Planification de vidage d'images satellitaires par systèmes multi-agents auto-adaptatifs

Timothée Jammot, Elsy Kaddoum, Serge Rainjonneau

▶ **To cite this version:**

Timothée Jammot, Elsy Kaddoum, Serge Rainjonneau. Planification de vidage d'images satellitaires par systèmes multi-agents auto-adaptatifs. 26èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2018), Oct 2018, Métabief, Doubs, France. pp.1-10. hal-03613749

HAL Id: hal-03613749
https://hal.science/hal-03613749

Submitted on 18 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Planification de vidage d'images satellitaires par systèmes multi-agents auto-adaptatifs

T. Jammot[a,b] timothee.jammot@irt-saintexupery.com
E. Kaddoum[a] kaddoum@irit.fr
S. Rainjonneau[b] serge.rainjonneau@irt-saintexupery.com

[a]Institut de recherche en Informatique de Toulouse,
Université de Toulouse, France

[b]Intitut de Recherche Technologique - IRT Saint-Exupéry
Toulouse, France

Résumé

Les satellites d'observation de la Terre stockent de larges quantités d'images à bord au cours de leurs missions. La planification de télédéchargement de ces images vers la Terre est un problème difficile. En effet, le nombre croissant d'images et de stations réceptrices cause une explosion combinatoire difficilement traitée par les techniques existantes.
Les systèmes multi-agents coopératifs ont montré leur adéquation pour résoudre efficacement une large variété de problèmes d'optimisation présentant une combinatoire élevée. Dans le système DOMAS ici présenté, les agents basés sur le modèle AMAS4Opt permettent l'émergence d'une solution satisfaisante en un temps de calcul raisonnable grâce à leur comportement local et coopératif. Une comparaison avec un algorithme couramment utilisé sur des scénarios dynamiques souligne l'adéquation de l'approche proposée.

Mots-clés : *Planification, émergence, systèmes multi-agents coopératifs, optimisation*

Abstract

Earth observing satellites store large amounts of acquired images on board during their missions. Planning the download of these images towards the Earth is a complex problem : the increasing number of images and stations causes a combinatorial explosion that is difficult to handle by existing techniques. We propose an adaptive multi-agent system to answer the complexity of the problem and optimize different download criteria. The agents of this system based on the AMAS4Opt model allow, thanks to their local behavior, the emergence of a satisfactory solution in a reasonable computation time. In this paper, we present the adaptive and cooperative behavior of these agents. A comparison with a commonly used algorithm on dynamic scenarios underlines the adequacy of the proposed approach.

Keywords: *Planning, emergence, adaptive multi-agent systems, optimization*

1 Introduction

Un satellite d'observation de la Terre en orbite basse est un satellite exploité pour l'obtention d'images géographiques de zones terrestres. Ce type de satellite suit une orbite polaire qui se décale par rapport au sol à chaque rotation afin d'assurer une couverture totale de la Terre. Le processus de livraison d'images décrit en figure 1 suit un cycle composé de :

1. Réception par des centres opérateurs de **requêtes client** pour l'observation de zones spécifiques
2. Découpage des zones demandées dans les requêtes client en **mailles** (surfaces élémentaires) pouvant être **imagées** individuellement par les satellites
3. **Planification au sol** des **acquisitions** des images des mailles par les satellites et de leur **télédéchargement** vers des stations terrestres réceptrices
4. Transmission des plans vers les satellites et **exécution** des instructions d'acquisition par les satellites et de télédéchargement des images vers les stations au sol
5. **Validation** des images et livraison aux clients

Dans un contexte où le domaine de l'observation est en pleine expansion ; augmentation de la taille des constellations (par exemple le projet Skybox de Google avec 24 satellites), accroissement des requêtes des clients demandeurs d'un feedback plus rapide quant à la gestion de leur demande, etc. Il est indispensable de rendre les phases de planification : **acquisition et télédéchargement** plus réactives et dynamiques.

Un premier travail [4] mené en partenariat entre l'IRT Saint-Exupéry et l'équipe SMAC de

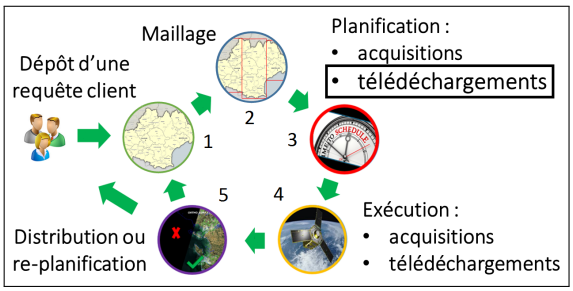

FIGURE 1 – Processus de livraison d'images suite à la réception d'une requête client

l'IRIT a mis en place le système ATLAS (Adaptive saTellites pLanning for dynAmic earth obServation) permettant une planification dynamique et réactive des plans d'acquisition des mailles par les satellites.

Dans le cadre de ce travail, nous visons à rendre la planification des télédéchargements des images acquises dynamique et réactive en proposant le système DOMAS (DOwnload Multi-Agent System). Les deux phases de planifications étant fortement liées, le couplage des deux systèmes est en cours d'étude.

En plus de la dynamique introduite par la phase de planification des acquisitions, le problème de la planification des télédéchargements doit prendre en compte la forte hétérogénéité des entités et différentes caractéristiques telles que les capacités de transmission des satellites et la localisation des stations réceptrices des images qui imposent des contraintes sur le nombre d'images vidées vers la Terre en un survol d'un satellite au-dessus d'une station. De plus, le nombre d'images stockées à bord d'un satellite est trop important pour toutes les télédécharger vers une unique station. De ce fait, la construction du plan de télédéchargement est un problème rendu difficile par le grand nombre de possibilités de placement des télédéchargements sur les stations réceptrices disponibles ainsi que les différents objectifs et paramètres à respecter : le nombre de télédéchargements effectués, l'importance des images télédéchargées ainsi que leur date limite de validité.

Appuyé sur le travail [4], le système DOMAS se base sur la théorie AMAS (Adaptive Multi-Agent Systems) [8] et le modèle AMAS4Opt [11] pour l'optimisation du problème de vidage.

En partie 2 de cet article, nous présentons la formalisation du problème ainsi qu'un bref état de l'art des méthodes existantes. En partie 3, le fonctionnement du système multi-agent coopératif DOMAS est développé. Enfin, la partie 4 propose une étude des résultats du système pour différents critères de qualité du plan ainsi qu'une comparaison à un algorithme de type « glouton hiérarchique » pour des plans de vidage simulés.

2 Le problème de vidage d'images satellitaires

Cette partie décrit les caractéristiques des éléments du problème ainsi qu'une modélisation formelle avec les objectifs recherchés. Un résumé des méthodes de résolution existantes est également proposé.

2.1 Description du problème

Le problème de planification des « **télédéchargements** » (aussi appelés vidages) se présente comme l'optimisation de plans de télédéchargement de **satellites** d'observation. Un plan de télédéchargement est une suite d'actions de **télédéchargement** qui seront entreprises par un ou plusieurs **satellite(s)** pour vider leurs **images** en continu et sans découpage possible sur des **stations** réceptrices en respectant des créneaux de **visibilité**.

Satellite. Un satellite d'observation est défini comme un outil d'acquisition, de stockage et de vidage d'images vers la Terre. Les caractéristiques d'un satellite prises en compte dans le cadre de ce travail comprennent :

- une trajectoire elliptique autour de la Terre,
- une vitesse de télédéchargement,
- une résolution d'image capturée,
- une capacité de stockage d'images.

Image. Une image est le résultat d'une acquisition par un satellite d'une maille appartenant à une requête client. Cette image hérite des paramètres de la requête correspondante et doit être retransmise vers la Terre pour validation par le client. Les caractéristiques d'une image prises en compte dans le cadre de ce travail comprennent :

- un satellite qui stocke l'image,
- un poids de l'image à bord du satellite,
- un temps nécessaire au vidage de l'image par le satellite,
- une date d'arrivée de l'image (disponible dès que l'acquisition de l'image est planifiée)
- une date de validité au plus tard (suite à laquelle l'image sera inutilisable),

— une priorité définie par la requête client,
— les stations imposées par la requête client pour son télédéchargement.

Station. Une station est un centre terrestre de **réception** d'images acquises par les satellites. Une station est définie par :
— sa localisation géographique
— son accessibilité par les satellites pendant des périodes de visibilité.

Visibilité. Le survol d'un satellite au-dessus d'une station réceptrice est défini comme une visibilité de ce satellite avec cette station. La vitesse d'un satellite étant constante, une visibilité est une plage temporelle durant laquelle le satellite peut effectuer le télédéchargement d'images à bord vers la station. Un satellite peut être amené à survoler une station plusieurs fois durant un même horizon de planification.

Télédéchargement. Un télédéchargement est l'action de vidage d'une image stockée à bord d'un satellite vers une station réceptrice. Cette opération nécessite de réserver un créneau de transmission de durée relative au poids de l'image durant lequel l'outil d'émission est utilisé et aucune autre image ne peut être envoyée vers la Terre.

2.2 Formalisation du problème

Dans cette partie, nous proposons une formalisation du problème de télédéchargement. Étant donné :

Un ensemble de satellites $SAT = sat_1, sat_2, \ldots, sat_i, \ldots, sat_n$ chacun capable de vider des images à une vitesse de télédéchargement $vitesse_i$.

Un ensemble de **stations** réceptrices $S = s_1, s_2, \ldots, s_j, \ldots, s_p$.

Un ensemble d'**images** $I = x_1, x_2, \ldots, x_k, \ldots, x_q$ chacune caractérisée par :
— le satellite sat_i sur lequel elle est stockée,
— un poids à bord p_k correspondant à la taille de l'image,
— une durée de vidage nécessaire $(p_k/vitesse_i)$,
— t^k_{start} la date d'arrivée de l'image,
— ${t^k}_{rest} = {t^k}_{lim} - t$ le temps restant avant la date de validité au plus tard ${t^k}_{lim}$ héritée de sa requête (t la date courante),
— $P_k = \{r, n, u\}$ la priorité client de l'image i_k héritée de sa requête. Cette priorité peut prendre comme valeur "routine", "normale" ou "urgente" avec $u > n > r$ indiquant l'ordre d'importance.

Un ensemble de **visibilités** du satellite sat_i sur la station s_j, $V_{ij} = v_{ij1}, v_{ij2}, \ldots, v_{ijl}, \ldots, v_{ijr}$, chacune caractérisée par :
— $t_{start(ijl)}$ la date de début de visibilité,
— $t_{end(ijl)}$ la date de fin de visibilité,

Objectif. Le problème de télédéchargement consiste à définir pour chaque image x_k à bord d'un satellite sat_i un créneau de télédéchargement d_{kij} sur une visibilité d'une station réceptrice s_j. Le plan de télédéchargement obtenu devra maximiser le nombre total d'images télédéchargées en respectant :
— l'ordre des priorités client,
— les dates limites de validité,
— le télédéchargement complet d'une image vers une station une fois initié.

La figure 2 propose une vision schématique d'un satellite sat_1, d'une station s_1, de leurs trois visibilités v_{111}, v_{112} et v_{113} et quatre créneaux de télédéchargement planifiés $d_{111}, d_{211}, d_{311}$ et d_{411} des images x_1, x_2, x_3 et x_4 respectivement.

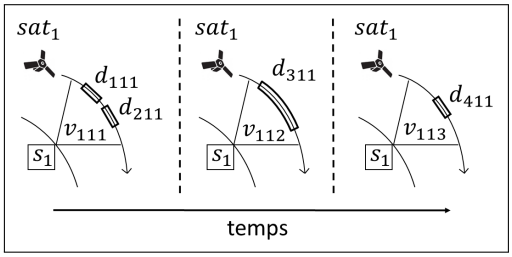

FIGURE 2 – Description de vidages pendant trois périodes de visibilité du satellite sat_1 sur une même station s_1

2.3 Etat de l'art

Le problème de planification de télédéchargement est souvent traité de façon conjointe à celui de planification des acquisitions d'images satellitaires [1][7]. Pour ces deux problèmes les algorithmes de type « glouton » sont les plus utilisés dans le cadre opérationnel [14]. L'approche « glouton » consiste à parcourir en un unique passage la liste des requêtes, éventuellement de façon ordonnée suivant des critères d'importance telle que la priorité client, et à trouver des créneaux de planification d'acquisition ou de télédéchargement pour les images de cette requête.

Les algorithmes gloutons utilisés dans les systèmes actuels se basent sur une heuristique fortement personnalisée afin de produire des plans de qualité raisonnable en peu de temps de calcul. Dans un contexte où le domaine de l'observation est en pleine évolution, des modifications importantes devront être réalisées afin d'intégrer la dynamique et la re-planification temps réel.

Les travaux de recherche dans le domaine de la planification de mission de satellites mettent en œuvre différentes techniques d'optimisation dans l'optique de construire des plans de meilleure qualité que ceux produits par les algorithmes gloutons de référence, notamment en explorant davantage l'espace de recherche du problème afin de ne pas être vulnérable à l'attraction des minimums locaux. Si le problème de sélection et d'ordonnancement d'acquisition a fait l'objet de nombreuses études [2][9], la littérature qui traite le problème de vidage d'images satellitaires est plus réduite. [13] ont ajouté une mémoire tabou à un algorithme glouton dans le cadre d'un problème de télédéchargement pour la sonde Mars Express. Dans [12] les auteurs comparent plusieurs techniques d'optimisation standard pour le problème de vidage du satellite radar RADARSAT-2 et montrent que la méthode de recuit simulé est la plus performante dans ces conditions. Cependant ces approches considèrent en entrée des plans d'acquisition figés et non modifiables au cours de la planification des plans de vidage limitant ainsi l'intégration de la dynamique.

Dans le cadre de travail, nous proposons d'enrichir le système présenté par [4] pour résoudre le problème d'optimisation dynamique de plans de télédéchargement. Dans cette étude les auteurs se sont basé sur la théorie AMAS pour l'optimisation de plans d'acquisitions dans un environnement dynamique tel qu'il est défini dans [10]. Cette théorie a montré son efficacité dans le traitement de problèmes d'optimisation à forte combinatoire grâce à l'émergence de fonctions globales de bonne qualité par coopération d'agents distribués aux comportements locaux simples [6][15]. A partir de ces observations nous avons utilisé la méthode ADELFE [3] pour développer un AMAS pour la résolution du problème de télédéchargement surnommé DOMAS. ADELFE a pour objectif de fournir des outils et techniques de conception et implémentation pour des AMAS génériques. Le modèle AMAS4Opt vient compléter ADELFE en proposant une approche d'auto-organisation des agents pour la résolution de problèmes d'optimisation. AMAS4Opt présente deux rôles d'agents coopératifs : le rôle « contraint » et le rôle « service ». Les agents à rôle « contraint » ont un problème qui doit être satisfait ; les agents à rôle « service » doivent satisfaire les problèmes des agents à rôle « contraint » en utilisant leurs ressources locales. L'objectif local d'un agent, les ressources qui lui sont accessibles et les communications qu'il devra effectuer sont autant de critères de décision pour son affectation aux rôles « contraint » ou « service ».

Dans la section suivante nous décrirons les entités du système, les rôles des agents ainsi que les mécanismes de coopération mis en place.

3 Le système DOMAS

3.1 Entités et agents

En s'appuyant sur la modélisation du problème proposée dans la partie 2.1 et le modèle AMAS4Opt nous avons identifié les types d'entités suivants :

Trois types d'entités actives : le satellite, la requête client et la visibilité des stations. Ces trois types d'entités sont autonomes mais ne possèdent pas de but local à satisfaire. Les agents du système interagissent avec eux afin de récupérer des informations nécessaires à leur décision. Par exemple, un agent Image sollicitera le satellite auquel il appartient afin de connaître sa vitesse de télédéchargement et ainsi calculer la durée nécessaire pour son télédéchargement.

Un type d'entité passive : le module de calcul de période de visibilité. Ce type d'entité n'est pas autonome et ne possède pas de but local à satisfaire. Il représente une ressource utilisée par les agents du système ou les entités actives. Le module de calcul de période de visibilité est utilisé pour définir les dates de début et de fin des visibilités des satellites sur les stations.

Trois types d'agents coopératifs décrits dans le tableau 1.

3.2 Criticité et Coût

L'objectif des agents à rôle « service » consiste essentiellement à aider les agents à rôle « contraint » à satisfaire leurs objectifs afin de résoudre le problème. De ce fait, un même agent à rôle « service » peut recevoir plusieurs requêtes d'agents à rôle « contraint » pendant un même

Agent (rôle)	Objectif	Interagit avec	Négocie avec
Image (contraint)	avoir un créneau de télédéchargement planifié sur une station avant sa date de validité au plus tard	la requête client correspondante, son satellite d'appartenance	des agents Station
Station (service)	trouver des solutions de télédéchargement pour des images sur ses créneaux de visibilité	le module de calcul de visibilité	des agents Image et leurs agents Télédéchargement
Télédéchargement (contraint)	représentant de l'agent Image sur une station possible, son objectif est de trouver un créneau de vidage sur une des visibilités de cette station	l'image qu'il représente	un agent Station

TABLE 1 – Description des agents coopératifs

cycle de vie. De la même façon un agent à rôle « contraint » peut avoir la possibilité d'émettre une requête vers plusieurs agents à rôle « service ». Dans ces deux cas, les agents se basent sur la coopération pour choisir les agents à aider/solliciter suivant leur degré d'insatisfaction. Le modèle AMAS4Opt définit pour cela deux métriques : la criticité pour les agents à rôle « contraint », et le coût pour les agents à rôle « service ». Les deux métriques se présentent sous la forme de listes de critères ordonnés communes pour un même type d'agent.

La criticité. Dans DOMAS, elle représente le degré d'insatisfaction d'un agent à rôle « contraint ». [5] définissent la criticité comme la distance qui sépare l'état courant [de l'agent], de l'état dans lequel son objectif local est atteint.

Un agent Image a une criticité transmise aux agents Télédéchargement qui recherchent un créneau de vidage pour cette image sur différentes stations. La criticité d'un agent Image et des agents Télédéchargement correspondants est équivalente. Nous avons utilisé les caractéristiques des éléments du système présentés en section 2.1 pour définir les critères de la criticité des agents Image et Télédéchargement :

— La **priorité client** : importance donnée par le client à sa requête et aux images de la requête par héritage, schématisée par les valeurs « routine », « normale » ou « urgente » ($P_k = \{r, n, u\}, u > n > r$).
— La **durée restante avant la date de validité au plus tard** : durée entre la date courante et la date de validité au plus tard d'une image. (${t^k}_{rest} = {t^k}_{lim} - t$). Plus l'agent s'approche de sa date de validité plus cette mesure est grande.

La criticité est utilisée par un agent Station pour choisir de façon coopérative les agents Télédéchargement représentant les images les plus prioritaires parmi ceux qui leur ont émis une requête de télédéchargement. Les agents Image et Télédéchargement adaptent leur criticité suivant les réponses des agents Station. Leurs criticités deviennent nulles s'ils reçoivent une confirmation de planification car leur objectif local est satisfait.

La comparaison de criticités des agents Image ou Télédéchargement suit le processus suivant :

1. L'agent avec la plus forte priorité client est le plus critique.
2. A priorités client égales l'agent avec la plus courte durée restante avant la date de validité au plus tard est plus critique.
3. A durées restantes égales, l'agent le plus critique est choisi de façon stochastique.

Le coût. Il est défini comme la difficulté d'un agent « service » à rendre son service pour un agent « contraint » qui l'a sollicité. Dans DOMAS, les critères représentant le coût de l'agent Station sont ordonnés comme suit :

1. **La disponibilité** : représentée par le temps de télédéchargement libre sur les visibilités possibles de la station en rapport au temps nécessaire pour planifier le vidage de l'image qui a émis la requête. Le coût augmente en fonction de la diminution de l'espace disponible sur les visibilités de la station.
2. **La criticité des télédéchargements remplacés** : dans le cas d'une planification d'un télédéchargement sur une station qui entraîne la dé-planification

d'autres vidages, la criticité de ces vidages en rapport à celle de l'image qui a émis la requête est prise en compte. Le coût augmente en fonction de la criticité totale des images dont les télédéchargements sont dé-planifiés.

Le coût est utilisé par un agent Image, à rôle « contraint », pour choisir de façon coopérative l'agent Station le plus disponible pour répondre à sa requête de télédéchargement. Un agent Station à coût élevé est caractérisé par un fort taux de remplissage de ses visibilités par des télédéchargements d'images à forte criticité.

3.3 Planification coopérative

La fonction du système DOMAS est de fournir un plan de vidage à partir d'images précédemment acquises. La figure 3 décrit le comportement et les échanges entre les agents du système dans son fonctionnement nominal. On considère dans cet exemple un agent Image x_1 stocké sur le satellite sat_1 ayant plusieurs créneaux de visibilité sur deux agents Station s_1 et s_2. Les étapes suivantes décrivent les échanges et traitements effectués par les agents du système :

1. L'agent Image x_1 est non planifié. Il envoie des requêtes de calcul de coût de planification vers les agents Station s_1 et s_2 possédant des créneaux de visibilités avec le satellite auquel l'image appartient.
2. Afin de répondre, les agents Station s_1 et s_2 créent chacun un agent Télédéchargement pour représenter l'image (d_{111} pour s_1 et d_{112} pour s_2) et leur délèguent le calcul de coût de planification en leur transmettant l'état courant de planification sur leurs visibilités potentiels.
3. d_{111} et d_{112} estiment le coût de planification d'un créneau de vidage pour l'image x_1 sur les visibilités de sat_1 sur s_1 et s_2.
4. d_{111} et d_{112} renvoient vers s_1 et s_2 respectivement le coût de planification de x_1.
5. s_1 et s_2 transmettent le coût de planification à x_1.
6. x_1 sélectionne s_1 comme la station avec le coût le plus faible et émet vers s_1 une demande de planification.
7. s_1 délègue le service de planification à d_{111} et lui transmet l'état courant de la planification sur ses visibilités.
8. d_{111} cherche un créneau de vidage pour x_1 sur une des visibilités de sat_1 sur s_1 prenant en compte la situation courante.
9. Si un créneau de vidage est trouvé, d_{111} renvoie à s_1 une proposition de Télédéchargement.
10. s_1 vérifie la cohérence de la demande de d_{111} par rapport à son état de planification courant. Si plusieurs agents Télédéchargement ont émis une demande de planifications pour le même créneau, s_1 décide de façon coopérative lesquels sont acceptés et lesquels sont refusés.
11. s_1 envoie à x_1 et d_{111} sa décision de planification (positive ou négative) et les raisons de son refus si la planification est impossible.

Le processus de résolution est dynamique et l'allocation des créneaux de visibilités est sans cesse remise en question tant que des images détectant de nouvelles situations (changement de priorités sur les stations par exemple) décident de redemander l'allocation d'une visibilité. Dans le cadre de cette étude, les agents répètent leur cycle de vie (perception, décision, action) pendant un certains nombres d'itérations. Nous projetons d'intégrer un mécanisme permettant d'arrêter le système en détectant la stabilité des échanges.

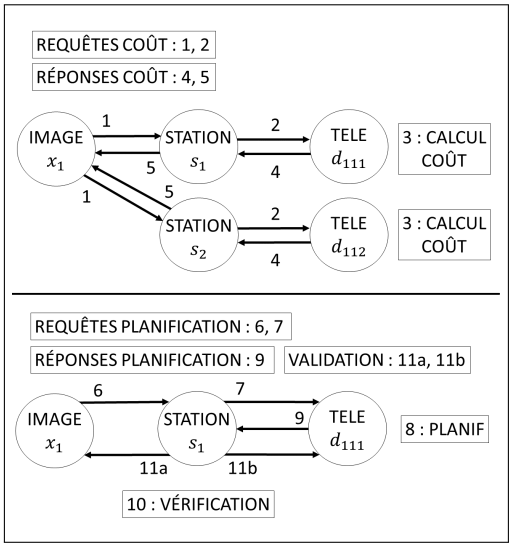

FIGURE 3 – Exemple séquentiel de planification entre agents pour le fonctionnement nominal

4 Résultats et discussion

4.1 Générateur de scénario

Afin de valider notre système sur une grande diversité de cas, nous avons développé un générateur de scénario basé sur la formalisation du problème et validé par les experts du domaine. Son fonctionnement suit deux étapes :

1. Génération d'un plan de vidage complet
2. Construction du scénario de test

Génération d'un plan de vidage complet. A partir d'un ensemble de satellites sat_i, d'un ensemble de stations s_j et d'une durée simulant un horizon de planification, donnés en entrée, le générateur :

1. associe des créneaux de visibilité V_{ij} entre les deux ensembles tout en respectant des contraintes du domaine satellitaire (telle que la durée de l'horizon de planification) non présentées dans le cadre de ce travail.
2. remplit chaque créneau de visibilité V_{ij} par des télédéchargements d_{kij} de durées variables tirées aléatoirement entre deux bornes t_{min} et t_{max} fixées par l'utilisateur en entrée.

Nous qualifions ces plans de « complets ». En effet, les créneaux de visibilités V_{ij} sont entièrement remplis, il n'est pas possible d'ajouter de télédéchargement d_{kij} supplémentaire. Ceci garantit que chaque image i_k associée à un télédéchargement d_{kij} peut être planifiée. Ainsi, le taux de planification optimal pour les télédéchargements de toutes les images dans un plan « complet » est de 100%. L'avantage de partir de ces plans complets est qu'une solution où tous les télédéchargements sont planifiés existe. Ceci permet de mieux tester et comparer le système développé.

Construction du scénario de test. À partir de plans de vidage « complets » générés à l'étape précédente, le générateur construit des scénarios de test présentant différentes caractéristiques. Pour cela,

1. il commence par transformer chaque télédéchargement d_{kij} en une image i_k associée à un sat_i.
2. il donne à chaque image i_k la liste des stations s_j visibles par son satellite sat_i d'appartenance. Ceci permet d'augmenter la combinatoire ainsi que l'espace de recherche. En effet, chaque image devra déterminer sur quelle station placer son télédéchargement.
3. un facteur de contrainte α défini en entrée permet de surcharger le scénario en créant des images supplémentaires sans télédéchargement prévu. Le facteur α représente un ratio entre le temps de télédéchargement nécessaire pour vider toutes les images et la disponibilité totale de vidage des visibilités des stations. Pour les scénarios obtenus à partir des plans « complets » sans ajout d'images supplémentaires, α est égal à 1. Pour des scénarios avec $\alpha > 1$ on sait par construction que le temps de télédéchargement nécessaire excède le temps disponible sur toutes les visibilités du scénario. Nous utiliserons ce type de scénario pour observer des situations de conflit entre agents concurrentiels.
4. pour chaque image la priorité client est choisie suivant un ratio d'image par priorité, le moment d'arrivée dans le système est attribué en paramètre ou tiré aléatoirement et la date de fin de validité est fixée à la fin de l'horizon de planification.

À la fin de cette deuxième étape, les scénarios de test contiennent l'ensemble des stations et les images à planifier ainsi que leurs caractéristiques (i.e. la priorité client et la durée de télédéchargement des images, les visibilités V_{ij} des satellites sur les stations, etc.).

4.2 Le glouton hiérarchique

Dans le but de comparer les résultats de planification du système DOMAS nous avons développé l'algorithme « Hierarchical Greedy » (HG) de type « glouton hiérarchique », technique utilisée actuellement en opérationnel. La méthode employée par cet algorithme consiste à parcourir la liste des images une seule fois suivant une hiérarchie, soit ici dans l'ordre décroissant de leur priorité client. Pour chaque image, HG recherche un créneau de télédéchargement sur les visibilités des stations accessibles par le satellite qui stocke l'image. Les stations et leurs visibilités sont parcourues par HG dans l'ordre chronologique de survol par le satellite et le nouveau télédéchargement est placé à la suite directe du dernier télédéchargement planifié dans la visibilité sélectionnée.

4.3 Expérimentation et comparaison

Dans le cadre de cet article, trois expérimentations montrant l'adéquation de l'approche sont présentées. Pour chaque expérimentation, un ou plusieurs scénarios ont été générés et exécutés 100 fois chacun. Les résultats représentent les moyennes obtenues pour chaque scénario.

La première expérimentation s'intéresse au **taux de planification** obtenu par DOMAS et HG. Pour cela, des scénarios ont été générés avec comme entrées du générateur un seul satellite, un même horizon de planification, $\alpha = 1$ et un nombre de stations croissant. L'augmentation du nombre de stations implique une augmentation de l'espace de recherche disponible pour le placement du télédéchargement de chaque image. Rappelons que, avec $\alpha = 1$, les images peuvent être toutes vidées en utilisant la totalité de la disponibilité des stations accessibles (i.e. le taux de planification optimal de télédéchargement pour ces scénarios est égal à 100%). La figure 4 présente les différents taux de planification pour DOMAS et HG pour des scénarios incluant entre 2 et 20 stations. Cette expérimentation montre qu'avec une combinatoire croissante, DOMAS arrive à maintenir un taux de planification plus élevé que HG.

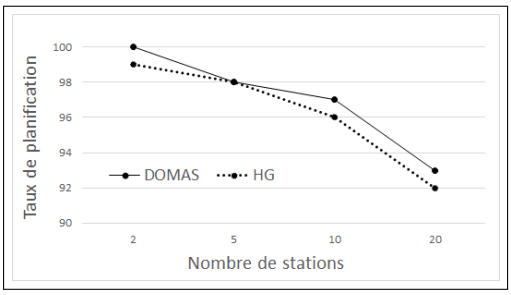

FIGURE 4 – Taux de planification sur des scénarios avec $\alpha = 1$

La deuxième expérience concerne le **respect des priorités client** P des requêtes **dans un environnement dynamique**.

Les spécifications du domaine stipulent qu'une image prise pour répondre à une requête client « urgente » doit être vidée en priorité par rapport à une image d'une requête « normale », et de même pour les priorités « normale » et « routine ». Le taux de planification de télédéchargements d'images à priorité P élevée est une mesure de qualité d'un plan de télédéchargement. Pour comparer les performances de planification des priorités P élevées entre DOMAS et HG nous avons généré des scénarios avec $\alpha > 1$ [1].

Afin de simuler la dynamique, nous avons modifié le temps d'arrivée des images en fonction de leur priorité. Les images « routines » sont disponibles depuis le début de la résolution. Les images « normales » arrivent au cycle de résolution 10 et les « urgentes » au cycle 20. Pour respecter des conditions opérationnelles, les requêtes moins urgentes sont plus nombreuses, suivant un ratio $r = 50; n = 34; u = 16$ en pourcentage de requêtes par niveau de priorité. À noter que, HG ne gérant pas cette dynamique, toutes les images sont disponibles dès le début de son processus de résolution.

Des taux de planifications de télédéchargements pour $P = r, n, u$ obtenus par DOMAS et HG sur un scénario comprenant 3 stations et avec $\alpha = 2$ sont présentés dans la figure 5. Les résultats obtenus montrent des taux de planification de télédéchargement similaires pour DOMAS et HG. Cette expérimentation montre que DOMAS est capable d'atteindre des résultats aussi bons que ceux obtenus par HG tout en gérant la dynamique. En effet, DOMAS peut intégrer à sa planification courante de nouvelles images à télédécharger contrairement à HG qui doit être relancé pour prendre en compte un jeu de données qui contient les nouvelles images.

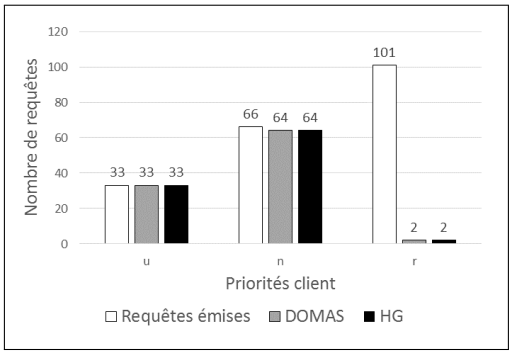

FIGURE 5 – Comparaison du nombre de requêtes émises et planifiées par DOMAS et HG en fonction de la priorité client (avec $\alpha = 2$).

La gestion de la dynamique est considérée dans la troisième expérimentation et notamment la figure 6 qui présente le taux de planification d'images classées par leur priorité P pour le même scénario considéré dans la deuxième expérimentation. Cette figure montre l'adaptabilité du système. En effet, dès l'introduction d'images « normales » (respectivement « urgentes »), les

1. Le temps de vidage cumulé sur toutes les visibilités des stations accessibles est inférieur à la durée nécessaire pour télédécharger toutes les images du scénario.

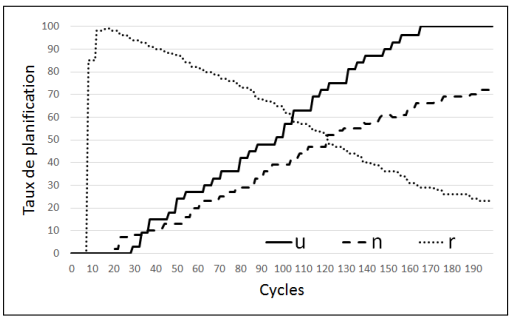

FIGURE 6 – Taux de planification par priorité sur scénario dynamique

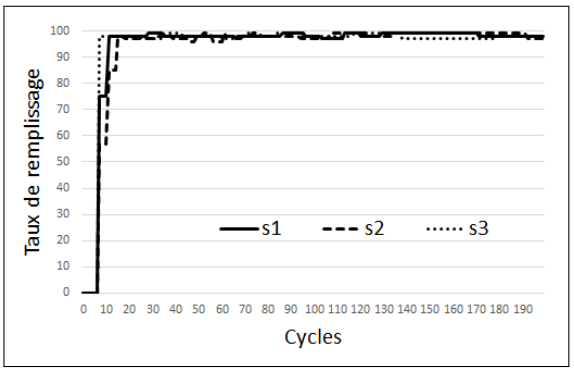

FIGURE 7 – Taux de remplissage des visibilités de stations par des télédéchargements

images « routines » (et/ou « normales ») sont déplanifiées pour libérer de la place aux images plus prioritaires.

Les cycles de déplanifications et replacements de télédéchargements sur les visibilités peuvent réduire la qualité du plan courant de façon temporaire au cours de l'exécution de DOMAS. Afin de garantir l'obtention d'un plan de bonne qualité à chaque instant, suite à une demande de l'opérateur par exemple, nous avons cherché à définir **la stabilité du système** au cours de son exécution. Le taux de remplissage des visibilités des stations par des télédéchargements en considérant des scénarios avec $\alpha > 1$ (i.e. présentant un grand nombre de remplacements et replanifications de télédéchargements) est un indicateur de la qualité du plan de vidage courant à un moment t de l'exécution de DOMAS. La figure 7 représente le taux de remplissage cumulé des visibilités des trois stations considérées dans le scénario de la deuxième expérimentation. Couplée avec la figure 6, cette figure montre l'adaptabilité et la stabilité du système développé. Des études plus approfondies seront également menées afin de mesurer l'impact ou l'effet papillon engendré par la déplanification et le replacement d'un télédéchargement dans un environnement soumis à une dynamique plus aléatoire que celle considérée ici.

4.4 Discussion et perspectives

Les résultats obtenus par les expériences réalisées en comparant DOMAS et HG montrent les capacités d'optimisation du système multi-agent pour le problème difficile de vidage d'images satellitaires. Pour des scénarios dits « complets », DOMAS maintient un taux de planification supérieur ou égal à celui obtenu par HG à différents niveaux de passage à l'échelle en termes de nombre de stations accessibles aux satellites et de nombre d'images à télédécharger. Le coût des agents Station laisse les agents Image choisir la meilleure station vers laquelle émettre leur demande de télédéchargement. Le temps inutilisé sur les visibilités est ainsi minimisé par remplacements successifs d'agents Télédéchargement qui remplissent au mieux l'espace disponible. Des expérimentations supplémentaires seront menées afin de tester la capacité du système à passer l'échelle.

De plus, DOMAS est capable d'adapter son plan de télédéchargement courant suite à l'injection de nouvelles requêtes client. Les résultats obtenus montrent l'efficacité du système dans le remplacement d'agents Télédéchargement à P faibles par d'autres agents Télédéchargement à P plus forts nouvellement injectés. Ces mécanismes de remplacement causent des pertes de qualité ponctuelles du plan de télédéchargement. Nos expériences montrent cependant que le taux de remplissage des visibilités des stations reste stable au cours de l'exécution. Un plan de télédéchargement peut donc être demandé par l'opérateur de DOMAS avec une garantie de bonne qualité à tout moment de la planification.

La prochaine étude va porter sur le couplage entre ATLAS et DOMAS afin de tester une dynamique plus forte incluant par exemple la déplanification d'une acquisition dans ATLAS engendrant la suppression de l'image à télédécharger dans DOMAS et vice-versa.

5 Conclusion

Cet article présente notre une approche multi-agent pour la résolution du problème de vidage d'images satellitaires. Nos expériences nous ont permis de comparer les performances de DOMAS avec un algorithme de type « glouton chronologique » couramment utilisé dans le domaine.

Typique d'un algorithme centralisé avec un traitement séquentiel, le glouton hiérarchique impose de connaître au préalable toutes les demandes. A l'opposé, le modèle AMAS4Opt distribue le calcul et décentralise totalement la résolution sur l'ensemble des entités impliquées. Les mesures de criticité et de coût locales à chaque agent lui permettent de choisir l'action à réaliser pour aider le collectif à converger vers une solution cohérente et efficace. Les résultats obtenus montrent que DOMAS propose des solutions pertinentes en plus de sa capacité à gérer la dynamique et la possibilité d'obtenir un plan de bonne qualité à tout moment de l'exécution. La distribution dans DOMAS et ATLAS permet une meilleure utilisation des ressources nécessaires. La planification dans le domaine satellitaire nécessite l'utilisation de bibliothèques coûteuses en temps de calcul. La distribution autorise d'exploiter en parallèle plusieurs instances de ces bibliothèques. La décentralisation permet une décision locale fondée sur une connaissance réduite du voisinage. Ces deux mécanismes facilitent la montée à l'échelle du système DOMAS.

Nos futurs travaux vont préparer la fusion de DOMAS avec l'algorithme de planification d'acquisitions ATLAS. Nous envisageons aussi d'ajouter des contraintes opérationnelles au problème de télédéchargement tel que le recoupement temporel entre visibilités de stations géographiquement proches et de se comparer avec d'autres algorithmes de résolution.

6 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le projet SYNAPSE de l'IRT Saint-Exupéry pour le financement de ces travaux.

Références

[1] JC Agn and E Bensana. Exact and approximate methods for the daily management of an earth observation satellite. 1995.

[2] E Bensana, M Lemaitre, and G Verfaillie. Earth observation satellite management. *Constraints*, 4(3) :293–299, 1999.

[3] C Bernon, M-P Gleizes, S Peyruqueou, and G Picard. Adelfe : a methodology for adaptive multi-agent systems engineering. In *International Workshop on Engineering Societies in the Agents World*, pages 156–169. Springer, 2002.

[4] J Bonnet. *Multi-Criteria and Multi-Objective Dynamic Planning by Self-Adaptive Multi-Agent System, Application to Earth Observation Satellite Constellations*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2017.

[5] T Bouziat, S Combettes, V Camps, and P Glize. La criticité comme moteur de la coopération dans les systèmes multi-agents adaptatifs (présentation courte). In *JFSMA*, 2014.

[6] N Brax. *Self-adaptive multi-agent systems for aided decision-making : an application to maritime surveillance*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.

[7] J Frank, A Jonsson, R Morris, D E Smith, and P Norvig. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites. 2001.

[8] M-P Gleizes. Self-adaptive complex systems. In *European Workshop on Multi-Agent Systems*, pages 114–128. Springer, 2011.

[9] Al Globus, J Crawford, J Lohn, and A Pryor. A comparison of techniques for scheduling earth observing satellites. In *AAAI*, pages 836–843, 2004.

[10] R Grasset-Bourdel. *Planification dynamique et réactive pour des satellites agiles d'observation de la Terre*. PhD thesis, Ph. D. thesis, Onera, 2011.

[11] E Kaddoum. *Optimisation sous contraintes de problèmes distribués par auto-organisation coopérative*. PhD thesis, Toulouse, France, 2011.

[12] D Karapetyan, S M Minic, K T Malladi, and A P Punnen. Satellite downlink scheduling problem : A case study. *Omega*, 53 :115–123, 2015.

[13] A Oddi, N Policella, A Cesta, and G Cortellessa. Generating high quality schedules for a spacecraft memory downlink problem. In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 570–584. Springer, 2003.

[14] C Pralet, G Verfaillie, A Maillard, E Hébrard, N Jozefowiez, M-J Huguet, T Desmousceaux, P Blanc-Paques, and J Jaubert. Satellite data download management with uncertainty about the generated volumes. In *ICAPS*, 2014.

[15] N Verstaevel. *Self-organization of robotic devices through demonstrations*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2016.