

# Dépasser l'observation mono-mission de la Terre : utiliser le paradigme multi-agents pour fédérer de multiples missions

Jean-Loup Farges<sup>1</sup>, Filippo Perotto<sup>1</sup>, Gauthier Picard<sup>1</sup>, Cédric Pralet<sup>1</sup>,  
Cyrille de Lussy<sup>2</sup>, Jonathan Guerra<sup>2</sup>, Philippe Pavero<sup>2</sup>, Fabrice Planchou<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DTIS, ONERA, Université de Toulouse, France  
first.last@onera.fr

<sup>2</sup> Airbus Defence and Space, Toulouse, France  
first.last@airbus.com

## Résumé

*Nous envisageons ici une couche de fédération multi-agents pour coordonner des systèmes composés de multiples missions d'observation de la Terre indépendantes. L'objectif de cette fédération est de permettre aux clients qui demandent des acquisitions de grandes zones d'accéder facilement à plusieurs constellations de satellites et de sites de communication pour composer et télécharger leurs acquisitions, en un temps réduit par rapport aux demandes conventionnelles non coordonnées. Nous identifions plusieurs pistes et défis scientifiques liés aux approches multi-agents, telles que la coordination, la planification et l'apprentissage, pour mettre en œuvre deux fonctionnalités clés de la fédération : (i) la détermination de la faisabilité et la répartition de la charge sur des missions multiples pour la couverture de grandes zones, et (ii) la réservation de stations de communication.*

## Mots-clés

*Satellites d'observation de la Terre, fédération de missions, couverture de grandes zones, réservation de stations de communications.*

## Abstract

*We envision a multi-agent federation layer to coordinate systems composed of independent Earth observation missions. The goal of this federation is to allow clients requesting acquisitions of large areas to easily access several constellations of satellites and communication sites to compose and download their acquisitions, in a reduced time compared to conventional uncoordinated requests. We identify several scientific tracks and challenges related to agent-based approaches such as coordination, planning and learning, to implement to two key federation functions : (i) multi-mission coverage feasibility and dispatching and (ii) communication site booking.*

## Keywords

*Earth observation satellites, mission federation, large area coverage, communication booking.*

## 1 Introduction

Le marché de l'*observation de la Terre*, en Anglais *Earth Observation* (EO), exige des systèmes satellitaires plus rapides et plus efficaces pour répondre aux besoins croissants de réactivité, de revisite et de capacités multi-missions<sup>1</sup> [10]. Les applications telles que la surveillance des frontières, la surveillance maritime et les interventions en cas de catastrophes nécessitent une programmation rapide des satellites afin de fournir des images en temps voulu. En outre, les utilisateurs recherchent des solutions évolutives et rentables pour soutenir leurs efforts en matière de durabilité environnementale et agricole. Pour répondre à ces exigences, les nouveaux systèmes EO sont équipés d'instruments et de satellites avancés, permettant des acquisitions haute résolution, de grandes capacités de stockage et d'acquisition rapide d'images sur plusieurs sites ; ce qui induit une amélioration significative de la performance.

Cependant, les utilisateurs et les opérateurs de satellites exigent des systèmes plus réactifs et plus souples. Les systèmes EO traditionnels, souvent constitués d'un ou deux satellites seulement, ne disposent pas de capacités de revisite et de réactivité suffisantes pour fournir des images dans les délais. Les utilisateurs ont besoin d'accéder à de multiples moyens d'acquisition, y compris à d'autres satellites, instruments, et même à des missions non dédiées à l'EO, pour répondre efficacement à leurs besoins. Dans cet article, nous nous concentrons particulièrement sur la chaîne amont du segment sol, qui comprend le contrôle du satellite, la programmation de la mission et la validation des images, qui sont spécifiques aux missions et étroitement intégrés aux systèmes satellitaires. Cette approche cloisonnée (voir Figure 1) est optimisée pour les missions individuelles et devient problématique lorsqu'il s'agit de gérer plusieurs systèmes d'observation de la Terre. Le manque d'interopérabilité entre ces systèmes empêche une utilisation efficace de leur capacité globale.

Pour répondre au besoin pressant d'une solution unifiée per-

---

1. Une *mission* consiste généralement en un seul satellite ou une constellation de satellites gérés par un seul opérateur et un ensemble de moyens de communication pour les liaisons de données montante et descendante.

mettant un accès transparent aux différents systèmes d'information, le projet DOMINO-E [9] vise à développer une couche de fédération (voir Figure 2) qui permet aux opérateurs de missions EO de coordonner et de hiérarchiser leurs besoins en imagerie à travers différents systèmes, en utilisant le paradigme multi-agents. Alors que les systèmes multi-agents ont déjà été identifiés comme une approche pertinente pour les constellations EO [18], cet article propose une nouvelle vision pour orchestrer des constellations multiples. La conception modulaire, flexible et résiliente de l'architecture proposée devrait permettre l'intégration de services supplémentaires pertinents sans compromettre les performances du système.

Nous nous intéressons en particulier aux défis liés à deux services clés pour les opérations multi-missions :

- *Faisabilité de la couverture et répartition sur de multiples missions* (Section 2) : en cas de couverture d'une surface importante à effectuer dans une période donnée, une seule mission ne suffit souvent pas pour accomplir la tâche dans les délais et avec la qualité requise. Nous proposons donc un système multi-agents qui permet une sélection dynamique entre plusieurs systèmes de satellites pour la couverture.
- *Réservation de communication multi-mission* (Section 3) : Les systèmes terrestres s'appuient actuellement sur des antennes dédiées pour le contrôle des satellites, le transfert de données et le téléchargement d'images. Le choix des antennes est généralement fixe pendant toute la durée de vie du système. Nous proposons un système dynamique de réservation d'antennes, qui s'appuie sur le segment terrestre en tant que service (*Ground Segment as a Service*, ou GSaaS), afin de garantir une capacité adéquate de liaison montante de plans et descendante de données et d'optimiser les coûts.

Les solutions centralisées risquent de ne pas fonctionner pour mettre en œuvre ces services complexes, car les informations clés sont dispersées. Nous devons donc mettre en place une coopération entre les composants et les parties prenantes, en suggérant que les techniques de planification multi-agents, d'allocation des ressources, d'enchères et d'apprentissage seront cruciales pour son développement.

## 2 Fédération de l'observation

Cette section aborde le problème de décision suivant : "Comment diviser une grande zone et attribuer ces subdivisions à différentes missions afin de minimiser le temps d'acquisition et de maximiser la qualité des images, même si nous ne connaissons pas la charge de travail future des missions ?" Cette décision doit être prise à chaque fois qu'une nouvelle demande est reçue ou qu'une mission met à jour ses dates d'acquisition.

### 2.1 Composition du système

Le problème étudié concerne un ensemble de  $K$  utilisateurs finaux, appelés *clients*, qui demandent des images sur de

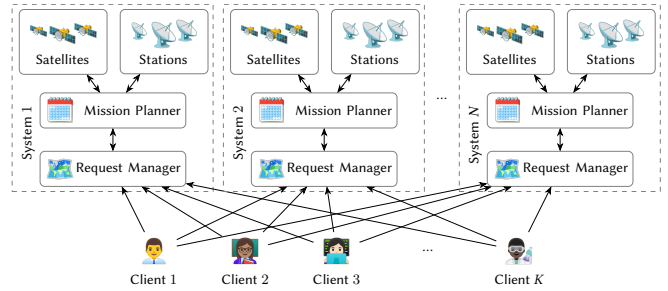


FIGURE 1 – L'architecture conventionnelle est verticale et les utilisateurs doivent interroger et envoyer des demandes à chaque système séparément.

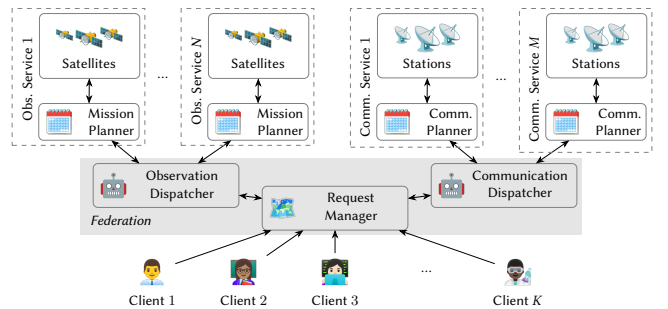


FIGURE 2 – L'architecture DOMINO-E appelle différents systèmes en tant que services, optimisant les demandes combinées de plusieurs clients vers plusieurs systèmes de manière transparente.

grandes zones de la surface de la Terre. Il implique également un ensemble de  $N$  agents d'observation indépendants, appelés *missions*, développés au fil des ans pour répondre à des besoins d'observation spécifiques. Fondamentalement, chaque mission dispose d'un ensemble de satellites en orbite basse capables de collecter des images sur des mailles élémentaires, où chaque maille couvre généralement quelques dizaines de kilomètres carrés, et chaque mission dispose de son propre *planificateur* pour déterminer les activités de ses satellites en fonction des demandes d'observation qu'elle reçoit.

L'objectif global est alors de réaliser les observations demandées par les  $K$  clients en utilisant les  $N$  missions d'observation disponibles. Pour ce faire, l'approche conventionnelle consiste à ce que chaque client envoie ses demandes d'observation directement à la mission de son choix (voir Figure 1). Pour aller au-delà de ce paradigme, la *couche de fédération* recevra les demandes d'observation des clients, enverra des tâches d'observation aux missions, récupérera les données d'observation et livrera les images aux clients (voir Figure 2). Ainsi, chaque client bénéficie d'un accès transparent à de nombreuses ressources satellitaires sans avoir à se soucier des détails. En outre, la couche de fédération peut exploiter au mieux les ressources disponibles pour accélérer considérablement l'observation d'une grande zone en la divisant en plusieurs sous-zones qui peuvent être observées en parallèle par des missions distinctes, et fusionner les demandes d'observation sur des

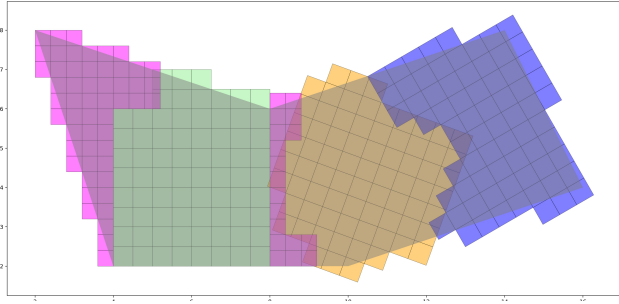


FIGURE 3 – Couverture multi-missions d’une grande zone (en gris) à l’aide de mailles de quatre missions différentes (une couleur par mission).

zones qui se chevauchent pour réduire la charge globale.

## 2.2 Décisions et problèmes multi-agents

Pour définir la couche de fédération, une première étape consiste à définir comment les différents agents interagissent. Une première approche consisterait à concevoir une architecture mettant en œuvre une *négociation multi-agents* [12], où la couche de fédération enverrait des requêtes aux missions tandis que ces dernières accepteraient ou non de faire des observations sur certaines sous-zones. Ensuite, chaque sous-zone serait effectivement attribuée à une mission spécifique. Cependant, un tel schéma de négociation n’est pas totalement compatible avec la présence de clients qui attendent des images, en particulier si le temps de réponse d’une mission est élevé pendant la phase de négociation. En effet, l’évaluation de l’impact de l’inclusion d’une nouvelle observation dans le programme d’une mission est un calcul coûteux, ou peut nécessiter un modèle de substitution efficace [22].

Pour limiter le nombre d’interactions entre les agents, une alternative pourrait consister à mettre en œuvre des *enchères combinatoires* [7], comprenant une première phase où la couche fédération demande aux missions de faire des offres sur les sous-zones d’observation possibles, et une seconde phase où les tâches d’observation sont réparties en fonction des offres reçues. Mais une telle approche nécessiterait le développement d’un système d’enchères pour chaque mission, ce qui peut s’avérer délicat et coûteux.

C’est pourquoi nous envisageons une architecture dans laquelle la couche de fédération saute l’étape de l’appel d’offres et attribue directement les tâches d’observation sur la base de sa connaissance actuelle de la capacité et de la charge de chaque mission. Dans ce cas, la communication avec les missions individuelles est minimale, mais la définition de la couche de fédération envisagée soulève plusieurs défis détaillés ci-après.

## 2.3 Défis pour la couche de fédération

### 2.3.1 Problèmes fortement combinatoires

Pour prendre des décisions de répartition, la couche de fédération doit s’attaquer à un problème hautement combinatoire (des centaines ou des milliers de demandes, des

dizaines ou des centaines de satellites, de nombreuses façons de diviser la zone de chaque demande en un ensemble de sous-zones, etc.). Sur ce point, il est nécessaire d’étudier à la fois les stratégies de répartition à gros grain où de grandes sous-zones sont allouées aux missions, et les stratégies de répartition à grain fin où des maillages détaillés sont pris en compte. Le raisonnement au niveau des mailles peut conduire à de meilleures décisions de répartition, mais augmente la difficulté du problème d’optimisation à résoudre. Un exemple de stratégie de couverture multi-mission possible définie au niveau de la maille est illustré dans la Figure 3. La couche de fédération doit également gérer des objectifs multiples, notamment la minimisation du temps de réalisation de la couverture et la minimisation de la charge totale du système.

Dans une autre direction, la couche de fédération doit prendre en compte la compatibilité entre les exigences associées à chaque demande et les capacités des agents disponibles, puisque les satellites de deux missions distinctes peuvent être équipés d’instruments ayant des résolutions ou des caractéristiques spectrales différentes.

### 2.3.2 Besoin d’un modèle des autres agents

Pour attribuer les tâches d’observation, la couche de fédération doit gérer un modèle des capacités actuelles de chaque mission. L’une des difficultés réside dans le fait qu’un tel modèle peut être imprécis, en particulier pour les *missions externes* dont les ressources ne sont pas sous le contrôle direct du gestionnaire du système. Et même pour les *missions propriétaires*, la couche de fédération n’a pas un contrôle total en raison de la présence d’un moteur de planification spécifique associé à chaque mission. C’est pourquoi la couche de fédération devrait idéalement *apprendre un modèle de haut niveau des capacités* de chaque mission. En outre, chaque mission peut recevoir directement des demandes urgentes de haute priorité qui peuvent retarder la réalisation d’observations de faible priorité sur de vastes zones, et pour cela la couche de fédération devrait envisager d’exploiter un modèle de la densité des demandes de haute priorité dans une zone donnée, basé par exemple sur des données de demandes historiques.

### 2.3.3 Gestion des incertitudes

Dans le problème considéré, il existe plusieurs sources d’incertitude, notamment en ce qui concerne la présence de nuages, qui entraîne des images ratées – par exemple jusqu’à 50% des images acquises par les satellites opérationnels peuvent être ratées en raison d’une couverture nuageuse excessive [11]. Sur ce point, un défi est de pouvoir exploiter à la fois les prévisions météorologiques à court terme pour préférer des solutions de répartition où une sous-zone donnée est attribuée à une mission disposant d’un satellite qui survole cette zone pendant une période ensoleillée, et les données météorologiques historiques pour identifier les régions dont les opportunités d’observation ne doivent pas être manquées. Pour ce faire, l’une des ambitions est d’apprendre un modèle de la récompense à long terme fournie par une décision de répartition. Un autre mécanisme clé consiste à construire une couche de fédération

qui effectue de manière itérative la redistribution des tâches, afin de mettre automatiquement à jour la stratégie de couverture en fonction de l'état réel de l'exécution.

## 2.4 Travaux connexes

Dans la littérature du domaine, plusieurs contributions traitent de l'observation de grandes zones [17, 15, 14, 2], mais il y a un fossé entre ces contributions et la couche de fédération recherchée – par exemple, le besoin de gérer des demandes multiples, le besoin de gérer la charge actuelle des missions, ou le besoin de gérer la couverture nuageuse. D'un point de vue plus large, la définition du service de couverture multi-mission est liée à plusieurs questions de recherche fondamentale telles que "comment construire un modèle de substitution des capacités d'un ensemble d'agents parmi lesquels un ensemble d'objectifs doit être réparti?", "comment estimer la récompense à long terme associée à une allocation de tâches donnée compte tenu de diverses sources d'incertitude?", ou "comment exploiter une approche d'*intelligence artificielle hybride* combinant l'optimisation et l'apprentissage automatique pour la fédération d'un ensemble de ressources?".

## 3 Fédération des communications

Pour la partie communication, nous adaptons l'utilisation de stations de communication non propriétaires en utilisant le paradigme GSaaS [3, 16], où les clients réservent des ressources de communication auprès d'un fournisseur de service de segments sols, sur une base de paiement à l'utilisation, au lieu de construire et exploiter leurs propres stations. Nous abordons ici le problème de décision suivant : "*Comment attribuer des paquets de fenêtres de communication aux satellites afin de répondre aux exigences en matière de flux de données, de minimiser le brouillage et de minimiser les coûts induits par les services de réservation?*" Une telle décision doit être prise régulièrement, plusieurs jours à l'avance, ou lorsqu'une demande urgente nécessite le téléchargement de données très rapidement.

### 3.1 Composition du système

Le problème considéré implique un ensemble de  $N$  satellites (détenus par des agents-missions), à la recherche de fenêtres de communication pour le transfert de données en liaison montante et descendante, et un ensemble de  $M$  agents de sites de communication indépendants, appelés sites, mettant en œuvre des interfaces GSaaS.

Au sein de la couche de fédération, un *agent de réservation de sites de communication* devrait être chargé de fournir des opportunités de communication aux satellites des missions fédérées (voir Figure 2). Il doit gérer les communications entre  $N$  satellites et  $M$  sites au sol, chaque site comprenant une ou plusieurs stations. Cette gestion doit être basée sur le concept de *contact*, c'est-à-dire la communication entre un satellite et un site pendant un intervalle de temps. Cet agent doit :

1. calculer tous les contacts potentiels (la Figure 4 illustre le concept de contact potentiel),

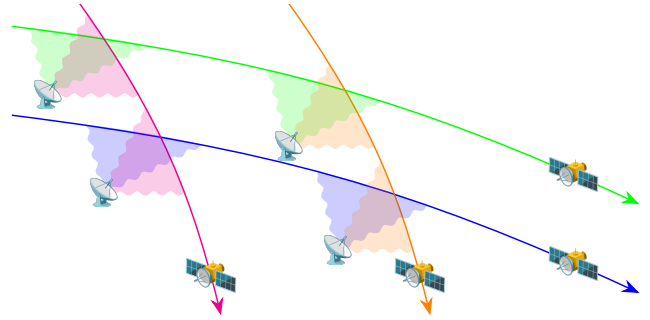


FIGURE 4 – Quatre satellites, chacun ayant des contacts potentiels avec deux stations au sol.

2. sélectionner les contacts à réserver, et
3. réserver les contacts sélectionnés.

Pour le point (1), les missions doivent fournir les orbites de leurs satellites et un propogateur d'orbite doit calculer la position de chaque satellite en fonction du temps et enregistrer les événements correspondant à l'entrée ou à la sortie du cône de visibilité de chaque station. Ces calculs fournissent, pour chaque satellite  $i$ ,  $L_i$  contacts potentiels. Pour le point (3), l'activité de réservation de l'agent peut être purement réactive et basée sur des règles prédéfinies qui doivent être respectées lors de l'interaction avec chaque fournisseur GSaaS, sur la base d'un niveau de service convenu.

### 3.2 Décisions et problèmes multi-agents

La sélection des contacts à réserver dépend des besoins de communication de chaque mission d'observation de la Terre. La réservation des contacts sélectionnés s'effectue en adressant des demandes aux agents associés à chaque réseau de stations sols. La réservation d'un contact n'est pas toujours couronnée de succès car le site demandé peut ne pas avoir une capacité suffisante. Par conséquent, l'agent de réservation peut itérer les activités (2) et (3) au cours des cycles de négociation avec les agents des sites.

La sélection des contacts peut être basée sur la résolution d'un problème d'optimisation dont les variables,  $x_{i,l} \in \{0, 1\}$ , correspondent à l'utilisation du contact  $l \in \{1, \dots, L_i\}$  par le satellite  $i$ , pour  $i \in \{1, \dots, N\}$ . Pour chaque satellite  $i$ , l'objectif est de satisfaire  $K_i$  besoins de contact, où chaque besoin  $k$  est défini par une durée de contact requise  $D_{i,k}$ , une liste de sites candidats, et une fenêtre temporelle. Chaque besoin de chaque satellite doit être satisfait, ce qui conduit à  $\sum_{i=1}^N K_i$  contraintes inégalité.

Deux critères entrent en ligne de compte pour la sélection des contacts : le coût total,  $C$ , et le niveau total de conflit et de brouillage,  $J$ . Le coût est la somme des coûts des contacts sélectionnés, soit  $C$ , i.e.  $C = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{L_i} c_{i,l} x_{i,l}$  où  $c_{i,l}$  est le coût du  $l$ ème contact du satellite  $i$ . En ce qui concerne les conflits et le brouillage, ils peuvent se produire lorsque les fenêtres temporelles de deux contacts de deux satellites sur le même site se chevauchent. Cela peut s'écrire comme suit :  $J = J_{\text{out}} + J_{\text{in}}$  avec  $J_{\text{out}} = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{L_i} f_{i,l} x_{i,l}$

et  $J_{in} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{l=1}^{L_i} \sum_{j=i+1}^N \sum_{m=1}^{L_j} b_{i,l,j,m} x_{i,l} x_{j,m}$ , où  $f_{i,l}$  caractérise le conflit et le brouillage entre le contact  $l$  du satellite  $i$  et les satellites n'appartenant pas à la fédération.  $b_{i,l,j,m}$  caractérise le conflit et le brouillage entre le contact  $l$  du satellite  $i$  et le contact  $m$  du satellite  $j$ . Si ces contacts ne se chevauchent pas ou s'ils ne sont pas liés au même site,  $b_{i,l,j,m} = 0$ . Dans le cas contraire, la valeur de  $b_{i,l,j,m}$  dépend des caractéristiques du site. Si le site possède une station et donc une seule antenne, il s'agit d'un conflit et  $b_{i,l,j,m}$  est le rapport de l'intersection des fenêtres temporelles sur leur union. Si le site possède plusieurs antennes, il peut y avoir brouillage lorsque l'angle entre les satellites  $i$  et  $j$  vus du site est inférieur à une valeur critique. Dans ce cas,  $b_{i,l,j,m}$  peut être calculé comme le rapport entre la durée pendant laquelle cette condition est remplie et la durée de l'union des deux contacts. Les critères de coût et de brouillage doivent être combinés à l'aide d'une stratégie d'optimisation lexicographique, dans laquelle un critère est optimisé en premier et les égalités sont rompues en optimisant le second critère.

### 3.3 Défis pour la couche de fédération

#### 3.3.1 Problèmes fortement combinatoires

Pour un agent de réservation, le problème de la sélection des contacts, c'est-à-dire des créneaux à demander au GSaaS, est hautement combinatoire, en raison du grand nombre de satellites et de contacts, et multicritères. Du côté centralisé, plusieurs options algorithmiques sont possibles, telles que la recherche locale, la recherche arborescente et la programmation en nombres entiers ou par contraintes. On peut également considérer qu'il s'agit d'un problème d'allocation de ressources multi-agents ou de planification multi-agents [6, 21]. Cependant, des méthodes de résolution spécifiques doivent être conçues pour s'adapter à la prise en compte de centaines de sites et de dizaines de satellites pour des horizons temporels supérieurs à une semaine. En outre, en raison des interférences possibles entre les contacts attribués, le problème de réservation devient un problème d'attribution multi-agents fortement couplé, où l'utilité d'un seul agent dépend fortement des lots de contacts des autres agents.

#### 3.3.2 Besoins d'un modèle des autres agents

L'activité de réservation peut induire un problème d'apprentissage de la probabilité de rejet d'une demande de contact. Ce problème est également lié à l'apprentissage des termes  $f_{i,l}$  sur la base de l'ensemble des contacts acceptés et rejetés. Pour la même raison que pour les activités d'observation, les activités de communication nécessitent l'apprentissage du comportement et de la charge de chaque service GSaaS, et pourraient être traitées comme un problème d'apprentissage par renforcement multi-agents (MARL) [1]. En effet, l'agent de réservation pourrait apprendre le comportement de chaque fournisseur de GSaaS en fonction des résultats des demandes antérieures, et pourrait également construire un modèle de substitution pour évaluer rapidement les probabilités d'acceptation de chaque demande de réservation en fonction de la charge du site,

compte tenu du fait que d'autres clients peuvent émettre des demandes pour des fenêtres temporelles concurrentes.

#### 3.3.3 Comportements stratégiques

L'activité de réservation peut être influencée par des questions stratégiques. Par exemple, on peut envisager réserver le plus tôt possible pour augmenter la probabilité d'acceptation de la demande de réservation ou, au contraire, réserver le plus tard possible pour avoir une meilleure idée des besoins réels de communication en fonction de l'utilisation des satellites. Là encore, les techniques d'apprentissage par renforcement pourraient être utiles pour optimiser ces décisions.

### 3.4 Travaux connexes

Le problème de l'ordonnement des téléchargements des satellites d'une constellation vers un réseau de stations au sol dédié est bien couvert par la littérature [5, 4, 24, 23, 19]. D'autres visions fédérées ont été développées dans plusieurs pays. Par exemple, ESTRACK est un réseau mondial de stations au sol qui soutient les missions de l'ESA [8]. Il se compose de 13 stations situées en Europe, en Afrique, en Australie et en Amérique du Sud. D'autres pays disposent également de réseaux similaires, comme les États-Unis, la Chine, la Russie, le Japon et l'Inde. Cependant, le problème de l'optimisation des besoins de communication de plusieurs constellations utilisant plusieurs réseaux de stations au sol avec des conditions d'accès différentes est un nouveau problème résultant du développement de plusieurs réseaux GSaaS concurrents tels que AWS [20] et KSAT [13].

## 4 Conclusion

Nous avons proposé une approche multi-agents pour orchestrer les activités d'observation de la Terre. Cette approche réduit le besoin d'intervention manuelle et favorise les décisions autonomes pour la programmation des observations et l'attribution des communications. Il reste cependant plusieurs défis à relever, en raison de la complexité combinatoire des problèmes et de la difficulté de modéliser le système complexe à l'aide d'algorithmes d'apprentissage. La communauté des chercheurs en IA et en systèmes multi-agents pourra ainsi s'approprier ces défis.

## Remerciements

Ce travail fait partie du projet DOMINO-E qui a reçu un financement du programme Horizon Europe de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation dans le cadre de la convention de subvention n°101082230.

*This work is part of the DOMINO-E project which received funding from the European Union's Horizon Europe Programme for Research and Innovation under Grant Agreement n°101082230.*

## Références

- [1] Stefano V. Albrecht, Filippos Christianos, and Lukas Schäfer. *Multi-Agent Reinforcement Learning : Foundations and Modern Approaches*. MIT Press, Cambridge, MA, 2024.
- [2] M. Barkaoui and J. Berger. A new hybrid genetic algorithm for the collection scheduling problem for a satellite constellation. *Journal of the Operational Research Society*, 71(9) :1390–1410, 2020.
- [3] Elisa Carcaillon and Berylia Bancquart. Market perspectives of ground segment as a service. In *71st International Astronautical Congress (IAC)*, Online, 10 2020. International Astronautical Federation (IAF).
- [4] Jeremy Castaing. Scheduling downloads for multi-satellite, multi-ground station missions. In *28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, Utah, 2014. AIAA/USU.
- [5] Hao Chen, Baorong Zhai, Jiangjiang Wu, Chun Du, and Jun Li. A satellite observation data transmission scheduling algorithm oriented to data topics. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020 :1–16, 2020.
- [6] Yann Chevaleyre, Paul Dunne, Endriss Ulle, Lang Jérôme, Lemaître Michel, Nicolas Maudet, Julian Padget, Steve Phelps, Juan Rodríguez-Aguilar, and Paulo Sousa. Issues in multiagent resource allocation. *Informatica*, 30, 01 2006.
- [7] Peter Cramton, Yoav Shoham, and Richard Steinberg. *Combinatorial Auctions*. The MIT Press, Cambridge, MA, 2006.
- [8] Sylvain Damiani, Holger Dreihahn, Jörg Noll, Marc Niézette, and Gian Paolo Calzolari. Automated allocation of esa ground station network services. In *International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSPSS'06)*, Baltimore, MD, USA, 2006. self-published.
- [9] DOMINO-E Consortium. DOMINO-E – Your access to multi-mission Earth observation, 2024.
- [10] EUSPA. Eo and gnss market report. Technical report, European Union Agency for the Space Programme (EUSPA), 2022.
- [11] Adrien Hadj-Salah, Rémi Verdier, Clément Caron, Mathieu Picard, and Mikaël Capelle. Schedule earth observation satellites with deep reinforcement learning, 2019.
- [12] Sarit Kraus. *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2001.
- [13] KSAT. Ground network services, 2023.
- [14] C. Lenzen, M. Dauth, T. Fruth, A. Petrak, and E. Gross. Planning area coverage with low priority. In *International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSPSS)*, pages 80–88, Online, 2021. self-published.
- [15] A. Maillard, S. Chien, and C. Wells. Planning the coverage of solar system bodies under geometric constraints. *Journal of Aerospace Information Systems*, 18(5) :289–306, 2021.
- [16] Louis Nguyen. Ground stations as a service (gsaas) for near real-time direct broadcast earth science satellite data. Technical report, NASA, 2012.
- [17] X. Niu, H.Tang, and L. Wu. Satellite scheduling of large areal tasks for rapid response to natural disaster using a multi-objective genetic algorithm. *Journal of Disaster Risk Reduction*, 28 :813–825, 2018.
- [18] Gauthier Picard, Clément Caron, Jean-Loup Farges, Jonathan Guerra, Cédric Pralet, and Stéphanie Rousel. Autonomous agents and multiagent systems challenges in earth observation satellite constellations. In *Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, AAMAS '21*, page 39–44, Richland, SC, 2021. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [19] Marco Schmidt. *Ground station networks for efficient operation of distributed small satellite systems*. PhD thesis, Universität Würzburg, 2011.
- [20] Amazon Web Services. Aws ground station, 2023.
- [21] Yoav Shoham and Kevin Leyton-Brown. *Multiagent Systems : Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, USA, 2008.
- [22] S. Tuli, G. Casale, and N. R. Jennings. Gosh : Task scheduling using deep surrogate models in fog computing environments. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 33(11) :2821–2833, nov 2022.
- [23] Rafael Vazquez, Federico Perea, and Jorge Galán Vioque. Resolution of an antenna–satellite assignment problem by means of integer linear programming. *Aerospace Science and Technology*, 39 :567–574, 2014.
- [24] Andrea J Witt. *Optimization of CubeSat Ground Stations for Increased Satellite Numbers*. PhD thesis, Monterey, CA ; Naval Postgraduate School, 2018.