

---

# De la coopération de collectifs multi-agents

## Un modèle d'utilisation de productions collectives

**Afra Khenifar-Bessadi<sup>1</sup>, Jean-Paul Jamont<sup>2</sup>, Michel Occello<sup>2</sup>,  
Choukri-Bey Ben-Yelles<sup>2</sup>, Mouloud Koudil<sup>1</sup>**

1. LMCS, École Nationale Supérieure d'Informatique, 16309-Alger, Algérie

{a\_khenifar,m\_koudil}@esi.dz

2. Univ. Grenoble Alpes, LCIS, F-26000 Valence, France

{jean-paul.jamont,michel.occello,choukri.ben-yelles}@lcis.grenoble-inp.fr

---

*RÉSUMÉ. Un système multi-agent est un ensemble d'agents qui collaborent et réalisent ensemble une production collective. Nous nous intéressons à des systèmes dont les agents n'ont qu'une vision partielle de leur collectif et des productions qu'ils génèrent. La coopération entre systèmes multi-agents peut permettre l'exploitation mutuelle des productions de chacun des collectifs plutôt que d'exploiter individuellement les savoir-faire des agents de chacun. Elle peut aider les collectifs à réaliser leurs propres productions ou à les renforcer. Nous proposons un modèle pour faire coopérer des collectifs distribués et préexistants en évitant de perturber leur fonctionnement nominal. Pour cela, nous insérons des sondes virtuelles dans chaque collectif pour observer et influencer les agents afin de permettre la coopération par utilisation de productions collectives. L'approche proposée est évaluée sur un scénario dans lequel un réseau de capteurs et un réseau de drones conçus et déployés séparément sont mis en coopération.*

*ABSTRACT. A multiagent system is a set of agents which collaborate and realize a collective product. We are interested by teams where agents have only a partial view on their team and of the collective products they generate. Teams cooperation allows them to exploit each other collective products, instead of exploiting individually the skills of agents from each team. This cooperation can help each team to realize or to enhance its own products. We propose a model to allow the cooperation of distributed preexisting teams by avoiding the disturbance of the initial functioning of each team. To meet this constraint, we insert virtual probes into each team to observe and to influence the agents in order to allow their cooperation by using collective products. The proposed approach is evaluated on a scenario where a sensor network and a drone network need to cooperate while designed and deployed separately.*

*MOTS-CLÉS : production collective, coopération inter-SMA, systèmes multi-agents.*

*KEYWORDS: collective product, inter-MAS Cooperation, multi-agent systems.*

---

DOI:10.3166/RIA.31.97-132 © 2017 Lavoisier

## 1. Introduction

Un système multi-agent (SMA) est un ensemble d'agents qui collaborent. Différents SMA peuvent coexister dans un même environnement physique. Ces SMA peuvent être amenés à coopérer pour accroître la résilience de leurs fonctionnalités ou en augmenter la qualité.

La coopération entre agents dans un SMA amène le système à produire des comportements, des structures ou des propriétés vus comme des phénomènes collectifs. On considère ces phénomènes comme le résultat du savoir-faire global du SMA. Les travaux sur les SMA qualifient généralement « d'émergents » de tels phénomènes.

La capacité des agents à percevoir le phénomène émergent ou pas a donné naissance aux notions d'*émergence forte* et d'*émergence faible* (Müller, 2002). L'émergence forte suppose que chaque agent du SMA a un retour du phénomène global auquel il contribue. Le corollaire est que l'émergence faible se distingue par l'absence d'information sur le phénomène émergent au niveau des agents.

Les approches pour la mise en œuvre de la coopération dans les SMA qui visent à comprendre comment le phénomène émergent apparaît (néo-émergentisme (Holland, 2000)) s'intéressent à reproduire ce phénomène, à le manipuler, à l'améliorer (Castel-franchi, 1998) ou tout simplement à le réifier (David, Courdier, 2009). Elles s'intéressent donc au niveau interne du SMA et à la conception des agents.

Les approches qui considèrent le phénomène émergent comme une boîte noire (proto-émergentisme (Goldstein, 1999)) visent à reconnaître un phénomène émergent et à le différencier de phénomènes explicables (Georgé, 2004). Elles s'intéressent donc plutôt au niveau externe au SMA, global au système.

Dans ce travail nous visons à faire coopérer des SMA en permettant à chacun d'eux d'utiliser un phénomène collectivement produit par un autre. Il s'inscrit dans la vision du proto-émergentisme et de l'émergence faible. Nous considérons ces phénomènes comme des objets exploitables et non pas comme une interprétation des actions des agents à un niveau plus abstrait.

Plus loin, nous adoptons la vision des sciences organisationnelles qui considèrent un phénomène émergent comme une « production collective » (Kozlowski *et al.*, 2013). Nous devons nous poser la question de cette coopération alors que cette production collective n'est inscrite nulle part dans le SMA et que, les agents ne la perçoivent au mieux que partiellement.

Dans le contexte des sciences organisationnelles, (Kozlowski *et al.*, 2013) classe les approches qui traitent des productions collectives selon la façon d'observer la production collective et la méthode utilisée pour la contrôler. Selon le mode d'observation on distingue les approches par *observation indirecte* où la production collective est identifiée après son apparition et les approches par *observation directe* où la production collective est identifiée durant son apparition.

Selon la méthode de contrôle utilisée on distingue les *approches qualitatives* qui se basent sur l'analyse de la production collective par un observateur externe afin de la prendre en compte et les *approches quantitatives* qui utilisent des modèles avec les mécanismes nécessaires qui évaluent l'apparition de la production collective et la contrôle. Le modèle quantitatif est souvent déployé dans le système étudié.

On déduit de ces travaux quatre approches possibles d'utilisation d'une production collective (Kozłowski *et al.*, 2013) :

1. les approches qualitatives indirectes, où un observateur analyse la production collective après son apparition (par exemple par l'utilisation de constatations a posteriori) ;
2. les approches qualitatives directes, où l'observateur est placé au milieu du système pour capturer directement la production collective (par exemple par la description et l'interprétation constructive par l'observateur) ;
3. les approches quantitatives indirectes, qui utilisent un modèle formel du processus d'apparition de la production collective. Par contre ce modèle ne permet pas d'évaluer directement l'apparition de la production collective ;
4. les approches quantitatives directes, qui utilisent un modèle capable d'analyser et de contrôler la production collective pendant son apparition.

Ces quatre catégories peuvent être considérées comme des étapes logiques d'un processus pour contrôler les productions collectives de SMA préexistants. En effet, dans ce contexte les productions collectives sont déjà produites au départ, une analyse qualitative directe et indirecte des SMA à faire coopérer peut être donc utilisée par le concepteur de la coopération. Ensuite, une démarche quantitative peut être chaînée en utilisant un modèle qui opérationnalise les connaissances définies pendant la précédente phase qualitative. Dans cet esprit, l'approche que nous proposons dans ce travail est une combinaison de ces différentes approches.

Concernant l'opérationnalisation de la perception de la fonctionnalité globale du SMA, on trouve dans l'existant des approches de conception internes ou externes au SMA. Dans les approches internes au SMA, un agent représentant de chaque SMA est désigné pour représenter son SMA. Cet agent maintient une vue de la production globale du SMA. Le problème de coopération des SMA est alors reformulé en un problème de coopération de leurs agents représentants. Beaucoup de travaux se concentrent sur la recherche de l'agent adéquat pour représenter son SMA (Buccafurri *et al.*, 2004 ; Luciani *et al.*, 2006). D'autres contributions proposent des solutions pour pallier les hétérogénéités (protocole d'interaction, normes, ...) entre les agents représentants (Uchiya *et al.*, 2008 ; Coutinho *et al.*, 2009). Cependant, malgré les efforts faits pour coordonner, communiquer puis maintenir l'objectif global d'un SMA par ses agents (David, Courdier, 2009 ; Gascueña *et al.*, 2012), un agent ne peut avoir qu'une vision partielle de l'objectif global du SMA auquel il appartient (Castelfranchi, 1998), ce qui limitera la coopération entre SMA à l'exploitation des connaissances et des savoir-faire d'un seul agent (représentant du SMA).

Dans les approches externes au SMA, l'objectif est d'abstraire les fonctionnalités du SMA en construisant un ensemble de niveaux du système. Cette construction peut être préalable comme c'est le cas dans les travaux basés sur les systèmes holoniques (Adam *et al.*, 2001). Le plus haut niveau construit permet de représenter le système par une seule entité (Schillo, Fischer, 2002). La coopération de ces systèmes est alors traitée par les agents appartenant au plus haut niveau d'abstraction (c.-à-d. tête du holon) de chaque système qui coopère (Adam *et al.*, 2002). La construction peut aussi être dynamique dans certaines approches récursives non holoniques (Hoang *et al.*, 2012).

Afin de mettre en coopération des SMA en leur permettant d'utiliser mutuellement leurs productions collectives, nous proposons de :

- définir une approche pour établir les métaconnaissances nécessaires pour la coopération des productions collectives (approche qualitative). Les SMA préexistants, le concepteur de la coopération n'est pas nécessairement celui qui a conçu l'un ou l'autre des SMA à faire coopérer ;
- opérationnaliser de façon externe la coopération des collectifs en utilisant un modèle basé sur des composants appelés « sondes virtuelles » dont le rôle est de permettre la perception et l'exploitation de l'objet « production collective » (approche quantitative).

Nos motivations pour ce type de coopération sont :

- conceptuelles, en permettant une meilleure intelligibilité de la conception. Masquer la complexité interne des SMA en ne considérant que leurs productions collectives permet de se concentrer sur l'objectif de la coopération. Le processus de décomposition de problèmes est ainsi plus compréhensible par le concepteur de la coopération ;
- fonctionnelles, en prenant en considération ce que sait faire un système collectivement. Un SMA pourra exploiter un savoir-faire d'un autre SMA plutôt que les savoir-faire individuels de ses agents ;
- opérationnelles, en offrant une résolution collective des problèmes, tout en préservant l'indépendance opérationnelle et l'autonomie de gestion de chacun des SMA qui coopèrent.

Nous présentons et illustrons les concepts que nous utilisons dans ce travail en section 2. L'illustration sera faite sur un exemple de contrôle de feux de forêts par coopération de deux SMA embarqués. Nous abordons une approche méthodologique visant à définir d'une façon qualitative l'ensemble de métaconnaissances nécessaires pour la coopération en section 3. Nous présentons un modèle qui déploiera les métaconnaissances afin d'opérationnaliser la coopération des collectifs en section 4. Nous évaluons le modèle proposé en utilisant le scénario de détection de feux de forêt en section 5. Enfin, avant de conclure, nous positionnons notre proposition par rapport à un ensemble de travaux connexes en section 6.

## 2. Coopération de collectifs

Nous avons montré dans la section précédente comment les agents d'un SMA produisent collectivement des phénomènes globaux dont ils ne peuvent avoir au mieux qu'une vision partielle. En s'appuyant sur des travaux de sociologie qui s'intéressent à la caractérisation de ces phénomènes comme des productions collectives, nous sommes conduit à focaliser notre attention sur les productions du collectif plutôt que sur les agents qui participent à son élaboration.

Nous présentons dans une première partie le scénario qui nous permettra d'illustrer les concepts mis en œuvre dans notre approche.

### 2.1. Exemple d'illustration

Soient deux SMA, fonctionnant de façon autonome (conçus par des concepteurs éventuellement différents) afin d'accomplir une mission de surveillance de feux de forêts.

Le premier SMA est un réseau de capteurs sans fil (RCSF) composé d'un ensemble d'agents capteurs. Ces agents ont la capacité de mesurer la température au sol et d'acheminer les mesures vers une station de base (SB). Dans cet exemple, le modèle d'auto-organisation MWAC (Jamont *et al.*, 2010) permet la gestion des communications. Le modèle MWAC établit une structure qui limite le nombre de connexions actives pendant le processus d'inondation pour la recherche de routes vers la station de base. Pour cela, il spécialise le rôle des agents. Un agent *représentant* prend en charge l'acheminement des messages que veulent transmettre les agents auxquels il est directement connecté. Pour ce faire, il diffuse, relaye et répond à des requêtes de recherche de route. Un agent *liaison* assure la mise en relation des différents agents représentants auxquels il est connecté. Un agent *simple membre* communique uniquement avec un seul agent représentant auquel il est connecté, il lui délivre les messages qu'il souhaite transmettre ou réceptionne les messages qui lui sont destinés. Quand les agents détectent une variation de température, ils acheminent la température captée à la SB, ce qui conduit à l'apparition d'une route MWAC. Une route MWAC est donc composée d'une succession d'agents représentant et liaison en alternance.

Le deuxième SMA est un réseau de véhicules aériens autonomes (RVAA) constitué d'agents drones. Ces agents ont la capacité de survoler la forêt pour détecter le départ d'incendies grâce à des photographies aériennes (caméras IR). Ils ont également la capacité de lutter contre l'incendie. Les drones volent en une seule formation en élisant des drones « leaders » qui permettent de synchroniser le vol afin de couvrir au mieux une zone. Un agent drone choisit de se synchroniser par rapport à l'agent leader le plus proche dans son champ de transmission. Un agent drone leader diffuse périodiquement des paramètres de synchronisation aux agents qui le suivent. Avant le déclenchement du feu, les drones maintiennent une communication entre eux pour pouvoir acheminer les informations capturées au centre de décision. Quand le feu se déclenche, les drones s'auto-organisent autour de lui en se synchronisant toujours par rapport aux leaders.

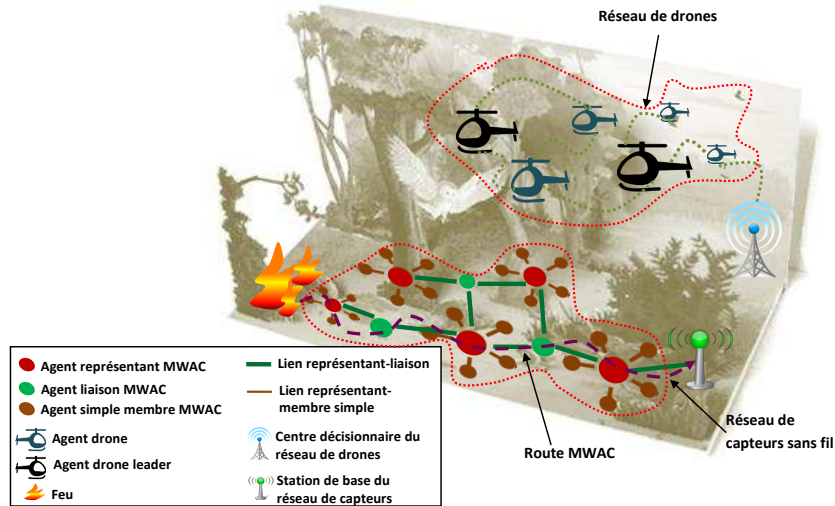


Figure 1. Exemple illustratif sur l'utilisation des réseaux hétérogènes pour la détection de feux de forêts

## 2.2. Des collectifs

**DÉFINITION 1 (Collectif).** — *Un collectif est un groupe de membres qui peut être considéré comme un « tout », qui exprime une relation entre le « tout » et ses membres et pour lequel on peut caractériser des propriétés attribuées au « tout » mais pas à ses membres individuellement. (Wood, Galton, 2009).*

En ce sens, un SMA est un collectif. Ses agents ont une représentation locale de leur environnement et ils ont la capacité de communiquer et de collaborer. De par leur collaboration, les agents sont à l'origine d'un phénomène collectif (Castelfranchi, 1998). Ce phénomène, produit par le collectif déployé, constitue une caractéristique propre de ce collectif dont les membres ne sont pas forcément conscients (Gaertner *et al.*, 2008).

**Niveaux d'observation d'un collectif.** Afin de faciliter l'explication de notre contribution, nous considérons trois niveaux d'observation des collectifs :

- *le niveau local* qui représente le niveau interne à l'agent. Le concepteur observe à ce niveau la composition interne, les capacités et les connaissances individuelles des membres d'un collectif ;
- *le niveau intra-collectif* qui représente le niveau interne au collectif. Le concepteur observe à ce niveau les comportements des membres du collectif de par leurs interactions ;

– *le niveau inter-collectif* qui représente le niveau externe au collectif. Le concepteur observe à ce niveau le résultat des interactions niveau intra-collectif (la production collective).

**Illustration sur le cas d'étude.** Le réseau de capteurs est un collectif dont les membres sont les agents capteurs. Ils collaborent pour atteindre un objectif commun qui est la surveillance de déclenchement d'un feu. Ils acheminent donc les températures mesurées vers la station de base pour réaliser cet objectif. Au niveau local de ce collectif, on observe les capacités de l'agent capteur comme l'envoi/réception de messages et ses connaissances comme son identifiant ou la dernière valeur de température mesurée. Au niveau intra-collectif on observe les messages échangés entre les agents capteurs pour construire et maintenir l'organisation MWAC.

Le réseau de drones est un collectif dont les membres sont les agents drones. Les agents drones collaborent pour atteindre un objectif commun qui est la lutte contre les incendies qui passe par la surveillance d'un environnement naturel. Au niveau local de ce collectif, on observe les capacités de l'agent drone comme l'envoi/réception de messages, et ses connaissances comme les photographies thermiques aériennes, l'altitude mesurée, etc. Au niveau intra-collectif on observe les messages échangés entre les agents drones pour former leur vol, ou bien pour s'auto-organiser autour du feu le cas échéant.

Au niveau inter-collectif du réseau de capteurs et du réseau de drones on observe leurs productions collectives qui font l'objet de la sous-section suivante.

### 2.3. Des productions collectives

Comme exprimé par (Kozłowski, Klein, 2000), la vision que nous adoptons dans ce travail se résume « à la fois à comprendre l'ensemble et à garder un œil sur les parties ».

DÉFINITION 2 (Production collective). — *Une production collective est un phénomène né des comportements des membres du collectif et qui est amplifié par leurs interactions (Kozłowski et al., 2013).*

Nous considérons dans ce papier une production collective donnée pour chaque collectif selon la vision et l'objectif d'utilisation du concepteur de la mise en coopération des collectifs.

**Illustration sur le cas d'étude.** Une production collective du réseau de capteurs est une route vers la station de base. La route est construite grâce aux interactions (envoi de messages) des agents capteurs suivant les principes d'auto-organisation de MWAC. Cette route est observable uniquement au niveau inter-collectif, car les agents n'ont pas de connaissances globales sur son existence. En effet, la route n'est pas inscrite comme un tout au niveau des agents, ils n'ont connaissance que de leur voisin qui sera le prochain relai. Pour le réseau de drones, une production collective est la formation du vol. En effet, chaque drone se synchronise avec ses voisins grâce aux interactions,

mais aucun n'a une connaissance du résultat global observé au niveau inter-collectif qui est le vol en formation de tout le système.

**Caractéristiques d'une production collective :** une production collective n'est pas produite par un ensemble figé d'agents. Elle est le résultat des interactions entre différents agents (Wood, Galton, 2009), qui ne participent pas nécessairement à tout moment à sa production (*stabilité*). Par exemple, les agents capteurs qui produisent une route MWAC ne sont pas toujours les mêmes, car un capteur peut tomber en panne et être remplacé par un autre, mais le résultat observé au niveau inter-collectif est toujours une route MWAC.

Une production collective peut être éphémère. Quand on veut l'exploiter, se pose la question de son existence (*disponibilité*). Par exemple, la production collective d'auto-organisation autour du feu du réseau de drones n'apparaît que si un feu se déclenche.

Une production collective peut être décrite de différentes façons (Wood, Galton, 2009) selon la position de l'observateur et son éloignement du niveau local (*granularité*). Par exemple, si on s'éloigne du réseau de capteurs, on ne peut retenir que la température moyenne mesurée en faisant abstraction de l'acheminement d'une température dans le réseau (la route MWAC).

**Formes d'une production collective.** Nous basant sur (Vijver, 1997 ; Atlan, 2000), nous considérons trois formes de productions collectives : les structures, les comportements et les propriétés.

*Une structure collective* est la manière dont sont liés les agents, vue au niveau inter-collectif comme une architecture exploitable du collectif (comme une route MWAC du réseau de capteurs).

*Un comportement collectif* est une fonction collective, vue au niveau d'observation inter-collectif, comme une primitive d'action entreprise par le collectif. Il résulte des interactions entre les agents qui les poussent à adapter leurs comportements/buts relativement à leurs agents voisins et/ou à leur environnement (comme le vol en formation ou l'auto-organisation du réseau de drones).

*Une propriété collective* est une singularité qu'on observe au niveau inter-collectif et qui ne peut pas toujours être exprimée par la composition des caractères individuels des membres du collectif (comme la sécurité du réseau de capteurs, la température terrestre).

#### **2.4. De la coopération de collectifs par utilisation des productions collectives**

**Scénario.** Nous proposons une extension de l'exemple illustratif qui mettra en œuvre la pertinence de la coopération des collectifs en utilisant des productions collectives. Supposons que le réseau de drones détecte un départ du feu. À cause de l'environnement hostile au départ du feu (fumée, chaleurs intenses, etc.), les signaux GPS ne sont plus exploitables par les drones (Lange *et al.*, 2009). Dans ce cas, le vol en formation du réseau de drones (une production collective) ne pourra pas atteindre le feu pour



l'éteindre. En détectant une température élevée, les capteurs du réseau de capteurs acheminent l'information vers la station de base ce qui fait apparaître une route (une production collective) reliant virtuellement le feu à la station de base. Cette route peut être interprétée comme une trajectoire permettant au réseau de drones d'atteindre le feu. Cependant, le vol en formation du réseau de drones et la route du réseau de capteurs sont des productions collectives sur lesquelles les agents des deux collectifs n'ont pas de connaissances globales. La coopération de ces collectifs est alors souhaitable.

**DÉFINITION 3** (Coopération de collectifs). — *Deux collectifs coopèrent (on parlera alors de coopération de collectifs) si chacun d'eux utilise une production collective de l'autre afin de réaliser ou de renforcer ses propres productions. On utilise l'acronyme MCLC (Multi-agent inter-Collective Level Cooperation) pour la désigner.*

Nous inspirant de (Castelfranchi, 1998), nous considérons deux utilisations mutuelles possibles de la production collective d'un collectif : *l'exploitation* ou *le guidage*.

Exploiter une production collective c'est l'utiliser sans avoir besoin de la modifier ou de l'adapter. Ainsi, le collectif sollicitateur va *adopter* l'utilisation sans agir sur le collectif sollicité. Par exemple, la route MWAC du réseau de capteurs est déjà produite, le réseau de drones peut donc simplement l'exploiter.

Guider une production collective est nécessaire quand la production collective que l'on veut utiliser n'est pas disponible lors de la sollicitation (caractéristique de disponibilité). Dans ce cas, le collectif sollicitateur et le collectif sollicité coopèrent pour faire apparaître la production du collectif sollicité puis permettre au sollicitateur de l'utiliser. Par exemple, supposons que le réseau de capteurs veut coopérer avec le réseau de drones afin d'éteindre le feu en utilisant sa production collective qui est l'auto-organisation autour du feu. Au moment de la sollicitation par le réseau de capteurs, le réseau de drones peut ne pas avoir détecté le départ du feu. Sa production collective n'est alors pas disponible. Dans ce cas, le réseau de capteurs interagit avec le réseau de drones pour pouvoir faire apparaître cette production collective puis l'exploiter.

Pour simplifier l'explication, nous nous limiterons dans cet article à l'exploitation par un collectif de la production collective d'un autre collectif.

Aucun agent dans le collectif ne possède de connaissance globale sur la production collective : le défi est de proposer une solution qui permettra d'exploiter cette production (la figure 2a page 107 illustre ce problème).

### 3. Une approche pour la coopération de collectifs

Afin de mettre en œuvre la coopération de collectifs (définition 3), nous proposons une démarche méthodologique pour identifier les besoins et les accès possibles aux collectifs à faire coopérer ainsi que leurs productions collectives. Nous proposons

de décrire de façon externe la modalité d'utilisation d'une production collective. Un ensemble de connaissances du niveau inter-collectif peut être défini.

### **3.1. Aperçu de l'approche globale de coopération**

Nous considérons des collectifs préexistants (figure 2a) à faire coopérer tout en évitant de perturber le fonctionnement nominal de chacun d'entre eux. Les productions collectives des collectifs sont déjà générées, mais ils n'ont pas la capacité de coopérer.

Une première étape méthodologique (figure 2b) va focaliser l'attention sur les collectifs mis en interaction. Cette analyse permettra dans un second temps de définir les connaissances des collectifs qui vont être manipulées par le modèle d'opérationnalisation (figure 2c). Ces connaissances permettront de paramétrer les différentes fonctions d'un ensemble de composants agents du modèle appelées « sondes virtuelles » (figure 2d). Ces sondes virtuelles seront insérées dans les collectifs afin d'opérationnaliser la coopération (figure 2e). L'ensemble des sondes forme un nouveau collectif qui permet la coopération des collectifs sous-jacents (figure 2f).

### **3.2. Démarche méthodologique**

Pour comprendre les collectifs et leur coopération, nous identifions trois phases d'analyse (figure 2b). Cette démarche (Khenifar-Bessadi *et al.*, 2015 ; Khenifar-Bessadi *et al.*, 2016b), aide informellement à définir un ensemble de « connaissances au niveau inter-collectif » qui vont être utilisées dans le modèle afin d'opérationnaliser la coopération des collectifs. L'approche méthodologique est donc destinée au concepteur de la coopération, qui est souvent différent des concepteurs des SMA à faire coopérer. L'objectif de cette approche est donc de guider le concepteur de la coopération afin qu'il puisse comprendre les SMA, et décrire leurs productions utiles pour la coopération.

Durant **la première phase (P1)**, cette démarche permet de définir l'objectif de la coopération puis de comprendre les collectifs, ce qui nécessite notamment l'identification de leurs productions collectives vues au niveau inter-collectif. Les questions relatives à cette phase sont notamment *Pourquoi faire coopérer les collectifs ?* : pour augmenter la résilience d'un collectif en utilisant la production collective d'un autre ou augmenter sa qualité de services ou produire un nouveau service. Une fois l'objectif de la coopération bien spécifié, les productions qui permettront d'atteindre cet objectif sont identifiées. Ainsi une autre question pertinente est *Quelle forme de production collective peut-on observer des collectifs ?* : la production observée est-elle un assemblage des agents (une structure), une fonction entreprise par le collectif (un comportement) ou une singularité observée au niveau inter-collectif (une propriété).

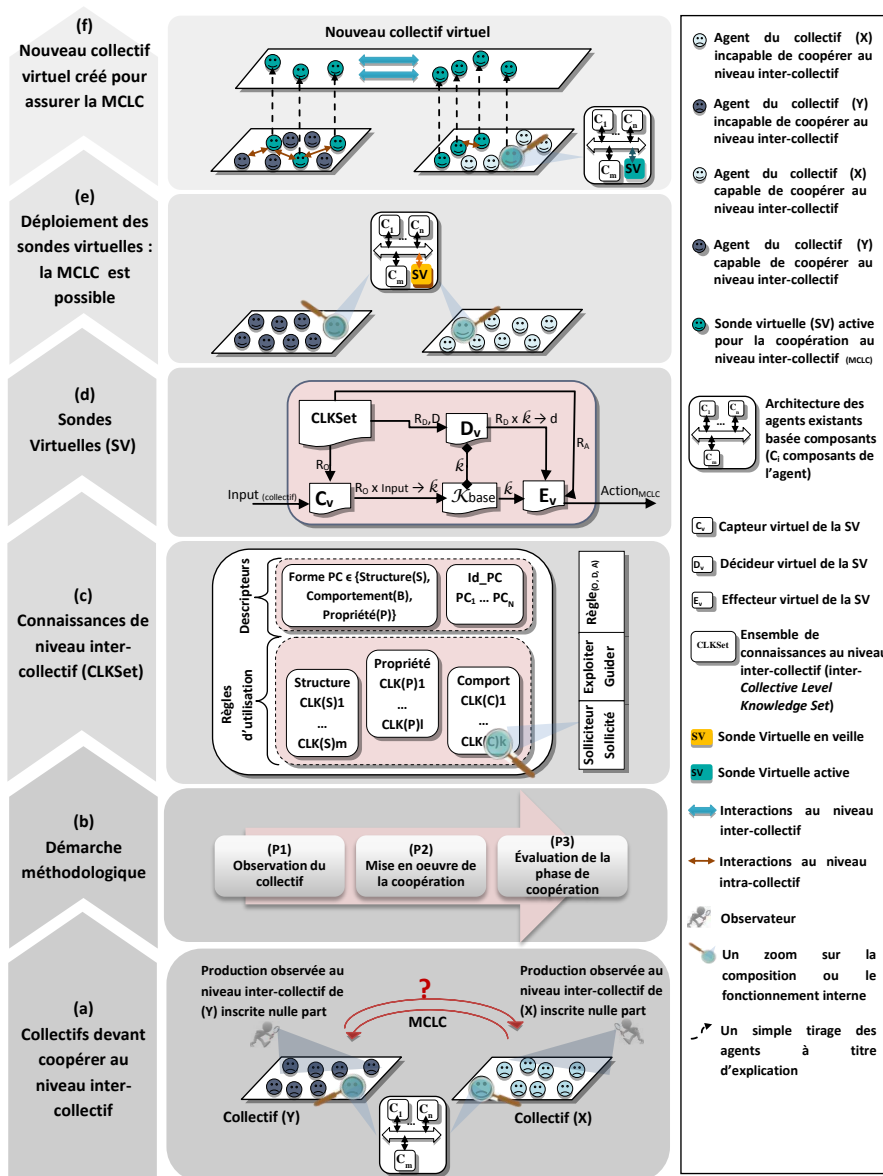


Figure 2. Approche générale de la coopération des productions collectives

L'identification des productions collectives est effectuée par une observation externe après leur apparition, cette phase représente en un sens l'aspect « qualitatif indirect » de l'approche <sup>1</sup>.

1. Définition des catégories en section 1, pages. 3, 4

Durant la **deuxième phase (P2)**, la démarche permet de définir un ensemble « d'indicateurs » qui permettront d'automatiser l'observation de l'apparition de la production collective dans le modèle. Ces indicateurs sont définis grâce à l'observation du collectif aux niveaux « intra-collectif » et « local ». Ensuite, des stratégies de coopération sont définies en se basant sur ces indicateurs. Nous organisons les questions concernant cette phase, selon la forme de la production observée. Par exemple :

– Pour l'observation de l'apparition de la production collective : *quelle connaissance est présente au niveau local de l'agent dès l'apparition de la production collective ? Quel comportement de l'agent au niveau intra-collectif est lié à la présence de la production collective ?*

– Pour l'exploitation d'une structure collective : *quels sont les leviers (organisation, interaction) qui permettront l'utilisation de la production collective ? Comment utiliser ces leviers pour permettre l'exploitation de la structure collective tout en assurant la continuité du fonctionnement du collectif sollicité ?*

– Pour l'exploitation d'un comportement collectif : *peut-on organiser une interaction entre le collectif sollicité et sollicitateur ? Quelles sont les connaissances sur les paramètres de synchronisation qui permettent d'organiser cette interaction et de la maintenir ? Comment faire pour permettre l'exploitation du comportement collectif en utilisant les connaissances définies ?*

– Pour l'exploitation d'une propriété collective : *Quel est le domaine applicatif du collectif ? Quelle est sa mission ? Quelles fonctions particulières conduisent à l'apparition des singularités relatives à la mission du collectif ?*

Durant cette phase, une observation externe de la production collective pendant son apparition est réalisée : cette phase est liée au caractère qualitatif direct (détaillé en section 1).

Au cours de la **troisième phase (P3)** les critères pour évaluer l'apport et l'impact de la coopération sur les collectifs qui coopèrent sont définis. Les critères à définir sont liés aux productions collectives identifiées dans la première phase et les stratégies de leur utilisation définies lors de la seconde phase. Les questions posées dans la grille d'analyse sont par exemple *Les stratégies définies perturbent-elles le fonctionnement nominal des collectifs ? Empêchent-elles les collectifs d'atteindre leurs objectifs initiaux ? Quel est le coût de la coopération par rapport au domaine applicatif du collectif ? Quel est l'apport de la coopération sur les collectifs ? Comment peut-on avoir un retour d'expérience sur la forme de coopération (guidage ou exploitation) et la stratégie de coopération les plus efficaces ? Peut-on améliorer les stratégies de coopération en se basant sur ce retour d'expérience ?*

### 3.3. Les connaissances au niveau inter-collectif

DÉFINITION 4 (Connaissance de niveau inter-collectif). — *Une connaissance du niveau inter-collectif (appelée CLK pour inter-Collective Level Knowledge) est méta-*

*connaissance qui décrit les modalités d'utilisation d'une production collective d'un collectif par un autre.*

Utiliser des métaconnaissances pour décrire des phénomènes émergents dans les SMA a déjà été utilisé par (David, Courdier, 2009). Nous distinguons deux types de CLK indépendants :

- *les descripteurs de productions collectives*, qui détaillent une production collective d'un collectif en précisant sa forme (structure, comportement ou propriété) et en décrivant son identifiant. Les descripteurs des productions collectives sont définis dans (P1) ;
- *les règles d'utilisation de productions collectives* qui décrivent les modalités d'utilisation des productions collectives. Ces règles sont définies dans (P2), et elles sont organisées selon la forme de la production collective observée (structure, comportement ou propriété), le statut du collectif (solliciteur/sollicité d'une coopération des productions collectives) et la forme d'interaction utilisée (exploitation ou guidage). Quand deux collectifs procèdent à une coopération des productions collectives, ils exploitent ces règles pour récupérer les connaissances sur les modalités (les métaconnaissances) d'utilisation des productions collectives.

Un collectif peut proposer différentes productions collectives identifiables par rapport à l'objectif du concepteur de la coopération : des métaconnaissances sont définies pour chaque production collective du collectif. L'ensemble des CLK d'un collectif est rassemblé dans un *CLKSet* (figure 2c).

#### 4. Opérationnalisation de la coopération des collectifs

Afin de mettre en œuvre la coopération des collectifs, nous proposons un modèle intitulé *McLcM (Multiagent inter-collective Level cooperation Model)* basé sur le déploiement des sondes virtuelles sur les agents des collectifs à faire coopérer.

**DÉFINITION 5 (Sonde virtuelle).** — *Une sonde virtuelle est un composant logiciel qui encapsule le CLKSet ainsi que les mécanismes de raisonnement nécessaires pour la coopération des collectifs.*

Les sondes virtuelles fonctionnent sur les trois niveaux d'observation :

- **un fonctionnement local** : la sonde espionne le fonctionnement interne de l'agent sur lequel elle est embarquée sans altérer son fonctionnement. Elle pourra donc avoir accès à ses messages entrants et sortants ;
- **un fonctionnement intra-collectif** : les sondes d'un même collectif communiquent entre elles afin de permettre l'exploitation des productions collectives de leur collectif. Les stratégies de déploiement, activation et décision des sondes virtuelles opérationnalisent la coopération des collectifs au niveau intra-collectif ;
- **un fonctionnement inter-collectif** : les sondes appartenant à différents collectifs communiquent entre elles afin d'opérationnaliser leur coopération en utilisant les productions collectives.

#### 4.1. Le fonctionnement local des sondes virtuelles

##### 4.1.1. Les composants d'une sonde virtuelle

Une sonde virtuelle comprend le *CLKSet*, une base de connaissances (*KBase*) et trois composants virtuels : un capteur, un effecteur et un décideur (figure 2d). Ces trois composants sont dits virtuels car ils n'accèdent pas directement à l'environnement physique du collectif dans lequel la sonde est déployée ; ils doivent utiliser les capacités physiques de l'agent sur lequel la sonde est greffée.

**Capteur virtuel.** Le rôle de ce composant est de construire la représentation du monde qu'aura la sonde. Il lui permet de percevoir son environnement immédiat, l'agent sur lequel la sonde est greffée. Pour cela, il utilise les règles d'observation incluses dans le *CLKSet*. Le capteur virtuel peut ainsi récolter plusieurs connaissances sur l'agent : ses interactions, ses compétences, son rôle dans le collectif etc. Il peut aussi percevoir l'environnement réel via les propres capteurs physiques de son agent. Les connaissances récoltées sont stockées dans la base des connaissances (*KBase*).

**Décideur virtuel.** Il est le module de raisonnement de la sonde qui contrôle son comportement. Il décide des interactions avec :

- les autres sondes de son collectif pour partager leurs observations et assurer l'exploitabilité de l'objet « production collective » si la sonde fait partie du collectif sollicité ;
- les sondes de l'autre collectif pour permettre l'exploitation de la production de son propre collectif si la sonde fait partie du collectif sollicité, ou d'un autre collectif si la sonde fait partie du collectif solliciteur.

Pour cela, il est connecté :

- à la *base des connaissances récoltées KBase* pour bénéficier des informations que le capteur virtuel récolte sur l'agent et l'environnement ;
- à la *base de connaissances CLKSet* pour utiliser les connaissances du niveau inter-collectif. Il se base notamment sur ces connaissances pour décider des actions que la sonde virtuelle doit entreprendre afin de mettre en œuvre la coopération des collectifs ;
- au composant *effecteur virtuel* à qui il communique la liste des interactions à réaliser afin de concrétiser l'exploitation des productions collectives.

**Effecteur virtuel.** Le rôle de ce composant est d'opérationnaliser les décisions prises par la sonde. Au *niveau interne à l'agent*, l'effecteur leurre la perception de l'agent pour l'amener à réagir selon ses propres besoins. Au *niveau externe à l'agent*, l'effecteur réalise les interactions requises par sa sonde avec les autres sondes (c.-à-d. aux niveaux intra-collectif et inter-collectif) et avec l'environnement de l'agent en utilisant les ressources physiques de l'agent.

**Illustration du fonctionnement de la sonde virtuelle.** Nous supposons que les agents drones et les agents capteurs ont une architecture à base de composants qui peut être gérée à distance (comme OSGI). Les sondes virtuelles seront déployées sur

la plate-forme et pourront percevoir les échanges entre les différents modules d'un agent (figure 3). Sans modifier le code de l'agent (les composants qui l'incarnent) la sonde pourra récolter et agir sur les connaissances de l'agent et son environnement.

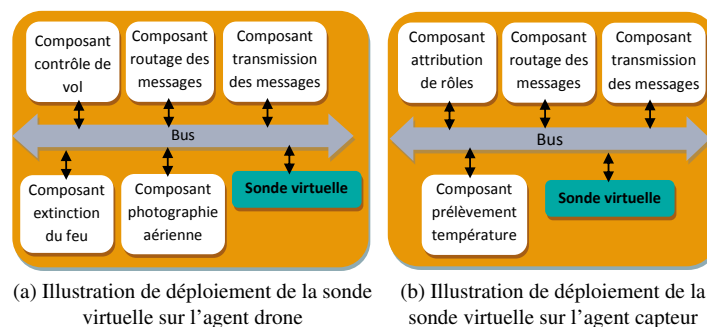


Figure 3. Illustration du déploiement des sondes virtuelles au niveau local

Le capteur virtuel de la sonde déployée dans l'agent drone, perçoit les échanges entre le composant de contrôle du vol et le composant de routage des messages qui permet l'envoi d'informations aux drones voisins. A travers cette perception il prend connaissance de l'altitude de l'agent drone, la direction du vol, etc. Il perçoit également les interactions entre le composant de capture aérienne et le composant d'extinction du feu. Il peut ainsi prendre connaissance de la détection d'un départ de feu et de sa position.

Le capteur virtuel de la sonde déployée dans l'agent capteur, perçoit les messages échangés entre le composant de routage des messages et le composant de transmission des messages. De ces messages, le capteur virtuel récolte des connaissances sur le rôle de l'agent (inclus dans le message).

L'effecteur virtuel de la sonde déployée dans l'agent drone, peut leurrer la perception de son agent concernant la direction du vol en passant au composant de contrôle de vol des paramètres de la même façon que le composant d'extinction du feu par exemple. Ainsi, il va le convaincre d'un départ d'incendie, et lui pousser à se diriger vers une direction précise. L'effecteur envoie ses propres messages en les passant directement au composant de transmission de messages.

L'effecteur virtuel de la sonde déployée dans l'agent capteur, peut leurrer la perception de son agent concernant la nécessité d'envoyer un message de donnée incluant la température prélevée. En effet, l'effecteur pourra générer un message de requête de température avec un identifiant d'un capteur voisin comme émetteur et le passer au composant de routage des messages. En recevant ce message, ce composant va générer un message de donnée et le passer au composant de transmission de messages.

#### 4.1.2. *L'état d'une sonde virtuelle*

Une sonde peut être « active » ou « en veille » selon ce qu'elle a un rôle ou non à jouer dans les interactions permettant l'exploitation de productions collectives. Une sonde active interagit avec les sondes actives de son collectif pour prendre des décisions liées aux aspects intra-collectifs (assurer l'exploitabilité de la production collective pour le collectif sollicité et son exploitation pour le collectif sollicitateur). Elle interagit également avec les sondes virtuelles d'un autre collectif pour opérationnaliser une coopération des collectifs, c'est à dire échanger les informations nécessaires pour l'exploitation de la production collective. Une sonde active a aussi la capacité de solliciter une sonde en veille pour l'activer dans certaines conditions. Une sonde en veille se contente donc de construire ses connaissances et de répondre aux sollicitations d'activation émanant des sondes virtuelles actives.

Une condition initiale d'activation peut être définie par rapport aux indicateurs identifiés lors de la phase d'analyse. Une fois que le processus de coopération commence, les sondes virtuelles peuvent commuter entre les deux différents états d'activité (figure 4) selon que ses conditions sont vérifiées ou non. Ces conditions sont :

- Si la sonde active ne participe pas à l'identification de la production collective (condition C1) alors elle va commuter en mode veille : elle en informe les sondes voisines.
- Si la sonde active perturbe le fonctionnement de l'agent (condition C2), elle envoie une requête d'activation aux sondes voisines qui sont en mode veille. Si une sonde en veille capable de se réveiller existe (si les conditions C1, C2 et C3 ne sont pas vérifiées) elle envoie une réponse. La sonde active choisit une sonde en veille à activer parmi celles qui ont envoyé une réponse et elle passe en mode veille.
- Si la sonde a perdu le lien de communication avec les sondes actives de l'autre collectif (condition C3), alors la sonde se comporte comme pour la condition C2 (elle envoie une requête d'activation).

#### 4.1.3. *Altruisme d'une sonde virtuelle*

Dans le but de maîtriser la perturbation du fonctionnement de l'agent hôte, les sondes contrôlent leur niveau d'altruisme (figure 5). Le niveau d'altruisme (noté  $\lambda$ ) représente la capacité physique de la sonde à répondre aux sollicitations de la coopération de collectifs. Si les ressources (temps de calcul, mémoire...) non utilisées de la plate-forme sur laquelle la sonde est déployée sont suffisantes pour répondre aux sollicitations de coopération, elle est dans un état « altruiste » car son fonctionnement interfèrera « peu » avec celui de l'agent. Dans les autres cas, en fonction des restrictions de ressources, la sonde sera soit dans un état « semi-altruiste » soit « auto-intéressée ». Dans ce dernier cas elle ne participera pas aux interactions entre sondes car perturber le fonctionnement de l'agent pourrait nuire à la qualité de la production collective. La transition entre ces trois états est commandée par les seuils  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$ , communs à toutes les sondes du même collectif, avec  $0 \leq \Lambda_1 < \Lambda_2 < 1$ .



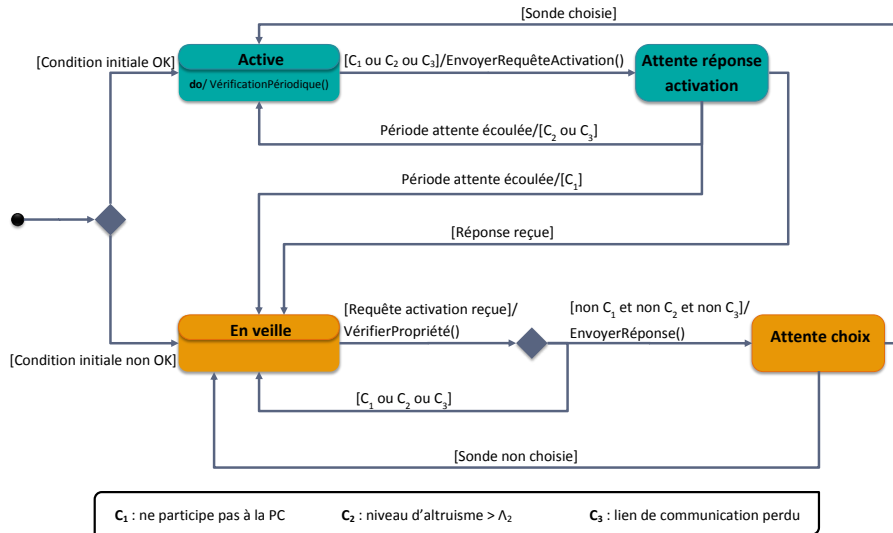


Figure 4. Dynamique d'activation d'une sonde virtuelle

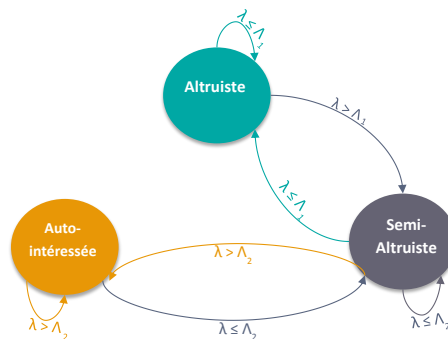


Figure 5. Dynamique du niveau d'altruisme d'une sonde virtuelle

## 4.2. Le fonctionnement intra-collectif et inter-collectif des sondes virtuelles

### 4.2.1. Déploiement des sondes virtuelles au niveau intra-collectif

Dans le cas le plus général, les sondes sont embarquées sur tous les agents des collectifs à faire coopérer afin de garantir l'exploitation des productions collectives

en accord avec leur propriété d'ouverture. Nous ne visons pas actuellement à optimiser la distribution des sondes en utilisant une « meilleure » politique de déploiement dans les collectifs. La dynamique d'activation des sondes permet au sous ensemble des sondes actives de participer à l'utilisation de la production collective. L'idée d'utiliser un sous-ensemble d'agents pour guider un phénomène au niveau inter-collectif a cependant déjà été éprouvée (Serban *et al.*, 2015).

4.2.2. *Décision des sondes virtuelles au niveau intra-collectif et inter-collectif*

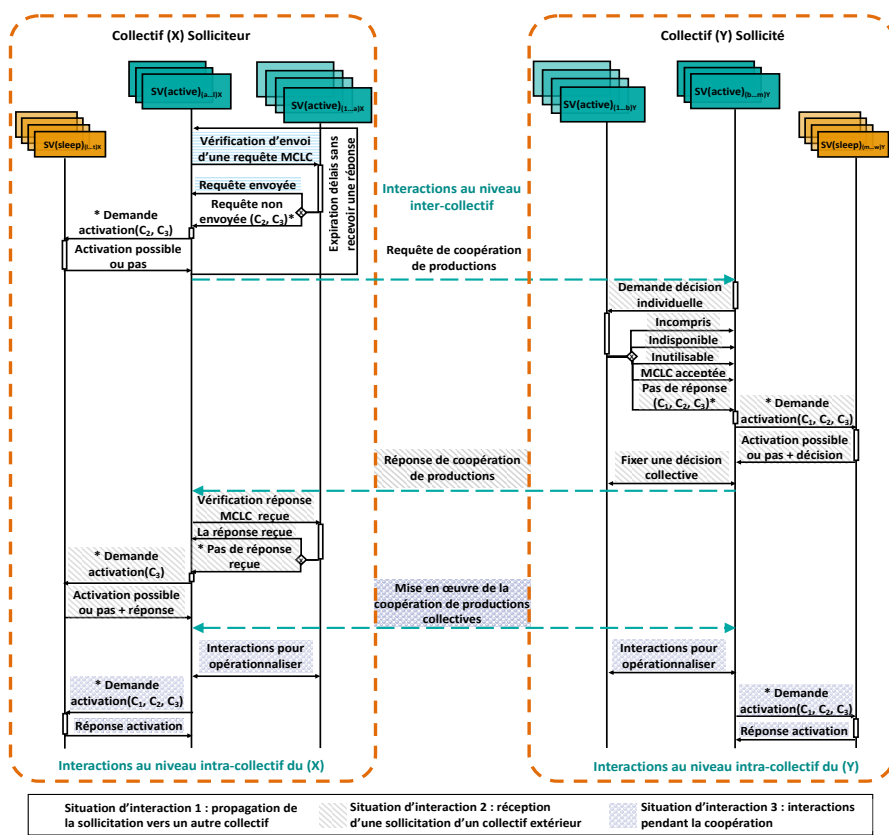


Figure 6. *Illustration des interactions des sondes virtuelles aux niveaux intra-collectif et inter-collectif*

Afin de pouvoir prendre des décisions au niveau intra-collectif et inter-collectif, un protocole qui fonctionne sur ces deux niveaux (figure 6) gère les interactions entre les sondes virtuelles. Les sondes actives du même collectif interagissent ensemble avant

de participer à toute interaction au niveau inter-collectif (avec les sondes actives d'un autre collectif). Nous distinguons les situations d'interaction suivantes :

- *Situation d'interaction 1 - propagation de la sollicitation d'une production collective vers un autre collectif* : le sous-ensemble des sondes actives d'un collectif qui décide d'exploiter une production collective d'un autre collectif l'amène à tenter d'interagir avec ses sondes virtuelles actives. Si l'opération ne fonctionne pas (elles ne reçoivent pas de réponse), les sondes virtuelles actives vont réveiller les sondes de leur collectif en mode veille pour augmenter leur chance d'atteindre l'autre collectif (le principe de localité des communications fait qu'en les utilisant on augmente la portée de communication du collectif).

- *Situation d'interaction 2 - réception d'une sollicitation d'un collectif extérieur* : lorsque les sondes actives d'un collectif reçoivent une sollicitation de coopération de la part d'un collectif extérieur, elle interagissent ensemble pour décider collectivement de l'acceptation ou le refus de la coopération. Les sondes commencent par décider individuellement sur l'acceptation ou le refus de la coopération en se basant chacune sur son niveau d'altruisme. Par la suite, elles échangent les décisions individuelles pour prendre une décision collective.

- *Situation d'interaction 3 - pendant la coopération* : pendant les interactions de la coopération, les sondes actives d'un collectif (solliciteur ou sollicité) interagissent entre elles avant toute interaction (guidée par le *CLKSet*) avec les sondes de l'autre collectif.

Les sondes virtuelles actives des différents collectifs interagissant au niveau inter-collectif pour opérationnaliser la coopération de collectifs ce qui conduit à faire apparaître un nouveau collectif virtuel. Ce dernier est au niveau inter-collectif des autres collectifs et représente le moteur de la coopération (figure 2f). Le collectif virtuel s'appuie sur les comportements initiaux des collectifs et sur celui des sondes virtuelles.

## 5. Application

Dans cette section, nous validons par simulation le modèle de coopération que nous proposons, à l'aide de l'outil MASH (Jamont *et al.*, 2013), dédié au développement de systèmes multi-agents embarqués (figure 7).

### 5.1. Instanciation du modèle sur l'exemple

Nous détaillons ici l'implémentation du modèle que nous proposons. Nous illustrons aussi le fonctionnement de l'approche pour que le réseau de drones puisse exploiter une production collective du réseau de capteurs (Khenifar-Bessadi *et al.*, 2016a).

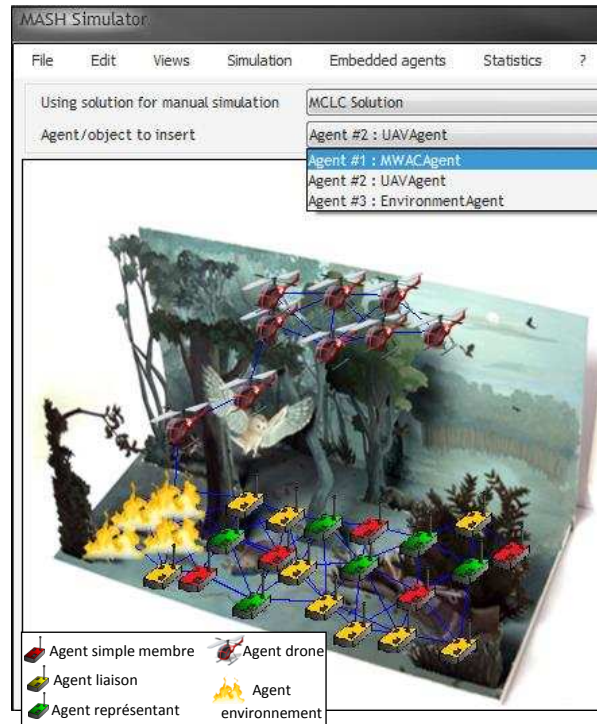


Figure 7. Implémentation du cas d'étude de surveillance de feux de forêts avec le simulateur MASH

#### 5.1.1. Fonctionnement des sondes virtuelles au niveau local

Le diagramme de packages correspondant à l'implémentation de la sonde virtuelle sous MASH est représenté dans la figure 8. Le package `SondeVirtuelle` contient les trois classes correspondant aux trois composants virtuels de la sonde. Le package `CLKSet` contient les classes qui gèrent les CLK de la sonde. Le package `Evenement` comprend tous les événements considérés pour l'observation et l'influence des productions collectives. Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement aux événements de type trame représentés par le package `Trame`. Le package `Messages` MCLC contient les classes qui gèrent les messages aux deux niveaux inter-collectif (p. ex. `MCLCRequest`, `MCLCReply`) et intra-collectif (p. ex. `MCLCIndividual Decision`, `ActivationRequest`). Le package `MessagesAgent` contient les classes qui gèrent les messages de l'agent préexistant. Le package `KBase` contient les classes qui gèrent les connaissances récoltées par la sonde, y compris la classe qui garde trace de l'état de la coopération en cours et des coopérations terminées (réussies ou échouées). Les données gérées par cette classe sont utilisées par la sonde pour

l'évaluation de la coopération ainsi que de la stratégie la plus efficace (celle qui a conduit plus de coopérations réussies) afin de l'aider à prendre des décisions pour les futures coopérations. Par contrainte d'espace, nous ne détaillons pas la phase d'évaluation dans cet article.

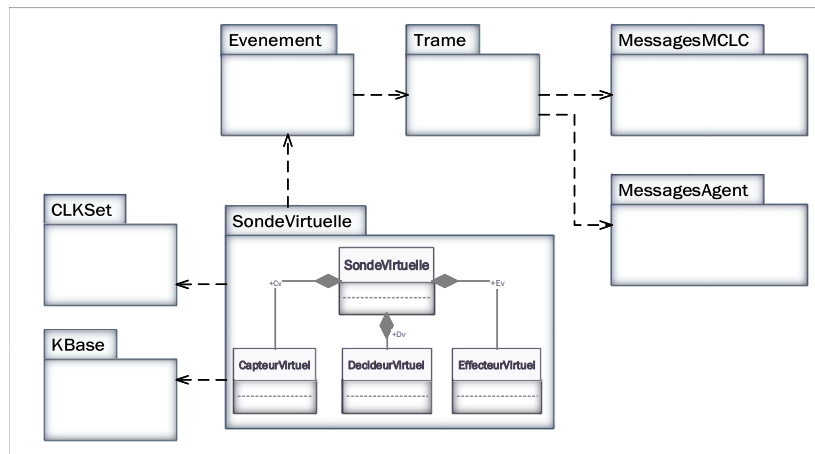


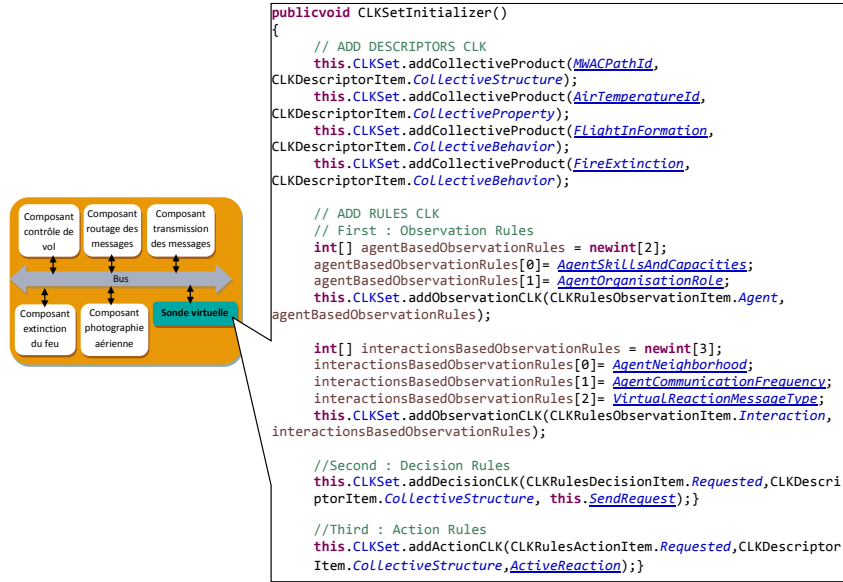
Figure 8. Diagramme de packages de la sonde virtuelle

Le *CLKSet* correspondant à la sonde déployée sur l'agent capteur et l'agent drone sont respectivement représentés dans la figure 9a et la figure 9b.

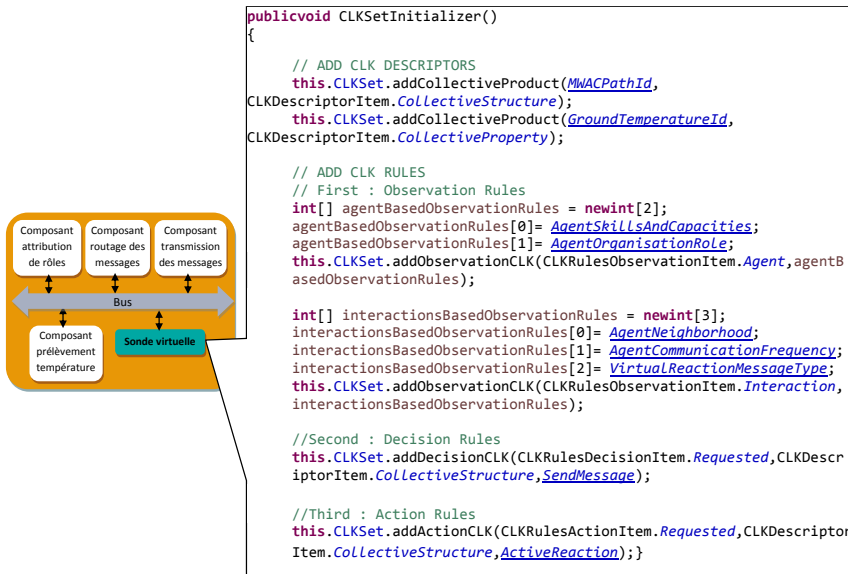
Grâce au capteur virtuel et au *CLKSet*, la sonde déployée sur l'agent capteur pourra observer cet agent et son environnement. De cette observation la sonde virtuelle prendra connaissance des capacités de l'agent qui sont l'envoi/réception de messages et les captures température, des agents capteurs voisins, du format des messages échangés et avec qui ils sont plus fréquemment échangés, du rôle de l'agent dans MWAC.

Grâce à l'observation de la sonde virtuelle embarquée sur l'agent drone par son capteur virtuel (à base du *CLKSet*), la sonde virtuelle récolte des connaissances : sur les capacités de l'agent (envoi/réception de messages, synchronisation pour le maintien de la formation du vol, captures aériennes, extinction du feu), sur les agents drones voisins, sur le format des messages échangés et avec qui ils sont le plus fréquemment échangés, sur les paramètres de synchronisation échangés et sur la fonction de l'agent (leader ou non) dans la synchronisation.

Étant donné que l'acheminement des données est la fonction principale du réseau de capteurs, et une parmi les plus importantes du réseau de drones, nous évaluons le niveau d'altruisme par rapport aux échanges effectués par la sonde. En effet, si les échanges de la sonde dépassent un certain seuil, l'agent ne pourra plus réaliser ses



(a) La sonde virtuelle de l'agent drone



(b) La sonde virtuelle de l'agent capteur

Figure 9. Les connaissances au niveau inter-collectif (CLKSet) des sondes virtuelles

échanges (comme l'augmentation du temps d'attente des fils d'envoi et de réception) ce qui risque de faire disparaître la route MWAC. Nous définissons donc le niveau d'altruisme  $\lambda$  d'une sonde virtuelle par le rapport entre les échanges effectués par la sonde et tous les échanges effectués par la plateforme sur laquelle coexistent l'agent et la sonde. Ainsi :

$$\lambda = \left( \frac{\text{(somme des messages envoyés + somme des messages reçus) par la sonde}}{\text{totalité des messages envoyés + totalité des messages reçus}} \right)$$

Pour cet exemple applicatif, nous fixons les seuils de transition  $(\Lambda_1; \Lambda_2)$  à  $(0,3; 0,5)$ . Si les échanges de la sonde ne dépassent pas un tiers de la totalité des échanges, la sonde est altruiste. Si les échanges de la sonde représentent un taux entre le tiers et la moitié de la totalité des échanges la sonde est semi-altruiste. Si les échanges de la sonde dépassent la moitié de la totalité des échanges, la sonde devient auto-intéressée.

### 5.1.2. Fonctionnement des sondes virtuelles au niveau intra-collectif et au niveau inter-collectif

a) *Déploiement intra-collectif* : initialement, les sondes virtuelles sont déployées sur tous les agents capteurs et sur tous les agents drones.

b) *Activation intra-collectif (selon la condition d'activation initiale)* : pour le réseau de capteurs, les sondes virtuelles des agents capteurs dont le rôle est « représentant » ou « liaison » s'activent. Cette décision est prise par le décideur virtuel de la sonde en se basant sur le *CLKSet*, les connaissances récoltées par le capteur virtuel et la condition d'activation initiale. De la même façon, les sondes virtuelles des agents drones dont la fonction est « leader » s'activent dans le réseau de drones.

#### c) *Décisions intra et inter-collectif*

Les sondes virtuelles du réseau de drones interagissent, grâce au protocole intra-collectif, pour garder trace des sondes virtuelles actives (sondes plus proches du sol et avec plus de capacités) qui vont envoyer la sollicitation de coopération des productions collectives aux sondes virtuelles du réseau de capteurs (instruction 1 algorithme 1).

Dès que les sondes virtuelles actives du réseau de capteurs reçoivent la requête de coopération, elles interagissent en utilisant le protocole intra-collectif pour prendre la décision de coopération avec le réseau de drones (instructions 2 et 3 algorithme 2).

Quand les sondes virtuelles du réseau de drones reçoivent l'acceptation de la part des sondes virtuelles du réseau de capteurs (instruction 2 algorithme 1), une coopération de collectifs est initialisée. Dès lors, commence le fonctionnement des sondes virtuelles comme un moteur des productions collectives. En effet, les sondes virtuelles fonctionnent simultanément sur le niveau intra et inter-collectif :

– *Action du réseau de drones (solliciteur)* : tout au long du déplacement des drones, ses sondes virtuelles actives interagissent pour désigner celles qui doivent envoyer une requête aux sondes virtuelles du réseau de capteurs (instructions 5, 6 de l'algorithme 1).

– *Réaction du réseau de capteurs (sollicité)* : suite à la réception des requêtes envoyées par les sondes virtuelles du réseau de drones, les sondes virtuelles du réseau de capteurs interagissent pour désigner les sondes virtuelles qui doivent envoyer un message (Instruction 5, algo 2). Les sondes sélectionnées agissent sur leurs agents pour les pousser à envoyer un message de données (Instruction 6 de l’algorithme 2).

– *Réaction du réseau de drones (solliciteur)* : l’écoute d’un message envoyé de la part d’une sonde capteur par une sonde virtuelle du réseau de drones lui permet de diriger le vol en formation en agissant sur les paramètres de synchronisation de leurs agents drones (instructions 12 et 13 de l’algorithme 1).

---

**Algorithme 1** Collectif solliciteur RVAA
 

---

```

1: Situation d'interaction 1 : Envoi sollicita-
   tion de la route MWAC ;
2: Situation d'interaction 1 : Réception ré-
   sponse de la sollicitation ;
3: tant que (Feu_Non_Atteint) faire
4:   si (etat=Active Et  $\neg C_1$  Et  $\neg C_2$  Et
      $\neg C_3$ ) alors
5:     Situation d'interaction 3 : Sélection-
       ner Drones Émetteurs de la requête ;
6:     Envoyer Requête MCLC ;
7:   sinon
8:     si (Moment de Vérification) alors
9:       Exécuter la dynamique d'activa-
         tion ;
10:    fin si
11:  fin si
12:  Attendre Réaction du RCSF (messages
     de données) ;
13:  Agir sur les Paramètres de Synchroni-
     sation de l'Agent ;
14: fin tant que
  
```

---



---

**Algorithme 2** Collectif sollicité RCSF
 

---

```

1: Situation d'interaction 2 : Réception sol-
   licitation ;
2: Situation d'interaction 2 : Envoi réponse ;
3: tant que (Requête_MCLC_Reçue) faire
4:   si (etat=Active Et  $\neg C_1$  Et  $\neg C_2$  Et
      $\neg C_3$ ) alors
5:     Situation d'interaction 3 : Sélection-
       ner les sondes qui envoient le mes-
       sage de données ;
6:     Leurrer la perception de l'agent cap-
       teur pour envoyer un message de
       donnée ;
7:   sinon
8:     si (Moment de Vérification) alors
9:       Exécuter la dynamique d'activa-
         tion ;
10:    fin si
11:  fin si
12: fin tant que
  
```

---

## 5.2. Évaluation du modèle de coopération

Nous testons dans cette section le modèle que nous proposons selon son apport, son coût et son fonctionnement. Afin de pouvoir évaluer l’apport et le coût du modèle que nous proposons, nous le comparons à un autre modèle. Nous partons donc d’un réseau de capteurs et d’un réseau de drone déployés indépendamment, sur lesquels nous appliquons séparément notre modèle et le modèle choisi pour l’évaluation.

### 5.2.1. Solution de comparaison

À notre connaissance, il n’existe pas de modèle ayant pour objectif de faire coopérer des collectifs en permettant l’utilisation de leurs productions collectives. Nous



avons donc choisi de faire la comparaison avec le modèle Agilla (Fok *et al.*, 2009 ; 2005) qui partage beaucoup de caractéristiques avec notre modèle (tableau 1).

Tableau 1. Solution de comparaison pour valider le modèle de coopération des collectifs

Caractéristiques partagées	
1) Solutions orientées SMA ;	
2) Solutions Bottom-Up ;	
3) Solutions applicables sur des SMA préexistants (dirigées par le principe de non perturbation du fonctionnement initial) ;	
4) Solutions qui considèrent des agents avec une architecture basée sur les composants ;	
5) Solutions qui utilisent la virtualisation (utilisation des ressources des agents existants) ;	
6) L'utilisation de connaissances ;	
7) Le même domaine d'application : les réseaux de capteurs hétérogènes pour la détection de feux de forêts ;	
Différences	
<i>McLcM</i>	<i>Agilla</i>
Distribué : par utilisation des productions collectives.	Décentralisé : le middleware joue le rôle d'un blackBoard.
Adaptation par activation/désactivation des sondes virtuelles	Adaptation par mobilité des agents.
Une seule sonde par agent existant	Plusieurs agents mobiles par agent existant

Agilla est un middleware Open Source<sup>2</sup>) à base d'agents mobiles destiné à la coopération de réseaux de capteurs hétérogènes, chaque réseau étant déjà modélisé par un SMA. Le principe de fonctionnement du modèle Agilla est basé sur la représentation de chaque réseau qui coopère par un agent mobile. L'agent mobile créé par le réseau sollicitateur se clone et se propage dans le réseau sollicité pour effectuer l'ensemble des opérations nécessaires à la coopération. Le déploiement de Agilla consiste à introduire un middleware entre l'OS de l'agent existant et les agents mobiles. Agilla permet donc la coexistence de plusieurs agents mobiles dans le même agent existant. Les agents mobiles communiquent alors entre eux en utilisant un espace dit de « n-uplet » dans le middleware.

Pour implémenter le fonctionnement de Agilla dans notre cas d'étude, nous nous sommes basés sur le scénario du problème de navigation dans (Fok *et al.*, 2009). Ainsi, les agents du réseau de drones envoient un agent mobile pour coopérer avec le réseau de capteurs afin de se guider vers le feu. L'agent mobile envoyé se clone et se propage à l'aide du Middleware des agents capteurs. Le but de cet agent mobile est de trouver le plus court chemin vers le feu en se basant sur les informations des agents capteurs (températures prélevées), contrairement à notre modèle qui exploite la route MWAC (une production collective) déjà existante.

2. <http://mobilab.wustl.edu/projects/agilla/download/index.html>

### 5.2.2. Tests et résultats

Nous évaluons l'apport de l'utilisation de notre modèle sur le cas d'étude de détection de feux de forêts. Ainsi, le temps nécessaire pour le réseau de drones afin d'arriver au feu est évalué. Sans aucune solution de coopération, le réseau de drones n'est pas capable d'atteindre le feu pour l'éteindre. Pour évaluer l'apport, nous utilisons la configuration de simulation Config 1 du tableau 2. Dans cette configuration, nous avons intuitivement choisi les valeurs 0,3 et 0,5 respectivement pour  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$  pour permettre à une sonde de devenir semi-altruiste si ses échanges dépassent le tiers de la totalité des échanges, et de devenir auto-intéressée si ses échanges dépassent la moitié. Les valeurs concernant la vitesse de propagation du feu, le rang de transmission/réception et la dimension de l'environnement représentent la moyenne utilisée par les simulations dans ce même contexte. La taille du réseau de capteurs et du réseau de drones est choisie en se basant sur une moyenne des valeurs de simulations dans la littérature où la taille du réseau de drone représente la moitié de la taille du réseau de capteurs pour s'approcher du cas réel où les fonctionnalités et les coûts des drones imposent de les déployer avec moins de densité.

Le cas d'étude que nous avons choisi repose sur des SMA embarqués avec des ressources limitées. Puisque le module de communication est le plus gourmand en consommation de ressources, nous évaluons le coût du modèle en terme du volume moyen supplémentaire échangé par les sondes. Pour évaluer le coût, nous utilisons la configuration Config 2 du tableau 2. Les valeurs des différents paramètres de la simulation sont identiques à la Config 1, sauf que dans Config 2 nous varions la taille des deux SMA. La taille du réseau de capteurs et du réseau de drones seront respectivement de 30 et 15, 100 et 50, 300 et 150. Il est important d'étudier le coût par rapport à la taille du SMA, car le fonctionnement du modèle que nous proposons et celui du modèle de comparaison Agilla repose sur les communications. Ainsi, plus le nombre d'agents du SMA augmente, plus le nombre de sondes insérées augmente et plus le volume moyen échangé augmente. L'intérêt est d'évaluer l'évolution du coût en fonction de la taille du SMA.

Nous évaluons la conformité fonctionnelle du modèle par rapport à l'influence du niveau d'altruisme des sondes sur son fonctionnement. Pour ce faire, nous utilisons la configuration Config 3 du tableau 2 où les valeurs des seuils  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$  seront respectivement de 0,3 et 0,5 puis de 0,5 et 0,7. Puisque le rôle du réseau de capteurs est d'acheminer les mesures vers la station de base, nous testons le fonctionnement selon le nombre moyen des messages acheminés par les agents capteurs. Nous évaluons aussi la conformité fonctionnelle du modèle en observant le nombre moyen des échanges des sondes au niveau intra-collectif et inter-collectif pour voir comment évoluent ces échanges. Pour cela, nous utilisons la Config 1 du tableau 2. Nous évaluons aussi la stratégie d'activation/mise en veille des sondes en utilisant la Config 1 avec des tailles de 10 et 5 respectivement pour le réseau de capteurs et le réseau de drones. Ces tailles ont été choisies pour faciliter la visualisation des résultats concernant l'évolution de l'état de chaque sonde virtuelle de chaque SMA.

Tableau 2. Paramètres des tests

	$\Lambda_1$	$\Lambda_2$	RCSF	RVAA	Vit. prop. feu	Rang T/R	Dim env
<b>Config 1</b>	0,3	0,5	30	15	2 m/s	60 m	800 x 738 m
<b>Config 2</b>	0,3	0,5	variés		2 m/s	60 m	800 x 738 m
<b>Config 3</b>	variés		30	15	2 m/s	60 m	800 x 738 m

### a) L'apport du modèle proposé

Selon les résultats obtenus (figure 10) nous constatons que sans solution de coopération, la distance moyenne varie dans le même intervalle [650 m, 722 m] mais ne diminue pas. Ceci s'explique par la perte des signaux GPS des drones ce qui les conduit à balayer aléatoirement la zone voisine. Par ailleurs, nous constatons que notre modèle permet au réseau de drones d'arriver plus rapidement au feu par rapport à Agilla. Ceci s'explique par la réaction en temps réel des sondes virtuelles en utilisant la production déjà existante, d'où le rapprochement immédiat des drones du feu, expliqué par la diminution de la distance moyenne au début du graphe. Ceci n'est pas le cas de Agilla, qui nécessite plus de temps pour le clonage et la mobilité des agents ainsi que la coordination entre ces agents en utilisant les n-uplet partagés dans le middleware afin de trouver le plus court chemin vers le feu. Ceci se manifeste par les 37 secondes au début du graphe avant que la distance moyenne ne commence à diminuer, donc avant que les drones ne commencent à se rapprocher du feu. Par ailleurs, la diminution de la distance en utilisant notre modèle n'est pas linéaire car le guidage est en temps réel au fur et à mesure de l'avancement des drones. Chaque sonde virtuelle du réseau de drones communique avec une ou plusieurs sondes du réseau de capteurs au niveau inter-collectif pour pouvoir coopérer en utilisant la route MWAC, dans certains endroits (comme à 300 m, 44 s) moins de sondes virtuelles du réseau de capteurs se trouvent au sol ce qui diminue les échanges donc ralentit l'avancement des drones. La non-linéarité du graphe s'explique aussi par le temps que mettent les sondes pour agir sur les agents drones afin de pas perturber leur fonctionnement initial.

### b) Le coût du modèle proposé

D'après les résultats obtenus (figure 11) nous constatons que le volume moyen échangé (messages envoyés et reçus) est exponentiel par rapport aux tailles des deux collectifs. Le volume moyen supplémentaire échangé par les sondes virtuelles du modèle McLcM quadruple en passant de 30 à 100 capteurs (figures 11a et 11b), et quintuple en passant de 100 à 500 capteurs (figures 11b et 11c). Dans tous les cas, le volume supplémentaire échangé ne dépasse pas un cinquième du volume moyen déjà échangé par les agents capteurs existants. De même constat est fait pour le réseau de drones sachant que le volume moyen des échanges des drones sans celui des sondes est en lui-même très important. L'augmentation exponentielle du volume moyen échangé par les sondes en fonction de la taille du SMA est expliquée par la politique de décisions collectives qui fait intervenir plusieurs sondes actives. Par conséquent, plus la taille du SMA est importante, plus le nombre de sondes insérées dans le SMA est

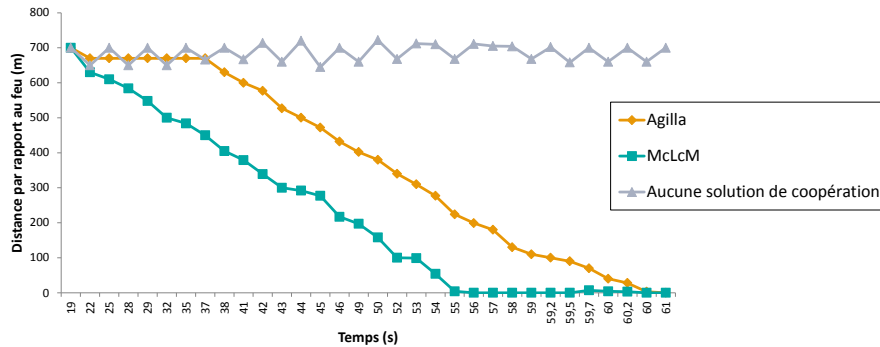


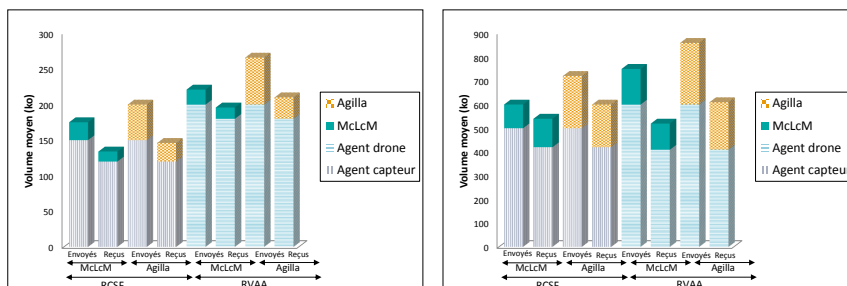
Figure 10. L'apport du modèle McLcM selon le temps nécessaire pour atteindre l'objectif de la coopération

important et plus les échanges entre les sondes augmente. Agilla présente un volume moyen supplémentaire plus important que McLcM. Le volume moyen engendré par le fonctionnement du modèle Agilla représente un quart du volume moyen échangé par les agents existants des deux SMA. Il présente à son tour une augmentation exponentielle du volume échangé par rapport à la taille des SMA. Ceci est expliqué par la mobilité des agents qui engendre une augmentation des transmissions. Le volume moyen quadruple quand le nombre de capteurs passe de 30 à 100 et de 15 à 50 drones (figures 11a et 11b), et il quintuple en passant de 100 à 500 capteurs et de 50 drones à 150 (figures 11b et 11c).

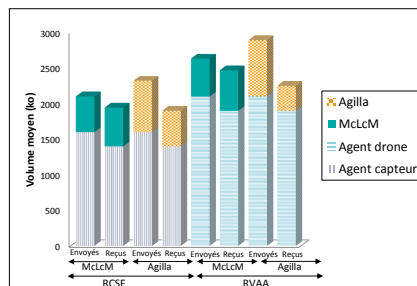
Afin de mieux étudier le coût du modèle, nous analysons le coût engendré par les niveaux de fonctionnement intra-collectif et inter-collectif des sondes virtuelles. D'après les résultats (figure 12), nous constatons que l'activité des sondes au niveau intra-collectif est plus importante que l'activité au niveau inter-collectif. Le volume moyen échangé au niveau inter-collectif représente 20 % du volume moyen au niveau intra-collectif. Au niveau intra-collectif plusieurs sondes interagissent pour prendre collectivement des décisions, ce qui explique l'augmentation exponentielle en fonction de la taille du SMA. Par contre au niveau inter-collectif, les sondes communiquent les résultats des interactions déjà faites au niveau intra-collectif en envoyant des messages légers et ciblés. Une prochaine amélioration du modèle devrait donc viser le niveau intra-collectif afin d'optimiser les échanges en étudiant plus profondément les sondes qui doivent intervenir dans chaque type d'interaction au niveau intra-collectif.

### c) Le fonctionnement du modèle

Au niveau local, nous lançons initialement la Config 3 avec un seul réseau de drones et un réseau de capteurs. À l'instant ( $t = 85$  s) nous introduisons un troisième SMA qui est un nouveau réseau de drones dont le fonctionnement est différent du



(a) (RCSF = 30 capteurs), (RVAA = 15 drones) (b) (RCSF = 100 capteurs), (RVAA = 50 drones)



(c) (RCSF = 300 capteurs), (RVAA = 150 drones)

Figure 11. Le coût de la solution de coopération selon le volume moyen des échanges supplémentaires engendrés par le fonctionnement des sondes virtuelles

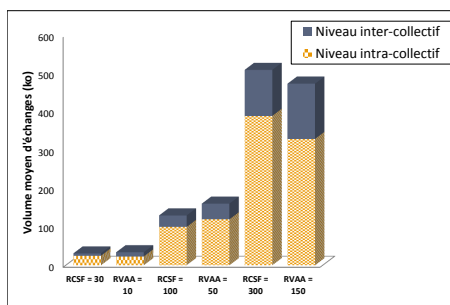


Figure 12. Volume moyen des échanges effectués sur chaque niveau de fonctionnement des sondes virtuelles

précédent, et nous observons le fonctionnement en utilisant des seuils d'altruisme différents. Selon les résultats obtenus (figure 13), nous constatons que dans le premier cas (figure 13a), où les seuils  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$  sont respectivement fixés à 0,3 et 0,5, la nouvelle sollicitation n'influence pas le fonctionnement du réseau de capteurs. En effet, la moyenne du nombre des messages envoyés par les sondes du réseau de capteurs augmente dans l'intervalle [85 s, 95 s] ce qui explique la phase de requête/réponse pour débiter une coopération. Une fois la décision faite qui est le refus de la MCLC (à cause des seuils  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$ ) le nombre de messages des sondes se stabilise. Dans ce premier cas, le fonctionnement du réseau de capteurs n'est pas influencé car le nombre de messages acheminés par les agents capteurs se stabilise. Dans le deuxième cas (13b) avec les seuils  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$  fixés respectivement à 0,5 et 0,7, nous constatons que depuis la sollicitation, le nombre de messages envoyés par les sondes augmente significativement. Ceci est expliqué par l'acceptation du réseau de capteurs d'une nouvelle coopération avec le nouveau réseau de drones (tolérée par les seuils  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$ ). Cette augmentation de messages des sondes perturbe le fonctionnement des agents capteurs qui ne peuvent plus acheminer les données (débordements et temps d'attente des files d'envoi et de réception des messages). Par conséquent, le fonctionnement des sondes est également perturbé car elles se basent sur les messages des agents qui sont désormais absents. Nous concluons que les seuils d'altruisme jouent un rôle important pour la conformité fonctionnelle du SMA préexistant ainsi que celui du modèle de coopération McLcM.

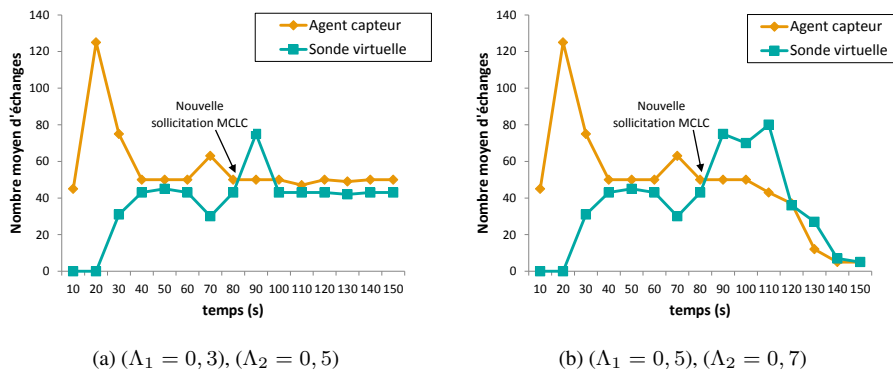


Figure 13. L'impact des seuils d'altruisme sur le fonctionnement du modèle proposé

Afin de pouvoir tester plus finement la stratégie d'activation nous provoquons la panne de l'agent capteur 3 qui participe à la production collective à ( $t = 80$  s). Le modèle MWAC par son fonctionnement nominal réagit à cette panne en cherchant une autre route vers la station de base. Ceci nous garantit le déclenchement du mécanisme d'activation des sondes car de nouveaux agents comportant d'autres sondes vont participer à l'apparition de la production collective. Nous constatons (figure 14) que suite à la panne provoquée, la sonde 3 passe en mode veille et la sonde 4 s'active pour la

remplacer suite à l'envoi d'une requête d'activation dans le réseau de capteurs. Nous constatons aussi que indépendamment de la panne provoquée, les sondes 2, 4, 5 et 6 du réseau de capteurs (figure 14a) changent d'état entre « active » et « en veille ». Ceci pourra être expliqué par la violation/satisfaction des conditions du niveau d'altruisme (C2) et de la perte du lien de communication (C3). A leur tour, les sondes du réseau de drones changent d'état (figure 14b) après chaque changement du réseau de capteurs, afin de répondre à la condition de perte de lien de communication (C3) ou à celle du niveau d'altruisme (C2).

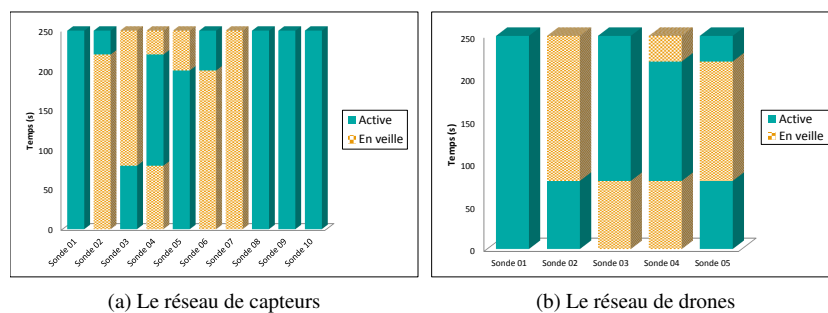


Figure 14. Évaluation de la stratégie d'activation des sondes virtuelles

Au niveaux *intra-collectif* et *inter-collectif*, nous testons le fonctionnement des sondes virtuelles en comparant l'évolution de la moyenne des échanges du collectif au niveau *intra-collectif* et *inter-collectif*. D'après les résultats obtenus (figure 15) nous validons la conformité fonctionnelle à ces deux niveaux. En effet, les échanges de niveau *inter-collectif* du réseau de capteurs (figure 15a) et du réseau de drones (figure 15b) ne sont effectués qu'après un ensemble d'échanges au niveau *intra-collectif* ce qui reflète les décisions collectives des sondes.

## 6. Discussion

Dans ce papier, nous nous intéressons à deux thématiques qui étaient séparément traitées dans la littérature : la coopération des SMA et leurs phénomènes émergents. Dans cette section, nous positionnons notre travail par rapport à certains travaux dans chaque thématique.

Pour utiliser des productions collectives, nous sommes amenés à passer par trois étapes, commençant par la compréhension du phénomène, son abstraction et son observation. Dans la littérature, les travaux sur les phénomènes collectifs émergents s'inscrivent dans une ou plusieurs de ces étapes. Pour comprendre un phénomène émergent, il peut être considéré comme un processus entraîné par les interactions des agents et progressivement raffiné (Mataric, 1993). Pour cela, une approche synthétique bottom-up peut être utilisée pour comprendre comment à partir de simples in-

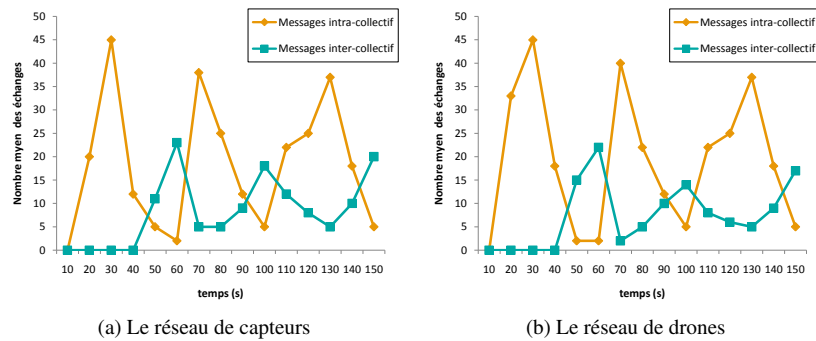


Figure 15. Évaluation de la conformité fonctionnelle des sondes virtuelles aux niveaux intra-collectif et inter-collectif

teractions, des comportements complexes de haut niveau peuvent être produits. Dans ce travail, nous utilisons cette même logique sur les phénomènes émergents mais sans supposer que les agents ne peuvent communiquer qu'à travers l'environnement. Dans notre approche, les agents interagissent directement en échangeant des messages.

L'observation de l'occurrence des phénomènes émergents a été particulièrement étudiée dans le contexte des travaux de simulation orientée-agent (SOA). Les approches d'observation pour SOA ont été classifiées sous trois catégories (O'Toole *et al.*, 2014) : (i) les approches basées sur les variables, qui analysent statistiquement certaines variables du système pour détecter le phénomène ; (ii) les approches formelles, qui utilisent des modèles formels pour observer le phénomène ; (iii) les approches basées sur les événements, qui utilisent certains événements pour détecter l'occurrence du phénomène en temps réel. Une approche basée sur les événements est plus souhaitable pour observer les phénomènes émergents des systèmes complexes adaptatifs distribués (O'Toole *et al.*, 2014) en n'utilisant que des événements détectés par les agents au niveau local. Ces événements peuvent être appelés des faits de l'émergence (David, Courdier, 2009) et leur occurrence peut être détectée par le déploiement des sondes dans l'outil de simulation. Ces sondes jouent le rôle d'un observateur externe du SMA sans influencer son fonctionnement. Dans la proposition de (David, Courdier, 2009) l'émergence est considérée comme une métaconnaissance qui est construite grâce à la détection des faits pendant la simulation. Nous utilisons également les métaconnaissances (*CLKSet*) mais dans le contexte des SMA physiquement distribués, qui est différent des SOA où certaines hypothèses, comme supposer que tout le SMA peut être représenté par un seul agent, ne sont pas valides dans notre contexte.

L'abstraction d'un phénomène émergent peut être réalisée par une approche formelle qui vise sa représentation par des entités macroscopiques du SMA (Lamarche-Perrin *et al.*, 2014). Cette représentation aide notamment à diminuer la complexité des SMA décentralisés asynchrones à grande échelle. Or cette approche est basée



sur l'analyse des traces d'exécution, chose qui n'est pas toujours possible dans notre contexte de SMA physiquement distribués. Dans notre proposition, les productions collectives, le mécanisme de leur observation et celui de leur exploitation sont abstraits dans les *CLKSet*.

Ajouter la fonctionnalité de coopération à des SMA préexistants et distribués d'une façon bottom-up est souvent opérationnalisée dans la littérature par la modification du code des agents (Cockburn, Jennings, 1996). Pour répondre à la contrainte d'évitement de la perturbation du fonctionnement des SMA préexistants, le code des agents de ces SMA ne doit pas être modifié. La fonctionnalité de coopération est donc ajoutée en ajoutant différents composants aux agents des SMA. Les capacités de raisonnement des composants ajoutés varient d'une simple ontologie (Nardin *et al.*, 2011 ; Hsieh, Lin, 2016 ; Santos *et al.*, 2016), un middleware (Coutinho *et al.*, 2009 ; Fok *et al.*, 2009), ou un agent (Yoon *et al.*, 2008 ; Archimède *et al.*, 2016), quelques travaux utilisent à la fois un agent et un middleware comme dans Agilla (Fok *et al.*, 2009). Nous proposons de rajouter des sondes virtuelles dont les capacités de raisonnement sont équivalentes à celles d'un agent. Le principe d'embarquement des sondes virtuelles peut se rapprocher de la solution plug-in adoptée par (Meron, Mermet, 2006) pour contrôler le respect de certaines propriétés d'un SMA durant son exécution.

Concernant l'idée de contrôler les productions collectives d'un collectif en agissant sur les sondes virtuelles, on peut la rapprocher des travaux exposés dans (Halloy *et al.*, 2007) qui contrôlaient le comportement d'un groupe de cafards en intégrant dans la société des « robots cafards ». Dans (Klein *et al.*, 2008), les auteurs introduisent des sondes dans un SMA afin d'asservir la dynamique du système.

## 7. Conclusion et perspectives

Cet article propose une approche hybride (qualitative et quantitative) respectivement pour définir les connaissances nécessaires, appelées connaissances au niveau inter-collectif (CLK), et pour opérationnaliser la coopération de collectifs. Pour cela, nous avons d'abord défini les notions de collectif, de production collective et de la coopération de collectifs. Le modèle d'opérationnalisation proposé se base sur l'utilisation des sondes virtuelles (SV) dont le contrôle permet d'exploiter les productions collectives d'un collectif afin qu'elles puissent être utilisées par un collectif externe.

Pour valider le modèle proposé, nous l'avons évalué par rapport au modèle de coopération Agilla. Les résultats obtenus montrent que la coopération par utilisation de productions collectives permet d'atteindre plus rapidement et efficacement les objectifs des collectifs qui coopèrent. L'utilisation des sondes virtuelles permet d'augmenter la fiabilité des systèmes tout en préservant leurs fonctionnements nominaux.

Nos efforts portent actuellement sur la formalisation du modèle proposé. Nous porterons ensuite notre attention sur comment un collectif peut déclencher une production collective d'un autre collectif. Ce problème concerne l'utilisation de productions collectives par guidage, où la production du collectif sollicité n'est pas nécessairement

générée au moment de la sollicitation. Nos ambitions sont aussi de pouvoir implémenter le modèle sur un deuxième cas d'étude dans le contexte du Web des Objets pour faire coopérer deux maisons intelligentes (Khenifar *et al.*, 2014).

## Bibliographie

- Adam E., Mandiau R., Kolski C. (2001). Application of a holonic multi-agent system for cooperative work to administrative processes. *Journal of Applied Systems*, vol. 2, n° 1, p. 100-115.
- Adam E., Mandiau R., Kolski C. (2002). Une méthode de modélisation et de conception d'organisations multi-agents holoniques. In *Organisation et applications des sma*, p. 41-75. Hermes, Paris.
- Archimède B., Memon M. A., Ishak K. (2016). Combining multi-agent model, soa and ontologies in a distributed and interoperable architecture to manage multi-site production projects. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, p. 1–15.
- Atlan H. (2000). La finalité. *Hors série Sciences et Avenir*, vol. 47.
- Buccafurri F., Rosaci D., Sarnè G. M., Palopoli L. (2004). Modeling cooperation in multi-agent communities. *Cognitive Systems Research*, vol. 5, n° 3, p. 171-190.
- Castelfranchi C. (1998). Modelling social action for ai agents. *Artificial Intelligence*, vol. 103, n° 1, p. 157-182.
- Cockburn D., Jennings N. R. (1996). Archon: A distributed artificial intelligence system for industrial applications. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, p. 319–344.
- Coutinho L. R., Brandão A., Sichman J. S., Hübner J. F., Boissier O. (2009). A model-based architecture for organizational interoperability in open multiagent systems. In *International workshop on coordination, organizations, institutions and norms in agent systems V, COIN 2009*, p. 102–113.
- David D., Courdier R. (2009). See emergence as a metaknowledge-a way to reify emergent phenomena in multiagent simulations? In *ICAART 2009 - proceedings of the international conference on agents and artificial intelligence*, p. 564-569. Porto, Portugal.
- Fok C.-L., Roman G.-C., Lu C. (2005). Mobile agent middleware for sensor networks: An application case study. In *Ipsn 2005. fourth international symposium on information processing in sensor networks*, p. 382–387.
- Fok C.-L., Roman G.-C., Lu C. (2009). Agilla: A mobile agent middleware for self-adaptive wireless sensor networks. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, vol. 4, n° 3, p. 16.
- Gaertner D., Rodríguez-Aguilar J. A., Toni F. (2008). Agreeing on institutional goals for multi-agent societies. In *International workshops on coordination, organizations, institutions and norms in agent systems IV, COIN 2008*, p. 1–16. Chicago, USA.
- Gascueña J. M., Garijo F. J., Fernández-Caballero A., Gleizes M. P., Glize P. (2012). Implementation and assessment of robot team cooperation models using deliberative control components. In *Advances in artificial intelligence - IBERAMIA 2012 - proceedings of the 13th ibero-american conference on ai*, p. 412–421. Cartagena de Indias, Colombia.

- Georgé J.-P. (2004). *Résolution de problèmes par émergence - étude d'un environnement de programmation émergente*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Toulouse III.
- Goldstein J. (1999). Emergence as a construct: History and issues. *Emergence*, vol. 1, n° 1, p. 49–72.
- Halloy J., Sempo G., Caprari G., Rivault C., Asadpour M., Tâche F. *et al.* (2007). Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices. *Science*, vol. 318, n° 5853, p. 1155–1158.
- Hoang T. T. H., Occello M., Jamont J.-P., Ben-Yelles C. (2012). Supervision de systèmes complexes artificiels décentralisés. proposition d'un modèle multi-agent récursif générique. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 26, n° 5, p. 569–600.
- Holland J. H. (2000). *Emergence: From chaos to order*. Oxford Univ Press.
- Hsieh F.-S., Lin J.-B. (2016). A self-adaptation scheme for workflow management in multi-agent systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 27, n° 1, p. 131–148.
- Jamont J.-P., Occello M., Lagrèze A. (2010). A multiagent approach to manage communication in wireless instrumentation systems. *Measurement*, vol. 43, n° 4, p. 489–503.
- Jamont J.-P., Occello M., Mendes E. (2013). Decentralized intelligent real world embedded systems: a tool to tune design and deployment. In *Advances on practical applications of agents and multi-agent systems, 11th international conference, PAAMS 2013, salamanca, spain, may 22-24, 2013. proceedings*, p. 133–144.
- Khenifar A., Jamont J.-P., Occello M., Ben-Yelles C.-B., Koudil M. (2014). A recursive approach to enable the collective level interaction of the web of things applications. In *Proceedings of international workshop on web intelligence and smart sensing*, p. 1–2.
- Khenifar-Bessadi A., Jamont J.-P., Occello M., Ben-Yelles C., Koudil M. (2016a). About cooperation of multiagent collective products: An approach in the context of cyber-physical systems. In *Proceedings of IEEE RIVF international conference on computing & communication technologies, research, innovation, and vision for the future*, p. 19–24.
- Khenifar-Bessadi A., Jamont J.-P., Occello M., Ben-Yelles C., Koudil M. (2016b). De la coopération des productions collectives dans un contexte multi-agent. In *Systèmes multi-agents et simulation - vingt-quatrièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents, JFSMA 16*, p. 43–52. Saint-Martin-du-Vivier (Rouen), France, Cépaduès Éditions.
- Khenifar-Bessadi A., Jamont J.-P., Occello M., Koudil M. (2015). Vers une coopération des collectifs de systèmes multi-agents hétérogènes. In *13èmes rencontres de jeunes chercheurs en intelligence artificielle, plate-forme intelligence artificielle*,. Rennes, France.
- Klein F., Bourjot C., Chevrier V. (2008). Contribution to the control of a mas's global behaviour: Reinforcement learning tools. In *Proceedings of the 9th international workshop engineering societies in the agents world, ESAW 2008*, p. 173–190. Saint-Etienne, France.
- Kozłowski S. W., Chao G. T., Grand J. A., Braun M. T., Kuljanin G. (2013). Advancing multilevel research design : capturing the dynamics of emergence. *Organizational Research Methods*, vol. 16, n° 4, p. 581–615.
- Kozłowski S. W., Klein K. J. (2000). A multilevel approach to theory and research in organizations: Contextual, temporal, and emergent processes. *Multilevel theory, research and methods in organizations: Foundations, extensions, and new directions*, p. 3–90.

- Lamarche-Perrin R., Demazeau Y., Vincent J.-M. (2014). Building optimal macroscopic representations of complex multi-agent systems. In *Transactions on computational collective intelligence xv*, p. 1–27. Springer.
- Lange S., Sünderhauf N., Protzel P. (2009). A vision based onboard approach for landing and position control of an autonomous multirotor uav in gps-denied environments. In *Ieee international conference on advanced robotics, icar 2009*, p. 1-6. IEEE.
- Luciani A., Thil F., Evrard M. (2006). Mass-interaction model of emergent collective phenomena. In *10th international conference on computer animation and social agents*, vol. 1, p. 197-206.
- Mataric M. J. (1993). Designing emergent behaviors: From local interactions to collective intelligence. In *proceedings of the second international conference on from animals to animats 2 : Simulation of adaptive behavior*, p. 432–441. Cambridge, MA, USA, MIT Press.
- Meron D., Mermet B. (2006). A tool architecture to verify properties of multiagent system at runtime. In *International workshop on programming multi-agent systems*, p. 201–216.
- Müller J.-P. (2002). *Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents: Interaction, émergence et systèmes complexes*. Thèse de doctorat non publiée, Université Libre de Bruxelles.
- Nardin L. G., Brandão A. A., Sichman J. S. (2011). Experiments on semantic interoperability of agent reputation models using the soari architecture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, n° 8, p. 1461–1471.
- O’Toole E., Nallur V., Clarke S. (2014). Towards decentralised detection of emergence in complex adaptive systems. In *Eighth IEEE international conference on self-adaptive and self-organizing systems*, p. 60–69.
- Santos G., Pinto T., Vale Z., Praça I., Morais H. (2016). Enabling communications in heterogeneous multi-agent systems: Electricity markets ontology. *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*, vol. 5, n° 2.
- Schillo M., Fischer K. (2002). Holonic multiagent systems. *Manufacturing Systems*, vol. 8, n° 13, p. 538-550.
- Serban A., Yammarino F. J., Dionne S. D., Kahai S. S., Hao C., McHugh K. A. *et al.* (2015). Leadership emergence in face-to-face and virtual teams: A multi-level model with agent-based simulations, quasi-experimental and experimental tests. *The Leadership Quarterly*, vol. 26, n° 3, p. 402-418.
- Uchiya T., Maemura T., Li X., Konno S., Kinoshita T. (2008). Agent interoperability mechanism among heterogeneous agent platforms for symbiotic computing. In *Proceedings of the seventh IEEE international conference on cognitive informatics*, p. 286–293. IEEE Computer Society.
- Vijver G. Van de. (1997). Emergence et explication. *Intellectica*, vol. 25, n° 2, p. 7-23.
- Wood Z., Galton A. (2009). A taxonomy of collective phenomena. *Applied Ontology*, vol. 4, n° 3-4, p. 267-292.
- Yoon Y.-J., Lee G.-H., Choi K.-H., Shin D.-R. (2008). Design of agent service system to manage services among heterogeneous multi-agent systems. In *Iwscs 2008, ieee international workshop on semantic computing and applications*, p. 123–125.