

Défis ouverts aux systèmes multi-agents dans le cadre des constellations de satellites d'observation de la Terre

Gauthier Picard¹, Clément Caron², Jean-Loup Farges¹,
Jonathan Guerra², Cédric Pralet¹, Stéphanie Roussel¹

¹ ONERA DTIS, Université de Toulouse
prenom.nom@onera.fr

² Airbus Defence and Space, Toulouse
prenom.nom@airbus.com

Résumé

Dans cet article, nous identifions plusieurs défis et opportunités ouverts aux systèmes multi-agents, suite aux récents développements dans le domaine des constellations de satellites d'observation de la Terre. Nous nous concentrons sur trois catégories de défis relevant de ce domaine : (i) les problèmes de configuration de constellations et de stations au sol utilisées pour les exploiter, potentiellement opérées par différents acteurs, afin d'améliorer les services fournis et leur coordination; (ii) les problèmes de planification et d'ordonnancement hors ligne, qui consistent à trouver des méthodes de résolution pour planifier les observations et les tâches de chargement de commandes et de déchargement de prises de vue de la constellation; et (iii) la conception de méthodes opérationnelles en ligne efficaces et réactives pour adapter les plans dans des contextes dynamiques. Étant naturellement distribués et composés de multiples entités et utilisateurs, ces problèmes s'inscrivent clairement dans le paradigme multi-agent, et peuvent représenter des défis pour les chercheurs du domaine pour de nombreuses années.

Mots-clés

Satellite, constellation, observation de la Terre, systèmes multi-agents.

Abstract

We identify several challenges and opportunities opened to agent and multiagent systems, following the recent developments in the domain of Earth observation constellations. We focus on three challenge categories that manifest in this field : (i) configuration problems of constellations and ground stations used to operate them, potentially owned by different actors, as to provide better services and coordination; (ii) offline planning and scheduling problems, which consist in finding solution methods to schedule observation and upload/download tasks over the constellation; (iii) the design of efficient and reactive online operation methods as to adapt schedules in dynamic settings. Being naturally distributed and composed of multiple entities and users, these problems clearly fit the multiagent paradigm, and may chal-

lenge researchers for many years.

Keywords

Satellite, Constellation, Earth observation, Multiagent systems.

1 Introduction

Ces dernières années ont vu une forte augmentation du développement des constellations de satellites. Au lieu de considérer des satellites individuels, l'idée est de tirer parti d'un groupe de satellites, dont certains partagent souvent les mêmes plans orbitaux, pour fournir des services plus riches de positionnement, de télécommunications ou d'observation de la Terre [61]. Avec peu de satellites (*e.g.* deux dans la constellation PLEIADES [37]), et sur des orbites terrestres basses ou moyennes (altitude inférieure à 35 000 km), aucune région de la Terre n'est couverte à tout moment. Ainsi, la principale motivation pour augmenter la taille de ces constellations est de permettre d'observer n'importe quel point sur Terre à une fréquence plus élevée, comme le fait la société Planet avec plus de 150 satellites d'observation de la Terre (EOS) [52]. Mais l'exploitation de nombreux EOS nécessite d'améliorer la coopération entre les moyens sol et bord afin d'utiliser au mieux le système, ce qui est une tâche hautement combinatoire. Outre leur taille croissante, la composition des constellations évolue également. Les technologies récentes permettent la production et le déploiement d'EOS agiles capables de changer leur orientation, et de fournir de multiples types de prises de vue avec de multiples capteurs. Tout en fournissant des services plus riches, cela ajoute de nombreux degrés de liberté et des variables de décision pour programmer l'activité de l'EOS, ouvrant ainsi de nombreux défis [3, 63].

La figure 1 montre un système EOS avec ses opérations au sol et dans l'espace. Elle met en évidence la multiplicité et la richesse des acteurs et des composants ayant leurs propres activités et objectifs. Comme les EOS ont une capacité de calcul embarquée limitée, la majeure partie de la mission est déterminée hors ligne et transmise aux EOS à l'aide de stations au sol. En outre, les centres de mission et les agences doivent collaborer pour partager les orbites,

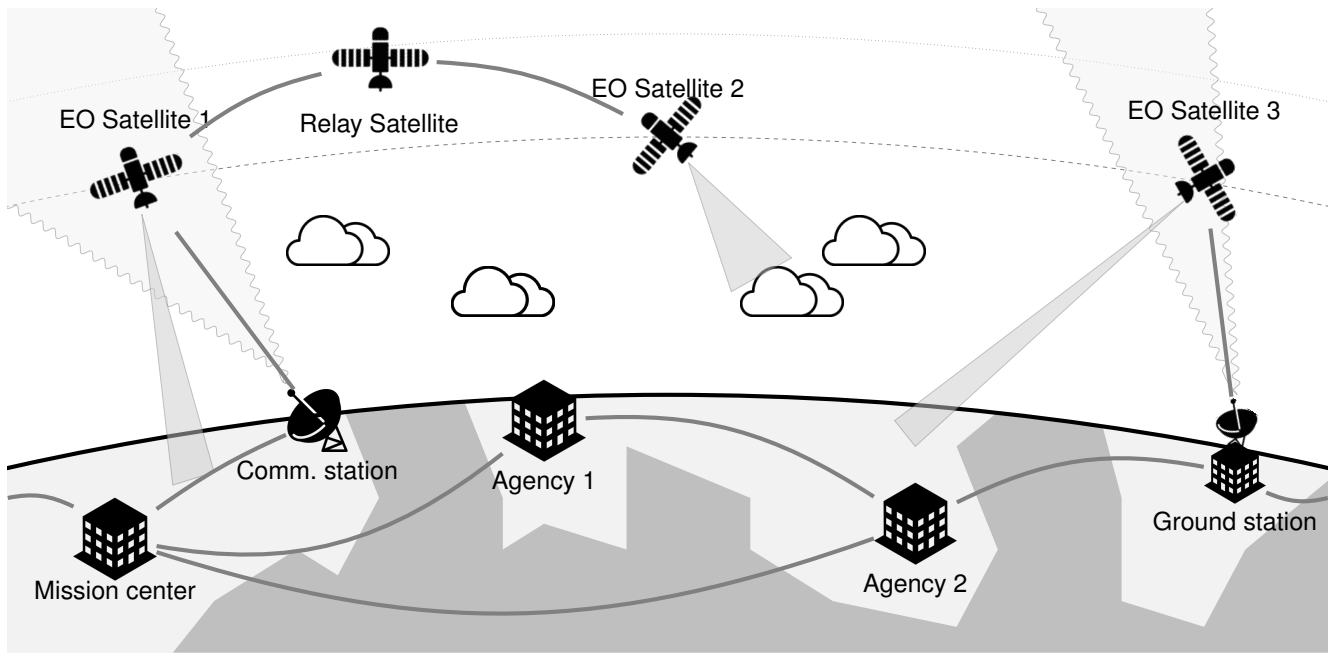


FIGURE 1 – Un système d’observation de la Terre composé d’un centre mission principal et de stations distribuées (ainsi que leurs fenêtres de visibilité), d’agences émettant des requêtes d’observation (au centre mission), de satellites d’observation (et leur empreinte sol), et de communication (reliant les satellites d’observation).

programmer les téléchargements de plans, les acquisitions d’images et les données. Si l’EOS appartient à différentes parties prenantes, celles-ci peuvent même négocier le partage de certaines ressources embarquées. Les opérations dans l’espace nécessitent également une coopération, notamment entre les EOS qui doivent effectuer de multiples acquisitions, qui sont également souvent composites. Pour les applications optiques, les incertitudes météorologiques doivent être traitées pour éviter de capturer des images inutiles remplies de nuages. Les EOS se partagent également les tâches, de sorte que les observations inutilisables faites par un EOS peuvent être effectuées plus tard par un EOS suivant survolant la région. En ce qui concerne la coopération, les EOS peuvent s’appuyer sur des communications indirectes (via des satellites relais dédiés) ou directes à courte distance pour transférer les tâches de l’un à l’autre, au lieu d’attendre plusieurs minutes pour interagir avec les stations terrestres accessibles.

Ce scénario illustre la nécessité de coopérer, de résoudre et de planifier collectivement, de s’adapter et d’interagir, qui sont les motivations principales des systèmes multi-agents (SMA). Alors que les SMA ont été identifiés très tôt pour modéliser les systèmes de satellites [51, 31], ce scénario ouvre de nouveaux défis à relever par la communauté SMA, regroupés en trois catégories. La section 2 traite des techniques multi-agents qui pourraient aider à concevoir et à dimensionner les constellations de satellites avant leur déploiement. La section 3 passe en revue certains modèles multi-agents pour la gestion au sol des principaux problèmes d’allocation et de planification au sol, de tâches d’acquisition d’images, de communication et de manœuvre, et dont les solutions sont poussées jusqu’à la constellation.

Enfin, la section 4 explore comment les systèmes multi-agents, et plus particulièrement les notions d’autonomie et d’interaction, peuvent apporter adaptation et résilience à l’exploitation des satellites, une fois les plans déjà installés à bord. Nous mettons l’accent sur les domaines d’intérêt multi-agents dans lesquels chaque défi se situe, en utilisant la notation $\Rightarrow \langle \text{domaine} \rangle$ (tirés des domaines listés dans l’appel des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents¹).

2 Défis dans la conception de constellations

Avant de déployer une constellation puis de l’exploiter, plusieurs problèmes difficiles doivent être résolus, liés au dimensionnement et à la composition de la constellation, à la répartition équitable des plans orbitaux entre les parties prenantes.

2.1 Modélisation et simulation

La phase de conception consiste à dimensionner la constellation, c’est-à-dire à déterminer le ou les modèles orbitaux, le nombre de satellites sur chaque plan orbital ainsi que leurs éléments, ainsi l’ensemble des stations au sol utilisées pour télécharger les images et les plans de mission. La nature composite, l’hétérogénéité, la dynamique et l’ouverture de la constellation EOS doivent être prises en compte dans cette phase. De plus, les systèmes spatiaux sont parmi les plus exigeants en matière d’exigences fonctionnelles et de sûreté.

Par exemple, les constellations EOS contiennent un grand

1. <https://easychair.org/cfp/jfsma2021>

nombre de satellites (d'une dizaine à plusieurs centaines de satellites), qui peuvent être très hétérogènes (plate-forme, charge utile, orbite) et généralement conçus pour un objectif spécifique à court terme (*e.g.* mission scientifique) [18]. Si toutes les tâches peuvent être effectuées par l'ensemble des satellites, le catalogue des demandes est beaucoup plus vaste que la capacité d'observation réelle de la constellation. Le problème consiste à sélectionner le sous-ensemble de satellites de la constellation pour effectuer les tâches d'observation. Le coût d'une équipe peut-être défini comme une agrégation du coût des tâches à effectuer, qui est fonction du satellite qui effectue réellement l'observation et du temps d'inactivité de chaque satellite. On vise alors à trouver l'équipe la moins chère pour un ensemble de tâches. En suivant cette approche et en utilisant les concepts de modélisation multi-agent, il serait possible de prendre en compte un plus large éventail de propriétés lors de la conception des équipes (par exemple, la robustesse ou les objectifs individuels si les satellites appartiennent à des gestionnaires différents) [1].

La *modélisation et la programmation multi-agent* pourraient être d'une grande aide en fournissant des concepts de modélisation (par exemple, rôles, objectifs, organisations, institutions) et des méthodologies pour développer des plateformes permettant de gérer des systèmes multi-satellites et multi-opérateurs [66, 9]. En outre, la *simulation multi-agent* (ou MABS) apparaît comme une approche à grains fins, pertinente pour mieux appréhender le fonctionnement du système, ou pour faire des prédictions sur ses performances [70, 5, 15]. Dans le domaine spatial, les simulateurs existants comme Ptolemy [48] pourraient bénéficier des concepts et des efforts du MABS, d'autant plus que l'on prévoit une plus grande autonomie des systèmes spatiaux. Toutefois, une telle intégration nécessite des efforts de recherche sur le couplage et l'interopérabilité des simulateurs [43, 17]. Enfin, comme les modèles utilisés pour évaluer les performances sont différents des modèles utilisés pour mesurer le respect des exigences et la sûreté [54], une piste s'ouvre pour les chercheurs dans le domaine du génie logiciel orienté agent.

La conception d'une constellation EOS est également un problème multi-objectif afin d'optimiser simultanément le nombre de passages de satellites au-dessus des régions cibles, le délai de revisite d'un satellite au-dessus de ces mêmes régions et également le coût de la constellation, tout en respectant les contraintes de sécurité. Pour les modèles simples, certaines méthodes analytiques peuvent être utilisées pour optimiser la conception de la constellation [34, 50]. Pour les modèles et simulations complexes, la conception de l'architecture peut être traitée par différentes approches numériques, comme l'optimisation multidisciplinaire [15], les algorithmes génétiques [20] ou l'optimisation par essaim de particules [64]. Mais, ces techniques de type *black box* rendent difficile la compréhension de l'influence des paramètres sur les configurations résultantes. Pouvoir expliquer aux décideurs les différents composants, leur comportement et leurs interactions est un défi majeur, qui pourrait être permis par l'intégration de MABS aux mé-

thodes d'optimisation.

- *Simulation multi-agent*
- *Langages de programmation multi-agents*
- *Méthodes et méthodologies multi-agents*
- *Organisations, Normes, Coalitions*
- *Vérification et validation des systèmes multi-agents*

2.2 Allocation et partage de ressources

Lorsqu'une constellation EOS est utilisée par plusieurs parties prenantes, il peut être exigé que son exploitation soit équitable ou juste, *e.g.* en fonction de l'investissement financier de chaque utilisateur. Ce problème relève du domaine de l'*allocation de ressources multi-agents* (ou MARA) [19]. Pour les constellations EOS, les utilisateurs ou clients peuvent partager différents types de biens, tels que des orbites, qui peuvent être considérés comme des biens divisibles, et obtenir l'exclusivité sur les portions d'orbite qui leur sont attribuées. Dans ce cas, les utilisateurs disposent de leur propre centre de mission et peuvent exploiter les EOS sur les portions qui leur sont attribuées. Les utilisateurs peuvent également partager des EOS en demandant une observation d'une zone géographique. Dans ce cas, les demandes sont considérées comme des biens indivisibles et les demandes d'un utilisateur donné qui sont effectivement programmées sur la constellation peuvent être considérées comme le lot de cet utilisateur.

Le cas de la division équitable soulève plusieurs défis [13]. Premièrement, l'*équité (fairness)* est étroitement lié aux préférences des utilisateurs car il est nécessaire de comparer les lots qui peuvent être attribués à chaque utilisateur. Représenter les préférences de manière compacte tout en étant capable de raisonner efficacement sur celles-ci est un défi en lui-même (*e.g.* CP-net pour les préférences ordinales [12]). Dans le contexte des EOS, de nombreuses caractéristiques pourraient être utilisées pour définir l'utilité d'une requête, sa priorité, sa zone d'observation et l'incertitude sur la météo [60]. La plupart des formalismes de représentation des préférences supposent que l'utilité d'un ensemble est la somme des utilités des éléments de l'ensemble. Dans le domaine spatial, les utilités des requêtes d'observation peuvent ne pas être indépendantes les unes des autres ou peuvent être assez complexes (*e.g.* requêtes périodiques), et nécessitent d'aller *au-delà de l'additivité* et d'envisager des hypothèses plus réalistes.

En outre, il existe plusieurs concepts d'équité, et peu d'ouvrages tiennent compte de l'équité lors de la planification des activités des EOS. L'équité peut être définie comme proportionnelle à la contribution financière dans le financement de la constellation [36]. L'équité peut également être définie comme une équité *maxmin* [59, 32]. En outre, l'équité n'est généralement pas le seul critère à prendre en compte et un compromis entre plusieurs critères est souvent nécessaire (*e.g.* entre efficacité et équité). Plusieurs procédures caractérisant des allocations efficaces et équitables pour EOS ont été étudiées [36], et alternativement l'équité fait partie d'un critère bi-objectif [59]. Trouver des procédures, centralisées ou décentralisées, qui permettent d'obtenir une allocation optimale ou de bonne qualité est

un réel défi technique. Dans le cas d'EOS où les orbites sont partagées entre plusieurs utilisateurs, on pourrait par exemple envisager des mécanismes d'enchères [19, 8] : les utilisateurs soumettent leurs offres (*i.e.* rapporte leurs préférences) publiquement ou en privé, il peut y avoir un ou plusieurs tours et l'allocation est faite par un commissaire-priseur.

- Résolution collective de problèmes
- Théorie des jeux

3 Défis dans les opérations hors-ligne

En opération, les centres de mission calculent des plans hors ligne pour chaque EOS, à partir d'un carnet de commandes. Outre le positionnement des acquisitions, ces plans doivent également préciser quand télécharger le résultat de l'activité des EOS vers les stations au sol accessibles, afin de préserver la mémoire embarquée limitée. Ceci résulte en un ensemble de problèmes de large échelle difficiles à résoudre.

3.1 Planification des observations

Ces problèmes sont distribués par la nature, et donc partiellement ou totalement décomposables. Cela ouvre la porte aux techniques multi-agents pour la résolution des problèmes. Par exemple, les différents composants des systèmes peuvent être considérés comme faisant partie d'un marché pour trouver des accords, en utilisant un *Contract Net Protocol* étendu, afin de résoudre un problème de planification de missions multi-satellites [47]. Les techniques d'*optimisation distribuée sous contraintes* (ou DCOP) [41] peuvent également être des méthodes de résolution efficaces pour aborder des problèmes d'allocation des tâches d'observation et de communication, où les variables de décision et les contraintes sont réparties sur un ensemble d'agents. Par exemple, la recherche distribuée à grand voisinage (*Distributed Large Neighborhood Search*) [25] pourrait être appliquée à la planification multi-satellites, comme c'est le cas avec son homologue centralisé [28]. L'ajout de la distribution permettrait d'améliorer l'explicabilité (en identifiant les lieux où des conflits sérieux apparaissent), l'accélération (en divisant le processus de recherche en plusieurs sous-processus simultanés) et la confidentialité (dans le cas où certaines tâches sont secrètes). Cependant, l'extensibilité des méthodes de résolution DCOP et la présence de variables de décision à nombres entiers et mixtes sont des défis à relever, comme l'ont récemment montré des études sur les DCOP à variables continues [30].

Plus généralement encore, les problèmes d'ordonnancement des constellations peuvent être modélisés comme des problèmes multi-objectifs (*e.g.* minimisant la consommation d'énergie tout en maximisant les observations réussies) [7, 39, 38, 59, 67] et asymétriques (*e.g.* les utilisateurs peuvent ne pas avoir la même récompense si une certaine observation est effectuée), qui sont encore des modèles pour lesquels l'efficacité des méthodes de résolution distribuées reste à démontrer [21, 27]. Enfin, comme ces problèmes de planification sont à très grande échelle, les approches distri-

buées *heuristiques et par auto-organisation* basées sur des plans auto-adaptatifs pourraient fournir à tout moment des solutions *anytime* de manière rapide et réactive [11]. Cependant, ces techniques ne fournissent pas (encore) de garanties de qualité, qui sont pourtant des conditions préalables importantes à l'adoption de telles outils par les acteurs aérospatiaux.

- Coordination, Travail en équipe, Planification
- Négociation multi-agent, consensus
- Résolution collective de problèmes

3.2 Planification sous incertitudes

Les systèmes EOS sont soumis à deux principaux types d'incertitudes. Premièrement, certains nuages peuvent être présents lors d'une observation. Si la fraction de couverture nuageuse de l'observation est supérieure à la fraction de couverture nuageuse maximale associée à la requête, l'observation n'est pas valide. De plus, comme le plan est calculé un certain temps avant que l'acquisition ne soit effectivement effectuée, cette incertitude est irréductible. Par exemple, l'espérance de la valeur absolue de la différence entre les fractions de couverture nuageuse prévues et réelles augmente avec l'horizon de prévision atteignant 0,4 pour un horizon d'une heure [69]. Étant donné que les fractions se situent entre 0 et 1, cette valeur reflète une grande incertitude. Ainsi, il existe une incertitude non négligeable concernant le succès de chaque observation prévue.

Deuxièmement, les observations sont stockées dans la mémoire des satellites sous une forme comprimée et le taux de compression est spécifique à chaque observation et n'est pas connu à l'avance. Par exemple, des taux de compression variant de 3 à 6 sont observés sur un petit ensemble d'images [68]. Il existe donc une incertitude sur la quantité de mémoire occupée par chaque observation avant son téléchargement vers une station au sol et sur le temps de téléchargement de chaque observation. En outre, les temps de téléchargement sont également influencés par la variabilité du débit binaire et la récupération après des erreurs de transmission.

Le premier type d'incertitude est directement lié à la récompense, tandis que le second est une caractéristique de la transition d'état.

La *planification multi-agent sous incertitudes* [55] et plus spécifiquement les *processus de décision de Markov décentralisés et partiellement observables* (DEC-POMDP) [6] peut être pertinents dans ce contexte. Néanmoins, les algorithmes fournissant des solutions DEC-POMDP ne passent pas à l'échelle et le défi consiste à concevoir des solutions plus simples. En compléments des approches basées sur des processus de Markov, des techniques d'optimisation distribuée traitant des incertitudes ont récemment conduit au développement des *DCOP probabilistes*. Ces techniques étendent les DCOP classiques en augmentant le résultat des fonctions de coût avec des propriétés stochastiques [4, 56, 46] ou en introduisent des variables aléatoires comme entrée des fonctions de coût, pour simuler des propriétés exogènes incontrôlables de l'environnement, et ainsi optimiser le résultat attendu en moyenne [35, 65]. Toute-

fois, il est également important de noter que la prévision des mesures d'incertitude associées au succès des observations pose un problème en termes de portée du système multi-agent étudié (si l'agent prédicteur est à l'intérieur ou à l'extérieur du système), et en termes de type de mesure d'incertitude, car en effet presque toutes les techniques de planification des satellites sont basées sur des probabilités alors qu'une meilleure robustesse pourrait être obtenue en utilisant des probabilités imprécises ou la *théorie des possibilités* [24]. Enfin, la définition d'une récompense déterministe qui prend en compte des demandes de différents types et priorités et qui peut facilement être combinée à la mesure d'incertitude choisie est un problème en soi.

- *Coordination, Travail en équipe, Planification*
- *Environnement (modélisation)*
- *Résolution collective de problèmes*

3.3 Déconfliction des requêtes utilisateurs

Les constellations de satellites impliquent de nombreux acteurs, comme les propriétaires de satellites, les opérateurs de satellites, les clients de services demandant des observations, les agences gouvernementales ou les opérateurs militaires. Le partage des ressources de la constellation entre des agents ayant des objectifs et des programmes différents implique que certains conflits peuvent survenir, qui ne peuvent être résolus de manière centralisée afin de garantir l'autonomie de décision et la préservation de la confidentialité. Ce dernier point est crucial : les EOS peuvent être utilisés à des fins de défense et de sécurité et la plupart des acteurs ne veulent pas que les autres soient informés de la façon dont ils utilisent les satellites. Par exemple, un opérateur d'un pays peut permettre à un client d'un autre pays d'utiliser son satellite pour effectuer une observation, mais ne peut pas permettre de capturer une image de son propre pays ou de savoir quelles sont les observations prévues avant et après l'observation demandée. Cela signifie que les différents utilisateurs doivent résoudre un problème dont les sous-composantes (variables de décision, contraintes ou paramètres) sont propres et privées. Les *techniques d'optimisation distribuées* comme les DCOP peuvent être considérées à nouveau, lorsque les utilisateurs visent un objectif commun (*par exemple* maximiser le nombre d'observations planifiées) [53]. En cas d'objectifs plus divergents, il est également intéressant d'envisager les approches par *optimisation de consensus* où les utilisateurs établissent des accords sur certaines variables de décision partagées [45, 44, 14]. Là encore, la présence conjointe de variables de décision discrètes et continues rend l'application de telles techniques encore plus difficile [58]. Dans des contextes plus conflictuels et non coopératifs, la *théorie des jeux* peut fournir des schémas de coordination pour résoudre ces situations conflictuelles, comme le propose un travail récent [57], ou pour concevoir des places de marché [22].

- *Coordination, Travail en équipe, Planification*
- *Négociation multi-agent, consensus*
- *Résolution collective de problèmes*

➤ *Théorie des jeux*

4 Défis dans les opérations en ligne

Les constellations EOS sont des systèmes dynamiques déployés dans des environnements également dynamiques. La planification hors ligne ne suffit pas pour assurer un fonctionnement pleinement efficace, lorsque les conditions météorologiques peuvent dégrader la qualité des images ou lorsque des requêtes de dernière minute arrivent. L'autonomie à bord est une dimension à prendre en compte pour doter les satellites de certaines routines d'adaptation à la volée en réponse à des événements imprévus.

4.1 Dynamique et replanification

Comme l'acquisition d'images peut échouer en raison de la présence de nuages, ou parce qu'une requête de dernière minute peut se produire, il est très important de pouvoir reprogrammer certaines observations. La reprogrammation peut être envisagée au sol ou à bord. La réparation du plan au sol est déclenchée une fois que les EOS ont téléchargé les données et que leur mauvaise qualité est identifiée par les centres de validation, qui peuvent alors demander une reprogrammation. Ici, les techniques classiques de réparation centralisée de plans peuvent être envisagées pour ajouter des tâches de manière dynamique, mais elles doivent être suffisamment rapides pour que le plan révisé soit poussé dès que possible vers le prochain EOS capable d'exécuter la tâche. Cette réparation doit être fournie de manière aussi réactive que possible par rapport à la construction d'un plan complet. Dans l'optique d'une prise de décision partiellement ou totalement embarquée, des techniques multi-agents existent pour faire face aux problèmes dynamiques, comme dans les *problèmes dynamique d'optimisation distribuée sous contraintes* (DynDCOP), où les agents coopèrent pour optimiser une série de problèmes au lieu d'optimiser une seule instance à un moment donné [29], ou pour pouvoir résoudre des problèmes qui changent au moment de l'exécution [49]. On peut également envisager, des techniques de *réparation de plans multi-agents* comme celles de la réparation embarquée [33], qui n'envisagent de modifier qu'une partie du plan pour les agents impactés au lieu de tout replanifier. Cependant, tout en fournissant des plans de bonne qualité, ces techniques souffrent encore d'une évolutivité limitée et nécessitent des communications fiables. Dans notre cas, la communication peut ne pas être persistante (*e.g.* les stations au sol ne sont pas accessibles à tout moment ou les satellites peuvent ne pas être en mesure d'interagir directement ou indirectement) [32]. Un schéma d'apprentissage distribué pour réparer les plans multi-satellites est proposé, en remarquant que les informations historiques de planification des tâches coopératives auront un impact sur les résultats de la dernière planification [62]. Une autre famille de techniques candidates sont celles qui s'appuient sur la détermination de *consensus* [40, 26], où les agents négocient pour s'entendre sur certaines variables de décision (*par exemple* le choix des tâches à effectuer) tout en étant *résilient* aux perturbations de l'environnement et à l'asynchronicité [23, 49]. En outre, les EOS

ont une capacité de calcul limitée, ce qui limite la gamme des techniques d'optimisation pouvant être réalisées à bord. Ainsi, les techniques d'auto-organisation, ne reposant que sur une communication limitée et nécessitant des calculs limités, semblent être de bons candidats pour assurer l'adaptation des plans en cours d'exécution [11, 49, 32]. Bien que n'étant pas garantis de fournir des solutions optimales, ces techniques pourraient arbitrer entre les requêtes sur la base de critères simples (priorité) et pourraient transférer les demandes d'EOS à EOS. Cependant, pousser une telle autonomie et une telle décision à bord reste un véritable défi, qui nécessite encore de gros efforts de recherche en matière d'intelligence artificielle et de robotique pour être certifiée puis intégrée dans les systèmes opérationnels.

- *Commande et contrôle de système multi-agent*
- *Déploiement de SMA, Résistance aux pannes, Fiabilité*
- *Émergence, Auto-organisation, Viabilité*
- *Évolution, Adaptation*
- *Robotique collective*

4.2 Interactions et protocoles

Lorsqu'il s'agit d'opérations en ligne, l'examen des possibilités de communication est un point essentiel pour améliorer les performances du système. Pour les constellations EOS, les communications directes sont évidemment utilisées entre un centre de mission et les satellites, mais de nombreux autres types de communications peuvent également être utilisés, comme les communications directes entre deux satellites par une liaison intersatellite, les communications directes entre deux centres de mission gérant différentes parties de la constellation, les communications indirectes via des satellites relais géostationnaires ou des drones, et plus généralement les communications indirectes par un réseau de liaisons de communication. L'examen de tous ces liens de communication potentiels pour les futures constellations soulève de nombreux défis pour les opérations en ligne, tels que « quel protocole de communication doit être utilisé », « quand communiquer », « quelles données communiquer et à qui », ou « quelle est la valeur d'une information », pour n'en citer que quelques-unes. Certaines propositions ont déjà été faites pour répondre à ces questions. Par exemple, les *Delay Tolerant Networks* (DTN) peuvent être envisagés pour construire un système dans lequel un satellite donné peut avertir les autres satellites des positions terrestres où un phénomène particulier a été détecté [42]. Alternativement, chaque satellite peut maintenir une estimation de la connaissance des autres satellites en utilisant un protocole de communication épidémique entre satellites [10]. Enfin, la communication directe peut être utilisée pour la négociation et la coordination entre les agents des engins spatiaux [51, 2] et également pour acheminer les données d'observation d'un satellite à une station de réception au sol par le biais de liaisons intersatellites, de manière à réduire le temps pendant lequel les utilisateurs peuvent obtenir leurs images [16]. Ces quelques exemples montrent que les communications peuvent être utilisées à la fois pour des raisons épistémiques (apporter une information qui peut aider à prendre de meilleures dé-

cisions ou à mettre en œuvre un protocole de coordination) et pour des raisons de performance (communiquer des données d'observation et obtenir une récompense immédiate des utilisateurs), un objectif commun étant d'obtenir soit une meilleure réactivité soit un meilleur partage des tâches entre les agents.

- *Interaction, Communication, Protocoles*
- *Robotique collective*

5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons identifié plusieurs défis ouverts concernant les constellations de satellites d'observation de la Terre et leurs applications, adressés à la communauté multi-agent. En effet, la conception, le déploiement et l'exploitation de tels systèmes composés de plusieurs acteurs et ressources conviennent parfaitement au paradigme multi-agent. Toutefois, la difficulté et la nouveauté de ces problèmes constituent toujours un défi pour les méthodes existantes, ce qui ouvre de nouvelles pistes de recherche pour les années à venir, en particulier dans les domaines d'intérêt identifiés par la communauté multi-agent, allant de l'ingénierie des systèmes multi-agents à la robotique en passant par la représentation des connaissances, le raisonnement et la planification.

Références

- [1] E. Andrejczuk, J. A. Rodriguez-Aguilar, and C. Sierra. A Concise Review on Multiagent Teams : Contributions and Research Opportunities. In Natalia Criado Pacheco, Carlos Carrascosa, Nardine Osman, and Vicente Julián Inglada, editors, *Multi-Agent Systems and Agreement Technologies*, pages 31–39, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [2] C. Araguz, A. Alvaro, I. del Portillo, K. Root, E. Alarcón, and E. Bou-Balust. On autonomous software architectures for distributed spacecraft : A local-global policy. In *2015 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–9, 2015.
- [3] C. Araguz, E. Bou-Balust, and E. Alarcón. Applying autonomy to distributed satellite systems : Trends, challenges, and future prospects. *Systems Engineering*, 21(16) :401–416, 03 2018.
- [4] J. Atlas and K. Decker. Coordination for uncertain outcomes using distributed neighbor exchange. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '10, page 1047–1054, Richland, SC, 2010. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [5] G. Bastianelli, D. Salamon, A. Schisano, and A. Iacobacci. Agent-based simulation of collaborative unmanned satellite vehicles. In *2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)*, pages 1–6, Rome, 2012. IEEE.
- [6] D.S. Bernstein, R. Givan, N. Immerman, and S. Zilberstein. The complexity of decentralized control of

- markov decision processes. *Mathematics of operations research*, 27(4) :819–840, 2002.
- [7] N. Bianchessi, J.-F. Cordeau, J. Desrosiers, G. Laporte, and V. Raymond. A heuristic for the multi-satellite, multi-orbit and multi-user management of earth observation satellites. *European Journal of Operational Research*, 177(2) :750 – 762, 2007.
- [8] L. Blumrosen and N. Nisan. Combinatorial auctions. *Algorithmic game theory*, 267 :300, 2007.
- [9] O. Boissier, R.H. Bordini, J.F. Hübner, A. Ricci, and A. Santi. Multi-agent oriented programming with jacamo. *Science of Computer Programming*, 78(6) :747 – 761, 2013.
- [10] G. Bonnet and C. Tessier. Collaboration among a satellite swarm. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2007.
- [11] J. Bonnet, M.-P. Gleizes, E. Kaddoum, S. Rainjonneau, and G. Flandin. Multi-satellite mission planning using a self-adaptive multi-agent system. In *2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, pages 11–20, Boston, 2015. IEEE.
- [12] C. Boutilier, R. I. Brafman, C. Domshlak, H. H. Hoos, and D. Poole. Cp-nets : A tool for representing and reasoning with conditional ceteris paribus preference statements. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 21 :135–191, Feb 2004.
- [13] S. Bouveret, Y. Chevaleyre, and N. Maudet. Fair allocation of indivisible goods. In *Handbook of Computational Social Choice*, pages 284–310, Cambridge, UK, 2016. Cambridge University Press.
- [14] S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, and J. Eckstein. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Found. Trends Mach. Learn.*, 3(1) :1–122, January 2011.
- [15] I. A. Budianto and J. R. Olds. Design and deployment of a satellite constellation using collaborative optimization. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 41(6) :956–963, 2004.
- [16] K.L. Cahoy and A.K. Kennedy. Initial Results from ACCESS : An Autonomous CubeSat Constellation Scheduling System for Earth Observation. In *31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2017.
- [17] B. Camus, T. Paris, J. Vaubourg, Y. Presse, C. Bourjot, L. Ciarletta, and V. Chevrier. Co-simulation of cyber-physical systems using a devs wrapping strategy in the mecsyco middleware. *SIMULATION*, 94(12) :1099–1127, 2018.
- [18] H. Chen, S. Yang, J. Li, and N. Jing. Exact and Heuristic Methods for Observing Task-Oriented Satellite Cluster Agent Team Formation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 :1–23, August 2018.
- [19] Y. Chevaleyre, P.E. Dunne, U. Endriss, J. Lang, M. Lemaître, N. Maudet, J.A. Padget, S. Phelps, J.A. Rodríguez-Aguilar, and P. Sousa. Issues in multiagent resource allocation. *Informatica (Slovenia)*, 30(1) :3–31, 2006.
- [20] C. Dai, G. Zheng, and Q. Chen. Satellite constellation design with multi-objective genetic algorithm for regional terrestrial satellite network. *China Communications*, 15(8) :1–10, 2018.
- [21] F. M. Delle Fave, R. Stranders, A. Rogers, and N. R. Jennings. Bounded decentralised coordination over multiple objectives. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS ’11*, page 371–378, Richland, SC, 2011. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [22] G. Denis, A. Claverie, X. Pasco, J.-P. Darnis, B. de Maupeou, M. Lafaye, and E. Morel. Towards disruptions in earth observation ? new earth observation systems and markets evolution : Possible scenarios and impacts. *Acta Astronautica*, 137 :415 – 433, 2017.
- [23] S.M. Dibaji and H. Ishii. Resilient multi-agent consensus with asynchrony and delayed information. *IFAC-PapersOnLine*, 48(22) :28 – 33, 2015. 5th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems NecSys 2015.
- [24] D. Dubois and H. Prade. Possibilistic logic — an overview. In Jörg H. Siekmann, editor, *Computational Logic*, volume 9 of *Handbook of the History of Logic*, pages 283 – 342. North-Holland, Amsterdam, Holland, 2014.
- [25] F. Fioretto, F. Campeotto, A. Dovier, E. Pontelli, and W. Yeoh. Large neighborhood search with quality guarantees for distributed constraint optimization problems. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS ’15*, page 1835–1836, Richland, SC, 2015. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [26] P. Franceschelli and P. Frasca. Proportional dynamic consensus in open multi-agent systems. In *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 900–905, Miami Beach, FL, USA, 2018. IEEE.
- [27] T. Grinshpoun, A. Grubshtein, R. Zivan, A. Netzer, and A. Meisels. Asymmetric distributed constraint optimization problems. *J. Artif. Int. Res.*, 47(1) :613–647, May 2013.
- [28] L. He, L. Xiaolu, G. Laporte, Y.-W. Chen, and Y. Chen. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling. *Computers and Operations Research*, 100 :12–25, 07 2018.
- [29] K. D. Hoang, F. Fioretto, P. Hou, M. Yokoo, W. Yeoh, and R. Zivan. Proactive dynamic distributed constraint optimization. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS ’16*, page 597–605, Richland, SC, 2016. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

- [30] K. D. Hoang, W. Yeoh, M. Yokoo, and Z. Rabinovich. New algorithms for continuous distributed constraint optimization problems. In *International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, AAMAS '20*, page 502–510, Richland, SC, 2020. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [31] Hongwei Xia, Guangcheng Ma, Weinan Xie, and Bao-min Feng. Multiple satellite formation based on multi-agent. In *2006 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pages 4 pp.–705, Harbin, China, 2006. IEEE.
- [32] M. Johnston. Scheduling nasa’s deep space network : Priorities, preferences, and optimization. 2020.
- [33] A. Komenda, P. Novák, and M. Pěchouček. Domain-independent multi-agent plan repair. *Journal of Network and Computer Applications*, 37 :76 – 88, 2014.
- [34] C. L. Korb and A.R. Korb. Methods for optimizing the performance, cost and constellation design of satellites for full and partial earth coverage, May 26 2020. US Patent 10,664,782.
- [35] T. Léauté and B. Faltings. Distributed constraint optimization under stochastic uncertainty. In *Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI’11*, page 68–73. AAAI Press, 2011.
- [36] M. Lemaître, G. Verfaillie, H. Fargier, J. Lang, N. Bataille, and J.-M. Lachiver. Equitable allocation of earth observing satellites resources. In *5th ONERA-DLR Aerospace Symposium (ODAS’03)*, 2003.
- [37] M. Lemaître, G. Verfaillie, F. Jouhaud, J.-M. Lachiver, and N. Bataille. Selecting and scheduling observations of agile satellites. *Aerospace Science and Technology*, 6(5) :367 – 381, 2002.
- [38] L. Li, H. Chen, J. Li, N. Jing, and M. Emmerich. Preference-Based Evolutionary Many-Objective Optimization for Agile Satellite Mission Planning. *IEEE Access*, 6 :40963–40978, 2018. Conference Name : IEEE Access.
- [39] L. Li, F. Yao, N. Jing, and M. Emmerich. Preference incorporation to solve multi-objective mission planning of agile earth observation satellites. In *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2017*, pages 1366–1373. IEEE, 2017.
- [40] Z. Li, Z. Duan, and F. L. Lewis. Distributed robust consensus control of multi-agent systems with heterogeneous matching uncertainties. *Automatica*, 50(3) :883 – 889, 2014.
- [41] P.J. Modi, W.-M. Shen, M. Tambe, and M. Yokoo. Adopt : Asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees. *Artif. Intell.*, 161(1–2) :149–180, January 2005.
- [42] S. Nag, A. Li, V. Ravindra, M. Sanchez Net, K.-M. Cheung, R. Lammers, and B. Bledsoe. Autonomous Scheduling of Agile Spacecraft Constellations with Delay Tolerant Networking for Reactive Imaging. In *International Conference on Automated Planning and Scheduling SPARK Workshop*, 2019.
- [43] K. Ndiaye, F. Balbo, J.-P. Jamont, and M. Occello. Simulation coupling limitations with respect to shared entities constraints. In *8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 338–346. INSTICC, SciTePress, 2018.
- [44] A. Nedić, A. Olshevsky, and Wei Shi. *Decentralized Consensus Optimization and Resource Allocation*, pages 247–287. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [45] A. Nedić, A. Ozdaglar, and P. A. Parrilo. Constrained consensus and optimization in multi-agent networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(4) :922–938, 2010.
- [46] D. T. Nguyen, W. Yeoh, and H.C. Lau. Stochastic dominance in stochastic dcops for risk-sensitive applications. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS ’12*, page 257–264, Richland, SC, 2012. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [47] Peng Feng, Hao Chen, Shuang Peng, Luo Chen, and Longmei Li. A method of distributed multi-satellite mission scheduling based on improved contract net protocol. In *2015 11th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, pages 1062–1068, Zhangjiajie, China, 2015. IEEE.
- [48] Claudius Ptolemaeus, editor. *System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II*. Ptolemy.org, Berkeley, California, USA, 2014.
- [49] P. Rust, G. Picard, and F. Ramparany. Resilient distributed constraint optimization in physical multi-agent systems. In *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, pages 195 – 202, Amsterdam, Holland, 2020. IOS Press.
- [50] T. Savitri, Y. Kim, S. Jo, and H. Bang. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017 :1235692, May 2017.
- [51] T. Schetter, M. Campbell, and D. Surka. Multiple agent-based autonomy for satellite constellations. *Artificial Intelligence*, 145(1) :147 – 180, 2003.
- [52] V. Shah, V. Vittaldev, L. Stepan, and C. Foster. Scheduling the world’s largest earth-observing fleet of medium-resolution imaging satellites. *IWPSS*, 2019.
- [53] P. K. Sinha and A. Dutta. Multi-satellite task allocation algorithm for earth observation. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 403–408, New York, New York, US, 2016. IEEE.
- [54] A.H. Sánchez, T. Soares, and A. Wolahan. Reliability aspects of mega-constellation satellites and their impact on the space debris environment. In *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pages 1–5, 2017.

- [55] M. T. J. Spaan and F. S. Melo. Interaction-driven markov games for decentralized multiagent planning under uncertainty. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS '08*, page 525–532, Richland, SC, 2008. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [56] R. Stranders, F.M. Delle Fave, A. Rogers, and N.R. Jennings. U-gdl : A decentralised algorithm for dcops with uncertainty. Project report, May 2011.
- [57] C. Sun, X. Wang, and X. Liu. Distributed satellite mission planning via learning in games. In *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pages 4381–4386, New York, New York, US, 2018. IEEE.
- [58] R. Takapoui, N. Moehle, S. Boyd, and A. Bemporad. A simple effective heuristic for embedded mixed-integer quadratic programming. *International Journal of Control*, 93(1) :2–12, 2020.
- [59] P. Tangpattanakul, N. Jozefowicz, and P. Lopez. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite. *European Journal of Operational Research*, 245(2) :542–554, September 2015.
- [60] A.E. Vasegaard, M. Picard, F. Hennart, P. Nielsen, and S. Saha. Multi criteria decision making for the multi-satellite image acquisition scheduling problem. *Sensors*, 20(5) :1242, 2020.
- [61] J.G. Walker. Satellite Constellations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 37 :559, December 1984.
- [62] C. Wang, J. Li, N. Jing, J. Wang, and H. Chen. A distributed cooperative dynamic task planning algorithm for multiple satellites based on multi-agent hybrid learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24(4) :493 – 505, 2011.
- [63] X. Wang, G. Wu, L. Xing, and W. Pedrycz. Agile earth observation satellite scheduling over 20 years : formulations, methods and future directions. *CoRR*, abs/2003.06169, 2020.
- [64] X. Wang, H. Zhang, S. Bai, and Y. Yue. Design of agile satellite constellation based on hybrid-resampling particle swarm optimization method. *Acta Astronautica*, 178 :595 – 605, 2021.
- [65] Y. Wang, K. Sycara, and P. Scerri. Towards an understanding of the value of cooperation in uncertain world. In *2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, WI-IAT '11*, page 212–215, USA, 2011. IEEE Computer Society.
- [66] M. Winikoff and L. Padgham. *Agent Oriented Software Engineering*, chapter 13, pages 695–757. MIT Press, 01 2013.
- [67] W. Yang, Y. Chen, R. He, Z. Chang, and Y. Chen. The Bi-objective Active-Scan Agile Earth Observation Satellite Scheduling Problem : Modeling and Solution Approach. In *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1–6, July 2018.
- [68] G. Yu, T. Vladimirova, and M.N. Sweeting. Image compression systems on board satellites. *Acta Astronautica*, 64(9-10) :988–1005, 2009.
- [69] I. Yucel, J. W. Shuttleworth, X Gao, and S Sorooshian. Short-term performance of mm5 with cloud-cover assimilation from satellite observations. *Monthly weather review*, 131(8) :1797–1810, 2003.
- [70] C. Zhang, Y. Wang, and Y. Zhao. Agent-based distributed simulation technology of satellite formation flying. In *Proceedings of the 2013 Fourth World Congress on Software Engineering, WCSE '13*, page 13–16, USA, 2013. IEEE Computer Society.