



HAL
open science

Maillage dynamique pour l'acquisition de grandes couvertures par système multi-agent coopératif

Timothée Jammot, Elsy Kaddoum, Serge Rainjonneau, Mathieu Picard,
Marie-Pierre Gleizes

► To cite this version:

Timothée Jammot, Elsy Kaddoum, Serge Rainjonneau, Mathieu Picard, Marie-Pierre Gleizes. Maillage dynamique pour l'acquisition de grandes couvertures par système multi-agent coopératif. 14èmes Journées Planification, la Décision et l'Apprentissage pour la conduite de systèmes (JFPDA 2019 @ PFIA), IRIT; AFIA, Jul 2019, Toulouse, France. hal-03613760

HAL Id: hal-03613760

<https://hal.science/hal-03613760>

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.

Maillage dynamique pour l'acquisition de grandes couvertures par système multi-agent coopératif

Timothée Jammot¹ Elsy Kaddoum² Serge Rainjonneau¹ Mathieu Picard¹ Marie-Pierre Gleizes²

¹ Institut de Recherche Technologique - IRT Saint-Exupéry (*prenom.nom@irt-saintexupery.com*)

² Institut de Recherche en Informatique de Toulouse - IRIT (*prenom.nom@irit.fr*)

Résumé

Dans le cadre de missions d'observation de la Terre, des satellites sont utilisés pour l'acquisition de zones à la surface terrestre. Les grandes couvertures sont des chantiers d'acquisition de zones à grande échelle. Elles nécessitent des constellations de satellites qui réalisent plusieurs passages pendant une longue période d'acquisition. Découper une zone d'intérêt en sous-zones appelées mailles qui peuvent être acquises par les satellites durant leur passages est un problème d'optimisation difficile.

Dans ce papier, nous présentons le système Glimpse basé sur les systèmes multi-agents adaptatifs pour le découpage et le positionnement de mailles sur une grille de sous-zones élémentaires. Les expérimentations menées ainsi que la comparaison à une approche faisant partie de l'état de l'art opérationnel montrent l'adéquation d'une approche décentralisée et dynamique pour la résolution de ce problème.

Mots-clés

Maillage dynamique, systèmes multi-agents adaptatifs, coopération, optimisation, émergence

Abstract

In the context of earth observation missions, satellites are used to acquire areas of the surface of the Earth. Large area coverage missions represent the acquisition of a large-scale zone of interest. These missions require satellite constellations to perform several passes over a long acquisition period. The splitting of a large-scale zone of interest into smaller subzones called meshes that can be acquired by a satellite is a complex optimization problem.

In this paper, we present the Glimpse adaptive multi-agent system for the splitting and positioning of meshes on a grid of elementary subzones. The conducted experimentations and the comparison to a technique used as the operational state of the art underline the adequacy of a decentralized and dynamic approach for the optimization of the large area coverage problem.

Keywords

Dynamic meshing, adaptive multi-agent system, cooperation, optimization, emergence

1 Introduction

Les satellites d'observation en orbite basse ont pour objectif de réaliser des prises de vues de zones d'intérêt à la surface terrestre. Les missions de ces satellites les plus courantes font l'objet de requêtes urgentes sur des zones de petite taille [12, 16]. Ces requêtes concernent souvent des phénomènes temporaires tels que des catastrophes naturelles. Le traitement de ces requêtes peut être assuré par la prise de vue ou acquisition d'une image par un seul satellite et sur une courte période. À l'inverse, les missions dites grandes couvertures concernent des requêtes d'acquisition de zones plus grandes, à l'échelle de pays ou de continents. Les grandes couvertures permettent d'obtenir des images utilisées dans des domaines tels que la cartographie et la surveillance [15]. Ce sont des missions coûteuses en ressources satellite et qui nécessitent des images temporellement proches pour garantir la cohérence des raccordements entre elles. Pour ces raisons, la réalisation d'une grande couverture doit être effectuée en temps et ressources satellites minimaux. La durée nécessaire à un unique satellite pour réaliser une mission de grande couverture est trop importante par rapport aux contraintes temporelles. Un ensemble de satellites doit être utilisé pendant une période plus longue que celle accordée au traitement de requêtes urgentes. Ces satellites peuvent être hétérogènes, dotés de caractéristiques et d'instruments différents, et être opérés par différents centres de planification indépendants. Un enjeu des missions de satellites d'observation actuelles est la coordination de centres de planification pour la bonne résolution de missions de grande couverture par des satellites hétérogènes.

Le partage de la zone d'intérêt d'une grande couverture entre un ensemble de satellites hétérogènes est un problème à la fois géographique et temporel. Pour chaque passage d'un satellite un ensemble de sous-zones

appelées mailles pouvant faire l'objet d'une acquisition doit être défini. Nous définirons le problème des grandes couvertures comme le découpage et la répartition de la zone d'intérêt en mailles attribuées à des satellites pour l'optimisation des temps et ressources satellites de la mission. La technique de maillage couramment réalisée pour la résolution de ce problème sera appelée **maillage statique**. Dans cet article nous proposons une technique innovante pour le découpage et placement des mailles surnommée **maillage dynamique**. Cette approche relâche les contraintes géographiques liées aux mailles et permet un placement plus précis et relatif aux besoins d'acquisition au cours de la grande couverture. Cependant, l'augmentation de l'espace de recherche qui en résulte nécessite l'usage d'algorithmes par méthode approchée pour l'optimisation du problème des grandes couvertures.

La suite de l'article est organisée comme suit. La section 2 présente la formalisation du problème des grandes couvertures ainsi qu'un état de l'art des problèmes similaires et des méthodes d'optimisation utilisées pour les résoudre. La partie 3 présente le fonctionnement du système multi-agent coopératif Glimpse conçu pour résoudre ce problème. Enfin, la partie 4 propose des résultats et une discussion sur la comparaison de l'algorithme Glimpse avec un algorithme état de l'art de maillage statique pour des scénarios simulés de grandes couvertures.

2 Le problème des grandes couvertures

2.1 Description du problème

Le problème des grandes couvertures concerne l'optimisation de l'acquisition d'une **zone d'intérêt** définie par une **requête client** par un ensemble de satellites hétérogènes.

Un **satellite** est un outil d'acquisition opéré par un **centre de planification** suivant une **orbite** polaire. Selon son orbite et la rotation de la terre, le satellite survole des zones terrestres selon des intervalles temporels appelés **passage**. Lors d'un passage donné, une zone géographique appelée **corridor** est accessible par le satellite. La largeur d'un corridor dépend de l'agilité des satellites, soit leurs capacités d'orientation, et de la résolution minimale des images obtenues par acquisition. Les entités géographiques qui interviennent lors d'acquisition de **mailles** sont illustrées dans la figure 1.

Une première phase en amont du problème de grande couverture consiste à établir l'ensemble de satellites et leurs passages qui peuvent être utilisés pour acquérir la zone d'intérêt.

Pour chaque passage d'un satellite sur une zone d'intérêt, le processus d'acquisition suit le cycle illustré par la figure

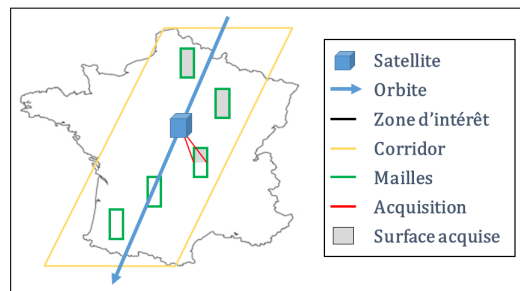


Figure 1: Schéma d'acquisition d'un ensemble de mailles pendant un passage de satellite

2 et constitué des phases suivantes :

1. **Maillage.** Découpage en **mailles** du corridor du passage.
2. **Requête d'acquisition.** Sélection d'un sous ensemble des mailles et envoi d'une requête d'acquisition de ces mailles au centre de planification qui opère le satellite.
3. **Acquisition.** Suite au calcul du plan d'acquisition effectif du satellite par le centre de planification, une réponse contenant les mailles de la requête qui ont été retenues pour acquisition est formulée.
4. **Validation.** Réponse du centre de planification contenant l'état de validation ou de rejet des mailles et les images correspondantes.

La programmation d'une grande couverture est assurée par un opérateur indépendant des centres de planification. Cet opérateur s'occupe du maillage et l'émission des **requêtes d'acquisition** vers les centres de planification qui opèrent les satellites. Notons que des requêtes d'acquisition plus urgentes que celles émises dans le cadre de la grande couverture peuvent être traitées en priorité par les centres de planification. En conséquence, les requêtes d'acquisitions de mailles émises vers les centres de planification ne sont pas garanties de mener à l'acquisition de toutes ces mailles. De plus, l'acquisition réussie d'une maille par un satellite dépend des conditions météorologiques au moment de l'acquisition. L'image obtenue par une acquisition sera jugée nette ou floutée suivant son taux de nébulosité constaté. L'acquisition d'une maille par un centre de planification peut donc échouer en raison de différences entre les prévisions météorologiques effectuées à l'envoi du plan d'acquisition au satellite et les conditions réelles au moment du passage. Pour chaque maille, trois états sont à distinguer :

- **Active** : En attente de planification sur un passage.
- **Acquise** : Incluse dans le plan d'acquisition d'un satellite.
- **Validée** : Acquisition réussie, une image nette de la maille est disponible.

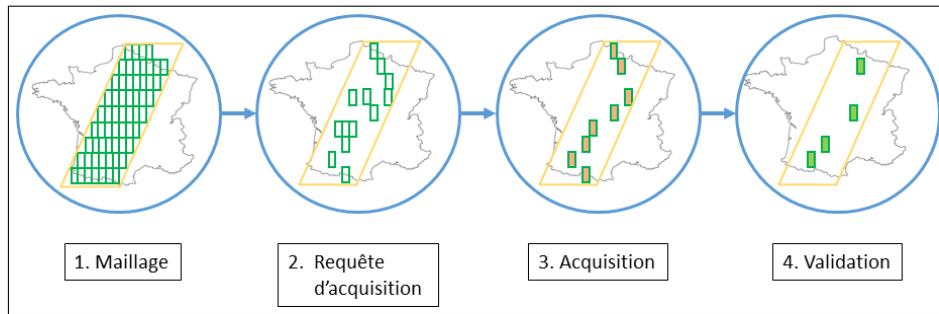


Figure 2: Processus d'acquisition et de validation pour un passage de satellite

Le problème des grandes couvertures consiste à trouver un ensemble de mailles à acquérir pour chaque passage des satellites de la constellation qui minimise à la fois le **temps** et les **ressources satellite** nécessaires pour obtenir des images nettes de la totalité de la zone d'intérêt. Le temps est mesuré par le **nombre de passages** des satellites de la constellation depuis le début de la grande couverture ou l'équivalent en nombre de jours. Les ressources satellite utilisées jusqu'à la complétion de la grande couverture sont mesurées par une métrique appelée **gâchis** définie comme le surplus d'acquisition de surfaces déjà acquises au cours de la grande couverture. Par exemple le gâchis minimal de 0% est atteint si toutes les acquisitions validées de la grande couverture ne concernent que des surfaces qui ont été acquises une seule fois.

2.2 Etat de l'art

Le problème de grande couverture tel que présenté dans la section précédente n'est pas traité dans son ensemble dans le domaine applicatif. Actuellement, le pré-traitement suivant est effectué :

1. découpage de la zone d'intérêt en plusieurs sous-zones,
2. répartition exclusive des sous-zones entre les centres de planification,
3. acquisition par les centres de planification de leur sous-zone respective.

Ce pré-traitement évite de submerger les centres de planification de requêtes d'acquisition sur la totalité de la zone d'intérêt. La coordination entre les centres de planification n'est pas nécessaire car chaque sous-zone est traitée de façon distincte. La répartition entre les centres de planification permet ainsi d'éviter la complexité du problème de grande couverture sur la zone d'intérêt entière. Cette approche implique cependant que certains passages de satellites seront ignorés pour des sous-zones car leur centre de planification s'est vu attribué une autre sous-zone. De nombreuses opportunités d'acquisition sont ignorées pour simplifier le problème et le temps de complétion de la mission augmente fortement en conséquence. Le problème des grandes couvertures considéré en sa totalité, augmente

fortement la combinatoire mais permet la coordination des centres de planification pour une résolution plus rapide et moins coûteuse en ressources satellite.

La planification de plans d'acquisitions pour un ensemble de satellites est un problème connu. [2, 5, 8] proposent des techniques différentes pour la planification. [7] compare 13 techniques d'optimisation pour ce problème et obtient de meilleurs résultats avec un algorithme d'optimisation par recuit simulé. Sur la base de ces travaux, [3] propose un système multi-agent adapté au traitement de nouvelles requêtes d'acquisition pour l'optimisation d'un ensemble de plans d'acquisitions. Ces exemples considèrent cependant les acquisitions des satellites comme des tâches indépendantes à réaliser sur un horizon de planification court. Le problème considéré est celui d'un centre de planification qui a connaissance des plans d'acquisitions des satellites et planifie des acquisitions en conséquence.

Il existe peu de références dans la littérature sur le problème des grandes couvertures dans sa globalité tel que nous souhaitons le considérer dans ce papier. [4] cherche à améliorer le traitement opérationnel, il propose un algorithme glouton pour une répartition dynamique entre les centres de planification de sous-zones obtenues par découpage de la zone d'intérêt. [18] décrit des phases de discrétisation de la zone d'intérêt, découpage en bandes et planification d'acquisition par algorithme génétique, avec de bons résultats obtenus par comparaison à un algorithme glouton. [10] et [14] considèrent un problème de coordination de satellites hétérogènes pour l'observation de catastrophes qui couvrent de grandes zones. Les auteurs proposent respectivement un algorithme par recuit simulé et un algorithme génétique pour l'optimisation du découpage et de l'acquisition de la zone d'intérêt. Le problème géométrique traité consiste à définir un ensemble de bandes qui couvrent la longueur de la zone d'intérêt et qui sont attribuées à des satellites hétérogènes. Ce problème est différent de celui des grandes couvertures car les requêtes d'acquisition sont considérées urgentes et toujours acceptées par les centres de planification, et les échecs d'acquisition dus aux conditions météorologiques sont ignorés.

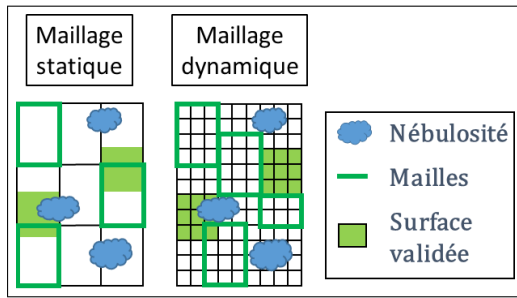


Figure 3: Exemple d'organisation de mailles dans la même sous-partie d'un corridor d'un satellite selon le type de maillage statique vs. dynamique

Dans le cadre opérationnel, un maillage est effectué par les centres de planification une fois qu'une sous-zone de la zone d'intérêt leur a été attribuée. Cette technique, que nous nommerons **maillage statique**, consiste à construire pour chaque passage de satellite, un ensemble de mailles qui peuvent être acquises. Une grille de mailles moyennes qui décrivent un pavage régulier sur le corridor du passage est calculée à la réception de la grande couverture. Les mailles obtenues sont fixes et de taille constante dans un même passage. Cette taille est définie suivant le maximum des capacités d'acquisition du satellite pour une seule maille. Le maillage statique permet de couvrir de mailles une grande partie du corridor de chaque passage. Le pavage régulier de mailles garantit l'absence de chevauchement entre elles et donc une bonne utilisation des ressources satellites. Cependant, le positionnement et les dimensions fixes des mailles impliquent qu'elles ne peuvent pas être adaptées aux conditions d'acquisition de la grande couverture durant la mission. Ces contraintes de placement peuvent entraîner des acquisitions surnuméraires de sous-zones validées. De plus, des sous-parties de corridor peuvent être inaccessibles pour acquisition en raison des contraintes de construction de la grille de mailles par rapport aux bords du corridor.

Nous proposons une nouvelle technique de maillage que nous nommerons **maillage dynamique**. Dans le cadre de ce maillage une grille de sous-zones élémentaires appelées **cellules** est construite sur la zone d'intérêt. Cette discrétisation permet un positionnement plus précis des mailles dans les corridors des passages, et notamment sur leurs bords. La position des mailles et leurs dimensions peuvent également être adaptées sur la grille de cellules pour une meilleure utilisation des ressources satellites. Des sous-parties de corridor validées ou nuageuses peuvent être ignorées en faveur de sous-parties non validées et bénéficiant de meilleure probabilité de validation. Les types de maillage, statique et dynamique, sont illustrés en figure 3.

Le problème de répartition de répartition de mailles sur

une grille de cellules pour chaque passage de satellites est complexe. Un grand nombre d'entités est considéré et la taille de l'espace de recherche est lié aux placements et dimensions possibles des mailles dans l'ensemble des passages. Nous avons choisi d'implémenter un système multi-agent pour l'optimisation du problème des grandes couvertures par maillage dynamique. Le système Glimpse présenté dans cet article est basé sur la théorie AMAS[6]. Les systèmes multi-agents coopératifs ont montré leur efficacité dans le traitement de problèmes d'optimisation à forte combinatoire qui comportent un grand nombre d'entités grâce à l'émergence de fonctions globales de bonne qualité par coopération d'agents distribués aux comportements locaux simples [17]. Le fonctionnement du système Glimpse est présenté section 3.

2.3 Formalisation du problème

Dans cette partie nous proposons une formalisation du problème des grandes couvertures avec discrétisation de la zone d'intérêt en cellules. Étant donné :

Une zone Z sur laquelle est placée une grille de largeur X et de longueur Y de cellules $c_{11}, \dots, c_{ij}, \dots, c_{XY}$, avec i et j les coordonnées géographiques du coin inférieur gauche la cellule c_{ij} .

L'ensemble des cellules $C_{int}^Z = \{(i, j) | c_{ij} \cap Z \neq \emptyset\}$ à l'intérieur ou partiellement à l'intérieur de la zone. Les cellules sont caractérisées par :

- une largeur l et une longueur L en kilomètre.
- Un statut d'acquisition $st(c_{ij}, t) \in \{Active, Acquired, Validated\}$ indiquant respectivement si la cellule c_{ij} est en attente de planification, incluse dans une maille acquise ou incluse dans une maille validée au temps t .

L'ensemble de satellites $S = s_1, \dots, s_k, \dots, s_K$ de largeur d'acquisition minimum $f_k^{min} * l$ et de largeur d'acquisition maximum $f_k^{max} * l$ avec $f_k^{min}, f_k^{max} \in N$; et de longueur d'acquisition minimum $g_k^{min} * L$ et de longueur d'acquisition maximum $g_k^{max} * L$ avec $g_k^{min}, g_k^{max} \in N$.

Des passages P_k du satellite s_k connus jusqu'à un horizon de planification H en nombre de passages, et caractérisés par :

- une date d'occurrence t_{P_k}
- un ensemble de cellules accessibles $C_{P_k} = \{(i, j) | c_{ij} \in Corridor_{P_k}\}$
- un seuil maximal de nombre mailles $|M_{P_k}| < \frac{|C_{P_k}|}{f_k^{max} * g_k^{max}}$ afin d'éviter la surcharge de mailles dans la requête d'acquisition. Ce seuil est défini comme le nombre de mailles de taille maximale suffisant pour couvrir toutes les cellules du corridor du passage.

But. Le but de la résolution est de déterminer par passage un ensemble de mailles $M_{P_k} = (i_0, j_0, f, g)$, avec i_0, j_0 les coordonnées du coin inférieur gauche de la maille et $f_k^{min} \leq f \leq f_k^{max}$ et $g_k^{min} \leq g \leq g_k^{max}$, à inclure dans une requête d'acquisition.

Objectifs. L'objectif principal est la minimisation du temps nécessaire pour réaliser des acquisitions validées qui recouvrent l'intégralité de la zone d'intérêt. Cet objectif se traduit par la validation de toutes les cellules de la zone d'intérêt. La complétion du chantier est atteinte à un moment noté t_{comp} .

La mesure du progrès dans la complétion du chantier est notée $Progress(Z, t) =$

$$\left(\frac{\sum_{i,j|c_{ij} \in C_{int}^Z \wedge st(c_{ij}, t) = Validated} c_{ij}}{\sum_{i,j|c_{ij} \in C_{int}^Z} c_{ij}} \right)$$

avec $Progress(Z, t_{comp}) = 1$.

L'objectif secondaire de l'optimisation est la minimisation du gâchis, soit du surplus d'acquisition de surfaces déjà acquises au cours de la grande couverture. Avec la discrétisation de la zone d'intérêt en cellules une mission sans gâchis peut être représentée comme l'acquisition de toute les cellules une seule fois. On note le gâchis

$$Waste(Z, t) = \frac{Nb_{acq}}{Nb_{C_{acq}}} - 1$$

avec Nb_{acq} le nombre total d'acquisitions de cellules de la zone Z depuis le début du chantier jusqu'à l'instant t , et $Nb_{C_{acq}}$ le nombre de cellules de Z acquises au moins une fois depuis le début du chantier jusqu'à l'instant t . Par exemple, si toutes les cellules de Z ont été acquises une seule fois, $Nb_{acq} = Nb_{C_{acq}}$ et $Waste(Z, t) = 0$.

3 Le système Glimpse

Glimpse compte trois types d'agents : les agents Cellule, Maille et Passage. Dans cette section, nous décrivons les comportements de ces agents, leurs objectifs et leurs interactions.

Le maillage statique couramment utilisé et décrit en section 2.2 est une heuristique de placement des mailles au sein des passages qui présente l'avantage de ne pas autoriser de chevauchements entre mailles. Le maillage dynamique proposé dans Glimpse apporte un degré de liberté supplémentaire aux mailles qui peuvent être placées sur n'importe quelle coordonnée (i, j) appartenant au corridor de leur passage. Le premier objectif des comportements des agents dans Glimpse est de trouver pour chaque agent Maille un placement coopératif prenant en compte la criticité des agents Cellule qui seront acquis avec l'agent Maille.

3.1 L'agent Cellule

Dans Glimpse, la criticité des agents Cellule représente l'importance d'acquisition de la zone couverte par la cel-

lule pour un passage donné. Les criticités de plusieurs cellules peuvent être comparées pour déterminer leur ordre d'importance d'acquisition sur un passage. La comparaison suit un ordre leximin : les critères sont comparés dans un ordre fixe jusqu'à trouver un critère différenciateur qui indique l'agent Cellule le plus critique. La comparaison de critère issus des données du problème implique la définition d'une importance relative de ces données. Dans le cadre de ce travail, l'importance des critères est issue d'analyses d'experts du domaine. La criticité des agents Cellule dans un passage donné est basée sur les critères normalisés suivants :

1. **Validation.** La criticité d'une cellule déjà validée est nulle.
2. **Probabilité de validation.** Probabilité de validation de la cellule si acquise dans ce passage. Pour des cellules acquises dans des passages antérieurs ce critère est pondéré par sa probabilité de validation dans ces passages.
3. **Probabilité de validation future.** Probabilité de validation de la cellule dans les passages restants sur l'horizon de planification pour lesquels le corridor couvre cette cellule.
4. **Proximité de cellules validées.** Ratio de cellules voisines déjà validées sur des passages antérieurs.
5. **Passages restants.** Ratio de passages restants sur l'horizon de planification pour lesquels le corridor couvre cette cellule.

Les agents Cellule ont pour objectif d'être acquis puis validés sur n'importe quel passage sur l'horizon de planification qui contient la cellule dans son corridor. Le comportement d'un agent Cellule se base sur ses connaissances locales, notamment les agents Maille visibles par l'agent Cellule dans chaque passage pour maximiser la probabilité d'acquisition de la cellule. La visibilité des agents Cellule est limitée aux mailles qui la recouvre ou directement adjacente sur la grille de cellules. Le comportement des agents Cellule suit l'algorithme 1.

algorithm 1 Comportement agent Cellule

```

for each  $P_k$  connu do
  tri des mailles  $M_{P_k}$  connues par ordre de criticité
  for each  $m_{P_k} \in M_{P_k}$  triées do
    if cellule non adhéree et aucune demande
      d'adhésion then
      requête d'adhésion à la maille  $m_{P_k}$ 
    end if
  end for
end for

```

La résolution de l'insatisfaction des agents Cellule se traduit par une notion d'adhésion à des mailles sur les passages connus. L'adhésion d'une cellule à une maille décrit

la volonté de faire partie des cellules couvertes par cette maille dans le passage correspondant. Une cellule ne peut adhérer qu'à une seule maille par passage, soit la maille qu'elle préfère et qui a accepté sa requête d'adhésion parmi les mailles qu'elle connaît dans ce passage. L'objectif de l'adhésion est de promouvoir la répartition des mailles sur la surface d'un même passage dans son corridor. Cette répartition est nécessaire en maillage dynamique pour éviter le regroupement et chevauchement des mailles d'un même passage sur les cellules les plus critiques dans ce passage. Les agents Cellule choisissent la maille à laquelle ils préfèrent adhérer suivant un tri par criticité des agents Maille visibles dans leur voisinage. La **criticité des agents Maille** comprend les criticités des agents Cellule qui adhèrent à elle triées par ordre décroissant.

3.2 L'agent Maille

Les agents Maille ont pour objectif d'être acquises puis validées dans leur passage. Pour ce faire, elles utilisent les requêtes d'adhésion des agents Cellule dans leur voisinage pour altérer leur géométrie et leur placement dans le corridor de façon à maximiser leur probabilité d'acquisition et de validation. Leur comportement est décrit dans l'algorithme 2.

algorithm 2 Comportement agent Maille

```

for each requête d'adhésion de  $c_{ij}$  do
  if criticité des cellules ayant demandé l'adhésion à la maille est supérieure à la criticité des cellules en adhésion à la maille then
    inclusion de la cellule  $c_{ij}$ 
    acceptation de la requête d'adhésion de  $c_{ij}$ 
  else
    rejet de la requête d'adhésion de  $c_{ij}$ 
  end if
  réduction des bords sans adhésion
end for

```

Une requête d'adhésion traitée par un agent Maille peut faire l'objet de trois types d'altération de sa géométrie sur la grille de cellules :

- **Déplacement.** Les coordonnées d'origine (i_0, j_0) de la maille sont modifiées.
- **Extension.** Le facteur f de largeur ou le facteur g de longueur de la maille est étendu dans un sens donné.
- **Réduction.** Le facteur f de largeur ou le facteur g de longueur de la maille est réduit dans un sens donné.

L'inclusion d'une cellule fait l'objet d'une extension de la maille lorsque la maille n'a pas encore atteint sa largeur maximale f_k^{max} ou longueur maximale g_k^{max} en nombre de cellules, selon la direction relative de la cellule qui émet la requête d'adhésion la plus critique. Lorsque la largeur ou longueur maximale est atteinte un déplacement peut être effectué. Ce déplacement causerait l'inclusion

à la maille d'un ensemble de cellules et l'exclusion de cellules sur le bord opposé au sens du déplacement. Une comparaison entre les criticités des cellules à inclure suite au déplacement potentiel et celles des cellules à exclure est simulée au sein de l'agent Maille. Le déplacement est effectué si la criticité des cellules qui adhéreront à la maille suite au déplacement est supérieure car cette altération augmente la criticité de la maille elle-même. La géométrie libre des mailles permet aussi la réduction des bords de la maille qui ne comprennent pas de cellules en adhésion. Les réductions des bords sans adhésion diminuent les chevauchements entre mailles de mêmes passages et tendent à répartir les mailles suivant un pavage régulier. Ce pavage diminue le gâchis au sein d'un passage qui est dû à l'acquisition surnuméraire de cellules comprises dans plusieurs mailles du passage.

3.3 L'agent Passage

Les comportements des agents Cellule et Maille ont pour objectif de placer les mailles dans leur environnement local pour maximiser leur probabilité d'être acquises et validées. Les altérations et déplacements des mailles sont basés sur leur voisinage de cellules qui émettent des requêtes d'adhésion. Ces comportements ne suffisent pas pour garantir la couverture des cellules les plus critiques à l'échelle du corridor d'un passage. Des sous-parties du corridor peuvent ainsi piéger les mailles dans un optimum de criticité local. La création de mailles par les agents Passage dans leur corridor correspond à un saut dans l'espace de recherche similaire à une augmentation de température d'une optimisation par recuit simulé[11], ou une mutation d'un algorithme génétique[13].

Les agents Passage ont pour objectif de maximiser la couverture des cellules les plus critiques au sein du corridor d'un passage. Leur comportement est lié au placement des mailles placées sur le corridor et doit permettre aux cellules les plus critiques d'être couvertes de façon dynamique, par exemple suite à une mise à jour des données météorologiques qui vient modifier la criticité des cellules. Le comportement de l'agent Passage est décrit dans l'algorithme 3.

Afin de laisser le placement local des mailles s'effectuer par les interactions entre agents Cellule et Maille, le comportement des agents Passage n'est effectué qu'après la stabilisation des mailles du passage. Les mailles d'un passage sont stabilisées quand toutes les cellules couvertes par des mailles sont en adhésion à une maille du passage, et suite à un délai suffisant pour garantir qu'aucun message, notamment des requêtes d'adhésion, n'est en transit ou en cours de traitement. Suite à la stabilisation des mailles, les cellules appartenant au corridor du passage sont parcourues jusqu'à trouver une cellule non couvertes ayant une criticité supérieure au point de référence de criticité de la première maille candidate au remplacement,

algorithm 3 Comportement agent Passage

```
if stabilisation des mailles  $M_{P_k}$  then
  for each cellule  $c_{ij} \in C_{P_k}$  do
    if  $c_{ij}$  non couverte et de forte criticité relative aux
    cellules couvertes then
      création d'un maille  $m = (i, j, 1, 1)$ 
      if seuil maximal de nombre de mailles dépassé
      then
        suppression de la maille la moins critique
      end if
    end if
  end for
end if
```

soit la cellule la plus critique de la maille la moins critique. Le remplacement d'une maille est nécessaire pour garantir un nombre de mailles dans le passage inférieur au seuil maximal défini comme le nombre de mailles suffisant pour couvrir entièrement le corridor du passage. Ce seuil maximal a pour objectif d'éviter la surcharge de requêtes d'acquisition de mailles au centre de planification.

4 Résultats et discussion

Cette section présente l'évaluation et les performances du système Glimpse pour l'optimisation de problèmes de grandes couvertures simulés. Les résultats d'expérimentations sont suivis par une discussion et nos perspectives d'amélioration du système.

4.1 Méthodologie d'expérimentation

Scénarios de mission. Les scénarios de mission considérés comportent les entrées nécessaires au traitement du problème par le système Glimpse, soit les éléments suivants :

- La requête de programmation client contenant :
 - La zone d'intérêt à acquérir,
 - Les centres de planification,
 - Les satellites et leurs caractéristiques,
 - Les passages des satellites sur la zone.
- Les données météorologiques pour les cellules de chaque passage,
- La taille des cellules de la grille,
- La taille de l'horizon de planification.

Modules de simulation. Le processus d'acquisition décrit en section 2 (figure 2) suppose l'action d'entités extérieures à la résolution du problème, telles que les centres de planification. La planification des mailles à acquérir par un centre de planification par exemple est dépendante des autres tâches du satellite qui sont inconnues au système de programmation de la grande couverture. Pour les besoins

d'expérimentation nous avons simulé les comportements des centres de planification par des modules de décision relatifs aux phases d'acquisition et de validation.

La phase d'acquisition comporte une sélection de mailles qui ont fait l'objet de requêtes d'acquisition à inclure au plan d'acquisition du satellite. Cette planification est effectuée par un algorithme de type glouton hiérarchique[1, 9] qui représente l'état de l'art opérationnel dans le domaine de la planification d'acquisitions de satellite à court-terme. Le comportement de cet algorithme consiste à trier les mailles du passage par ordre d'importance, soit ici par criticité, et de sélectionner des mailles jusqu'à atteindre une limite fixe de capacité d'acquisition du satellite. Pour la phase de validation, des mailles sont sélectionnées en quantité relative à la probabilité de validation moyenne des mailles du passages et dans l'ordre décroissant de criticité.

Éléments de comparaison. Comme décrit en section 2.2, l'état de l'art pour optimisation du problème des grandes couvertures consiste à sous-diviser le problème et le répartir entre centres de planifications distincts. Pour évaluer notre approche sur la résolution globale du problème nous avons choisi de comparer une approche basée sur un maillage statique; et les mailles obtenues par le système Glimpse, placées par maillage dynamique sur une grille de cellules qui couvre la zone d'intérêt. De plus nous considérons des scénarios de mission dont les mailles pouvant être acquises sont caractérisées par leurs dimensions. Des scénarios seront décrits comme comportant des mailles homogènes si les satellites du scénario acquièrent des mailles de mêmes dimensions, et hétérogènes sinon.

4.2 Expérimentations

Pour chaque expérimentation les métriques observées sont par ordre d'importance :

1. Le temps de complétion à 95% de la grande couverture, en nombre de passage.
2. Le gâchis, surplus d'acquisition de surfaces déjà acquises au cours de la grande couverture, en pourcentage.

La progression de la résolution au cours du temps est représentée par la validation successive de passage. La courbe de progression des métriques ainsi que leur mesure finale est présentée.

La première expérimentation propose un scénario de mission avec les caractéristiques suivantes :

- L'Australie en zone d'intérêt,
- Des cellules de bord 30km,
- 4 satellites à **mailles homogènes** de largeur 60km et longueur 120km,
- Un horizon de planification de 10 passages.

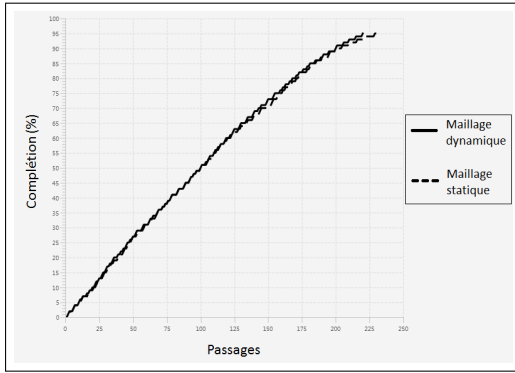


Figure 4: Évolution du taux de complétion par type de maillage pour un scénario aux mailles homogènes

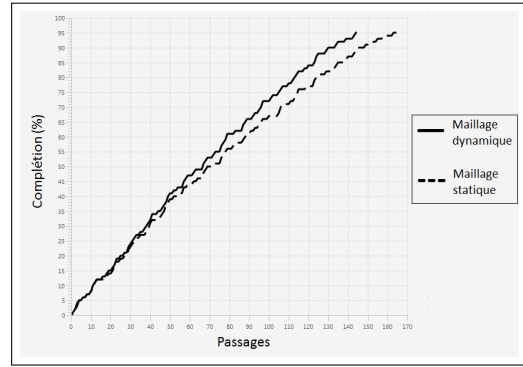


Figure 7: Évolution du taux de complétion par type de maillage pour un scénario aux mailles hétérogènes

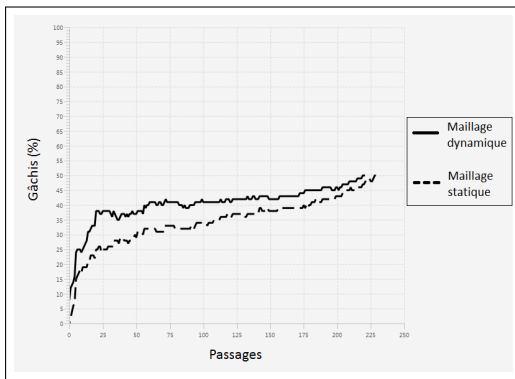


Figure 5: Évolution du gâchis par type de maillage pour un scénario aux mailles homogènes

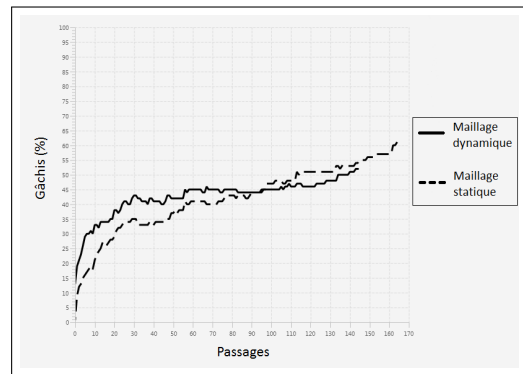


Figure 8: Évolution du gâchis par type de maillage pour un scénario aux mailles hétérogènes

Les courbes d'évolution du taux de complétion et du gâchis au cours de la résolution de la grande couverture sont présentées respectivement en figures 4 et 5. Le tableau de la figure 6 contient les mesures finales pour ces métriques à 95% de complétion.

La deuxième expérimentation propose de réutiliser ce scénario en modifiant les dimensions de mailles acquérables par les satellites afin de permettre la planification de **mailles hétérogènes**. Les 4 satellites de ce nouveau scénario peuvent respectivement acquérir des mailles qui ont les dimensions suivantes : 60km/90km, 60km/120km, 90km/150km et 90km/180km.

Les courbes d'évolution, du gâchis et leurs mesures finales sont respectivement présentées en figures 7, 8 et 9.

	Passages	Gâchis(%)
Maillage dynamique	222	50
Maillage statique	227	50

Figure 6: Nombre de passages planifiés et gâchis à 95% de complétion de la grande couverture

4.3 Discussion

Les résultats obtenus montrent les avantages du maillage dynamique obtenu par Glimpse par rapport à un maillage statique traditionnel. Pour des scénarios dont les satellites acquièrent des mailles homogènes tel que présenté dans la première expérimentation, nous constatons une diminution du temps nécessaire en nombre de passage nécessaire pour atteindre 95% de complétion. Cette réduction peut s'expliquer par la précision du maillage dynamique qui permet à Glimpse de placer des mailles qui n'appartenaient pas à la grille pré-construite du maillage statique, notamment sur les bords des corridors où les contraintes de placement sont plus fortes. L'évolution du gâchis montre que l'autorisation de chevauchements entre mailles du maillage dynamique entraîne une augmentation du gâchis en début

	Passages	Gâchis(%)
Maillage dynamique	144	52
Maillage statique	163	61

Figure 9: Nombre de passages planifiés et gâchis à 95% de complétion de la grande couverture

de mission par rapport au maillage statique. Ces chevauchements n'existent pas en maillage statique dans le cas de mailles homogènes. En effet, dans ce cas, la grille pré-construite par le maillage statique est en superposition sur tous les passages du scénario. Le seul gâchis observé pour le maillage statique de mailles homogènes provient donc de la ré-acquisition de mailles identiques sur des passages suites à des rejets sur des passages antérieurs. Le taux de rejet des acquisitions en maillage statique est plus important qu'en maillage dynamique car les mailles sont moins bien placées dans les corridors des passages. Ce taux de rejet du maillage statique élevé compense les chevauchements du maillage dynamique, le gâchis observé à la fin de la mission est identique pour les deux approches dans le cas de mailles homogènes.

La répartition de mailles homogènes est le meilleur cas de figure du maillage statique grâce à la superposition de toutes les mailles entre passages. Dans le cadre opérationnel des grandes couvertures, les centres de planification opèrent des satellites différents. La répartition de mailles hétérogènes est donc plus proche des conditions d'expérimentation opérationnelles. Les résultats obtenus dans la deuxième expérimentation qui comporte des mailles hétérogènes montrent une augmentation du gâchis obtenu dans le cas du maillage statique. Les grilles pré-construites par le maillage statique présentent en effet des chevauchements entre mailles dus aux dimensions variables entre satellites. Des cellules validées dans des passages antérieures sont donc acquises à nouveau car les mailles ne peuvent pas être re-dimensionnées. De plus, l'acquisition de cellules validées diminue le nombre de cellules non validées acquises dans un passage par limite de capacité d'acquisition du satellite, ce qui retarde le temps de complétion total. Dans le cas du maillage dynamique effectué par le système Glimpse le gâchis reste constant par rapport à la première expérimentation car les mailles peuvent altérer leur géométrie pour éviter de recouvrir des cellules déjà validées. En évitant ces cellules, les mailles maximisent le nombre de cellules pouvant être acquises dans la limite de capacité d'acquisition du satellite. Le temps de complétion et le gâchis obtenus par maillage dynamique avec Glimpse sont équivalents ou meilleurs à ceux obtenus par maillage statique pour des scénarios à mailles homogènes, et meilleurs pour des scénarios à mailles hétérogènes. Ces résultats montrent l'adéquation de l'approche dynamique proposée pour l'optimisation du problème des grandes couvertures.

4.4 Perspectives

Le traitement actuel du problème par Glimpse est fortement dépendant de la valeur de criticité des agents Cellule. Cette criticité est calculée en utilisant des critères identifiés par des experts du domaine. Nos prochaines études vont venir remplacer le tri par leximin présent dans le calcul de criticité des agents de Glimpse par des

méthodes d'évaluation plus performantes. Nous souhaitons améliorer l'estimation de la criticité en intégrant des techniques d'apprentissage par renforcement aux agents. Une évaluation plus précise de la probabilité d'acquisition des cellules aidera la répartition des mailles entre passages pour maximiser les probabilités d'acquisitions réussies sur l'horizon de planification. Le seuil du nombre de mailles envoyées aux centres de planification peut également faire l'objet d'une optimisation. En observant le nombre de mailles intégrées au plan du satellite pour des requêtes d'acquisition, un nombre de mailles mieux adapté aux contraintes du centre de planification sera estimé pour les passages suivants.

De plus, les capacités du maillage dynamique permettent de traiter le problème des grandes couvertures avec une validation dite partielle. Ce type de validation ne concerne plus les mailles mais les cellules. En validation partielle, la validation d'une cellule est basée sur la netteté de la sous-zone lui correspondant sur l'image obtenue. En conséquence, les images partiellement floues obtenues ne sont plus entièrement rejetées mais en partie validées de même que les cellules relatives aux sous-parties nettes. Des cellules isolées peuvent exister suite à leur rejet individuel, mais le maillage dynamique permet de créer des mailles de tailles variables adaptées à l'acquisition d'un petit nombre de cellules en utilisant des ressources satellites minimales. La validation partielle permet un traitement plus ciblé des images qui diminue le besoin de réacquies des sous-zones de la zone d'intérêt et améliore le temps de complétion.

Enfin, le problème sera étendu pour améliorer son réalisme et ajouter des contraintes opérationnelles. Les différences entre conditions météorologiques prévues et réelles ainsi que les profils d'occupation des plans des satellites seront modélisés. Les temps de manoeuvres de rotation du satellite pour l'orienter vers les mailles à acquies seront estimés et pris en compte dans le placement des mailles en maillage dynamique. La montée à l'échelle sera également évaluée. Le système Glimpse peut actuellement traiter un problème qui nécessite des interactions locales entre des milliers d'agents tels que ceux présentés en section 4.2. Des scénarios à l'échelle de pays plus grand et à taille de cellule plus petite seront construits. La diminution de la taille des cellules permettra de placer les mailles dynamiques de façon plus précises sur les cellules de forte criticité dans les passages.

5 Conclusion

Cet article présente notre méthode d'optimisation du problème des grandes couvertures basée sur le maillage dynamique par système multi-agent coopératif. La méthode de résolution dans l'industrie se base sur l'expertise humaine pour sous-diviser le problème afin de ne pas avoir à traiter son aspect combinatoire. Nous avons implémenté

un système multi-agent coopératif nommé Glimpse en appliquant les méthodes ADELFE et AMAS4Opt. Afin d'évaluer Glimpse nous avons comparé le maillage dynamique employé au maillage statique couramment utilisé en contexte opérationnel. Les résultats que nous avons obtenu sur des scénarios de grandes couvertures simulés dans le cas général de mailles à dimensions hétérogènes montrent que le maillage dynamique permet d'atteindre 95% de complétion de la requête sur une période plus courte tout en diminuant le gâchis des ressources satellites par rapport au maillage statique.

Nos futurs travaux vont venir ajouter des données inconnues au problème telles que la probabilité de réalisation de valeurs de météo prédites et la probabilité de réponse positive à une requête d'acquisition de maille par un centre de planification. Ces données sont difficiles à modéliser et nous envisageons d'intégrer des techniques d'apprentissage par renforcement aux agents du système Glimpse afin de les estimer. Cette fusion aura pour objectif de mieux calculer l'importance d'acquisition de cellules sur des passages spécifiques dans un contexte incertain.

References

- [1] J.-C. Agn, N. Bataille, D. Blumstein, E. Bensana, and G. Verfaillie. Exact and approximate methods for the daily management of an earth observation satellite. *RAIRO-Oper. Res.*, 41(4):381–398, 2007.
- [2] E. Bensana, M. Lemaitre, and G. Verfaillie. Earth observation satellite management. *Constraints*, 4(3):293–299, 1999.
- [3] 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.
- [4] W. Fei and L. Zhi. Research on the optimization method of dynamic partitioning area target for earth observation satellites. *Procedia Engineering*, 15:3159–3163, 2011.
- [5] J. Frank, A. Jonsson, R. Morris, D.-E. Smith, and P. Norvig. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites. 2001.
- [6] M.-P. Gleizes. Self-adaptive complex systems. In *European Workshop on Multi-Agent Systems*, pages 114–128. Springer, 2011.
- [7] A. Globus, J. Crawford, J. Lohn, and A. Pryor. A comparison of techniques for scheduling earth observing satellites. In *AAAI*, pages 836–843, 2004.
- [8] R. Grasset-Bourdel. *Planification dynamique et réactive pour des satellites agiles d'observation de la Terre*. PhD thesis, Ph. D. thesis, Onera, 2011.
- [9] N. G. Hall and M. J. Magazine. Maximizing the value of a space mission. *European journal of operational research*, 78(2):224–241, 1994.
- [10] N. Holvoet, W. Vongsantivanich, S. Chaimatanan, and D. Delahaye. Mission planning for a non-homogeneous earth observation satellite constellation for disaster response. In *SpaceOps 2018*, 2018.
- [11] S. Kirkpatrick, C.-D. Gelatt, and M.-P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598):671–680, 1983.
- [12] 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.
- [13] J. McCall. Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184(1):205–222, 2005.
- [14] XN Niu, H Tang, and LX Wu. Multi-satellite observation scheduling for large area disaster emergency response. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(3), 2018.
- [15] D. W. Rhind and DR F. Taylor. *Cartography Past, Present and Future: A Festschrift for FJ Ormeling*. Elsevier, 2013.
- [16] 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, 2015.
- [17] N. Verstaevel. *Self-organization of robotic devices through demonstrations*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2016.
- [18] Y. Xu, X. Liu, R. He, Y. Chen, and Y. Chen. Multi-objective satellite scheduling approach for very large areal observation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 435, page 012037. IOP Publishing, 2018.