

Optimisation d'un réseau de stations sols optiques maximisant les données transférées par un satellite héliosynchrone

Mikaël Capelle^{1,2}, Marie-José Huguet², Nicolas Jozefowicz², Xavier Olive¹

¹ Thales Alenia Space France, Toulouse, France
prenom.nom@thalesaleniaspace.com

² LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, INSA, Toulouse, France
{mcapelle, huguet, njozefow}@laas.fr

Mots-clés : *Liaisons optiques en espace libre, Programmation Linéaire Mixte, Approche hiérarchique, Programmation dynamique*

1 Introduction

Face à l'augmentation des volumes de données acquises par les systèmes spatiaux d'observation de la Terre, il est aujourd'hui nécessaire de considérer des technologies de communication pouvant accélérer le transfert des données vers le sol. Parmi ces technologies, les liaisons optiques en espace libre offrent des débits utiles d'ordres de grandeur supérieurs aux liaisons de type radio-fréquence (RF) actuelles. Contrairement à l'utilisation de celles-ci, l'utilisation de liaisons optiques implique la prise en compte de contraintes atmosphériques, en particulier liées à la couverture nuageuse, c'est pourquoi il est nécessaire d'établir un réseau de stations sols prenant en compte les contraintes orbitales et atmosphériques.

Nous nous intéressons au problème de l'optimisation d'un réseau de stations sols pour un satellite héliosynchrone. Contrairement aux méthodes actuelles utilisant des données statistiques de couvertures nuageuses ([1] [2]) ou des outils de simulations ([3]), nous proposons une solution basée sur une simplification du modèle de visibilité entre le satellite et les stations sols, en utilisant des données de couverture nuageuse archivées.

Nous proposons deux méthodes pour résoudre ce problème simplifié : D'abord une modélisation en programme linéaire mixte, puis une approche hiérarchique basée sur une énumération des réseaux de stations possibles et sur un algorithme de programmation dynamique pour l'affectation des fenêtres de visibilité.

2 Définition du problème ciblé et méthodologie de résolution

Nous considérons un satellite défilant et un ensemble de stations $\mathcal{L} = 1 \dots N$, l'objectif du problème est de maximiser le pourcentage de données acquises transférées au sol, ou de minimiser les pertes (dues à la capacité finie du buffer à bord), en choisissant un sous-ensemble optimal de stations $\mathcal{L}^* \subseteq \mathcal{L}$ (sous contrainte $\text{coût}(\mathcal{L}^*) \leq K$) tout en respectant les contraintes concernant les conflits entre les fenêtres de visibilité et le buffer à bord. Notre horizon de temps est découpé en créneaux de durée fixe (une heure) et au début de chacun de ces créneaux s le satellite acquière un volume de donnée a^s . Durant chaque créneau s , un ensemble de stations $\mathcal{L}^s \subseteq \mathcal{L}$ est visible depuis le satellite, et il est possible de transférer un volume q_i^s vers chacune de ces stations. Afin de simplifier le problème initial, nous considérons que ce volume peut être transféré instantanément au début de la fenêtre de visibilité et que sa valeur dépend de la longueur de la fenêtre et de la couverture nuageuse au dessus de la station au début de la fenêtre. Pour des questions d'agilité du satellite, et car le satellite ne peut gérer plusieurs communications simultanées, il n'est pas possible d'utiliser toutes les stations visibles durant chaque créneau (certaines fenêtres de visibilité sont en *conflict*).

Nous proposons d’abord un programme linéaire mixte utilisant des variables binaires pour le choix des stations y_i et des fenêtres x_i^s , avec des contraintes standard (e.g. $x_i^s \leq y_i$ ou $x_i^s + x_i^s \leq 1$), ainsi que des variables modélisant les volumes de données dans le buffer b^s et perdus l^s durant les créneaux, avec des contraintes liants les volumes d’un créneau à l’autre et prenant en compte les volumes descendus vers les stations choisies, par exemple :

$$b^s + l^s = \max \left(0, b^{s-1} + a^s - \sum_{i \in \mathcal{L}^s} x_i^s q_i^s \right), \quad s \in \mathcal{S}$$

Ce modèle n’étant pas capable de résoudre des instances sur des horizons de temps longs (5 an ou plus) pour des ensembles \mathcal{L} de petite taille (e.g. $|\mathcal{L}| = 16$), nous avons développé une approche hiérarchique à deux niveaux dans laquelle :

- Un premier algorithme sélectionne les sous-ensembles de stations $\mathcal{L}' \subseteq \mathcal{L}$ acceptables.
- Un second algorithme sélectionne les fenêtres à utiliser et calcule le volume des pertes.

Les instances réelles contenant peu de stations, nous avons choisi d’utiliser une énumération exhaustive pour le choix des sous-ensemble \mathcal{L}' . En revanche, l’horizon temporel étant très grand, le nombre de fenêtres de visibilité est conséquent, et nous avons donc développé un algorithme de programmation dynamique pour la sélection des fenêtres. Pour un sous-ensemble \mathcal{L}' de stations donné, l’algorithme procède en étendant un arbre de labels dans lequel chaque label correspond au choix d’une fenêtre - chaque conflit entre deux fenêtres crée une nouvelle branche - et en supprimant les branches ne pouvant pas mener à une solution optimale. Bien que cet algorithme de programmation dynamique est une complexité théorique exponentiel, la distribution des fenêtres de visibilité dans les instances réelles (due à l’orbite du satellite) démontre des temps de calcul quasi-linéaires.

3 Résultats et perspectives

Nous testons notre modèle de programmation linéaire mixte ainsi que notre approche hiérarchique sur deux réseaux de stations \mathcal{N}_{11} et \mathcal{N}_{16} composés respectivement de 11 et 16 stations et sur plusieurs horizons de temps (1 an, 5 ans, 21 ans). Les instances sont créées pour un satellite en particulier en utilisant un outil de génération de fenêtres de visibilité. Bien que le modèle linéaire arrive à résoudre de manière optimale les instances sur 1 an et quelques instances sur 5 ans (celles de \mathcal{N}_{11}), l’approche hiérarchique parvient à résoudre toutes les instances et en des temps largement inférieurs à ceux du modèle linéaire.

L’utilisation de cette approche hiérarchique fournissant des résultats très rapidement permet d’analyser l’impact de certains paramètres sur l’objectif final obtenu (taille du buffer à bord, débit utile descendant, volume des acquisitions). Dans le futur, nous espérons arriver à résoudre des instances avec plus de stations en utilisant un algorithme plus adapté (potentiellement non-optimal) pour la sélection des réseaux dans l’approche hiérarchique.

Références

- [1] A. Guérin, F. Lacoste, A. Laurens, J. Berthon, C. Periard, and D. Grimal, “Optimisation of an optical ground stations network,” in *Proceedings 5th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC, ESA-ESTEC)*, 2010.
- [2] F. Lacoste, A. Guérin, A. Laurens, G. Azema, C. Periard, and D. Grimal, “Fso ground network optimization and analysis considering the influence of clouds,” in *Proceedings 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 2746–2750, IEEE, 2011.
- [3] “Optical link study group final report,” Tech. Rep. IOAG.T.OLSG.2012.V1, Interagency Operations Advisory Group (IOAG), Optical Link Study Group (OLSG), June 2012.