

# Détection d'Objets Faibles près de l'Anneau des Géostationnaires

Albert BIJAOU<sup>1</sup>, Benoît VANDAME<sup>1</sup>, Alain MAURY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CERGA, UMR CNRS 6527  
Observatoire de la Côte d'Azur  
BP 4229, 06304 Nice Cedex 04, France

<sup>2</sup>Département Galilée  
Observatoire de la Côte d'Azur  
Station du Calern - CAUSSOLS  
06460 St VALLIER DE THIEY

bijaoui@obs-nice.fr, vandame@obs-nice.fr, maury@obs-azur.fr

**Résumé** – L'existence de nombreux débris spatiaux préoccupe de plus en plus les agences spatiales en raison des risques d'impact. Si l'utilisation de radars s'impose pour les orbites basses, pour les orbites géostationnaires l'observation optique reste le seul moyen de détection pour des petits objets. Nous avons étudié les possibilités de détection sur cette orbite avec le télescope de Schmidt de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Nous avons mis en œuvre une caméra CCD de  $2000 \times 2000$  qui nous a amené à développer un logiciel de détection des candidats, avec mesure de leur position et de leur flux et détermination de leurs paramètres orbitaux. La méthode de traitement des images est basée sur la soustraction des traînées avec un seuillage de l'image tenant compte de l'environnement local. Une campagne d'exploitation du logiciel est en cours.

**Abstract** – The space agencies are more and more worried about the existence of numerous space debris turning around the Earth close to operational payloads. Radars are optimal for tracking these debris on low Earth orbits, but they are ineffective for detecting geostationary objects for which optical observations are still the alone mean to detect small debris. We have analyzed the capability of the OCA Schmidt telescope, equipped with a  $2000 \times 2000$  CCD camera for that purpose. We have developed a dedicated software in order to detect the candidates, to measure their positions and their luminous intensities, to track them along successive images and to compute their orbital parameters. The image processing is based on the subtraction of the stellar trails and a thresholding taking into account the neighborhood. This software is currently running today for a dedicated observational campaign.

## 1 Les Débris Spatiaux

Sur la dizaine de milliers d'objets catalogués en orbite seulement 5% d'entre eux correspondent à des satellites opérationnels. La plus grande proportion sont des objets non identifiés, qui peuvent être des satellites abandonnés, des étages de fusée, des coiffes ou des débris de satellite. On estime à près d'un million le nombre de débris en orbite de plus d'un millimètre [1]. Leur existence préoccupe de plus en plus les agences spatiales en raison des risques de collision. En 1997, on avait identifié près de 137 incidents, dont deux en orbite géostationnaire.

Si l'utilisation de radars s'impose pour les orbites basses, leur capacité de détection décroît comme l'inverse de la puissance quatrième de la distance. Pour les orbites géostationnaires les plus puissantes stations radars ne peuvent détecter que des objets d'une taille plus grande qu'un mètre carré. L'observation optique reste alors le seul moyen de détection pour des objets plus petits. Le CNES a commencé à examiner ce problème à la suite de la destruction du satellite CERISE en orbite géostationnaire. Il a contacté l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) pour étudier les possibilités de détection sur cette orbite d'ob-

jets potentiellement dangereux pour les satellites opérationnels.

Pour cela nous avons mis en œuvre le télescope de Schmidt de l'OCA de 90 cm d'ouverture. Nous avons commencé par des observations sur des films photographiques [2] permettant un champ de vue de  $5^\circ \times 5^\circ$ . Ceci nous a permis d'évaluer les potentialités de détection, sans pouvoir permettre une procédure automatique de détection, de mesure et de suivi. Néanmoins, cette première campagne a permis d'identifier les problèmes, tout en montrant l'existence de plusieurs objets croisant dans les parages de satellites opérationnels.

Pour obtenir une détection optimale, avec un suivi des objets conduisant à une estimation des paramètres orbitaux, nous avons ensuite mis en œuvre une caméra CCD (détecteur à transfert de charges) de  $2048 \times 2048$  pixels, ne permettant l'observation que d'un champ de  $35' \times 35'$ , mais avec une saisie informatique immédiate. Ceci nous a amené à développer un logiciel de détection des candidats, avec mesure de leur position et de leur flux et détermination de leurs paramètres orbitaux [3].

## 2 Les Observations

Les objets à détecter étant faiblement mobiles par rapport à l'observateur, nous observons en laissant le télescope fixe, dans la direction d'un satellite géostationnaire. Pendant la prise de vue, les étoiles se déplacent alors rapidement sur le détecteur, parcourant 15 pixels par seconde. Compte tenu des caractéristiques de notre caméra, le temps de pose est de l'ordre de 50 s, ce qui conduit à des étoiles traînées sur 750 pixels. Sur une image on peut distinguer plus d'une centaine de ces traînées, qui conduisent ainsi à lui donner une texture très particulière (fig. 2). Les objets à détecter sont des petites structures quasi ponctuelles, ou en forme de petits segments, si l'objet est un peu éloigné de l'anneau des géostationnaires.

Pendant une nuit correcte d'observation, nous pouvons acquérir plus d'une centaine d'images.

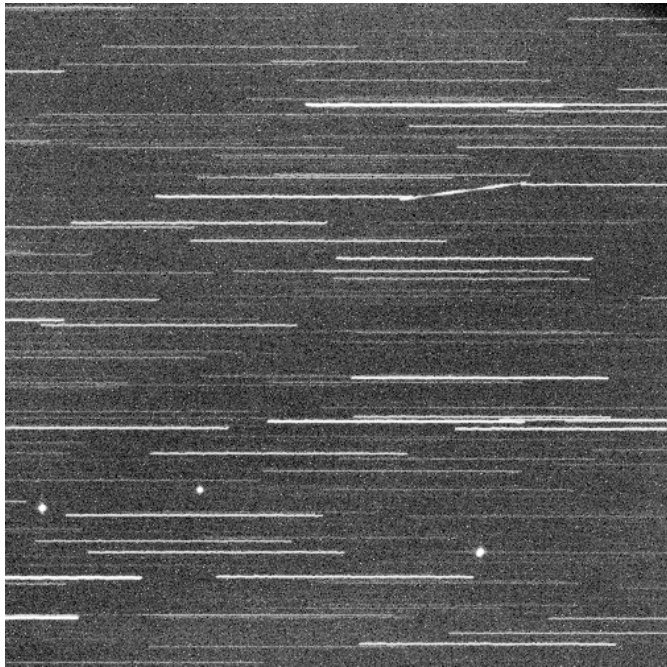


FIG. 1: Un champ de vue de satellites géostationnaires le 20 Janvier 1998. Nous pouvons voir trois objets brillants quasi ponctuels. Deux d'entre eux correspondent à des satellites opérationnels Intelsat. Le troisième, à droite, mobile, a été identifié à un gros débris croisant dans cette région. Un quatrième objet, très rapide, est visible en haut de l'image. Les observations étaient insuffisantes pour pouvoir obtenir ses éléments orbitaux

## 3 L'Analyse des Images.

Le traitement de ces images a nécessité la construction d'une procédure spécifique. La méthode choisie est basée sur la soustraction des traînées, ce qui autorise la détection d'objets superposés sur des traînées stellaires, permettant ainsi de pouvoir augmenter le temps de pose, donc de baisser le seuil de détection. Elle s'effectue en quatre étapes :

- Recherche du centre des traînées par filtrage adapté;
- Détermination d'un profil moyen pondéré;

- Soustraction du profil à la position de l'objet;
- Seuillage de l'image en tenant compte de l'environnement local.

Si on connaît le profil  $p(i, j)$  d'une traînée, sa détection au pixel  $(i_0, j_0)$  résulte de la minimisation du résidu  $\mathcal{R}$  par la méthode des moindres carrés pondérés:

$$\mathcal{R}(i_0, j_0) = \sum_{i, j} w(i - i_0, j - j_0) [v(i, j) - f]^2 \quad (1)$$

$w(i, j)$  correspond à une distribution de poids, et  $f$  représente notre modèle :

$$f = ap(i - i_0, j - j_0) + b \quad (2)$$

avec  $a$  l'amplitude de l'objet et  $b$  le fond. La détermination de  $a$  en tout point conduit au filtre adapté à la détection de la traînée, en tenant compte d'un fond.

Pour simplifier on peut considérer que le profil est séparable :

$$p(i, j) = p_1(i)p_2(j) \quad (3)$$

Le profil  $p_1(i)$  correspond au déplacement de l'étoile pendant la prise de vue. Il peut être approximé par une fonction porte ayant pour largeur typique 750 pixels. Dans le sens transverse, les traînées ont un profil approximativement gaussien sur quelques pixels. Il est préférable alors d'effectuer le filtrage adapté en deux phases:

- On examine l'ajustement d'une gaussienne dans le sens transverse:

$$\mathcal{R}(i, j_0) = \sum_j w_2(j - j_0) [v(i, j) - f_2]^2 \quad (4)$$

avec:

$$f_2(i, j) = a_2(i, j_0)p_2(j - j_0) + b(i) \quad (5)$$

On choisit généralement les poids  $w_2(j) = p_2(j)$ . Ceci conduit à obtenir une carte  $a_2(i, j)$  par un filtrage linéaire. Le filtre correspondant est une différence de deux gaussiennes, à moyenne nulle, le fond du ciel étant ainsi éliminé.

- On effectue ensuite un ajustement longitudinal avec le profil de traînée:

$$\mathcal{R}(i_0, j) = \sum_i w_1(i - i_0) [a_2(i, j) - f_1]^2 \quad (6)$$

avec:

$$f_1(i, j) = a_1(i_0, j)p_1(i - i_0) \quad (7)$$

On choisit les poids  $w_1(i) = p_1(i)$ . Ceci conduit à une carte  $a_1(i, j)$  par une corrélation avec une fonction porte. Le fond du ciel ayant été éliminé à la première étape, il n'était pas nécessaire d'en tenir compte.

Sur les traînées le résultat obtenu est, le long des lignes, une fonction triangle dont le maximum correspond au centre de l'étoile en milieu de pose.

Après le filtrage, les paramètres statistiques de l'image, moyenne  $m$  et écart-type  $\sigma$ , sont établis par itération à partir d'un rejet à  $3\sigma$ . On détermine  $m$  et  $\sigma$ , puis on élimine tous les pixels dont la valeur est à l'extérieur de l'intervalle  $[m - 3\sigma; m + 3\sigma]$ . On itère jusqu'à convergence. Ces paramètres de l'image représentent assez bien le fond et le bruit hors de la présence des structures significatives qui ont été éliminées par les rejets successifs. Ceci permet

de déterminer le seuil de détection des objets à  $m + 3\sigma$ . En général, la moyenne  $m$  obtenue est très proche de 0.

Les positions des étoiles sont déterminées par les positions des maxima significatifs. Typiquement nous identifions une centaine d'étoiles dont beaucoup correspondent à des traînées non visibles directement sur l'image, le filtrage ayant augmenté fortement le rapport signal sur bruit.

Un profil moyen est construit en sommant toutes les traînées détectées de l'image originale. Ce profil diffère légèrement de la fonction  $p(i, j)$  préalablement considérée pour la détection. On pourrait recommencer la détection adaptée avec ce nouveau filtre, ce qui permettrait de détecter des étoiles éventuellement plus faibles, mais cela n'apporterait rien à l'analyse pour les débris. Disposant du profil moyen, on effectue la soustraction de toutes les traînées des étoiles identifiées.

Un résidu subsiste pour plusieurs raisons :

- Les positions des étoiles ne sont pas parfaitement estimées. Leur profil varie aussi légèrement de l'une à l'autre. On a donc des erreurs résiduelles importantes, surtout pour les étoiles brillantes.
- La détection des étoiles suppose qu'elles soient isolées les unes des autres, ce qui n'est pas toujours le cas. Cela entraîne des erreurs importantes de positionnement.
- Les étoiles des bords de champ ne sont que partiellement vues. Il faut donc effectuer une détermination de position sur des traînées tronquées.
- En raison du bruit de Poisson la fluctuation est plus importante pour les objets brillants, on peut donc percevoir sur l'image obtenue (fig. 3), la place des traînées des étoiles brillantes, il faut donc tenir compte de la position par rapport à ces traînées pour seuiller.

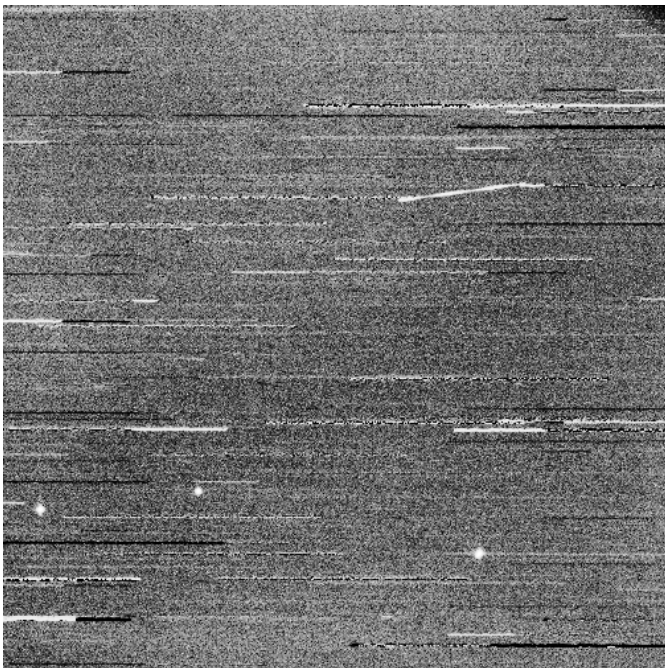


FIG. 2: L'image après suppression des traînées d'étoiles identifiées.

Pour la détection des candidats débris, la méthode de seuillage de l'image résiduelle est la suivante :

- On construit une carte de fond avec une méthode basée sur l'histogramme local [4] et on la soustrait.
- On lisse l'image avec un profil gaussien sensé correspondre à la fonction d'étalement.
- Le fond moyen résiduel et l'écart-type sont calculés itérativement avec un rejet à  $3\sigma$ . Le fond est soustrait.
- Pour les pixels non couverts par une traînée, on seuille à  $3\sigma$ .
- Pour les pixels recouverts par la traînée, on calcule la variance sur la portion de ligne concernée, et on seuille en tenant compte de cette valeur. Le seuil reste suffisamment faible pour permettre la détection de géostationnaires sur une traînée.

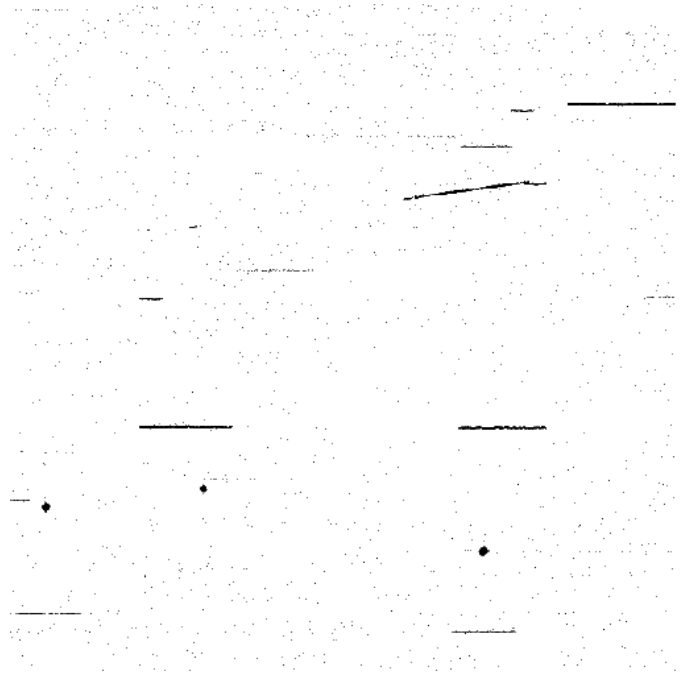


FIG. 3: Image après seuillage, montrée en mode inverse, les objets lumineux étant des taches noires. Les objets géostationnaires ressortent fortement, mais on perçoit des résidus de traînées, et de nombreux objets quasi ponctuels.

Une fois le seuillage des traînées réalisé (fig. 3) nous devons extraire les objets. Pour cela nous mettons en oeuvre un programme très simple d'extraction de sources basé sur une simple segmentation [5]. Soit  $P$  la propriété d'un pixel d'être détecté et  $\bar{P}$  son contraire. Nous attribuons une même étiquette à tous les pixels ayant  $P$  et appartenant au même domaine connexe. L'algorithme d'étiquetage choisi permet la segmentation en une passe sur l'image.

Au cours de cette opération, on calcule pour chaque domaine différentes quantités : aire, flux, et coordonnées barycentriques. Avant de poursuivre, un seuillage est effectué pour éliminer les objets ayant 1 ou 2 pixels, cela correspond soit à des artefacts, soit à des cosmiques, soit à des points chauds de la caméra. Les objets de plus de 4 pixels, allongés dans le sens du défilement des étoiles, correspondant vraisemblablement à des résidus de traînées sont aussi éliminés. Le nombre de domaines est ainsi

réduit d'environ 400 à une centaine.

## 4 L'Exploitation.

Sur chaque image une centaine de candidats débris est détectée. Il faut comparer les mesures sur au moins trois images successives pour identifier des candidats débris sérieux. Nous avons trouvé la proportion d'un objet réel pour une centaine d'images. La plupart des objets candidats correspondent à des traces de rayons cosmiques, des points chauds de la caméra CCD, ou des résidus du seuillage. Un programme permet de suivre les objets détectés sur la centaine de poses réalisées successivement. Sur la figure 4 nous avons fabriqué une image de la somme d'une vingtaine d'images successives montrant le déplacement du débris.

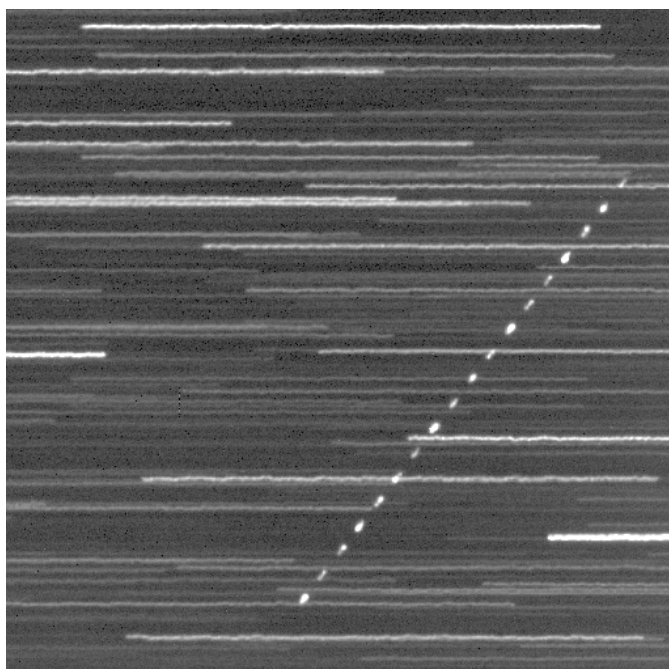


FIG. 4: Image obtenue par la somme de plusieurs images successives montrant le mouvement d'un débris.

Les mesures exprimées en coordonnées pixels, sont ensuite transformées dans un repère stellaire. Pour cela on compare la position des étoiles détectées à celle prise dans un catalogue astronomique de référence, en l'occurrence le GSC produit par le *Space Telescope Science Institute*. Ces coordonnées sont ensuite transformées dans le repère local, site et azimut, en tenant compte de l'heure d'observation et de la position géographique.

Grâce à la comparaison avec le catalogue GSC, on peut aussi déterminer les flux lumineux reçus des objets. On les convertit en magnitude  $m$ , conformément à l'usage des astronomes. La limite de détection pour un objet géostationnaire est  $m = 19$ , ce qui correspond à un objet d'un dixième de mètre carré pour un coefficient de réflectivité normal. Cette limite descend à 17, soit un mètre carré pour un objet très mobile. Seul un objet détecté était plus faiblement lumineux.

Les orbites des objets sont déterminées, à partir d'au

moins trois observations. Si l'arc mesuré est trop court il est difficile de retrouver l'objet le lendemain.

Pour identifier éventuellement l'objet, nous accédons à un serveur sur Internet qui contient les *twolines* de tous les objets identifiés et suivis par le NORAD américain. Un faible pourcentage d'objets a été ainsi identifié.

Une campagne d'observation est en cours, exploitant ce logiciel. Elle a conduit à la détection de plusieurs objets de grande taille croisant dans la zone des satellites Télécom 2C et 2D.

Pour augmenter sensiblement le rendement de la détection, la réalisation d'une caméra formée de plusieurs CCD est envisagée.

Les perspectives sont donc très favorables pour l'obtention d'une connaissance approfondie d'un champ assez grand dans l'anneau des géostationnaires.

**Remerciements.** Ce travail a été réalisé dans le cadre de relations contractuelles entre le CNES et l'OCA. Les auteurs remercient M. Fernand Alby et Mlle Catherine Hourtolle, du CNES, de leur soutien et de leurs nombreuses suggestions.

## Références

- [1] H. Klinrad, J. Bendisch, H. Sdunnus, P. Wegener et R. Westerkamp. An introduction to the 1997 ESA MASTER Model. *Second European workshop on Space Debris*, pp. 217-224, ed. W.Flury, ESA, Darmstadt, 1997.
- [2] A. Bijaoui, A. Maury, P. Oberti, Ch. Pollas et F. Alby. Detection of objects near the Geostationary ring by wide field surveys. *Second European workshop on Space Debris*, pp. 83-87, ed. W.Flury, ESA, Darmstadt, 1997.
- [3] A. Bijaoui, A. Maury, P. Oberti, B. Vandame, J.C. Venturino et F. Alby. Detection of objects near the Geostationary ring using a CCD Camera, *Advanced in Space Research* 23 (1) pp. 37-44 1999
- [4] A. Bijaoui. Sky background determination and applications. *Astronomy and Astrophysics* 80, pp. 81-85, 1980.
- [5] A. Rosenfeld. *Picture Processing by Computer*, p.127, Academic Press, New York, 1969.