

# LE MOSAÏQUAGE D'IMAGES SATELLITALES OPTIQUES A HAUTE RESOLUTION SPATIALE

Philippe BLANC, Eric SAVARIA, Farid OUDYI

Alcatel Space Industries

Bd. du Midi, B.P. 99

F-06156 Cannes la Bocca Cedex

pre nom.nom@space.alcatel.fr

**Résumé** – Cette communication propose une réflexion sur les performances et les traitements nécessaires à un système d'observation spatiale à haute résolution optique — métrique et sub-métrique — mettant en œuvre des techniques de mosaïquage spécifiques pour la production d'images à large fauchée — supérieure à 50 km — à partir d'instruments à faible champ (inférieur à 20 km).

**Abstract** – This article proposes an analysis of the performance and the required processing of high resolution imagery systems — metric and sub-metric — that make use of very specific mosaicing techniques to produce high resolution large swath image — greater than 50 km — with small field of view optical system (less than 20 km).

## 1. Contexte général

L'expression du besoin de performance en systèmes spatiaux d'observation de la Terre s'oriente depuis plusieurs années vers l'amélioration de la résolution spatiale : 10 m pour SPOT (1986) à 0,82 m pour IKONOS (1999). Les nouvelles et futures générations de systèmes optiques commerciaux à haute résolution spatiale ouvrent le champ à de nouvelles applications comme la gestion des risques liés à l'environnement ou la cartographie urbaine 3D, à condition de conserver une fauchée conséquente.

Or, pour la technologie actuelle des instruments optiques, on constate qu'un accroissement de la résolution implique une diminution de la fauchée des zones imagées : 60 km pour SPOT contre 11 km pour IKONOS. Par ailleurs, les plateformes des satellites d'observation à haute résolution spatiale présentent de grandes capacités de manœuvrabilité. Cette agilité permet d'envisager l'acquisition, lors d'un même passage orbital, de plusieurs scènes élémentaires de faibles fauchées qui, mises bout à bout par des techniques de mosaïquage, couvrent une zone de grande surface (cf. figure 1).

L'utilisation du mosaïquage permet donc, au niveau système, de réduire les contraintes de dimensionnement du champ de l'instrument et donc la création de produits images mosaïquées haute résolution spatiale suivant un champ relativement important.

## 2. La problématique

L'objectif du mosaïquage est de créer, à partir de plusieurs images contiguës, une seule image cohérente et homogène sur les plans géométrique et radiométrique. L'image mosaïquée résultante ne doit pas présenter de discontinuités rédhibitoires en termes de qualité géométrique intrinsèque, radiométrique ou encore de restitution de contraste entre les différentes images la constituant, notamment au niveau de leurs frontières.

Les acquisitions suivant le même passage orbital des différentes scènes élémentaires sont quasi-simultanées : elles permettent donc de s'affranchir des problèmes de différence d'angle d'éclaircement et de changements importants du paysage, à l'exclusion des objets mobiles comme les véhicules et les nuages. La contrepartie est que les images successives présentent d'importantes discontinuités d'angle d'acquisition, notamment dues au basculement en tangage entre les prises de vue.

Ces différences importantes d'angles impliquent des distorsions géométriques (effet de parallaxe, variation de la taille du pixel au sol) ainsi que des différences radiométriques locales lorsque les éléments du paysage ne présentent pas des caractéristiques purement lambertiennes (effet non négligeable du caractère bi-directionnel de la réflectance de certains éléments du paysage). Des traitements au sol sont donc à prévoir afin de corriger ou d'atténuer ces différences pour la constitution de mosaïques cohérentes et homogènes.

## 3. Analyse des performances d'acquisition pour le mosaïquage

La problématique du mosaïquage pour un système d'observation spatial ne se résume pas à une chaîne de traitements au sol. Pour que la production d'images mosaïquées soit performante, il est important de considérer l'ensemble de la chaîne, de l'acquisition des données à leurs traitements au sol. C'est la raison pour laquelle, nous

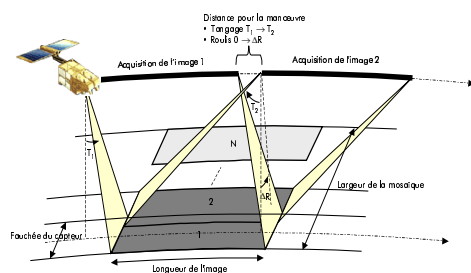


FIG. 1 : acquisition par basculement en tangage.

présentons tout d'abord un outil d'analyse des performances d'acquisition d'un système d'observation pour le mosaïquage.

Cet outil prend en compte les caractéristiques de manœuvrabilité de la plate-forme (accélération et vitesse limite des roues à réaction ou des actionneurs gyroscopiques, amplitude des angles d'attitude, etc.), l'emploi de techniques d'augmentation du temps d'intégration (intégration à report de charge, prise de vue ralentie), la possibilité d'acquérir chaque scène de manière stéréoscopique ou encore de procéder à un balayage « boustrophédon » de la barrette de détecteurs, *i.e.* suivant un sens alternativement inverse à celui du défilement du satellite. L'outil d'analyse permet alors, en fonction de la longueur de la scène, de déterminer le nombre de scènes élémentaires contiguës que peut acquérir le système, la surface totale de l'image mosaïquée ainsi que des paramètres de qualité géométrique comme la variation de la taille des pixels au sol, les discontinuités d'angles ou encore les écarts temporels entre les différentes prises de vue.

A titre d'exemple, nous présentons ici des résultats d'analyse pour un système dont les caractéristiques d'agilité et d'imagerie sont comparables à celles du futur système d'observation PLEIADES.

La figure 2 illustre deux types d'acquisition pour le mosaïquage :

- l'acquisition *monoscopique* pour laquelle chaque scène élémentaire est acquise une seule fois avec un recouvrement spatial entre deux images consécutives ;
- l'acquisition *stéréoscopique* où chaque scène élémentaire est observée deux fois avec des angles de tangage différents.

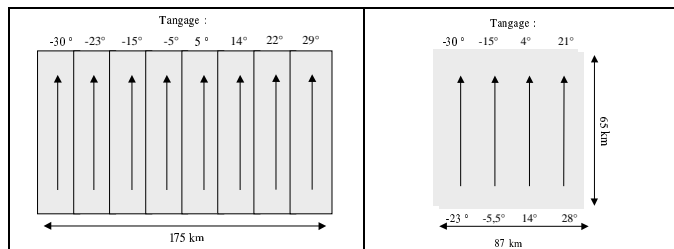


FIG. 2 : illustrations des acquisitions monoscopique et stéréoscopique pour une longueur de 65 km.

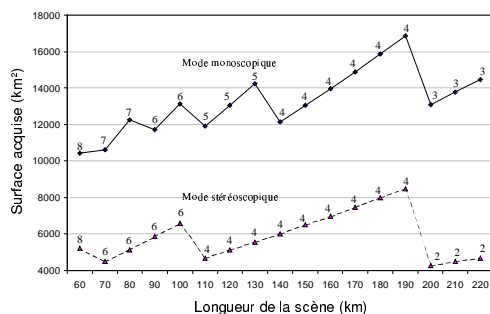


FIG. 3 : surface et nombre de prises de vue des mosaïques suivant leurs longueurs et les modes d'acquisition.

La figure 3 permet de déterminer, en mode monoscopique et stéréoscopique, la surface des mosaïques en fonction de leur longueur. L'agilité prévue des nouvelles plates-formes comme celle de PLEIADES permet d'envisager des tailles de

mosaïques en acquisition stéréoscopique tout à fait comparables à des produits issus de systèmes décimétriques actuels comme SPOT ou LANDSAT.

## 4. Différents produits mosaïques

Le choix de l'espace géométrique dans lequel créer les mosaïques d'images est crucial car il détermine le type de produit mosaïque, les données et leur précision nécessaires à la création des mosaïques, ainsi que les traitements à effectuer au sol pour « l'assemblage ». Trois types d'espaces géométriques ont été envisagés :

### 4.1 La projection 2D orthoscopique HR (avec les superstructures)

La mosaïque est créée à partir des scènes élémentaires projetées suivant la géométrie orthoscopique. Le choix de cette projection commune suivant un même pas d'échantillonnage permet naturellement une normalisation géométrique de chacune des images. Ce choix résout donc le problème de l'inhomogénéité géométrique entre les différentes scènes élémentaires ; cette solution est celle généralement retenue pour les applications de mosaïquage pour des systèmes d'observation de résolution moyenne.

Cette normalisation par la correction des parallaxes entre les images nécessite cependant une connaissance très fine de la topographie du relief. Aux échelles spatiales sub-métriques considérées, ceci nécessite un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) non seulement constitué de l'altimétrie du terrain mais aussi des superstructures comme le bâti, suivant une résolution compatible avec celle du produit mosaïque final.

Deux types de MNE sont possibles selon leur provenance :

- *exogènes* : ces MNE sont créés à partir d'autres images, à des dates différentes et éventuellement par des systèmes différents : leur utilisation soulève donc des problèmes de calage MNE/images, de précision ou encore de changements de la morphologie du paysage ;
- *endogènes* : seule l'acquisition stéréoscopique assure la génération de MNE endogènes, ce qui est souhaitable pour la qualité du produit final, au détriment de la largeur de la mosaïque résultante.

Cependant, à cause de la présence éventuelle de superstructures générant des occlusions et des faces cachées, le choix de la géométrie orthoscopique engendre des zones non renseignées dans les images et, plus « embêtant », la perte de zones imagées comme les façades des bâtiments, comme illustrées par la figure 4.

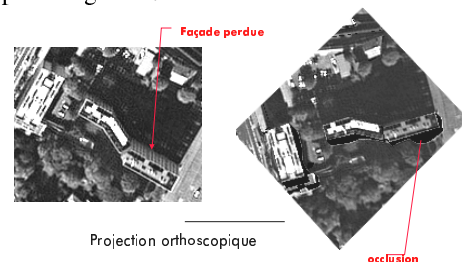


FIG. 4 : illustration de perte d'information et d'occlusions lors de la projection orthoscopique.

Ce problème, déjà identifié dans le domaine de la photogrammétrie aéroportée, conduit à envisager un autre espace de projection et donc un autre type de produit image mosaïquée.

## 4.2 La projection 2D orthoscopique BR (sans les superstructures)

La mosaïque est créée à partir des images projetées dans la géométrie orthoscopique en ne considérant que la topographie du terrain, sans les superstructures. Partant de la supposition que le terrain ne génère pas de faces cachées, les images élémentaires ne subissent pas de perte d'information et ne comportent pas de zones non renseignées. Dans ce cas, il n'est pas absolument nécessaire de procéder à une acquisition stéréoscopique ou de recourir à des MNE exogènes précis.

En revanche, les superstructures, non prises en compte dans la correction géométrique, ne sont pas représentées sous le même angle de prise de vue suivant la scène élémentaire considérée (cf. figure 6). L'image mosaïquée présente donc une inhomogénéité de la géométrie intrinsèque due aux discontinuités du tangage entre chaque scène.

## 4.3 Base de données 3D

Aucune des deux géométries précédentes n'est en fait pleinement satisfaisante. En effet, le fait d'acquérir les différentes scènes suivant des angles différents génère des données intrinsèquement en trois dimensions dont la projection en une simple image 2D n'est pas pleinement satisfaisante. La solution consiste à créer une base de données 3D constituée des facettes du terrain et des superstructures ainsi que des textures associées à celles vues lors des différentes acquisitions. Malgré la présence de zones non renseignées, une telle base de données présente l'avantage de ne pas perdre l'information des façades qui ont pu être observées et de pouvoir appréhender la scène 3D — et non plus une simple image — mosaïquée sous tous les angles et projections souhaités, comme l'illustre la figure 5.

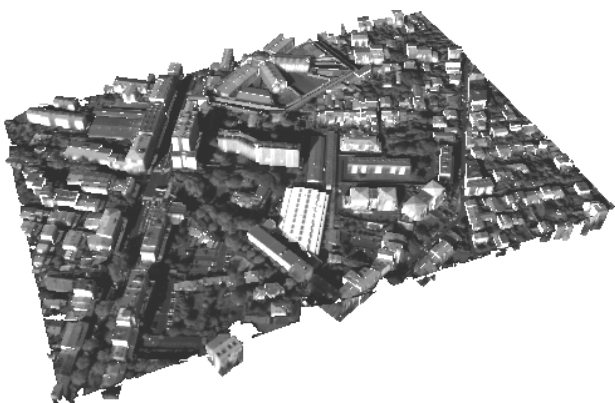


FIG. 5 : exemple de projection 3D d'une scène mosaïquée.

# 5. Les traitements de mosaïquage

## 5.1 Sur l'ensemble des images

### 5.1.1 Les traitements géométriques

La génération automatique ou semi-automatique des MNE ou MNT ainsi que les projections en géométrie orthoscopique HR et BR ou encore la détermination des coordonnées de texture de chaque facette s'appuie sur la grande expérience d'Alcatel Space Industries dans le domaine de la reconstruction 3D HR : [5], [6], [7].

### 5.1.2 Les traitements radiométriques

Une normalisation radiométrique globale est effectuée par des méthodes classiques de régression linéaire itérative ou d'adaptation d'histogrammes de façon à ce que les images présentent des statistiques au premier et au second ordre très voisines. Cependant, certains éléments du paysage ne sont pas de type lambertien (eau, toit métallique, ...). Dans ce cas, une correction locale peut être souhaitable dans un souci d'homogénéité radiométrique du produit, mais extrêmement ardue dans la mesure où chaque élément a une fonction de réflectance bi-directionnelle (BRDF) qui lui est propre. Cet état de fait reste pour nous, en l'état actuel des choses, un problème ouvert. Une des pistes envisagées est la prise en compte de modèles de BRDF dans la base de données 3D, dont les paramètres seraient estimés à partir des différentes images acquises.

## 5.2 Sur les zones de recouvrement

### 5.2.1 Les traitements géométriques

Une méthode de recalage automatique [2] basée sur des modèles de déformations locaux calculés à partir de points homologues automatiquement détectés et appariés permet de corriger les déformations géométriques résiduelles sur les zones de recouvrement entre les différentes scènes élémentaires. La répartition de ces points homologues est déterminante pour la qualité de la mesure et de la correction des disparités résiduelles, notamment localement à la frontière. Un autre objectif est d'assurer une continuité de la déformation géométrique mesurée sur les recouvrements sur l'ensemble des images de la mosaïque. Cette étape est d'autant plus importante que les MNE utilisés sont exogènes et peuvent présenter des défauts ou des incohérences.

### 5.2.2 Les traitements liés à la restitution de contraste

La variation des angles de prise de vue induit une variation de la taille des pixels entre les différentes images élémentaires. Ainsi, pour l'acquisition sur 65 km (figure 2), la taille des pixels varie de 41 % en ligne et de 19 % en colonne. Même si l'on procède au ré-échantillonnage de chacune des images suivant la même taille de pixel, il subsiste une variation de la restitution de contraste de bout en bout de la mosaïque. Une méthode de normalisation par filtrage inverse des Fonctions de Transfert de Modulation de chaque image

est alors appliquée de façon à ce que ces dernières coïncident jusqu'à une fréquence maximale qui leur est propre, correspondant à leur fréquence de Nyquist.

### 5.2.3 Détermination de la frontière inter-image

Toujours dans l'objectif d'éviter des discontinuités d'ordre géométrique, radiométrique ou de pouvoir de résolution, est mise en œuvre une méthode de détermination automatique de la frontière optimale pour l'assemblage des images contiguës. Dans un souci de respect des radiométries effectivement mesurées, nous avons choisi de ne pas utiliser des méthodes de mosaïquage procédant à des mélanges progressifs des radiométries comme celle décrite dans [3].

Duplaquet [4] utilise la programmation dynamique afin de déterminer une frontière invisible suivant les critères :

- suivre des contours communs aux deux images de telle sorte que la rupture ne soit pas artificielle ;
- éviter de scinder des éléments du paysage ayant des radiométries différentes ;
- éviter des zones présentant des variations importantes du relief ou une forte disparité ;
- la frontière devra absolument éviter les superstructures dont les parallaxes n'auront pas été corrigés en géométrie orthoscopique BR.

L'idée est de calculer une image de coût total résultat d'une combinaison linéaire des coûts liés à ces critères. Ensuite, une propagation des coûts ligne par ligne et une rétro-recherche permet de déterminer le chemin de coût minimal, suivant le principe de la programmation dynamique.

L'originalité de notre approche est d'interdire les pixels du bâti lors de la rétro-recherche et de permettre un déplacement horizontal et du « back-tracking » en cas de blocage. Ainsi, la frontière ne traversera pas le bâti qui, même s'il a un coût important, pouvait être traversé par l'approche [4] s'il menait à un chemin finalement globalement plus avantageux.

Pour parfaire la qualité de la frontière en post-traitement, un lissage est effectué par un contour actif [1] attiré par la même fonction de coût locale mais aussi contraint par des termes de régularité sur la forme de la frontière.

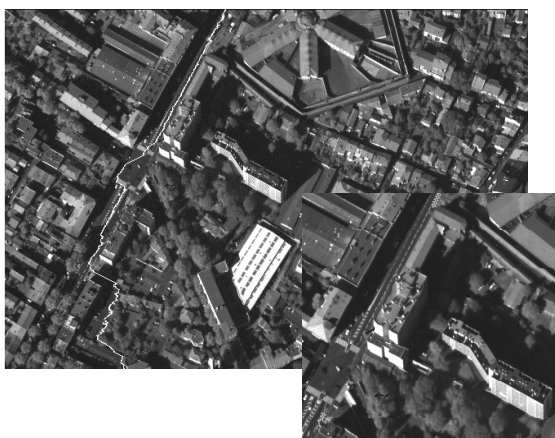


FIG. 6 : illustration de la frontière entre deux acquisitions suivant des angles de tangages différents (+3° et +14°).

## 6. Conclusion

La mise en œuvre de techniques de mosaïquage rend possible la production d'images satellitaires à haute résolution spatiale et à champ large en s'appuyant sur les méthodes de reconstruction 3D HR. Deux problèmes restent cependant à étudier : la correction radiométrique des effets non lambertiens et le traitement des objets mobiles ; problèmes d'autant plus délicats que la résolution spatiale est importante.

Enfin, nous avons vu que l'agilité des nouvelles plateformes est telle qu'elle permet une acquisition stéréoscopique de chaque scène élémentaire. Même si cette stratégie n'est pas la plus efficace en terme de surface, elle est, à notre avis, la plus intéressante. Tout d'abord, les images ainsi acquises portent en elles les informations nécessaires au mosaïquage. Enfin, et surtout, elle ouvre de nouvelles possibilités d'exploitation des données d'observation spatiale haute résolution de grande surface sous la forme de bases de données 3D visualisables sous tous les angles et même, pour la très haute résolution, de manière immersive.

## 7. Remerciements

Nous remercions le Centre National d'Etudes Spatiales pour nous avoir autorisé à utiliser les images de Toulouse, provenant d'un capteur aéroporté.

## Références

- [1] Amini, A.A., T.E., Weymouth, C. J., Jain, 1990. *Using dynamic programming for solving problems in vision*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **12**, 9, 855-867.
- [2] Blanc, P., L., Wald, 1998. Validation protocol applied to an automatic co-registration method based on multiresolution analysis and local deformation models. *In : Proc. of the ISPRS Commission II*, Cambridge, England, 13-17 July, **XXXII**, 2, 11-19.
- [3] Whitetaker, R.T., 2000. *Level-set approach to image blending*. IEEE Trans. on Image Processing, **9**, 11, 1849-1861.
- [4] Duplaquet M-L, 1998. Building large mosaics with invisible seam-lines. *In : Proc. of SPIE AeroSense*, Orlando, USA, 13-14 April, **3387**.
- [5] Paparoditis, N., 1998. *Reconstruction tridimensionnelle de paysages urbains en imagerie stéréoscopique satellitale haute résolution*. Thèse de doctorat. Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 161 pp.
- [6] Rognant, L., 2000. *Triangulation contrainte de Delaunay : application à la représentation de MNT et à la fusion de MNT RADAR*. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier de Grenoble, France, 462 pp.
- [7] Rognant, L., M., Mémier, J.M., Chassery, J.G., Planes, 2000. Low cost precise urban orthophotos. *In : Proc. of ASPRS*, Washington DC, USA, 22-26 May.