

Gestion de la mission de satellites
d'observation de la terre
Description informelle du problème global

Gérard Verfaillie	Nicolas Bataille
Michel Lemaître	Jean-Michel Lachiver
ONERA, Toulouse	CNES, Toulouse
Gerard.Verfaillie@onera.fr	Nicolas.Bataille@cnes.fr
Michel.Lemaitre@onera.fr	Jean-Michel.Lachiver@cnes.fr

22 mai 2002

Résumé

Ce document décrit de façon informelle le problème global de gestion de la mission de satellites d'observation de la terre et, plus précisément, celui concernant des satellites agiles munis d'un instrument optique à haute résolution.

Son objectif est de décrire le contexte dans lequel se situe le problème simplifié qui fait l'objet du challenge et qui est présenté dans le document suivant.

1 Vision globale du problème

Les satellites d'observation de la terre sont des plates-formes, munies d'instruments d'observation optique, radar ou infrarouge, placées en orbite basse autour de la terre. Plates-formes et instruments peuvent être commandés de façon à répondre à des requêtes d'observation émanant de divers utilisateurs. Ces requêtes sont émises à n'importe quel moment par les utilisateurs vers un centre responsable de la gestion de la mission et du contrôle des satellites. Gérer ces satellites équivaut pour ce centre à répondre à la question : comment les commander de façon à satisfaire au mieux les requêtes des utilisateurs ?

Dans ce document nous nous focalisons sur des satellites agiles, munis d'instruments optiques à haute résolution, qui correspondent à la nouvelle génération de satellites dédiés à l'observation optique. Nous faisons de plus

l'hypothèse que le centre ne dispose que d'un seul satellite ou qu'il gère chaque satellite isolément.

2 Orbite du satellite

Les satellites actuels d'observation de la terre sont placés sur des orbites particulières, qui sont circulaires, hélio-synchrones, quasi polaires et phasées :

- le fait que l'orbite soit circulaire induit une altitude constante (de l'ordre de quelques centaines de kilomètres) ;
- le fait qu'elle soit hélio-synchrone (angle constant tout au long de l'année entre le plan orbital du satellite et l'axe terre-soleil ; voir la figure 1) induit des conditions d'éclairement constantes ;
- la conjonction entre le fait que l'orbite soit quasi polaire (plan orbital passant quasiment par les pôles nord et sud) et le mouvement naturel de rotation de la terre d'ouest en est autour de l'axe polaire permet un survol chaque jour de l'ensemble du globe (voir la figure 2) ; à noter que c'est la conjonction entre le fait que l'orbite soit quasi polaire et l'aplatissement de la terre aux pôles qui provoque le mouvement régulier du plan orbital et le maintien d'un angle constant avec l'axe terre-soleil ;
- l'orbite est enfin phasée : la trace au sol du satellite est décalée jour après jour (voir aussi la figure 2) et le satellite retrouve exactement la même trace au bout d'un cycle de quelques dizaines de jours.

3 Prises de vue

Le satellite est construit de façon compacte autour d'un instrument optique. Grâce à sa compacité et à son système de contrôle d'attitude, il peut à tout moment, tout en se déplaçant sur son orbite, se mouvoir en attitude selon les trois axes (roulis, tangage et lacet). Le cœur de l'instrument est un alignement de photo-diodes qui permet à chaque instant d'acquérir l'image d'un segment sur la surface terrestre. C'est la combinaison du mouvement du satellite en translation (sur son orbite) et en rotation (sur lui-même) qui permet d'acquérir l'image d'une bande, comme la conjonction d'images de segments contigus (voir la figure 3).

Pour simplifier leur traitement, ces bandes sont contraintes à être des rectangles. Bien que leur largeur dépende en réalité de l'angle d'acquisition,

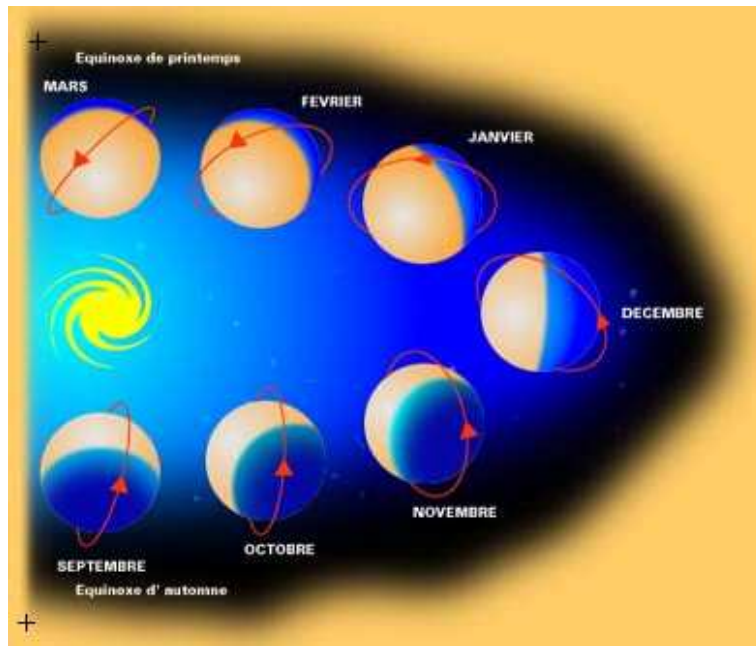


FIG. 1 – Le mouvement du plan orbital mois après mois.

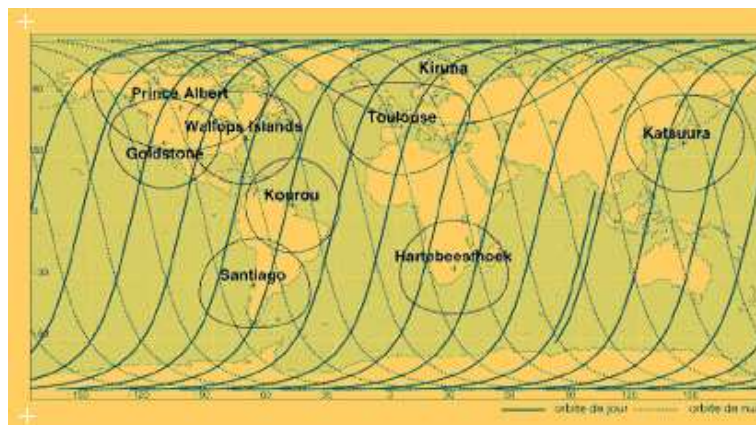


FIG. 2 – La trace au sol du satellite sur la surface terrestre au cours d'une journée.

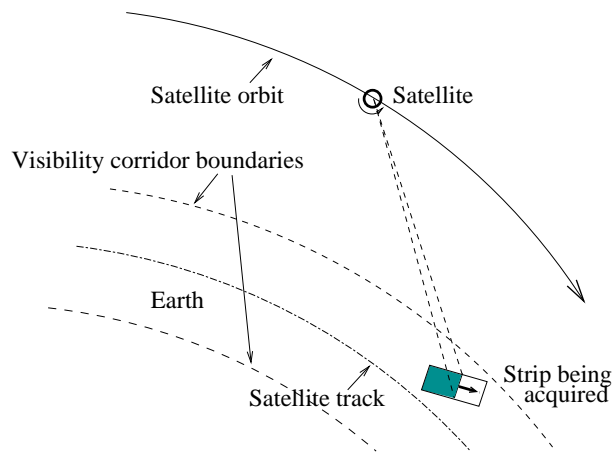


FIG. 3 – Acquisition de l'image d'une bande rectangulaire sur la surface terrestre.

on considérera qu'elle est fixe (égale à sa valeur minimale obtenue avec un angle nul sous l'orbite du satellite). Leur longueur, ainsi que la direction selon laquelle elles sont prises, restent par contre libres.

À noter qu'équipé d'un instrument optique, le satellite ne peut réaliser des prises de vue que sur la partie illuminée de chacune des révolutions qu'il réalise autour de la terre.

De plus, du fait de son orbite basse et des limites sur l'angle d'acquisition, seule une bande limitée autour de la trace au sol du satellite est accessible à la prise de vue (voir aussi la figure 3). Ceci implique que toute la surface du globe n'est pas accessible chaque jour. Elle l'est par contre sur une période de plusieurs jours, avec un nombre d'opportunités de prises de vue décroissant avec la distance aux pôles.

4 Demandes de prise de vue

Des demandes de prises de vue peuvent à tout instant être soumises par les utilisateurs. Une demande de prise de vue est caractérisée par :

- une zone géographique à acquérir qui peut être une cible (un cercle de dimension limitée) ou un polygone (une large zone de forme polygonale) ;
- une période de validité, au sein de laquelle cette demande doit être satisfaite (généralement spécifiée en jours) ;

- des contraintes angulaires d’acquisition (angles minimaux et maximaux en roulis et en tangage) ;
- un type qui peut être mono ou stéréo ; dans le cas d’une demande de type mono, une seule image est nécessaire ; dans le cas d’une demande de type stéréo, deux images sont nécessaires, à partir de la même révolution ; elles doivent de plus être réalisées en utilisant le même sens de prise de vue (voir section suivante) et en respectant certaines contraintes angulaires (différences minimales et maximales entre les angles de prise de vue) ;
- un poids ou une priorité qui exprime son importance aux yeux de l’utilisateur et/ou du centre de mission.

5 Pré-traitement des demandes de prise de vue

La fauchée au sol de l’instrument est suffisante pour acquérir une cible en une seule passe : une bande de direction quelconque passant par le centre de la cible.

Elle n’est par contre pas suffisante pour acquérir en une seule passe la plupart des polygones. C’est pourquoi les polygones sont prédécoupés (une fois pour toutes) en bandes parallèles (voir la figure 4). Les bandes résultant du découpage d’un polygone peuvent être acquises à partir de révolutions différentes du satellite (certains polygones très larges ne pourraient de toute façon pas être acquis à partir d’une seule révolution). Chaque bande peut de plus être acquise dans un sens ou dans l’autre.

Nous nommons prise de vue l’association d’une bande et d’un sens d’acquisition.

6 Contraintes de réalisation des prises de vue

Pour chaque révolution du satellite h (en fait pour chaque demi-révolution dans la lumière du jour) et pour chaque prise de vue candidate i , les contraintes angulaires d’acquisition pesant sur i nous permettent de déterminer si oui ou non i est réalisable à partir de h et, si c’est le cas, de calculer les dates au plus tôt et au plus tard de début de réalisation de i .

La vitesse d’acquisition des images étant constante, la durée de réalisation d’une prise de vue est proportionnelle à sa longueur.

Pour chaque révolution du satellite h et pour chaque paire de prises de vue i et j , réalisables à partir de h , un temps de transition minimal entre la fin de la réalisation de i et le début de la réalisation de j peut être calculé,

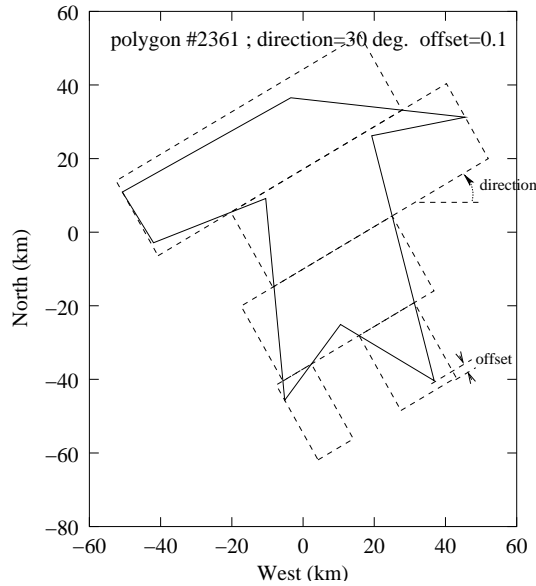


FIG. 4 – Découpage d'un polygone en bandes parallèles, selon deux paramètres : la direction et l'offset.

prenant en compte le mouvement du satellite sur son orbite et ses capacités de manœuvre en attitude. Bien que ce temps de transition dépende en réalité de l'instant auquel cette transition est engagée, on fera l'hypothèse qu'il ne dépend que de i et de j . À noter que déterminer ce temps de transition minimal implique de résoudre un problème complexe d'optimisation sous contraintes impliquant des variables continues. La résolution optimale de ce sous-problème, pour lequel il n'existe pas de solution analytique, peut être très coûteuse en temps. En conséquence, des majorants calculables en temps raisonnable doivent être recherchés.

7 Stockage et déchargement des données

Chaque image doit non seulement être acquise, mais aussi stockée à bord, puis télé-déchargée au sol. Ceci implique de prendre en compte les limitations de la mémoire à bord, les créneaux de déchargement possibles (créneaux de visibilité entre le satellite et les stations sol concernées) et les limitations du débit de télé-déchargement.

À noter de possibles conflits entre les tâches d'acquisition et de télé-

déchargement des images, liés à l'orientation du satellite.

8 Consommation d'énergie

Le contrôle permanent du satellite en attitude est consommateur d'énergie. Cette énergie est régulièrement renouvelée grâce à des panneaux solaires.

À noter aussi de possible conflits entre les tâches d'acquisition des images et la tâche de renouvellement de l'énergie, liés à l'orientation du satellite : comme les panneaux solaires sont solidaires du satellite (non orientables), leur rendement est largement dépendant de l'orientation du satellite par rapport au soleil.

9 Incertitudes sur la réalisation

Dans le domaine de l'optique, la qualité de l'image est extrêmement dépendante de la présence ou non de nuages. On observe qu'avec les satellites actuels, la présence de nuages est à l'origine du rejet de près de 90% des images réalisées. D'où l'importance de la prise en compte des informations météorologiques. La solution actuelle consiste à modifier le poids ou la priorité associée à une prise de vue de façon à prendre en compte sa probabilité de réalisation effective (absence de nuages), ainsi que ses autres opportunités de réalisation (à partir d'autres révolutions, le jour même ou les jours suivants ; voir [VBMEB99]).

10 Critère d'optimisation

Bien que des critères égalitaristes, utilisant la notion de priorité, puissent être considérés, le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est un critère utilitariste, utilisant la notion de gain : l'objectif est de maximiser la somme des gains (des poids) associés aux prises de vue réalisées.

Une difficulté apparaît avec les polygones qui peuvent éventuellement n'être que partiellement acquis : quel gain associer à la réalisation partielle d'un polygone ?

La première solution consiste à associer à une réalisation partielle un gain proportionnel à la surface acquise. Cette solution a le défaut de conduire à un éventuel éparpillement des réalisations entre les différents polygones : beaucoup de polygones entamés, mais non terminés.

La seconde solution consiste à favoriser la terminaison des polygones en associant à une réalisation partielle un gain qui soit le résultat de l'application

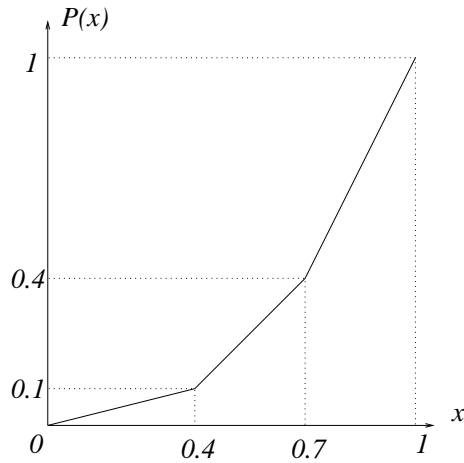


FIG. 5 – Gain associé à la réalisation partielle d'un polygone. Si w est le gain associé à la réalisation complète du polygone et x est le pourcentage de surface acquise, le gain associé à x est $w \cdot P(x)$

d'une fonction convexe (par exemple, une fonction linéaire par morceaux ; voir la figure 5) à la surface acquise.

11 Modes de gestion de la mission

Bien que de nombreux modes de gestion de la mission soient envisageables (voir par exemple [VB00]), le mode le plus couramment utilisé peut être ainsi décrit :

- la gestion est réalisée au sol, automatiquement ou semi-automatiquement, sous la supervision d'opérateurs humains ;
- elle est en général réalisée le jour $i - 1$ pour le jour i ; toutes les demandes présentes dans le carnet de commandes le jour $i - 1$ et au moins partiellement réalisables à partir des révolutions du satellite le jour i sont prises en compte ;
- elle peut être réalisée globalement sur toutes les révolutions du jour i ou révolution après révolution
- une fois le plan de prise de vue du jour i généré, il est télé-chargé au satellite pour exécution ; il est exécuté sans modification le jour i ;
- dès qu'une prise de vue est effectivement réalisée (qualité jugée admissible), elle est retirée du carnet de commandes.

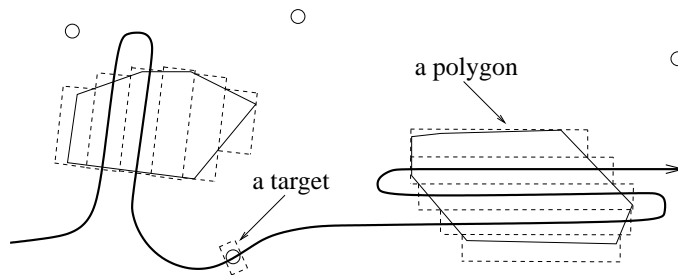


FIG. 6 – Exemple de portion de plan de prises de vue. Le trait gras représente la trace au sol de l'axe de l'instrument. Entre deux prises de vue, la représentation de cette trace est entièrement fictive.

12 Exemple

La figure 6 montre l'exemple d'une portion de plan de prise de vue enchaînant l'acquisition partielle d'un polygone, la réalisation d'une cible et la réalisation partielle d'un autre polygone.

13 Bibliographie

Des descriptions proches, parfois plus complètes, du même problème peuvent être trouvées dans [VL01, LVJ⁺02]. Divers algorithmes de résolution y sont proposés et comparés.

Les problèmes de gestion de satellites d'observation de la terre non agiles ou peu agiles (de génération courante) et plus généralement les problèmes de gestion de missions spatiales sont étudiés, du point de vue de leur modélisation et de leur résolution, dans [ABB⁺95, BVA⁺96, BLV99, GMMP97, HM94, VH01, VH02, WS02]. À noter que le problème de gestion de satellites agiles est sensiblement différent et plus complexe que celui de gestion de satellites non agiles.

Toute erreur ou oubli dans cette bibliographie peut nous être rapporté. De même pour toute incohérence ou imprécision dans la description du problème.

Références

- [ABB⁺95] J.C. Agnèse, N. Bataille, E. Bensana, D. Blumstein, and G. Verfaillie. Exact and Approximate Methods for the Daily Management of an Earth Observation Satellite. In *Proc. of the 5th ESA Workshop on Artificial Intelligence and Knowledge Based Systems for Space*, Noordwijk, The Netherlands, 1995.
- [BLV99] E. Bensana, M. Lemaître, and G. Verfaillie. Earth Observation Satellite Management. *Constraints: An International Journal*, 4(3):293–299, 1999.
- [BVA⁺96] E. Bensana, G. Verfaillie, J.C. Agnèse, N. Bataille, and D. Blumstein. Exact and Approximate Methods for the Daily Management of an Earth Observation Satellite. In *Proc. of the 4th International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems (SpaceOps-96)*, München, Germany, 1996.
- [GMMP97] V. Gabrel, A. Moulet, C. Murat, and V. Paschos. A New Single Model and Derived Algorithms for the Satellite Shot Planning Problem Using Graph Theory Concepts. *Annals of Operations Research*, 69:115–134, 1997.
- [HM94] N. Hall and M. Magazine. Maximizing the Value of a Space Mission. *European Journal of Operational Research*, 78:224–241, 1994.
- [LVJ⁺02] M. Lemaître, G. Verfaillie, F. Jouhaud, J.-M. Lachiver, and N. Bataille. Selecting and Scheduling Observations of Agile Satellites. *submitted to Aerospace Science and Technology*, 2002.
- [VB00] G. Verfaillie and E. Bornschlegl. Designing and Evaluating an On-line On-board Autonomous Earth Observation Satellite Scheduling System. In *Proc. of the Second NASA International Workshop on Planning and Scheduling for Space*, pages 122–127, San Francisco, CA, USA, 2000.
- [VBMEB99] G. Verfaillie, E. Bensana, C. Michelon-Edery, and N. Bataille. Dealing with Uncertainty when Managing an Earth Observation Satellite. In *Proc. of the 5th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation for Space (i-SAIRAS-99)*, pages 205–207, Noordwijk, The Netherlands, 1999.
- [VH01] M. Vasquez and J.K. Hao. A Logic-constrained Knapsack Formulation and a Tabu Algorithm for the Daily Photograph Sche-

- duling of an Earth Observation Satellite. *Journal of Computational Optimization and Applications*, 20(2):137–157, 2001.
- [VH02] M. Vasquez and J.K. Hao. Upper Bounds for the SPOT5 Daily Photograph Scheduling Problem. *To appear in the Journal of Combinatorial Optimization*, 2002.
- [VL01] G. Verfaillie and M. Lemaître. Selecting and Scheduling Observations for Agile Satellites: Some Lessons from the Constraint Reasoning Community Point of View. In *Proc. of the 7th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-01)*, pages 670–684, Paphos, Cyprus, 2001.
- [WS02] W. Wolfe and S. Sorensen. Three Scheduling Algorithms applied to the Earth Observing Systems Domain. *Management Science*, 46(1):148–168, 2002.