le bénéfice au participant d'un produit collectif ? ... En tout, 18 questions ont été identifiées.

4 Conclusion et perspectives

Cet article a défini la notion de Système de Systèmes Multi-Agents et motivé le besoin de coopération de SMA au niveau macro. Une approche est proposée, concrétisée notamment par une fiche de conception pour l'analyse de la coopération des collectifs de SMA. Nous visons la proposition d'un modèle qui utilise cette fiche de conception permettant de répondre aux questions suivantes :

- Un SMA non coopératif au niveau collectif pourra-t-il le devenir en intégrant différents mécanismes ou devra-t-il être conçu pour l'être dès le début de la conception ?
- La coopération des collectifs doit-elle être motivée, a priori, ou peut-elle émerger des interactions des collectifs ?
- Quels sont les mécanismes clés qui donnent lieu à une coopération au niveau collectif et lui permettent de se maintenir ?
- Dans quelle mesure ces mécanismes sont nécessaires ? Est-il possible d'identifier un ensemble de conditions nécessaires pour la coopération des collectifs ?

L'instanciation de ce modèle en une architecture et son implantation permettra de valider globalement cette approche.

Bibliographie

- [1] W. Alshabi, S. Ramaswamy, M. Itmi, and H. Abdulrab, "Coordination, cooperation and conflict resolution in multi-agent systems," in *Innovations and Advanced Techniques in Computer and Information Sciences and Engineering*, ed: Springer, 2007, pp. 495-500.
- [2] S. Biswas, L. Bai, and Q. Dong, "Multi-objective consensus of interconnected system of multi-agent systems," in *Resilient Control Systems (ISRCs), 2013 6th International Symposium on*, 2013, pp. 42-47.
- [3] F. Buccafurri, D. Rosaci, G. M. Sarnè, and L. Palopoli, "Modeling cooperation in multi-agent communities," *Cognitive Systems Research*, vol. 5, pp. 171-190, 2004.
- [4] P. Cariani, "Emergence of new signal-primitives in neural systems," *Intellectica*, vol. 2, pp. 95-143, 1997.
- [5] J. A. Carlson and R. P. McAfee, "Joint search for several goods," *Journal of Economic Theory*, vol. 32, pp. 337-345, 1984.
- [6] J. Chen, Y. Hong, J. Huang, and J. Sun, "Guest editorial special issue on cooperative control of multi-agents systems: Theory and applications," *Automatica Sinica, IEEE/CAA Journal of*, vol. 1, pp. II-II, 2014.
- [7] V. Conitzer and T. Sandholm, "Automated mechanism design for a self-interested designer," in *Proceedings of the 4th ACM conference on Electronic commerce*, 2003, pp. 232-233.
- [8] J. A. G. Coria, J. A. Castellanos-Garzón, and J. M. Corchado, "Intelligent business processes composition based on multi-agent systems," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, pp. 1189-1205, 2014.
- [9] L. R. Coutinho, A. A. Brandão, J. S. Sichman, J. F. Hübner, and O. Boissier, "A model-based architecture for organizational interoperability in open multiagent systems," in *Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems V*, ed: Springer, 2010, pp. 102-113.
- [10] J. E. Doran, S. Franklin, N. R. Jennings, and T. J. Norman, "On cooperation in multi-agent systems," *The Knowledge Engineering Review*, vol. 12, pp. 309-314, 1997.
- [11] T. Ebadi, M. Purvis, and M. Purvis, "A framework for facilitating cooperation in multi-agent systems," *The Journal of Supercomputing*, vol. 51, pp. 393-417, 2010.
- [12] W. El Kholy, J. Bentahar, M. El Menshawy, H. Qu, and R. Dssouli, "Modeling and verifying choreographed multi-agent-based web service compositions regulated by commitment protocols," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, pp. 7478-7494, 2014.
- [13] J. R. J. Gatti, "Multi-commodity consumer search," *Journal of Economic Theory*, vol. 86, pp. 219-244, 1999.
- [14] M. N. Huhns, "Software agents: the future of web services," in *Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for E-Services*, ed: Springer, 2003, pp. 1-18.
- [15] J. Jamont and M. Ocelllo, "A multiagent tool to simulate hybrid real/virtual embedded agent societies," in *Web Intelligence and Intelligent Agent Technologies, 2009. WI-IAT'09. IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on*, 2009, pp. 501-504.
- [16] N. R. Jennings, K. Sycara, and M. Wooldridge, "A roadmap of agent research and development," *Autonomous agents and multi-agent systems*, vol. 1, pp. 7-38, 1998.
- [17] A. Khenifar, J.-P. Jamont, M. Ocelllo, C.-B. Ben-Yelles, and M. Koudil, "A recursive approach to enable the collective level interaction of the Web of Things applications," in *Proceedings of the 2014 International Workshop on Web Intelligence and Smart Sensing*, 2014, pp. 1-2.
- [18] P. N. Lowe and M. W. Chen, "System of systems complexity: modeling and simulation issues," in *Proceedings of the 2008 Summer Computer Simulation Conference*, 2008.
- [19] E. Manisterski, D. Sarne, and S. Kraus, "Enhancing cooperative search with concurrent interactions," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 32, pp. 1-36, 2008.
- [20] D. Mitrović, M. Ivanović, Z. Budimac, and M. Vidaković, "Radigost: Interoperable web-based multi-agent platform," *Journal of Systems and Software*, vol. 90, pp. 167-178, 2014.
- [21] I. Rochlin, D. Sarne, and M. Mash, "Joint search with self-interested agents and the failure of cooperation enhancers," *Artificial Intelligence*, vol. 214, pp. 45-65, 2014.
- [22] D. Sarne and S. Kraus, "Cooperative exploration in the electronic marketplace," in *AAAI*, 2005, pp. 158-163.
- [23] D. Sarne, E. Manisterski, and S. Kraus, "Multi-goal economic search using dynamic search structures," *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 21, pp. 204-236, 2010.