

# Coopération au sein d'une constellation de satellites

Grégory Bonnet      Catherine Tessier  
gbonnet@onera.fr      tessier@onera.fr

Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (DCSD)  
2, avenue Edouard Belin BP 74025  
31055 Toulouse cédex 4 – FRANCE

## Résumé

*Nous nous intéressons à la planification collective et la coordination d'une constellation de satellites reliés par liaisons intersatellites qui permettent des communications lorsque les satellites se rencontrent. Nous proposons un protocole de communication épidémique fondé sur l'écoute flottante qui permet la construction d'une connaissance commune des tâches à réaliser et des intentions des agents. Les premiers résultats montrent qu'il est pertinent de considérer la coordination des agents physiques via une méthode de formation dynamique de coalitions. Ces coalitions sont générées à partir des connaissances partielles des agents puis enrichies et négociées au fur et à mesure de leurs rencontres. Cet enrichissement provient de nouvelles connaissances qui viennent modifier la structure de coalition initiale. La négociation quant à elle fait appel à une notion de conflit local dont la résolution se fait, en fonction du type de conflit, par des stratégies paramétrées par les caractéristiques du problème.*

**Mots-clés :** coalitions, communication, coordination, protocoles

## Abstract

*We investigate collective planning and coordination within a constellation of satellites connected by intersatellite links that induce communication when satellites meet. We propose an epidemic protocol based on overhearing which allows to build a common knowledge on the tasks to be carried out and the agents' intentions. First results show that it is relevant to coordinate these physical agents via a method based on dynamic coalition formation. The coalitions are generated from the agents' partial knowledge, then enriched and negotiated when the agents meet. The enrichment comes from new knowledge that modifies the initial coalition structure. The negotiation is based on local conflicts that are solved by strategies depending on the conflict type and the problem features.*

**Keywords:** coalitions, communication, coordination, protocols

## 1 Introduction

De nombreuses recherches sont menées pour accroître l'autonomie des satellites en transférant la planification à bord et en leur permettant d'adapter leur comportement aux nouveaux événements. De plus, la mise en place de constellations de satellites permet d'envisager des activités conjointes et d'assurer la robustesse. Des architectures multiagents ont été testées pour modéliser des constellations [4, 13] mais il est fait l'hypothèse de fortes capacités de communication et de délibération afin de construire un plan commun. En effet dans ce contexte, les agents doivent être capables de changer un but, réaffecter des ressources et réagir aux changements d'environnement et aux choix des autres agents, ce qui suppose que les agents doivent se coordonner [24].

Les mécanismes de coordination supposent d'importantes capacités de communication et des notions comme la communication intermittente, les délais d'attente ou tout simplement l'impossibilité de communiquer ne sont que rarement abordées. En effet la plupart des mécanismes de coordination, comme [3, 11] par exemple, s'intéressent à des *agents informatiques* ou des *agents sociaux*. Dans le cas d'*agents physiques* comme des robots ou des satellites, l'environnement a une influence cruciale sur la coordination en raison de sa dynamique et des contraintes physiques qu'il fait peser sur les agents.

Nous nous intéressons à la coordination d'agents en présence de communications restreintes et sujettes à des délais, en particulier dans le cadre d'une constellation de satellites d'observation inspirée de la mission Fuego [5].

Une constellation de satellites d'observation est un ensemble de satellites (généralement de 3 à 20) placés sur différentes orbites basses et dont la mission consiste à prendre des images de diverses zones de la surface terrestre. Le sol envoie à la constellation des requêtes d'observation asynchrones et de priorité variable. Les

satellites sont équipés d'un unique instrument d'observation dont un miroir peut décaler en roulis (à gauche ou à droite) la ligne de visée. Une durée minimum étant nécessaire pour actionner le miroir, deux requêtes d'observation trop proches géographiquement peuvent ne pas être réalisables par un même satellite. Les satellites sont aussi équipés d'un instrument de détection pointé vers l'avant qui permet de détecter une zone intéressante à la volée et de générer à bord une requête d'observation.

Les constellations que nous considérons sont telles que les orbites des différents satellites se croisent aux pôles. Un positionnement judicieux des satellites sur les orbites permet d'envisager que deux (ou plus) satellites passent à proximité l'un de l'autre dans les régions polaires, et puissent donc communiquer entre eux *via* une liaison intersatellite (ISL<sup>1</sup>) sans intervention du sol. Intuitivement, la communication intersatellite augmente la réactivité de la constellation puisque chaque satellite n'est en visibilité du sol (et n'a donc de possibilité de communication avec ce dernier) que 10 % du temps.

Notre problème est alors le suivant: nous voudrions que chaque satellite (chaque agent) puisse construire dynamiquement une affectation de requêtes (plan) telles que si ces requêtes sont réalisées, leur nombre soit le plus grand possible, qu'elles soient réalisées le plus rapidement possible et que le nombre de requêtes prioritaires non réalisées soit minimal. Remarquons que ces contraintes ne sont pas nécessairement compatibles entre elles.

Dans la Section 2, nous présenterons une formalisation de notre problème puis nous verrons dans la Section 3 un protocole de communication permettant la construction d'une connaissance commune. Des premiers résultats expérimentaux seront donnés dans la Section 4. Nous nous intéresserons alors aux mécanismes de coopération et plus particulièrement à la formation des coalitions en Section 5. Nous verrons ensuite dans la Section 5.2 de quelle manière les agents peuvent se coordonner en construisant dynamiquement des coalitions implicites.

## 2 De l'application à la formalisation

### 2.1 Les agents

Notre problème est un problème d'affectation de tâches décentralisé dans un système mul-

1. InterSatellite Link.

tiagent, sous la contrainte d'une forte dynamique et de communications intermittentes. Le système multiagent est défini comme suit :

**Définition 1 (Système multiagent)** *Le système multiagent  $\mathcal{S}$  est un triplet  $\langle \mathcal{A}, \mathbb{T}, \text{Voisins} \rangle$  :*

- $\mathcal{A} = \{a_1 \dots a_n\}$  : ensemble de  $n$  agents.
- $\mathbb{T} \subset \mathbb{N}^+$  : ensemble de dates.
- $\text{Voisins} : \mathcal{A} \times \mathbb{T} \mapsto 2^{\mathcal{A}}$  : relation de voisinage.

Ce triplet est une connaissance commune et complète de chacun des agents du système. La relation de voisinage spécifie pour un agent et un instant donné l'ensemble des agents avec lesquels il peut communiquer (modèle d'acointances). Dans notre application, cette relation concerne les périodes où les satellites se rencontrent. Cependant, cette relation permet de capturer des modèles de communication plus complexe comme l'utilisation de relais géostationnaires<sup>2</sup>.

Chaque agent possède un ensemble de connaissances privées.

**Définition 2 (Connaissances)** *Une connaissance  $K_{a_i}^\tau$  de l'agent  $a_i$  à la date  $\tau$  est définie par un triplet  $\langle \text{info}_{K_{a_i}^\tau}, A_{K_{a_i}^\tau}, \tau_{K_{a_i}^\tau} \rangle$  :*

- $\text{info}_{K_{a_i}^\tau}$  est une tâche  $t_j$ , soit  $I_{t_j}^{a_k}$  une intention de  $a_k$  envers  $t_j$ .
- $A_{K_{a_i}^\tau} \subseteq \mathcal{A}$  : agents qui connaissent  $K_{a_i}^\tau$ .
- $\tau_{K_{a_i}^\tau} \in \mathbb{T}$  : estampille temporelle.

On note  $\mathcal{K}_{a_i}^\tau$  l'ensemble des connaissances de l'agent  $a_i$  à la date  $\tau$ .

À partir des informations de l'ensemble  $\mathcal{K}_{a_i}^\tau$ , on peut construire  $\mathcal{T}_{a_i}^\tau = \{t_1 \dots t_m\}$  l'ensemble des tâches connues par l'agent  $a_i$  à la date  $\tau$  et  $\mathcal{I}_{a_i}^\tau = (I_{t_j}^{a_k})$  la matrice des intentions connues par l'agent  $a_i$  à la date  $\tau$ . Chaque agent  $a_i$  ne possède les ressources nécessaires que pour réaliser un sous-ensemble de  $\mathcal{T}_{a_i}^\tau$ .

### 2.2 Les contraintes sur les tâches

Dans notre application, les tâches sont des requêtes d'observation générées par une station au sol ou par un satellite. À chaque tâche est associée une priorité,  $\text{prio}(t_j) \in \mathbb{R}$ , qui représente son importance : plus la valeur de la priorité est petite, plus la tâche doit être impérativement réalisée<sup>3</sup>. Est aussi associé un booléen  $b_{t_j}$  qui indique si la tâche a été réalisée ou

2. Il s'agit d'un satellite servant de relais sur l'orbite géostationnaire visible de plusieurs satellites en orbite basse qui ne se croisent pas.

3. Dans le domaine spatial, l'échelle des priorités est décroissante ; ainsi 1 est la priorité la plus importante tandis que 5 est la priorité la plus faible par exemple.

non. Les tâches sont soumises à trois formes de contraintes :

- **exclusion mutuelle** entre deux tâches : c'est une contrainte intrinsèque à chaque agent qui ne peut réaliser deux tâches à la même date  $\tau \in \mathbb{T}$  ;
- **unicité** d'une tâche : deux agents peuvent réaliser une même tâche mais il y aura redondance. Ainsi lorsqu'une tâche est réalisée, il est inutile de la réaliser une nouvelle fois ;
- **composition** de  $n$  tâches : les  $n$  tâches doivent être impérativement réalisées. Un ordonnancement peut être défini sur une composition afin de former une *séquence*.

### 2.3 Les intentions

L'intention représente l'attitude d'un agent vis-à-vis d'une tâche. Quatre attitudes sont définies : un engagement ferme qui ne peut être remis en cause par la dynamique de l'environnement, un engagement temporaire qui peut être remis en cause, un refus ferme qui ne peut être remis en cause et un refus temporaire qui peut être remis en cause. Les intentions d'un agent peuvent être vues comme un contrat que passe l'agent envers une tâche.

**Définition 3 (Intention)** Soit  $I_t^{a_i}$  l'intention de l'agent  $a_i$  envers la tâche  $t_j$ .  $I_t^{a_i}$  est une modalité de la proposition ( $a_i$  réalise  $t_j$ ) :

Modalité	Sémantique
$\square$	$a_i$ s'engage à réaliser $t_j$
$\diamond$	$a_i$ se propose de réaliser $t_j$
$\square \neg$	$a_i$ ne réalisera pas $t_j$
$\diamond \neg$	$a_i$ n'envisage pas de réaliser $t_j$

À chaque intention est associée une date de réalisation  $rea(I_{t_j}^{a_i}) \in \mathbb{T} \cup \{\emptyset\}$  et une date de télédéchargement<sup>4</sup>  $tel(I_{t_j}^{a_i}) \in \mathbb{T} \cup \{\emptyset\}$ .

L'ensemble des intentions d'un agent forme son plan courant. Chaque engagement ferme ou temporaire sur une tâche signifie que cette dernière fait partie du plan courant de l'agent tandis que chaque refus ferme ou temporaire signifie que la tâche ne fait pas partie du plan. Supposons chaque agent équipé d'un planificateur. Le processus de planification est un processus en trois étapes :

1. À partir de l'ensemble  $\mathcal{T}_{a_i}^\tau$  des tâches connues de  $a_i$ ,  $a_i$  calcule un plan optimal selon deux critères pour les tâches planifiées :

4. Le télédéchargement est l'activité qui consiste à transférer des données d'un satellite vers une station au sol, typiquement les images obtenues après la réalisation d'une requête d'observation.

- maximisation du nombre de tâches ;
  - minimisation de la somme des priorités.
2. les intentions de l'agent  $a_i$  envers les tâches  $t_j$  à l'instant  $(\tau - 1)$  viennent contraindre le processus de planification :
    - les tâches associées à un engagement ( $\square$ ) sont toujours planifiées ;
    - les tâches associées à un désistement ( $\square \neg$ ) ne sont jamais planifiées.
  3. Notons  $\mathcal{P}_{a_i}^\tau$  le plan de l'agent  $a_i$  à la date  $\tau$ . Ce plan vient modifier les intentions de l'agent  $a_i$  à la date  $\tau$  telles que :
    - chaque tâche planifiée qui n'était pas associée à un engagement génère une proposition ( $\diamond$ ) ;
    - chaque tâche qui n'est pas planifiée et qui n'était pas associée à un désistement génère une mise à l'écart ( $\diamond \neg$ ).

Nous remarquons que les engagements ( $\square$ ) et les désistements ( $\square \neg$ ) ne sont pas générés par la phase de planification. Nous verrons dans la Section 5.2 qu'ils ne le sont qu'après une phase de coordination entre les agents.

### 2.4 Confiance envers l'information

Lorsque deux agents communiquent à la date  $\tau$ , un agent qui reçoit une intention ne peut pas être certain que cette intention soit toujours vraie à la date  $\tau'$  où  $\tau' > \tau$ . En effet, comme l'environnement est dynamique, l'apparition de nouvelles tâches ou la disparition de tâches déjà réalisées peuvent venir modifier les plans (et donc les intentions des agents). De manière générale, un agent remet en cause son plan lorsque des faits nouveaux lui parviennent, c'est-à-dire lorsqu'il a de nouvelles connaissances. Ceci peut arriver en deux cas : l'agent détecte une nouvelle tâche ou il rencontre un autre agent.

Comme les agents n'ont pas de modèle de l'environnement, il ne peuvent prédire l'arrivée de nouvelles tâches. Aussi, la mesure de confiance envers une information va-t-elle dépendre du nombre de rencontres faites par l'agent à partir du moment où il a formulé sa première intention. Il s'agit d'un critère fonction de la relation Voisins et, par conséquent, d'une information que chaque agent peut individuellement calculer.

**Définition 4 (Confiance)** La confiance d'un agent  $a_i$  en l'intention  $I_{t_j}^{a_j}$  capturée par  $K_{a_i}^\tau$  à la date  $\tau_{K_{a_i}^\tau}$  est inversement proportionnelle à  $|\bigcup_{\tau_{K_{a_i}^\tau} \leq \tau' \leq rea(I_{t_j}^{a_j})} Voisins(a_j, \tau')|$ . Notons  $m(\tau_{K_{a_i}^\tau}, rea(I_{t_j}^{a_j}))$  ce nombre de rencontres.

### 3 Communication et connaissance

Comme les choix d'un agent relativement aux tâches à exécuter sont conditionnés par les choix des autres agents, il est nécessaire que les agents puissent raisonner sur une connaissance commune des tâches. Il est donc nécessaire de mettre en place un protocole de communication efficace afin que chaque agent puisse savoir quel agent sait quelle information et ainsi construire une connaissance commune.

#### 3.1 Un protocole épidémique

Les travaux sur les protocoles épidémiques [6] ainsi que sur l'écoute flottante [8, 10] montrent que protocoles de communication et mécanismes de coordination peuvent être découplés. Nous définissons un protocole de communication pour la transmission des connaissances [2] dont l'idée est de tirer profit au maximum de toutes les occasions de communication. Chaque agent note tout changement de connaissance et les propage à ses voisins qui mettent à jour leurs connaissances en se fondant sur l'estampille temporelle. Ces voisins réitèrent alors le processus.

**Protocole 1 (Communication)** Soit un agent  $a_i \in \mathcal{A}$ .  
 $\forall \tau \in \mathbb{T}$ :

- $\forall a_j \in \text{Voisins}(a_i, \tau)$ ,  $a_i$  exécute :
  1.  $\forall K_{a_i}^\tau \in \mathcal{K}_{a_i}^\tau$  tel que  $a_j \notin A_{K_{a_i}^\tau}$  :
    - (a)  $a_i$  transmet  $K_{a_i}^\tau$  à  $a_j$ .
    - (b)  $a_i$  met à jour  $A_{K_{a_i}^\tau}$  si  $a_j$  accuse réception de  $K_{a_i}^\tau$ .
- $\forall K_{a_i}^\tau \in \mathcal{K}_{a_i}^\tau$  reçue par  $a_j$  à l'instant  $\tau$  :
  1.  $a_j$  met à jour  $\mathcal{K}_{a_j}^\tau$  avec  $K_{a_i}^\tau$ .
  2.  $a_j$  accuse réception à  $a_i$ .

Deux types de mises à jour existent pour un agent : *interne* et *externe* [2]. Une mise à jour interne de  $K_{a_i}^\tau$  est réalisée par un agent  $a_i$  dans deux cas : (1) une intention  $I_{t_j}^{a_i}$  est modifiée ou (2) une tâche  $t_j$  est réalisée par  $a_i$ . Lors de cette mise à jour, l'estampille temporelle est fixée à la date courante.

La mise à jour externe est effectuée par un agent  $a_i$  lorsqu'il reçoit une connaissance  $K_{a_j}^\tau$  provenant d'un agent  $a_j$ . L'estampille temporelle est discriminante.

1. si  $K_{a_j}^\tau$  est déjà connue, il existe  $K_{a_i}^\tau$  telle que  $\text{info}_{K_{a_j}^\tau} = \text{info}_{K_{a_i}^\tau}$  :

- (a) si  $\tau_{K_{a_j}^\tau} > \tau_{K_{a_i}^\tau}$ , la connaissance de  $a_i$  est obsolète. Il la remplace par  $K_{a_j}^\tau$  et s'ajoute à l'ensemble  $A_{K_{a_j}^\tau}$ .
  - (b) si  $\tau_{K_{a_j}^\tau} = \tau_{K_{a_i}^\tau}$ , seuls les agents connaissant cette information peuvent avoir changé. Par conséquent,  $A_{K_{a_i}^\tau} = A_{K_{a_i}^\tau} \cup A_{K_{a_j}^\tau}$ .
2. si  $K_{a_j}^\tau$  n'est pas connue de  $a_i$ ,  $a_i$  l'ajoute simplement à son ensemble  $\mathcal{K}_{a_i}^\tau$ , et s'ajoute à l'ensemble  $A_{K_{a_j}^\tau}$ .

#### 3.2 Comment communiquer ?

Si le Protocole 1 permet de propager les connaissances de chaque agent au niveau collectif, un agent peut chercher à communiquer avec un agent particulier. Cette communication n'a de sens que par rapport à une échéance : un agent  $a_i$  peut désirer transmettre une connaissance  $K_{a_i}^{\tau_1}$  à un agent  $a_j$  avant une date  $\tau_2$ . Les possibilités de communication de  $a_i$  vers  $a_j$  sont alors de trois types :

- *communication directe* :  $\exists \tau', \tau_1 \leq \tau' \leq \tau_2$ , telle que  $a_j \in \text{Voisins}(a_i, \tau')$ . (Figure 1)

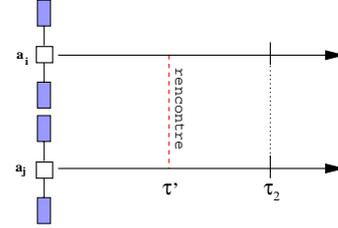


FIGURE 1 – Communication directe

- *communication indirecte* :  $\exists \{a_i \dots a_j\}$  et  $\{\tau_{i-1} \dots \tau_{j-1}\}$  tels que  $\forall i \leq k < j$ ,  $a_{k+1} \in \text{Voisins}(a_k, \tau_k)$  avec  $\tau_{k-1} \leq \tau_k < \tau_2$ . (Figure 2)

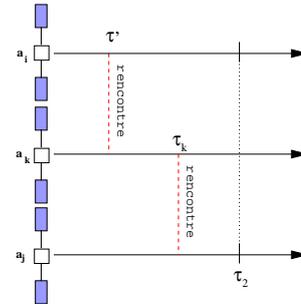


FIGURE 2 – Communication indirecte

- *communication impossible* :  $a_i$  ne peut pas faire une communication directe avec  $a_j$  avant l'instant  $\tau_2$ , ni faire aboutir une communication indirecte avec  $a_j$  avant l'instant  $\tau_2$ . (Figure 3)

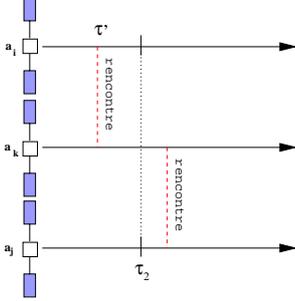


FIGURE 3 – Communication impossible

D'après la définition de la relation de voisinage qui est symétrique et non transitive, si l'agent  $a_i$  peut communiquer directement avec  $a_j$  alors  $a_j$  peut communiquer directement avec  $a_i$  ; que  $a_i$  puisse communiquer indirectement avec  $a_j$  n'implique pas que  $a_j$  puisse communiquer indirectement avec  $a_i$ .

On définit alors la notion de connaissance partagée au niveau de l'intention :

**Définition 5 (Connaissance partagée)** L'agent  $a_i$  sait à la date  $\tau$  que  $a_j$  connaît l'intention  $I_{t_j}^{a_i}$  capturée par  $K_{a_i}^\tau$  si et seulement si :

- $a_j \in A_{K_{a_i}^\tau}$  **ou**
- $a_i$  a communiqué indirectement vers  $a_j$  à une date  $\tau'$  telle que  $\tau_{K_{a_i}^\tau} \leq \tau' \leq \tau$ .

## 4 Premières expérimentations

Le protocole de communication a été implanté et nous avons considéré deux scénarios avec 3 satellites ayant respectivement 40 tâches avec un faible taux d'exclusions mutuelles (Table 1) et 74 tâches avec un taux élevé d'exclusions mutuelles (Table 2). L'environnement n'est donc que faiblement dynamique : il n'y a pas d'apparition de nouvelles tâches. Trois simulations ont été réalisées :

- *centralisée* : planificateur centralisé au sol ;
- *isolée* : les agents planifient individuellement et ne peuvent ni communiquer, ni se coordonner ;
- *informée* : les agents planifient individuellement et peuvent simplement communiquer les tâches connues et leur état. En communiquant, les agents peuvent abandonner les tâches qui ont déjà été réalisées et modifier

leurs intentions si des tâches plus prioritaires viennent à leur connaissance.

Trois métriques ont été utilisées pour évaluer ces approches : le nombre de tâches différentes réalisées, le nombre de tâches réalisées mais redondantes avec les précédentes et le nombre de messages échangés par les agents où chaque message représente la transmission d'une connaissance.

Dans le premier scénario (Table 1), les simulations centralisées et isolées conduisent au même nombre de tâches réalisées bien que la simulation isolée conduise à un grand nombre de redondances, et donc une consommation inutile de ressources. La simulation informée permet de réaliser autant de tâches mais diminue le nombre de redondances. En effet, un agent apprenant qu'une tâche a été réalisée la retire de son plan et évite ainsi la redondance. Au sujet des messages échangés, au pire cas 1440 messages seront échangés au cours de 12 rencontres. Nous pouvons remarquer que le nombre de messages réellement échangés est bien plus faible grâce au maintien des listes  $A_{K_{a_i}^\tau}$  qui évitent la diffusion inutile d'information.

Dans le second scénario (Table 2), une différence évidente apparaît entre les simulations centralisée et isolée. Non seulement la simulation isolée conduit à un nombre élevé de redondances mais elle ne permet de réaliser qu'un faible nombre de tâches. La simulation informée permet alors de diminuer ces redondances tout en permettant de réaliser un plus grand nombre de tâches. Etant donné qu'il y a un grand nombre d'exclusions mutuelles dans ce scénario, chaque redondance évitée permet très souvent de réaliser au moins une autre tâche. Concernant les messages, 2664 messages sont échangés dans le pire cas au cours de 12 rencontres. Comme dans le scénario précédent, le protocole de communication évite la duplication inutile de messages.

Si l'approche centralisée semble la plus efficace, elle n'est pas envisageable car :

1. dans le cas où les tâches arrivent de manière continue, une telle planification ne peut pas être réalisée par les satellites, du fait des communications contraintes et des échéances à respecter ;
2. elle pourrait être faite au sol, mais le principe de la constellation de satellites avec ISL vise justement à s'affranchir du sol.

Simulation	Tâches réalisées	Redondances	Messages
Centralisée	34	0	0
Isolée	34	21	0
Informée	34	6	457

TABLE 1 – Premier scénario

Simulation	Tâches réalisées	Redondances	Messages
Centralisée	59	0	0
Isolée	37	37	0
Informée	55	27	836

TABLE 2 – Second scénario

La mise en œuvre du protocole de communication et la construction d’une connaissance commune permettent aux agents d’éviter des redondances et de réaffecter les ressources ainsi préservées en vue de réaliser d’autres tâches. Nous avons défini dans [2] des règles de coopération paramétrées pour permettre aux agents les moins à même de réaliser une tâche de se désister et modifier leur plan au fil de leurs rencontres. Cependant ces paramètres sont des heuristiques dont il est difficile de tirer des propriétés. C’est pour cette raison que nous nous intéressons dans la Section 5 à un mécanisme de coordination fondé sur la formation de coalitions.

## 5 Formation des coalitions

### 5.1 Approches et limites

Les coalitions sont des organisations d’agents au cycle de vie court. Elles sont formées avec un objectif précis et sont dissoutes lorsqu’elles n’ont plus de raison d’être. Au travers d’une coalition, chaque agent tente de maximiser son gain personnel. Dans la littérature, le problème de formation de coalitions, qui est un problème NP-dur, est décomposé en trois étapes [12] :

1. Générer des structures de coalitions, c’est-à-dire l’ensemble de toutes les coalitions pouvant réaliser les tâches considérées. Par exemple, supposons que le système contient trois agents  $a_1, a_2, a_3$  et que les tâches à réaliser sont  $t_1$  et  $t_2$ . Supposons aussi que les deux agents  $a_1$  et  $a_2$  peuvent réaliser  $t_1$  tandis que  $a_1$  et  $a_3$  peuvent réaliser  $t_2$ . Ainsi, l’ensemble  $\{\{a_1, a_2\}, \{a_1, a_3\}\}$  est une structure de coalition.
2. Choisir la structure qui sera retenue par tous les agents. Les structures générées à la 1<sup>re</sup> étape sont différentes pour chaque agent en

fonction de ses préférences. Il faut donc que ces agents négocient une unique solution.

3. Partager les gains obtenus par chaque coalition de la structure choisie entre les agents qui la composent.

Toutes les méthodes pour générer des structures de coalitions se fondent sur quatre approches [22] qui reviennent à construire le treillis des structures de coalitions et à l’explorer.

Dans les approches *incrémentales* [1, 9, 16, 17, 18], les agents explorent le treillis en partant des coalitions singletons (contenant un seul agent) puis incrémentent petit à petit la cardinalité des coalitions jusqu’à trouver une solution. Dans les approches *par référence* [7], les agents considèrent des coalitions de taille maximale en fonction de leurs connaissances puis les raffinent en retirant les agents inutiles. Dans les approches *aléatoires* [14, 15], les agents sont affectés au hasard à des coalitions puis toutes les coalitions inacceptables sont fusionnées et l’on réitère le processus sur ce sous-ensemble. Les approches *adaptatives* [19, 20, 21] consistent pour chaque agent à conserver un historique des coalitions acceptables passées pour débiter le processus de génération dans le voisinage.

Lorsqu’il s’agit de trouver la structure de coalitions optimale, les agents n’ont bien souvent qu’une information incertaine et (ou) incomplète sur les coûts et les préférences des autres agents. Ils doivent donc utiliser des heuristiques pour estimer la valeur d’une coalition. Par exemple, [7] en propose deux : une *heuristique marginale* qui estime le coût des autres agents et cherche à maximiser le profit marginal estimé ainsi qu’une *heuristique experte* qui tente de minimiser le nombre d’agents concurrents au sein d’une même coalition (des agents ayant des compétences identiques). L’heuristique marginale est la plus adaptée en cas d’information in-

certaines tandis que l'heuristique experte est plus adaptée pour une information incomplète.

De manière générale, les méthodes proposées se heurtent à deux limites. D'une part, elles sont très souvent centralisées ; d'autre part, les problèmes de communication entre agents ne sont pas abordés. Les méthodes sont centralisées car elles supposent une connaissance commune des tâches du système et une construction hors-ligne des coalitions [16, 17] ou bien font appel à des commissaires-priseurs (ou tout autre forte hiérarchie) [1, 9, 18] qui centralisent les informations et arbitrent les négociations.

Les méthodes fondées sur la structure organisationnelle du système s'intéressent aux communications contraintes dans le sens où un agent ne peut communiquer que le long de la hiérarchie [1, 9, 18] ou dans un voisinage [19, 20, 21]. Ces contraintes peuvent aussi correspondre à un coût [23]. Cependant dans un environnement dynamique réel, les agents ne sont pas toujours capables d'échanger de l'information et ils doivent prendre des décisions seuls. De plus, certaines tâches ne peuvent pas attendre que la structure de coalition ait été complètement trouvée pour être réalisées. Ainsi, ces méthodes sont très sensibles à la dynamique du système.

## 5.2 Définitions

Les mécanismes de formation de coalitions nous intéressent particulièrement pour trois raisons : (1) les agents s'associent pour réaliser une tâche collective ou se partager des tâches ; (2) ils s'organisent en structures au cycle de vie court, ce qui permet une adaptation à un environnement dynamique ; (3) les agents tentent de trouver les solutions les plus efficaces en présence d'informations incertaines et (ou) incomplètes. Si nous y ajoutons les contraintes de communication et relaxons les contraintes de centralisation, notre problème peut être considéré comme un problème de formation de coalitions décentralisé avec des agents coopératifs. Ainsi, nous nous intéresserons aux deux premières étapes du processus de formation de coalitions, en écartant celle de la distribution de gain car les agents du système sont coopératifs et ne tentent pas de maximiser un gain individuel. Nous proposons dans cette section un mécanisme décentralisé fondé sur deux points :

1. Les agents construisent des coalitions de taille maximale en fonction de leurs connaissances.

2. Ces coalitions sont ensuite raffinées au fil des rencontres des agents afin d'en retirer les agents inutiles.

Les agents doivent générer dynamiquement des coalitions, sélectionner les plus intéressantes et maintenir leur stabilité pour réaliser leurs objectifs. Nous définissons les coalitions comme suit :

**Définition 6 (Coalition)** Une coalition  $C$  est un triplet  $\langle A, O, P \rangle$  tel que  $A \subseteq \mathcal{A}$  est un sous-ensemble d'agents membres de la coalition,  $O$  est un ensemble de tâches objectifs de la coalition et  $P$  un ensemble de tâches représentant le pouvoir de la coalition.

La taille de la coalition est donnée par  $|A|$ . Le pouvoir d'une coalition est fonction des intentions des agents qui en sont membres : une coalition a le pouvoir de réaliser une tâche  $t_j$  si au moins un agent de la coalition se propose ( $\diamond$ ) ou s'engage ( $\square$ ) à réaliser  $t_j$ .

**Définition 7 (Pouvoir)** Une coalition  $C$  a le pouvoir de réaliser son objectif  $O$  si et seulement si  $O \subseteq P$ . Dans le cas contraire, on dira que la coalition est incomplète. L'ensemble  $P$  est défini comme suit :

$$P = \{t_j \in O \mid \exists a_i \in A : I_{t_j}^{a_i} \in \{\square, \diamond\}\}$$

Afin de prendre en compte les contraintes d'unicité sur les tâches, nous considérons les coalitions minimales comme les plus petites coalitions pouvant réaliser leur objectif :

**Définition 8 (Minimalité)** Une coalition  $C$  est dite minimale si et seulement si l'ensemble  $A$  est minimal pour l'inclusion parmi les coalitions qui ont le pouvoir de réaliser  $O$ .

En fonction de ses connaissances sur les intentions des autres agents, un agent peut construire différentes coalitions. Une phase de négociation intermittente est alors engagée entre les différents agents. Une négociation permet à un agent de modifier ses intentions, et par conséquent son plan. Il peut :

1. Rejoindre une coalition pour accroître le pouvoir de cette coalition.
2. Se retirer d'une coalition afin de la rendre minimale.

## 5.3 Générer et rejoindre les coalitions

L'étape de génération des coalitions est effectuée individuellement par chaque agent. Il doit :

1. Considérer l'ensemble des coalitions potentielles du système.
2. Calculer le pouvoir et l'état de chacune d'entre elles.

3. Posséder un mécanisme pour modifier ses intentions en fonction.

**Exemple 1** Supposons un agent  $a_i$  ayant comme intention  $I_{t_j}^{a_i} = \diamond$  et une connaissance  $K_{a_i}^\tau$  telle que  $\text{info}_{K_{a_i}^\tau} = I_{t_j}^{a_k} = \square$ . Il peut alors construire la coalition  $C$  suivante  $\langle \{a_i, a_k\}, \{t_j\}, \{t_j\} \rangle$ . Remarquons que cette coalition n'est pas minimale car  $\{a_i, a_k\}$  n'est pas minimal pour l'inclusion. Il est donc nécessaire de procéder à une négociation à son sujet.

Chaque agent  $a_i$  génère les coalitions potentielles de la manière suivante :

1.  $a_i$  partitionne l'ensemble des tâches  $\mathcal{T}_{a_i}^\tau$  en un ensemble  $\{T_1 \dots T_h\}$  tel que  $T_i \subseteq \mathcal{T}$  est un ensemble maximal ( $\subseteq$ ) de tâches formant une composition.  
**Exemple 2** Supposons  $\mathcal{T}_{a_i}^\tau = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ . Supposons que les tâches  $t_1$  et  $t_2$  soient en composition ainsi que les tâches  $t_4$  et  $t_5$ . Alors on peut partitionner  $\mathcal{T}_{a_i}^\tau$  en  $\{\{t_1, t_2\}, \{t_3\}, \{t_4, t_5\}\}$ .
2. Chaque  $T_i$  est l'objectif d'une coalition potentielle. Remarquons que ces ensembles sont disjoints. Ainsi pour un agent donné, le nombre de coalitions est fonction du nombre de tâches qu'il connaît.
3. Les membres d'une coalition potentielle pour un sous-ensemble  $T_i$  sont définis par :  $\{a_k \in \mathcal{A} : \exists t_j \in T_i / I_{t_j}^{a_k} \in \{\square, \diamond\}\}$

Chaque coalition ainsi formée peut être minimale (et donc complète), non minimale mais complète, ou incomplète (donc non minimale).

On peut remarquer que ce cadre capture à la fois des coalitions *recouvrantes* et des coalitions *disjointes* en fonction des capacités des agents qui sont exprimées au travers des intentions. Si un agent formule plusieurs intentions, il rejoint plusieurs coalitions ; s'il formule une seule intention (par manque de ressources, de capacité ou par exclusions mutuelles), l'agent ne rejoindra qu'une seule coalition.

Si une coalition est incomplète, cela signifie qu'il existe au moins une tâche objectif qui n'est pas dans le pouvoir de la coalition. Or plus il y a de tâches dans le pouvoir de la coalition, plus les tâches qui n'y sont pas deviennent importantes car une coalition doit impérativement réaliser toutes les tâches objectifs. Une modification des priorités des tâches objectifs manquantes incite alors les agents à rejoindre la coalition.

**Protocole 2 (Rejoindre une coalition)** Pour chaque coalition incomplète  $C$  d'objectif  $O$  et de pouvoir  $P$ , l'agent  $a_i$  exécute :

$$\forall t \in O \setminus P, \text{prio}(t) \leftarrow \frac{\text{prio}(t)}{1+|P|}$$

Les agents sont incités à rejoindre une coalition si et seulement la coalition a pour objectif des tâches en composition dont certaines sont déjà affectées. Si un  $T_i$  singleton, qui contient une tâche indépendante des autres tâches, n'est pas planifié, c'est qu'il ne répond pas aux critères d'optimisation présentés en Section 2.3. Dans ce cas,  $|P| = 0$  et la priorité de la tâche reste inchangée. Pareillement, si la tâche du  $T_i$  singleton est planifiée alors  $O \setminus P$  est vide et la priorité de la tâche reste aussi inchangée.

## 5.4 Négocier la minimalité d'une coalition

### Conflit

S'il existe une coalition complète non minimale, il s'agit d'une coalition qui peut atteindre son objectif mais en y affectant des agents inutiles, c'est-à-dire des agents qui effectuent le même travail qu'un autre. Un agent membre d'une coalition doit donc considérer tous les agents qui ont les mêmes compétences que lui (réaliser une ou plusieurs tâches identiques au travers d'une ou plusieurs intentions) et prendre la décision de modifier ou non ses propres intentions.

Afin de prendre une décision, c'est-à-dire se désister ou s'engager fermement, un agent doit considérer les autres membres de la coalition, leurs intentions et leurs capacités de communication. De plus, cette décision doit être prise avant la date de réalisation de la tâche.

**Définition 9 (Conflit)** Soit deux agents  $a_i$  et  $a_j$  et une coalition  $C = \langle A, O, P \rangle$  telle que  $\{a_i, a_j\} \subseteq A$ .  $\forall t \in P$ , les agents  $a_i$  et  $a_j$  sont en conflit si et seulement si  $I_t^{a_i} \in \{\square, \diamond\}$  et  $I_t^{a_j} \in \{\square, \diamond\}$ .

**Exemple 3** Reprenons l'Exemple 1. Comme la coalition n'est pas minimale et qu'il y a un conflit sur la tâche  $t_j$ ,  $a_i$  doit prendre la décision avant la date  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i})$  de se désister ( $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \diamond \neg$  ou  $\square \neg$ ) ou de maintenir son intention.

Comme nous cherchons à optimiser la réactivité du système, les agents doivent décider en fonction de leur capacité à réaliser rapidement la tâche (expertise) :

**Définition 10 (Expertise)** Soit deux agents  $a_i$  et  $a_j$  et une tâche  $t$  sur laquelle ils sont en conflit. On dit que  $a_i$  est expert pour  $t$  si et seulement si  $\text{rea}(I_t^{a_i}) \leq \text{rea}(I_t^{a_j})$ .

### Négociation par accord tacite

Pour chaque agent  $a_k$  dans  $A$  en conflit avec  $a_i$  sur une tâche  $t_j$  tel que  $a_i$  peut communiquer directement avec lui à une date  $\tau < \min(\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}), \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$ , on peut définir un **accord tacite** : les deux agents échangent leurs

intentions et prennent des décisions cohérentes sans besoin de communication ultérieure.

**Protocole 3 (Accord tacite)** Soit deux agents  $a_i$  et  $a_k$  en conflit sur une tâche  $t_j$  qui se rencontrent à la date  $\tau < \min(\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}), \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$ . Supposons que  $a_i$  est l'agent expert. Soit  $\epsilon \in \mathbb{R}$  une valeur seuil. Après communication,  $a_i$  et  $a_k$  appliquent :

1. **stratégie altruiste :**  
 si  $\text{tel}(I_{t_j}^{a_i}) - \text{tel}(I_{t_j}^{a_k}) > \epsilon$   
 et  $|\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) - \text{rea}(I_{t_j}^{a_k})| < \epsilon$   
 alors  $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \square \neg$  et  $I_{t_j}^{a_k} \leftarrow \square$
2. **sinon stratégie experte :**  
 $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \square$  et  $I_{t_j}^{a_k} \leftarrow \square \neg$

Si l'agent non expert ne dégrade pas la date de réalisation au-delà d'une valeur  $\epsilon$  mais qu'il diminue d'au moins autant la date de télédéchargement, il s'engage ( $\square$ ) tandis que l'expert se désiste ( $\square \neg$ ). Dans le cas contraire, l'expert s'engage tandis que l'autre se désiste.

On peut craindre qu'une application continue d'une stratégie altruiste ne permette jamais de réaliser la tâche. Ce n'est pas le cas car on peut borner le nombre de fois où une telle stratégie sera appliquée.

**Preuve** Par définition, un agent  $a_i$  ne peut jamais télédécharger avant d'avoir réalisé la tâche  $t_j$ . Par conséquent,  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) < \text{tel}(I_{t_j}^{a_i})$ . Si deux agents appliquent la stratégie altruiste alors les nouvelles dates d'observation et de télédéchargement seront au pire cas  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) + \epsilon$  et  $\text{tel}(I_{t_j}^{a_i}) - \epsilon$  avec  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) + \epsilon < \text{tel}(I_{t_j}^{a_i}) - \epsilon$ . Supposons  $k$  rencontres où la stratégie altruiste est appliquée ; alors les dates de télédéchargement et d'observation seront au pire cas  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) + k\epsilon$  et  $\text{tel}(I_{t_j}^{a_i}) - k\epsilon$  avec comme contrainte  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) + k\epsilon < \text{tel}(I_{t_j}^{a_i}) - k\epsilon$ . Ainsi, on peut borner  $k$  par :  $k < \frac{\text{tel}(I_{t_j}^{a_i}) - \text{rea}(I_{t_j}^{a_i})}{2\epsilon}$   
 Lorsque cette borne est dépassée, les agents qui se rencontrent appliquent toujours une stratégie experte.

### Prise de décision dans l'incertain

Si les agents en conflit ne peuvent pas communiquer directement, il leur faut tout de même prendre une décision, mais ils ne peuvent pas être certains de sa pertinence en raison de la dynamique du système. Il s'agit donc d'une prise de décision dans l'incertain où, intuitivement, la notion de confiance va jouer un rôle et où assurer une redondance est une décision pertinente.

Pour chaque agent  $a_k$  dans  $A$  en conflit avec  $a_i$  sur une tâche  $t_j$  tel que  $a_i$  peut communiquer indirectement avec  $a_k$  avant la date  $\tau_k = \min(\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}), \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$  alors il est intéressant de prendre la décision avant la première rencontre de la chaîne d'agents. De plus, cela signifie que  $a_k$  connaîtra les intentions de  $a_i$  et il

s'agit d'un *conflit souple*. C'est aussi le cas si  $a_i$  ne peut communiquer avec  $a_k$  mais que  $a_k$  connaît les intentions de  $a_i$  (Définition 4).

**Protocole 4 (Conflit souple)** Soit  $A^+$  l'ensemble des membres de la coalition en conflit avec  $a_i$  qui connaissent les intentions de  $a_i$  ou avec lesquels il peut communiquer indirectement avant la date  $\tau_k = \min(\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}), \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$ . Avant de prendre sa décision,  $a_i$  doit attendre si possible que chaque agent  $a_k \in A^+$  lui ait confirmé indirectement ses intentions. L'agent  $a_i$  applique :

1. **stratégie sécuritaire :**  
 si  $\text{prio}(t_j) < \min_{a_k \in A^+} m(\tau_{t_j}^{a_k}, \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$  alors  $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \diamond$
2. **sinon stratégie compétitive :**  
 si  $\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}) < \min_{a_k \in A^+} \text{rea}(I_{t_j}^{a_k})$  alors  $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \diamond$
3. **sinon stratégie opportuniste :**  
 $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \diamond \neg$

Si la priorité de la tâche est inférieure à la confiance que l'agent accorde aux intentions des autres ou qu'il est expert, il maintient sa proposition ( $\diamond$ ) sinon il retire la tâche de son plan ( $\diamond \neg$ ).

Pour chaque agent  $a_k$  dans  $A$  en conflit avec  $a_i$  sur une tâche  $t_j$  tel que  $a_i$  ne peut communiquer avec lui avant la date  $\tau_k = \min(\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}), \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$ ,  $a_i$  doit prendre une décision selon que  $a_k$  connaît les intentions de  $a_i$  ou non (Définition 4). Si  $a_k$  ne connaît pas les intentions de  $a_i$ , il s'agit d'une situation de *conflit dur*.

**Protocole 5 (Conflit dur)** Soit  $A^-$  l'ensemble des membres de la coalition en conflit avec  $a_i$  sur une tâche  $t_j$  avec lesquels  $a_i$  ne peut pas communiquer avant la date  $\tau_k = \min(\text{rea}(I_{t_j}^{a_i}), \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$  et qui ne connaissent pas ses intentions. Avant de prendre sa décision,  $a_i$  doit attendre si possible que chaque agent  $a_k \in A^-$  lui ait confirmé indirectement ses intentions. L'agent  $a_i$  applique :

1. **stratégie sécuritaire :**  
 si  $\text{prio}(t_j) < \min_{a_k \in A^-} m(\tau_{t_j}^{a_k}, \text{rea}(I_{t_j}^{a_k}))$  alors  $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \diamond$
2. **sinon stratégie opportuniste :**  
 $I_{t_j}^{a_i} \leftarrow \diamond \neg$

Si la priorité de la tâche est inférieure à la confiance que l'agent accorde aux intentions des autres, il maintient sa proposition ( $\diamond$ ) sinon il retire la tâche de son plan ( $\diamond \neg$ ).

## 6 Conclusion

Nous proposons dans cet article une méthode de coordination d'une constellation de satellites reliés par liaisons intersatellites. Nous avons défini une notion de connaissance privée à chaque

agent qui capture les tâches connues du système et les intentions des agents concernant ces tâches. Un protocole de communication a été proposé et permet de construire une connaissance commune au fur et à mesure que les agents se rencontrent. Une première implantation sur simulateur a été réalisée afin de vérifier expérimentalement ce protocole de communication et les premiers résultats sont encourageants.

Afin d'envisager la coordination multiagent, nous nous intéressons à la formation de coalitions. À partir de leurs connaissances sur les intentions d'autrui, chaque agent construit des coalitions ayant le pouvoir de réaliser les tâches qu'ils connaissent. Ces coalitions sont ensuite raffinées par une étape négociation fonction des capacités de communication des agents et d'une notion de conflits locaux. Ces conflits servent à optimiser la structure de coalitions en tentant de minimiser la taille des coalitions.

Les travaux en cours sont consacrés à l'implantation de ce mécanisme. De nouvelles simulations utilisant la formation de coalitions doivent être réalisées pour comparer les résultats avec ceux des simulations centralisées, isolées ou simplement informées. De plus, l'état de santé des agents doit être introduit afin de prendre en compte des défaillances. Cette information peut être vue comme un type de connaissance, propagée par le protocole de communication, qui viendra pondérer les protocoles de génération et de négociation des coalitions.

## Remerciements

Nous remercions Marie-Claire Charmeau (CNES), Serge Rainjonneau et Pierre Dago (Thales Alenia Space) pour leurs conseils.

## Références

- [1] S. Abdallah and V. Lesser. Organization-based cooperative coalition formation. In *Proceedings of the IEEE IAT*, 2004.
- [2] G. Bonnet and C. Tessier. Collaboration among a satellite swarm. In *Proceedings of the 6th AAMAS*, 2007.
- [3] C. Brooks and E. Durfee. Congregation formation in multiagent systems. *Journal of AAMAS*, Vol. 7 :145–170, 2003.
- [4] S. Das, P. Gonzales, R. Krikorian, and W. Trzuskowski. Multi-agent planning and scheduling environment for enhanced spacecraft autonomy. In *Proceedings of the 5th ISAIRAS*, 1999.
- [5] D. Escorial, I. F. Tourne, and F. J. Reina. Fuego : a dedicated constellation of small satellites to detect and monitor forest fires. *Acta Astronautica*, Vol.52(9-12):765–775, 2003.
- [6] I. Gupta, A.-M. Kermarrec, and A. Ganesh. Efficient epidemic-style protocols for reliable and scalable multicast. In *Proceedings of the 21st IEEE SRDS*, pages 180–189, 2002.
- [7] S. Kraus, O. Shehory, and G. Taase. Coalition formation with uncertain heterogeneous information. In *Proceedings of the 2nd AAMAS*, pages 1–8, 2003.
- [8] F. Legras and C. Tessier. LOTTO : group formation by overhearing in large teams. In *Proceedings of 2nd AAMAS*, 2003.
- [9] C. Ortiz and T. Rauenbusch. Dynamic negotiation. In *Proceedings of the AAAI Workshop on Planning with and for Multiagent Systems*, 2002.
- [10] B. Pittel. On spreading a rumor. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, Vol. 47 :213–223, 1987.
- [11] T. Sandholm. Contract types for satisficing task allocation. In *Proceedings of the AAAI Spring Symposium : Satisficing Models*, pages 23–25, 1998.
- [12] T. Sandholm, K. Larson, M. Andersson, O. Shehory, and F. Tohmé. Coalition structure generation with worst case guarantees. *Artificial Intelligence*, Vol. 111(1-2):209–238, 1999.
- [13] T. Schetter, M. Campbell, and D. M. Surka. Multiple agent-based autonomy for satellite constellation. *Artificial Intelligence*, Vol. 145 :147–180, 2003.
- [14] T. Scully, M. Madden, and G. Lyons. Coalition calculation in a dynamic agent environment. In *Proceedings of the 21st ICML*, 2004.
- [15] S. Sen and P. Dutta. Searching for the optimal coalition structure. In *Proceedings of the 3rd CEECMAS*, pages 286–292, 2000.
- [16] O. Shehory and S. Kraus. Methods for task allocation via agent coalition formation. *Artificial Intelligence*, Vol. 101(1-2):165–200, 1998.
- [17] O. Shehory and S. Kraus. Feasible formation of coalitions among autonomous agents in non-super-additive environments. *Computational Intelligence*, Vol. 15(3):218–251, 1999.
- [18] M. Sims, C. Goldman, and V. Lesser. Self-organization through bottom-up coalition formation. In *Proceedings of the 2nd AAMAS*, 2003.
- [19] L.-K. Soh and C. Tsatsoulis. Reflective negotiating agents for real-time multisensor target tracking. In *Proceedings of the IJCAI'01*, 2001.
- [20] L.-K. Soh and C. Tsatsoulis. Allocation algorithms in dynamic negotiation-based coalition formation. In *Proceedings of the Workshop on Teamwork and Coalition Formation at AAMAS'02*, 2002.
- [21] L.-K. Soh and C. Tsatsoulis. Utility-based multiagent coalition formation with incomplete information and time constraints. *Proceedings of the IEEE SMC*, 2003.
- [22] D. Thanh-Tung, B. Frankovic, C. Sheahan, and I. Bundiska. Using agent coalitions for improving plan quality. *Intelligent Systems at the Service of Mankind*, Vol. 2 :351–364, 2005.
- [23] F. Tohmé and T. Sandholm. Coalition formation processes with belief revision among bounded-rational self-interested agents. *Journal of Logic and Computation*, Vol. 9(6):793–815, 1999.
- [24] R. VanDerKrogt and M. deWeerd. Plan repair as an extension of planning. In *Proceedings of the 15th ICAPS*, pages 161–170, 2005.