

# Ordonnancement des contacts Search And Rescue dans une constellation de satellites de géopositionnement

Christian Artigues<sup>1</sup>      Léonie Gallois<sup>1</sup>      Laurent Houssin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France  
artigues@laas.fr

<sup>2</sup> ISAE SUPAERO, University of Toulouse, Toulouse, France  
laurent.houssin@isae.fr

**Mots-clés :** *constellation de satellites, ordonnancement, programmation en nombres entiers*

## 1 Introduction

Le *Search And Rescue* (SAR) est un service de localisation et d'aide aux personnes en détresse. Il est implémenté dans plusieurs constellations de satellites de géolocalisation récentes telles que GPS, GALILEO ou GLONASS. Cependant, la mise en place de ce service est conditionnée par la bonne gestion des contacts entre les utilisateurs et les satellites d'une part et entre les satellites et les stations (passerelles) au sol d'autre part. La planification des contacts SAR peut être considérée comme un double problème d'affectation avec fenêtres de temps. Plus précisément, il faut associer à chaque utilisateur au moins un et au mieux deux satellites visibles (orbite basse, non géostationnaire) et que ces satellites soient associés à une antenne d'une station au sol (visible par le satellite). L'objectif est alors de définir un ordonnancement des affectations dans le temps tel que, à chaque instant, chaque utilisateur est associé idéalement à deux satellites qui sont eux-mêmes associés à une antenne dans leurs fenêtres de visibilité.

## 2 Optimisation des contacts SAR dans une constellation de satellites

Dans le problème considéré, la constellation est composée de 18, 24 ou 32 satellites suivant les instances. Les sites qui rassemblent les antennes (un site comporte 4 antennes) sont au nombre de 5 et ils sont situés aux endroits suivants : Nouméa, Kourou, Svalbard, Tahiti, Réunion.

L'objectif de ce problème est de fournir une affectation des antennes aux satellites sur un horizon de 10,5 jours en tenant compte des fenêtres de visibilité des satellites par rapport aux sites en maximisant le taux de couverture moyen des utilisateurs.

L'algorithme utilisé actuellement pour la gestion du SAR dans la constellation GALILEO est celui présenté dans [1]. C'est un algorithme glouton qui sélectionne en premier lieu l'affectation des satellites aux sites puis dans un second temps, une affectation plus fine qui correspond à l'association des satellites aux antennes. Cet algorithme a un taux de couverture satisfaisant en pratique mais peut générer beaucoup de handovers (changements d'antennes intempestifs pour un satellite). L'objectif de ce papier est d'améliorer la résolution du problème via une approche de programmation mathématique.

Un modèle de PLNE a été développé visant à pénaliser les handovers, que nous présentons ci-dessous. Le PLNE consiste à affecter des antennes aux satellites sur un intervalle de temps où les visibilité antennes/satellites et utilisateurs/satellites ne changent pas. Les paramètres de ce PLNE sont les suivants :

- La visibilité du satellite  $s$  par l'utilisateur  $u$  sur l'intervalle considéré est donnée par  $t(u, s) \in \{0, 1\}$
- la visibilité d'une antenne  $a$  par un satellite  $s$  dans l'intervalle considéré est  $v(a, s) \in \{0, 1\}$
- l'affectation de l'antenne  $a$  au satellite  $s$  dans l'intervalle précédent est donnée par  $g_1(a, s) \in \{0, 1\}$

Les variables sont les suivantes :

- Le nombre de satellites qui couvrent l'utilisateur  $u$  :  $\tau(u) \in \{0, 1, 2\}$
- L'affectation du satellite  $a$  à l'antenne  $s$  dans l'intervalle considéré  $g(a, s) \in \{0, 1\}$

Les contraintes s'écrivent :

$$g(a, s) \leq v(a, s) \quad \forall(a, s) \quad (1)$$

$$\sum_a g(a, s) \leq 1 \quad \forall(s) \quad (2)$$

$$\sum_s g(a, s) \leq 1 \quad \forall(a) \quad (3)$$

$$\tau(u) \leq 2 \quad \forall u \quad (4)$$

$$\tau(u) \leq \sum_s \sum_a g(s, a) * t(u, s) \quad \forall u \quad (5)$$

La fonction objectif s'exprime comme suit :

$$\max \left( \beta * \sum_u \tau(u) \quad + \quad \alpha * \sum_s \sum_a g(a, s) * g_1(a, s) \right)$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres visant à régler le compromis entre taux de couverture et gestion des handovers ( $g(a, s) * g_1(a, s) = 1$  s'il y a une continuité de connexion entre l'antenne  $a$  et le satellite  $s$ ).

Les contraintes (1) affectent au plus une antenne à tout satellite. Les contraintes (2) précisent qu'une antenne ne peut être connectée qu'à au plus un satellite. Les contraintes (3) bornent le nombre de satellites affectés à un utilisateur à 2 alors que les contraintes (4) indiquent qu'un utilisateur peut être couvert par un satellite s'il est visible par celui-ci et qu'une antenne y est connectée. Le problème peut être montré NP-difficile par réduction de SET COVERING. Notons que le nombre d'utilisateurs peut être très important (plus de 1600 points répartis non uniformément sur la terre) mais du fait de la maximisation et de la contrainte (5), les variables  $\tau(u)$  peuvent être déclarées comme des variables continues et le nombre de variables entières est réduit au nombre de satellites fois le nombre d'antennes (en visibilité). Pour obtenir un planning global, il faut décomposer l'horizon en intervalles où les visibilités sont fixées et exécuter un PLNE pour chacun de ces intervalles. Des intervalles de longueur 600s ont été choisis.

Des instances ont été générées à partir des indications disponibles dans l'article [1] et des données publiques.

Le taux de couverture moyen du modèle présenté est quasiment identique à celui de l'algorithme de l'ESA, soit 99,5% en moyenne (pourcentage du temps où chaque utilisateur est couvert par deux satellites). Cependant le nombre de handovers est nettement inférieur pour notre modèle (546 handovers pour le PLNE contre 23047 pour l'algorithme de l'ESA) ce qui est plus intéressant d'un point de vue pratique. Des méthodes de décompositions sont envisagées pour améliorer encore les résultats et accélérer les temps de calcul.

## Références

- [1] Marco Porretta and Bernhard Kleine Schlarmann and A. Ballereau and Massimo Crisci *A Novel Uplink Scheduling Algorithm for the Galileo System*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2018.