

Évaluer un système multiagent physique

Retour sur expérience

G. Bonnet
gregory.bonnet@onera.fr

C. Tessier
catherine.tessier@onera.fr

Onera DCSD/CD,
Toulouse, France

Résumé

Les systèmes multirobots sont des systèmes multiagents particuliers car chaque agent robot est plus coûteux à mettre en œuvre qu'un agent informatique. C'est pour cette raison que l'évaluation des systèmes multirobots par le biais de la simulation est très important. Il est cependant nécessaire de pouvoir évaluer avec pertinence les résultats de ces simulations et de trouver des mesures permettant de dégager un compromis entre efficacité et nombre d'agents robots. Dans cet article, nous présentons un retour sur l'évaluation de l'intérêt d'algorithmes de coordination décentralisée pour une constellation de satellites autonomes d'observation. Nous définissons pour cela une notion d'expérience et des critères d'évaluation relatifs aux notions de performance, stabilité et capacité d'extension.

Mots-clés : *Evaluation, Capacité d'extension, Déploiement de systèmes multiagents*

Abstract

Multirobot systems are particular multiagent systems because each robot is more expensive to implement than a software agent. Therefore evaluating multirobot systems through simulations is a major issue. However it is important to evaluate in a relevant way. Relevant measures allow to find a trade-off between the efficiency and the size of the system. In this paper, we present a practical case: the evaluation of decentralized coordination algorithms within a constellation of autonomous observation satellites. We define an experiment notion and evaluation criteria concerning performance, stability and scalability.

Keywords: *Evaluation, Multiagent demonstration, Scalability*

1 Introduction

Résoudre un problème par un système multiagent permet, dans un premier temps, de n'affecter à chaque agent qu'une partie du problème

à résoudre et, dans un second temps, de transformer des contraintes globales en contraintes locales qui sont résolues par coordination entre les agents.

Dans le domaine spatial nous avons présenté dans [2] un problème d'affectation décentralisée de tâches au sein d'une constellation de satellites et nous avons proposé une méthode de résolution par formation de coalitions. De par la structure du problème, un unique agent peut le résoudre en un laps de temps important ; l'ajout d'autres agents en accélère la résolution.

Dans un contexte d'agents informatiques, l'ajout d'un nouvel agent est généralement peu coûteux. Ce n'est pas le cas en robotique autonome et moins encore dans le domaine spatial. Se pose alors la question suivante : est-il intéressant d'ajouter un nouvel agent au système ? Cela nous conduit à évaluer à la fois l'efficacité d'un système multirobot et sa capacité d'extension¹ et donc de définir des mesures pertinentes permettant de dégager un compromis entre efficacité et nombre d'agents robots.

Dans la section 2, nous rappelons brièvement le problème multirobot de la constellation de satellites. Puis nous présentons dans la section 3 quels doivent être les critères d'une évaluation et nous définissons des mesures abstraites sur ces critères ; ces mesures sont ensuite définies pour notre application dans la section 4. Puis nous présentons et discutons dans la section 5 les résultats d'évaluation de l'application.

2 Description du problème

Nous nous intéressons à la coordination d'un ensemble de satellites (généralement de 4 à 16) placés sur différentes orbites basses et dont la mission consiste à prendre des images de diverses zones de la surface terrestre. Le sol envoie aux satellites des tâches d'observation asynchrones et de priorités variables. Une durée

1. *scalability* en anglais.

minimum étant nécessaire pour réaliser une observation, deux tâches trop proches géographiquement peuvent ne pas être réalisables par un même satellite. De plus, les tâches peuvent être décomposées en sous-tâches devant être réalisées par des satellites différents. Cette décomposition peut provenir du besoin de suivre l'évolution d'une même zone, de l'observer avec différents instruments ou de couvrir une zone géographique très importante.

Les satellites doivent donc collaborer pour se partager les tâches. Cette collaboration passe par deux contraintes :

1. ils doivent éviter les redondances, c'est-à-dire éviter que deux satellites distincts réalisent la même tâche alors qu'une seule réalisation aurait été suffisante ;
2. si un satellite réalise une sous-tâche d'une tâche composée, toutes les autres sous-tâches doivent être impérativement réalisées (par le même satellite ou un autre).

Les constellations que nous considérons sont telles que les orbites des différents satellites se croisent aux pôles comme représenté sur la figure 1. Lors de ces rencontres deux satellites (ou plus) peuvent communiquer entre eux *via* une liaison intersatellite (ISL ou InterSatellite Link) sans intervention du sol.

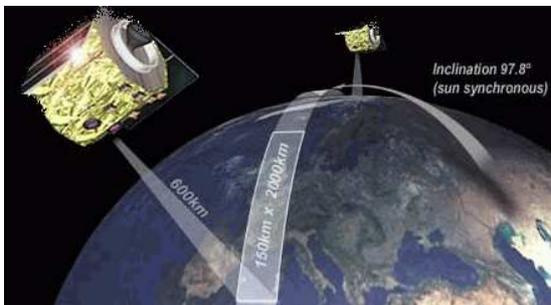


FIGURE 1 – Deux orbites se croisent aux pôles

En communiquant, les satellites construisent une connaissance commune des tâches à réaliser et des intentions d'autrui concernant ces tâches. Nous avons proposé dans [2] deux types de coordinations :

- une coordination *a posteriori* où les satellites évitent de réaliser les tâches qui ont déjà été réalisées par d'autres satellites ; il s'agit d'une approche réactive, peu coûteuse en communication et raisonnement ;
- une coordination *a priori* où les satellites négocient les tâches à réaliser et forment implicitement des coalitions ; il s'agit d'une ap-

proche délibérative plus coûteuse en communication et en raisonnement.

Ces deux approches a été évaluées par simulation sur une constellation comportant 3 satellites. Cette simulation est fondée sur un scénario dynamique : toutes les 6 heures, les stations au sol envoient 40 nouvelles tâches (elles-mêmes composées d'au moins 2 sous-tâches) aux satellites. Deux métriques nous ont permis d'évaluer les résultats : le nombre de tâches réalisées (figure 2) et le nombre de tâches réalisées sans redondances (figure 3).

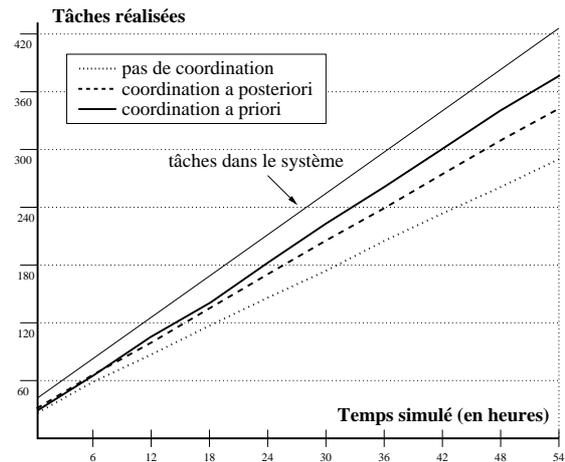


FIGURE 2 – Tâches réalisées

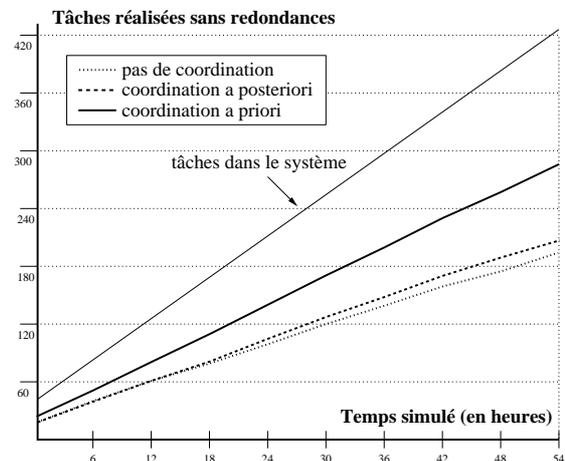


FIGURE 3 – Tâches réalisées sans redondances

Les approches par coordination sont évidemment plus efficaces que des satellites isolés (sans coordination). Cependant, nous pouvons remarquer que la coordination *a priori* permet à la constellation de réaliser plus de tâches, avec plus d'efficacité. Au fur et à mesure que le temps passe, l'écart entre l'approche *a posteriori* et *a priori* se creuse : la coordination *a*

priori permet d'économiser des ressources et de les réaffecter plus tard pour réaliser plus de tâches.

L'étape suivante de l'évaluation consiste à « passer à l'échelle », c'est-à-dire à considérer une constellation composée d'une dizaine de satellites. Cependant pour un problème donné, augmenter le nombre de satellites - même isolés - permet de résoudre plus facilement le problème. En soi le nombre de satellites augmente les performances mais trois questions se posent alors :

1. quelles sont les mesures pertinentes pour évaluer la performance d'un tel système ?
2. comment prendre en compte le biais dû à la diminution de la complexité d'un problème au fur et à mesure que le nombre d'agents affectés à sa résolution augmente ?
3. à partir de ces deux notions, peut-on définir une relation entre le nombre de satellites mis en œuvre et leur mode de coordination ?

3 Evaluer un système multiagent

Dans notre contexte, il ne s'agit pas d'évaluer la méthodologie qui mène à la construction d'un système multiagent [1, 10, 13] mais d'évaluer le système multiagent en fonctionnement. [8] propose de le faire selon les trois axes classiques pour évaluer les systèmes distribués : performance, stabilité et capacité d'extension.

3.1 Trois critères

La *performance* du système se mesure par le biais d'indicateurs statistiques comme la consommation en ressources, le temps de réponse, le nombre de tâches réalisées, le temps de calcul et la charge de communication. [4] définit par exemple les indicateurs suivants : réactivité du système, répartition des tâches entre les agents, utilisation de toutes les ressources, charge de communication.

La *stabilité* est liée au concept d'équilibre. Lorsqu'un événement vient influencer sur le système, ce dernier est stable s'il parvient à revenir à un état d'équilibre. C'est un concept à rapprocher de la robustesse fonctionnelle du système [4]. Intuitivement, un système multiagent est à l'équilibre si ses performances restent stationnaires suite à un ou plusieurs événements qui peuvent venir le perturber [8]. La notion d'événement doit bien évidemment être définie : il peut s'agir de l'ajout ou du retrait d'agents, de l'ajout de nouvelles tâches, de bruit sur les observations ou de toute

autre variation de paramètres au cours de l'exécution.

Si la définition des deux critères précédents est communément admise, ce n'est pas le cas pour la *capacité d'extension* dont la définition est liée à la complexité du système, terme difficile à définir pour les systèmes multiagents [7]. Par exemple, [8] s'intéresse à la complexité algorithmique et définit la capacité d'extension comme le fait que la performance au pire cas du système est bornée par une fonction polynomiale de la charge de travail. De son côté, [11] considère un système comme extensible si la consommation en ressources par agent est bornée par une fonction polynomiale de la taille du système. Mais pour [4], la capacité d'extension correspond à la dégradation (ou non) de la performance à mesure que le système croît en nombre d'agents.

La première définition revient en fait à une mesure de performance et ne s'intéresse pas à la dimension multiagent du système. La seconde définition prend en compte cette dimension mais définit un système comme extensible si les agents utilisent individuellement de moins en moins de ressources pour résoudre leur problème. Or dans le domaine qui nous intéresse, il y a une contradiction : si des ressources sont disponibles, elles doivent être utilisées. La troisième définition nous donne une piste de réflexion : nous pouvons dire que la capacité d'extension réfère à la capacité du système à accroître ses performances alors que sa taille augmente elle aussi. Par exemple, quatre agents sont-ils deux fois plus efficaces que deux agents ?

Nous proposons de définir des mesures sur les notions de performance, stabilité et capacité d'extension pour un système multirobot mis en œuvre ou simulé. Dans les deux cas, nous parlerons d'expérience, que nous définissons formellement.

Définition 1 (Expérience) Une expérience \mathcal{E} est un tuple $\langle E, M, S, \mathbb{T} \rangle$ où $E = \langle e_i \rangle$ est un ensemble de n entrées et $S = \langle s_j \rangle$ est un ensemble de m sorties où les domaines de valeurs de chacun des éléments de E et S sont quelconques ; $\mathbb{T} \subseteq \mathbb{N}$ est une horloge et $M : E \times \mathbb{T} \mapsto S$ est un modèle de la dynamique qui lie E à S .

E est l'ensemble des paramètres initiaux de l'expérience (contraintes sur les objectifs des agents, nombre de tâches connues, nombre

d'agents, ressources, conditions d'arrêt de la simulation, etc.) et S l'ensemble des observations en sortie. La fonction M est considérée comme une *boîte noire* qui modélise le système multiagent ainsi que l'environnement. Notons que nous considérons un *temps discrétisé*.

3.2 Performance

Une expérience produit une grande quantité de données dont le résultat dépend de nombreux paramètres (comme le nombre d'agents, les différentes échelles de complexité du problème, les paramètres intrinsèques des agents ou des interactions). Ainsi, il n'est pas trivial de définir de *bonnes mesures* pour évaluer les performances du système. Nous proposons de définir formellement ce qu'est une mesure de performance.

Définition 2 (Mesure de performance)

Soit une expérience \mathcal{E} , un ensemble $V = \{v_i \in E \cup S \cup \mathbb{T} : \exists v_i \in S\}$. Une mesure de performance $G(\mathcal{E})$ sur cette expérience est définie par :

$$G(\mathcal{E}) : V \mapsto \mathbb{R}$$

Cette définition nous permet de considérer $G(\mathcal{E})$ comme une fonction quelconque des variables du système. Cependant nous nous limitons aux mesures de performance monovaluées, c'est-à-dire monocritères. La raison tient au fait que nous définissons la stabilité et la capacité d'extension en fonction des performances et que, dans un cadre multicritère, un système peut être stable (ou extensible) pour un critère et pas l'autre. Ceci nous amène à analyser chaque critère, c'est-à-dire chaque mesure de performance, séparément.

3.3 Stabilité et capacité d'extension

Trouver des mesures pertinentes lors d'un changement d'échelle est un problème que les sciences physiques traitent depuis longtemps à travers le concept de *grandeur sans dimension*. Ces grandeurs servent à étudier les propriétés intrinsèques des modèles. Le nombre de Reynolds par exemple représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses en dynamique des fluides. Un autre exemple peut être le nombre de Mach qui exprime le rapport de la vitesse locale d'un fluide sur la vitesse du son dans ce même fluide.

De manière générale, une grandeur sans dimension est une quantité permettant de décrire

une caractéristique physique sans unité explicite d'expression. Elle est constituée du produit ou rapport de grandeurs ayant une dimension, de telle façon que le rapport des unités soit 1 [6].

Nous pouvons définir la stabilité et la capacité d'extension comme des grandeurs sans dimension sur les mesures de performance.

Stabilité. Suite à un événement, nous supposons que les performances du système vont se dégrader. Nous mesurons alors la stabilité du système par la vitesse à laquelle il recouvre ses performances initiales après l'événement. Un événement est défini de la manière suivante :

Définition 3 (Événement) Soit une expérience $\mathcal{E} = \langle E, M, S, \mathbb{T} \rangle$. Le système modélisé par M est soumis à un événement δ s'il existe une date $\tau \in \mathbb{T}$ telle que $E(\tau + 1) \neq E(\tau)$. Notons \mathcal{E}^δ l'expérience fondée sur M et subissant l'événement δ .

Dans ce cas, une mesure de stabilité est définie comme suit :

Définition 4 (Mesure de stabilité) Soit une expérience $\mathcal{E} = \langle E, M, S, \mathbb{T} \rangle$ et soit \mathcal{E}^δ l'expérience fondée sur M subissant l'événement δ à la date $\tau \in \mathbb{T}$. Soit $G(\mathcal{E}(\tau'))$ une mesure de performance réalisée à la date $\tau' > \tau$. La stabilité du système est donnée par :

$$S(\mathcal{E}, \mathcal{E}^\delta, \tau') = \frac{G(\mathcal{E}^\delta(\tau'))}{G(\mathcal{E}(\tau'))}$$

Capacité d'extension. En considérant la capacité d'extension comme la variation des performances du système à mesure que le nombre d'agents augmente, la capacité d'extension est la variation du rapport de deux performances pour un nombre d'agents différent *ceteris paribus*.

Définition 5 (Mesure de capacité d'extension) Soit une expérience \mathcal{E}_n portant sur n agents et une mesure de performance $G(\mathcal{E}_n)$. La capacité d'extension du système à $(n + p)$ agents ($p \neq 0$) est donnée par :

$$X(n, p) = \frac{\left(\frac{G(\mathcal{E}_{n+p})}{n+p}\right)}{\left(\frac{G(\mathcal{E}_n)}{n}\right)}$$

Une capacité d'extension valant 1 indique que la performance par agent reste inchangée si le nombre d'agents augmente. Si la capacité d'extension est inférieure à 1 cela signifie que les agents ne sont plus aussi performants individuellement (même si le système dans sa globalité peut être plus performant). Une capacité d'extension supérieure à 1 indique qu'augmenter le nombre d'agents permet d'accroître la performance par agent et, par conséquent, d'accroître la performance du système en plus du gain dû au simple nombre d'agents.

Ainsi si une mesure de performance $G(\mathcal{E}_n)$ est sous-linéaire en fonction du nombre d'agents, le système n'est pas extensible. Si la mesure de performance est super-linéaire en fonction du nombre d'agents, le système est extensible.

Remarque : une fonction $f(n)$ est sous-linéaire si $f(n) \in o(n)$, c'est-à-dire $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{n} = 0$.

4 Application

Considérant l'application présentée dans la section 2, nous adaptons les définitions générales des mesures de performance, stabilité et capacité d'extension. Nous définissons aussi une mesure de coordination qui permet de dégager le compromis entre nombre de satellites et mode de coordination.

4.1 Mesures de performances

Nous définissons trois mesures de performance : la *réactivité*, c'est-à-dire la capacité de n agents à accomplir plus rapidement qu'un unique agent un ensemble de tâches, l'*efficacité*, c'est-à-dire une mesure des ressources mises en œuvre pour accomplir ces tâches, et l'*activité*, la proportion de tâches réalisées à une date donnée. Formellement,

Définition 6 (Réactivité) Soit une expérience \mathcal{E} et $\mathbb{T}_n \in S$ le temps nécessaire à n satellites pour la mener à bien. La réactivité de la constellation est donnée par :

$$\frac{\mathbb{T}_1}{\mathbb{T}_n}$$

La mesure de réactivité est toujours supérieure à 1 car n satellites ($n > 1$) ne peuvent pas avoir besoin de plus de temps qu'un unique satellite pour réaliser un ensemble de tâches. Ainsi plus la mesure de réactivité est élevée, meilleure est la performance de la constellation.

Définition 7 (Efficacité) Soit une expérience \mathcal{E} , $O \subset S$ les observations réalisées et $T \subset S$ les tâches réalisées. L'efficacité de la constellation est donnée par :

$$\frac{|T|}{|O|}$$

Dans notre application, le nombre d'observations $|O|$ correspond au nombre d'images prises par l'ensemble des satellites, sans tenir compte d'éventuelles redondances. Le nombre de tâches $|T|$ correspond au nombre de requêtes réalisées par la constellation en tenant compte des redondances. Ainsi le nombre d'observations est toujours supérieur ou égal au nombre de tâches réalisées. La mesure d'efficacité est donc toujours inférieure ou égale à 1. Plus elle est élevée, meilleure est la performance de la constellation.

Définition 8 (Activité) Soit une expérience \mathcal{E} , $\mathcal{T} \subset E$ les tâches dans le système et $T_\tau \subset S$ les tâches réalisées à la date $\tau \in \mathbb{T}$. L'activité du système multiagent est :

$$A(\mathcal{E}, \tau) = \frac{|T_\tau|}{|\mathcal{T}|}$$

Le nombre de tâches $|T_\tau|$ correspond aux nombre de tâches dans le système réalisées indépendamment du nombre de redondances. Cela correspond donc à la quantité de travail qui a été effectuée par la constellation. La mesure d'activité est donc toujours inférieure ou égale à 1. Plus elle est élevée, plus la constellation est performante à la date courante.

4.2 Mesure de stabilité

Les événements que nous considérons sont l'arrivée de nouvelles tâches dans le système.

Définition 9 (Événement) Soit une expérience $\mathcal{E} = \langle E, M, S, \mathbb{T} \rangle$ où $\mathcal{T} \subset E$ est l'ensemble des tâches dans le système. Il y a un événement δ à la date $\tau \in \mathbb{T}$ si $\mathcal{T}(\tau + 1) > \mathcal{T}(\tau)$. Notons \mathcal{E}^δ cette expérience subissant l'événement δ .

Nous définissons alors la stabilité sur une mesure d'activité.

Définition 10 (Mesure de stabilité) Soit une expérience $\mathcal{E} = \langle E, M, S, \mathbb{T} \rangle$ et soit \mathcal{E}^δ l'expérience fondée sur M subissant l'événement

δ à la date $\tau \in \mathbb{T}$. Soit $A(\mathcal{E}, \tau)$ une mesure d'activité réalisée à la date τ . La stabilité du système est donnée par :

$$S(\mathcal{E}, \mathcal{E}^\delta) = \frac{A(\mathcal{E}^\delta, \tau + 1)}{A(\mathcal{E}, \tau + 1)}$$

La mesure de stabilité représente la dégradation de l'activité de la constellation lorsque la charge de travail (le nombre de tâches à réaliser) augmente. Cette mesure est toujours inférieure à 1. Plus elle est élevée, meilleure est la résistance de la constellation à une modification de la charge de travail. Ainsi, une valeur de 1 signifie que la modification n'a aucune influence sur l'activité de la constellation.

4.3 Mesure de la capacité d'extension

Dans notre application, nous nous intéressons à des constellations de taille 1, 4, 6, 8, 9, 12 et 16 respectivement. La mesure de capacité d'extension pour les mesures de réactivité et d'efficacité exprime alors l'intérêt à passer d'une taille de constellation à la suivante, comme par exemple de 1 à 4 satellites ou de 9 à 12 satellites. Dans notre cas, cette mesure reste inchangée par rapport à la définition 5.

4.4 Mesure de coopération

Dans notre application, nous nous intéressons aux deux types de coordination exposés à la section 2. Pour rappel, nous disposons d'une approche :

1. réactive via une coordination *a posteriori* où les satellites évitent de réaliser les tâches qui ont déjà été réalisées par d'autres satellites ;
2. délibérative via une coordination *a priori* où les satellites négocient les tâches à réaliser et forment implicitement des coalitions.

Dans notre application, nous devons définir une mesure pour mettre en évidence le gain à coordonner *a priori* des satellites qui se coordonnaient *a posteriori*, malgré un coût de communication et de raisonnement supplémentaire. Formellement,

Définition 11 (Mesure de coopération) Soit une expérience \mathcal{E}_k impliquant k satellites qui se coordonnent *a posteriori* et une mesure de performance G . Soit une expérience \mathcal{E}_n identique si ce n'est qu'elle implique n satellites

qui se coordonnent *a priori*. La capacité de coordination de la constellation est donnée par :

$$C(\mathcal{E}_k) = \min\{n : G(\mathcal{E}_n) \geq G(\mathcal{E}_k)\}$$

La capacité de coordination indique combien de satellites coordonnés *a priori* suffisent pour être aussi performants qu'une constellation composée de satellites coordonnés *a posteriori*. Plus cette mesure est faible, plus la taille de la constellation peut être réduite pour une performance identique.

5 Expériences et résultats

5.1 Implantation du système multiagent

Nous avons implanté un simulateur de constellations de satellites en JAVA qui simule de manière centralisée la constellation distribuée par l'intermédiaire d'un système à événements discrets. La concurrence entre les différentes actions des agents est contrôlée par des règles de résolution de conflit (par exemple l'agent possédant le numéro d'identification le plus petit est toujours prioritaire). Cette méthode, semblable à celle de [3], permet de réitérer de manière déterministe une expérience.

Nous considérons alors des expériences sur un scénario comportant 500 tâches initiales et des constellations de Walker [12] de tailles différentes (1, 4, 6, 8, 9, 12 ou 16 satellites régulièrement répartis sur un nombre fini de plans orbitaux). Une expérience se termine lorsque toutes les tâches ont été réalisées. Les performances sont ensuite mesurées.

5.2 Réactivité de la constellation

Sur la figure 4, nous pouvons remarquer que la réactivité sans coordination suit une courbe logarithmique tandis que la coordination (*a posteriori* ou *a priori*) ne comporte pas une telle régularité. Cela est dû à la structure non homogène des interactions entre les satellites. En effet, des satellites qui ne sont pas coordonnés sont toujours homogènes dans le sens où il n'y a aucune interaction entre eux. En revanche, lorsqu'il y a interaction, celle-ci ne peut exister qu'entre des satellites placés sur des plans orbitaux différents. La figure 5 représente quelques-uns de ces plans.

Ainsi, 4 plans de 2 satellites peuvent permettre plus d'interactions que 3 plans de 4 satellites.

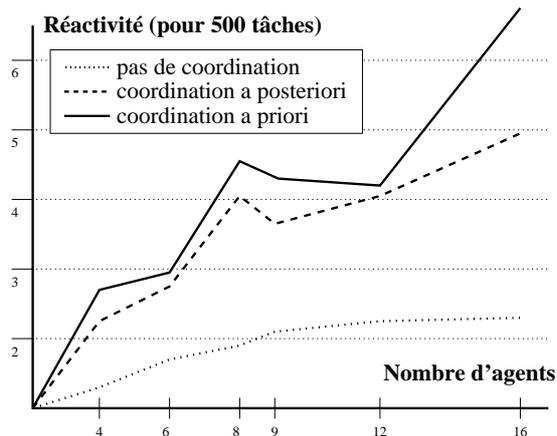


FIGURE 4 – Réactivité de la constellation

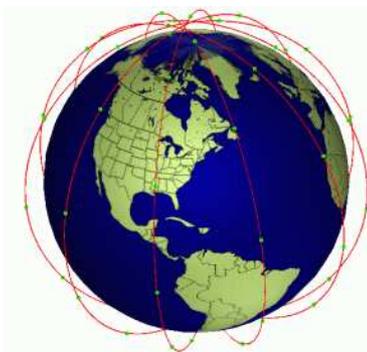


FIGURE 5 – Différents plans orbitaux

Il y a donc une notion de topologie des interactions que l'on ne trouve pas dans d'autres applications multiagents comme le fourrageage [5, 9]. En fait le nombre de satellites n'est pas le facteur déterminant dans le nombre d'interactions, il s'agit plutôt de leurs orbites : peu de satellites peuvent communiquer souvent tandis que de nombreux satellites peuvent ne communiquer qu'épisodiquement. Cette topologie des interactions provoque une réduction de la performance de la constellation. Ce phénomène peut être observé dans la plage de 8 à 12 satellites pour les constellations coordonnées *a priori*.

Le tableau de la figure 6 nous donne la capacité d'extension du système coordonné *a priori* pour le scénario précédent selon le critère de réactivité. Nous pouvons remarquer que passer de 6 à 8 satellites, tout comme passer de 12 à 16 satellites, permet d'obtenir une réactivité supplémentaire qui provient des interactions entre les satellites. Ainsi mettre en œuvre 8 satellites comparativement à 6 permet non seulement

d'obtenir le gain de performance attendu par rapport au nombre, mais d'obtenir une réactivité accrue de 16 %. De même, passer de 12 à 16 satellites permet d'accroître la réactivité de 26 % en plus du gain dû au nombre.

Cependant nous avons des cas sous-linéaires, c'est-à-dire des cas où le système n'est pas extensible pour la coordination *a priori*. Ceci est dû, une nouvelle fois, à la topologie des interactions entre les agents. En effet si ajouter un nouvel agent n'augmente pas proportionnellement le nombre d'interactions positives au sein du système, ce dernier ne va pas accroître suffisamment sa réactivité pour être considéré comme extensible.

Nb. de satellites (coord. a priori)		X(n, p)
n	n + p	
1	4	0,67
4	6	0,73
6	8	1,16
8	9	0,85
9	12	0,74
12	16	1,26

FIGURE 6 – Capacité d'extension (réactivité)

Le tableau de la figure 7 indique la mesure de coopération du système selon le critère de réactivité. Les valeurs ont été arrondies à l'entier le plus proche afin de prendre en compte la granularité du nombre d'agents. Nous pouvons remarquer que 4 satellites coordonnés *a priori* suffisent pour être aussi réactifs que 6 satellites coordonnés *a posteriori* tandis que 8 satellites coordonnés *a priori* sont au moins aussi réactifs que 12 satellites coordonnés *a posteriori*. L'économie au niveau de la mise en œuvre de la constellation est donc importante.

Trois cas d'équivalence peuvent cependant être remarqués, signifiant qu'une réduction du nombre de satellites coordonnés *a priori* entraîne une dégradation de la réactivité par rapport à l'utilisation d'une constellation de plus grande taille composée de satellites coordonnés *a posteriori*. Dans ces cas d'équivalence, il est nécessaire, pour choisir le type de satellite à utiliser, de se poser la question suivante : la réactivité supplémentaire dégagée par la coordination *a priori* compense-t-elle le coût de développement de tels satellites ?

Nb. de satellites k	$C(\mathcal{E}_k)$
4	4
6	4
8	8
9	8
12	8
16	16

FIGURE 7 – Mesure de coopération (réactivité)

Nb. de satellites (coord. a priori)		$X(n, p)$
n	$n + p$	
1	4	0,15
4	6	0,19
6	8	0,15
8	9	0,16
9	12	0,1
12	16	0,08

FIGURE 9 – Capacité d’extension (efficacité)

5.3 Efficacité de la constellation

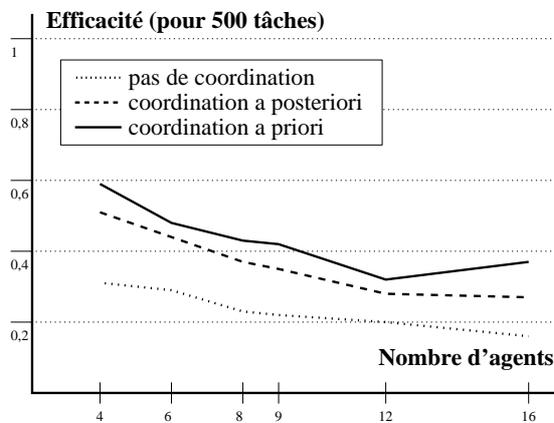


FIGURE 8 – Efficacité de la constellation

La figure 8 nous permet de remarquer que la coordination *a priori* est en moyenne plus efficace de 5% que la coordination *a posteriori* et de 19% par rapport à l’absence de coordination. Ceci correspond à une économie en termes de mémoire de masse utilisée pour stocker les images. Si la mesure d’efficacité décroît au fur et à mesure que le nombre de satellites augmente, cela signifie que le système coordonné *a priori* n’est pas extensible selon notre définition (se reporter au tableau de la figure 9). En effet, le gain en termes de ressources n’est pas proportionnel au nombre d’agents. Nous pouvons cependant remarquer que le système est extensible au sens de Turner [11]. En effet, la consommation en ressources (et plus précisément la surconsommation en ressource au niveau de la constellation) peut être mesurée par le nombre d’observations divisé par le nombre de tâches réalisées $\frac{|O|}{|T|}$. Or, c’est l’inverse de la mesure d’efficacité. Ainsi, la consommation en ressources peut être bornée par une fonction polynomiale en le nombre d’agents.

Le tableau de la figure 10 indique la mesure de coopération du système selon le critère d’efficacité. Étant donné que l’efficacité est décroissante à mesure que le nombre d’agents s’accroît, un nombre minimal d’agents coordonnés *a priori* sera toujours plus efficace qu’un nombre quelconque d’agents coordonnés *a posteriori*. Ainsi la coordination *a priori* est toujours intéressante pour l’efficacité de la constellation. Cependant, il convient alors de se poser la question suivante : le gain d’efficacité de 5% procuré par la coordination *a priori* compense-t-il le coût de développement de cette approche ?

Nb. de satellites k	$C(\mathcal{E}_k)$
4	4
6	4
8	4
9	4
12	4
16	4

FIGURE 10 – Mesure de coopération (efficacité)

5.4 Stabilité de la constellation

Le scénario utilisé pour mesurer la stabilité d’une constellation comporte 250 tâches initiales. Nous avons discrétisé le temps en pas de 6 heures. À la date 1, un événement ajoute 250 tâches au système puis la stabilité est mesurée à la date 2.

Nous pouvons remarquer sur la figure 11 deux phénomènes : la mesure de stabilité croît dans un premier temps puis devient constante ; et les coordinations *a priori* et *a posteriori* sont aussi stables l’une que l’autre en termes d’activité.

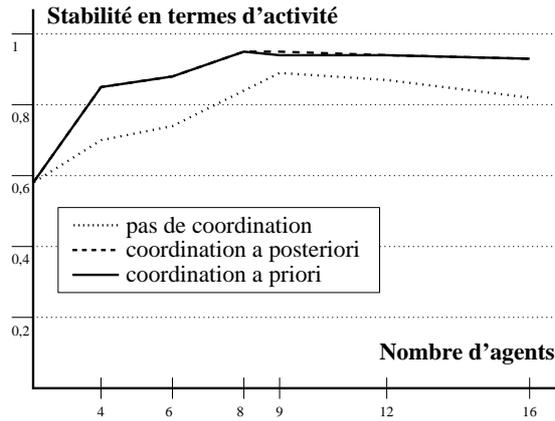


FIGURE 11 – Stabilité de la constellation

Le premier résultat vient du fait que la stabilité dépend en partie de la capacité des agents à construire une connaissance commune en termes de tâches à réaliser et de tâches déjà réalisées. Ajouter des agents permet de transmettre plus rapidement de l'information et de bâtir plus vite cette connaissance commune. Cependant au-delà d'un certain nombre d'agents, ajouter un nouvel agent n'a pas d'influence sur la vitesse de propagation des informations.

Le deuxième résultat provient de deux phénomènes qui interagissent. La coordination *a priori* est plus efficace (se reporter à la section 5.3) et cette économie de ressources permet d'absorber les perturbations de la charge de travail. Cependant ce type de coordination pousse les agents à prendre des engagements qui ne peuvent être remis en cause et qui sont donc sensible aux événements. Ces deux phénomènes conjoints peuvent expliquer l'équivalence entre la coordination *a priori* et *a posteriori* en termes de stabilité.

Nb. de satellites (coord. a priori)		$X(n, p)$
n	$n + p$	
1	4	0,37
4	6	1,02
6	8	0,81
8	9	0,95
9	12	0,75
12	16	0,74

FIGURE 12 – Capacité d'extension (stabilité)

Le tableau de la figure 12 indique la capacité

d'extension du système en termes de stabilité. Passer de 4 à 6 satellites permet de légèrement accroître la stabilité au-delà de ce qui est attendu. La capacité d'extension décroît par la suite, atteignant une valeur maximale comme présenté sur la figure 11.

Nb. de satellites k	$C(\mathcal{E}_k)$
4	4
6	6
8	8
9	9
12	12
16	16

FIGURE 13 – Mesure de coopération (stabilité)

Le tableau de la figure 13 indique la mesure de coopération du système en termes de stabilité. Comme la mesure de stabilité est identique pour les constellations coordonnées *a priori* et *a posteriori*, la mesure de coopération est égale au nombre de satellites considérés. Il n'y a pas de gain à coordonner *a priori* en ce qui concerne la stabilité du système.

Il est cependant intéressant de noter que la coordination *a posteriori*, en tant qu'approche réactive, est naturellement stable car le coût de réorganisation au sein de la constellation est nul. Or comme il y a équivalence en termes de stabilité entre la coordination *a priori* et *a posteriori*, nous pouvons dire que l'approche délibérative employée (approche spécifique présentée dans [2]) voit son coût de réorganisation compensé par son gain.

6 Conclusion

Évaluer un système multirobot en fonctionnement nécessite de définir des mesures pertinentes qui permettent la comparaison de différentes simulations ou expériences dans un cadre réel. Nous avons proposé une manière de formaliser des mesures sur des notions de performance, de stabilité et capacité d'extension.

Cela est ensuite mis en pratique afin d'évaluer un algorithme de coordination dans le domaine des satellites d'observation. La simulation d'une constellation de satellites nous a permis de dégager des mesures de *réactivité*, d'*efficacité* et de *stabilité* afin mettre en évidence le compromis nécessaire entre nombre d'agents du sys-

tème et extension des performances. Nous avons pu nous rendre compte que les notions de capacité d'extension ne suffisaient pas à comparer différentes approches et nous avons défini une *capacité de coordination* pour mettre en évidence le gain à utiliser des algorithmes de coordination plus complexes. De plus, nous pouvons remarquer d'une part que capacité d'extension et capacité de coordination sont des mesures relatives à un critère de performance. Un système multirobot n'est donc pas extensible en soi mais selon un critère donné. D'autre part, plusieurs critères peuvent être contradictoires.

Par exemple dans notre application, un utilisateur désirant un système stable en termes d'activité préférera une constellation ayant un faible nombre de satellites coordonnés *a posteriori* tandis qu'un utilisateur privilégiant la réactivité préférera une constellation de grande taille coordonnée *a priori*. De même si la limitation en termes de ressources est une contrainte forte, il est préférable d'utiliser une coordination *a priori*. Cependant ces résultats se fondent sur le nombre de satellites mis en œuvre et non pas le nombre d'interactions au sein de la constellation. Une perspective d'étude serait alors de considérer la capacité d'extension d'un système non pas en fonction du nombre d'agents qui le composent mais en fonction de la quantité d'interaction entre les agents.

Remerciements

Nous remercions Marie-Claire Charmeau (CNES) et Serge Rainjonneau (Thales Alenia Space) pour leur aide et leurs commentaires pertinents sur ce travail.

Références

- [1] C. Bernon, M.-P. Gleizes, S. Peyruqueou, and G. Picard. ADELFE, a methodology for adaptive multi-agent systems engineering. *Engineering Societies in the Agents World*, Vol. 3 :70–81, 2003.
- [2] G. Bonnet and C. Tessier. Coopération au sein d'une constellation de satellites. In *Actes des 15es Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, 2007.
- [3] A.-H. Chow. Parallel DEVS: A parallel hierarchical modular modeling formalism and its distributed simulator. *Transactions of the International Society for Computer Simulation*, Vol. 13(2) :55–68, 1996.
- [4] P. Davidsson and S. Johansson. Evaluating multi-agent system architectures: a case study concerning dynamic resource allocation. *Engineering Societies in the Agents World*, Vol. 3 :25–77, 2003.
- [5] L. Gaubert, P. Redou, F. Harrouet, and J. Tisseau. A first mathematical model of brood sorting by ants: functional self-organization without swarm-intelligence. *Ecological Complexity*, Vol. 4(4) :234–241, 2007.
- [6] P. Giacomo. Sans dimension ou de dimension un? *Metrologia*, Vol. 32 :311–313, 1996.
- [7] Y. Kubera, P. Mathieu, and S. Picault. La complexité dans la simulation multi-agent. In *Actes des 15es Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, 2007.
- [8] L. Lee, H. Nwana, D. Ndumu, and P. D. Wilde. The stability, scalability and performance of multi-agent systems. *BT Technology Journal*, Vol. 16(3) :94–103, 1998.
- [9] N. Monmarche. *Algorithmes de fourmis artificielles: application à la classification et à l'optimisation*. PhD thesis, Université François Rabelais, Tours, Décembre 2000.
- [10] A. Sturm and O. Shehory. A framework for evaluating agent-oriented methodologies. In *Proceedings of the Workshop on Agent-Oriented Information System (AOIS)*, pages 60–66, 2003.
- [11] P. Turner and N. Jennings. Improving the scalability of multi-agent systems. In *Proceedings of the Workshop on Infrastructure for Scalable Multi-Agent Systems*, 2000.
- [12] J. Walker. Satellite constellations. *Journal of British Interplanetary Society*, Vol. 37 :559–571, 1984.
- [13] F. Zambonelli, N. Jennings, and M. Wooldridge. Developing multiagent systems: The GAIA methodology. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, Vol. 12(3) :317–370, 2003.