

# Découpage de grandes zones pour l'observation de la Terre à l'aide de plusieurs constellations de satellites

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

<sup>1</sup> ONERA/DTIS, Université de Toulouse

{cedric.pralet, jean-loup.farges, gauthier.picard, filippo.perotto}@onera.fr

<sup>2</sup> Airbus Defence and Space, Toulouse

{jonathan.guerra, cyrille.de-lussy}@airbus.com

**Mots-clés** : *Découpage de surfaces, allocation, observation de grandes zones, satellites.*

## 1 Contexte

Dans ce travail, on considère une requête d'observation d'une grande zone à la surface de la Terre, couvrant typiquement plusieurs milliers ou dizaines de milliers de  $\text{km}^2$ , à l'aide de satellites capables de réaliser des prises de vue sur des mailles élémentaires couvrant chacune quelques dizaines de  $\text{km}^2$ . Pour cela, l'approche classique consiste à utiliser un seul *système d'observation* composé d'un ou plusieurs satellites en orbite basse qui tournent autour de la Terre. Afin d'accélérer de manière significative l'observation d'une grande zone, une approche envisagée consiste à utiliser non pas un mais plusieurs systèmes d'observation. Il en résulte un problème de découpage de la grande zone d'intérêt en un ensemble composé d'autant de sous-zones qu'il y a de systèmes à disposition. Ces systèmes pourront ensuite avancer en parallèle sur leur chantier d'observation, sachant qu'ils disposent chacun de leur propre outil de planification (pour calculer les plans d'observation des mailles par les satellites du système en fonction de toutes les requêtes reçues jusqu'alors) et qu'ils n'utilisent pas forcément le même pas de discrétisation et la même orientation pour leur maillage. Dans la littérature, on trouve diverses contributions sur l'observation de grandes zones [1, 2, 3, 4], cependant ces contributions ne considèrent pas plusieurs aspects qui sont pourtant très dimensionnants (charge courante de chaque système, prévisions de couverture nuageuse, possibilité de réoptimisation du découpage...), d'où le besoin de nouveaux travaux.

## 2 Problème de découpage spatial

Dans une première version du problème, on considère un découpage dit *purement spatial*. Dans ce problème, on discrétise la zone à observer en introduisant un ensemble de points  $\mathcal{P}$  couvrables par différentes mailles de l'ensemble  $\mathcal{S}$  des systèmes à disposition. On considère de plus pour chaque système  $i \in \mathcal{S}$  une vitesse d'acquisition moyenne  $Speed_i$  exprimée en nombre de mailles couvrables par unité de temps. On introduit alors des variables de décision  $x_{ij} \in \{0,1\}$  spécifiant si la maille numéro  $j$  associée au système  $i$  est sélectionnée, c'est-à-dire si elle fait partie de la sous-zone allouée au système  $i$ . La contrainte à satisfaire est que chaque point  $p \in \mathcal{P}$  doit être couvert par au moins une maille sélectionnée. De plus, en notant  $\mathcal{M}_i$  l'ensemble des mailles candidates pour le système  $i$ , la charge de ce système est définie par  $y_i = \sum_{j \in \mathcal{M}_i} x_{ij} / Speed_i$ . L'objectif prioritaire est de minimiser la charge maximum obtenue sur un système ( $\max_{i \in \mathcal{S}} y_i$ ) et l'objectif secondaire est de minimiser la charge totale qui pèse sur les systèmes ( $\sum_{i \in \mathcal{S}} y_i$ ), ce qui conduit indirectement à minimiser les chevauchements entre les mailles sélectionnées. Ces spécifications sont ensuite exprimées en Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE). La figure 1a donne un exemple de découpage obtenu en quelques secondes avec un solveur PLNE pour un problème simplifié contenant 4 systèmes d'observation. Dans le modèle, il est aussi possible d'ajouter une composante pour favoriser les solutions qui minimisent l'éparpillement des mailles allouées à un système. La figure 1b fournit un découpage obtenu avec cette spécification additionnelle.

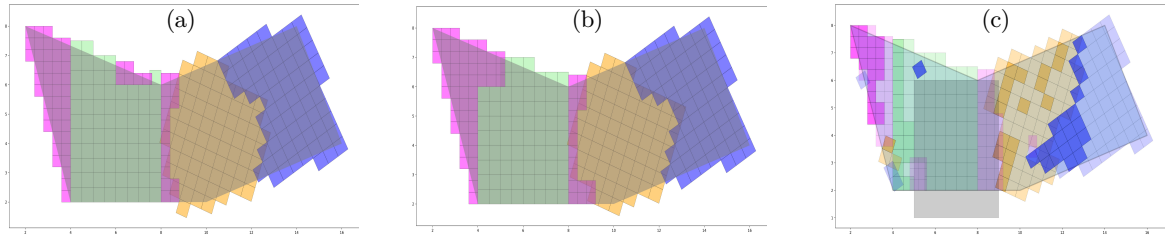


FIG. 1 – Découpage d’une grande zone (polygone gris) entre 4 systèmes (une couleur pour les mailles allouées à chaque système) : (a) modèle purement spatial, (b) modèle purement spatial favorisant l’allocation de mailles connexes, (c) modèle spatio-temporel (mise en évidence des mailles sélectionnées sur la journée à venir et zone couverte par des nuages représentée en gris foncé).

### 3 Problème de découpage spatio-temporel

Le modèle purement spatial n’exploite pas des informations telles que les dates des prochains survols des mailles par les satellites ou les prévisions de couverture nuageuse qui ont pourtant un impact déterminant sur la réussite des prises de vue. Ainsi, si la sous-zone allouée à un système  $i$  présente une forte couverture nuageuse sur la journée à venir, le système  $i$  n’aura en réalité aucune charge utile sur le court terme alors qu’il aurait pu alléger la charge des autres systèmes. Pour corriger cela, on propose un modèle dit *spatio-temporel* impliquant un ensemble  $\Sigma$  qui contient les passages de satellites au-dessus de la zone d’intérêt sur un horizon restreint (par exemple une journée), avec pour chaque passage  $\sigma \in \Sigma$  associé à un satellite du système  $i$  et pour chaque point  $p \in \mathcal{P}$  une récompense  $R_{i\sigma p}$  collectée en observant  $p$  lors du passage  $\sigma$ . Cette notion de récompense est suffisamment souple pour couvrir des caractéristiques comme la météo prévue sur  $p$  lors du passage  $\sigma$  ou la difficulté d’observation du point  $p$  étant donné des archives météo. Dans le modèle complet, le critère d’optimisation est alors une somme pondérée agrégeant (1) le profit collecté avec les passages de satellites sur l’horizon restreint (via les récompenses  $R_{i\sigma p}$ ), et (2) la charge pesant sur les différents systèmes au-delà de l’horizon restreint (reprise du modèle purement spatial). Le problème obtenu est à nouveau exprimé en PLNE, mais cette fois les temps de calcul sont beaucoup plus longs. La figure 1c donne un exemple de solution obtenue en 1h de calcul pour un problème faisant intervenir, pour chacun des 4 systèmes impliqués, de 2 à 4 survols de la zone sur l’horizon restreint considéré.

### 4 Perspectives

Les résultats obtenus montrent que le problème de découpage spatio-temporel est beaucoup plus combinatoire que le problème de découpage spatial. L’utilisation de méthodes incomplètes est à l’étude, de même que l’utilisation de techniques d’apprentissage pour adapter au mieux certaines données d’entrée du problème (vitesse d’acquisition de chaque système, récompense associée à l’observation d’un point...). Ces travaux sont réalisés dans le projet européen DOMINO-E (<https://domino-e.eu/>).

### Références

- [1] X. Niu , H.Tang , 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, 2018.
- [2] A. Maillard, S. Chien, C. Wells. Planning the Coverage of Solar System Bodies Under Geometric Constraints. *Journal of Aerospace Information Systems*, 18(5), 2021.
- [3] C. Lenzen , M. Dauth , T. Fruth, A. Petrak , E. Gross. Planning Area Coverage with Low Priority. *International Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 2021.
- [4] M. Barkaoui, J. Berger A new hybrid genetic algorithm for the collection scheduling problem for a satellite constellation. *Journal of the Operational Research Society*, 71(9), 2020.