

# Estimation de l'attitude d'un satellite par recalage d'images

R. Perrier<sup>1</sup>

E. Arnaud<sup>2</sup>

P. Sturm<sup>1</sup>

M. Ortner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INRIA Rhône Alpes, <sup>2</sup> Université Joseph Fourier LJK, <sup>3</sup> EADS Astrium

<sup>1</sup> 655 avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot, France

{regis.perrier, elise.arnaud, peter.sturm}@inrialpes.fr

## Résumé

La plupart des applications d'imagerie satellitaire utilisent des caméras de type pushbroom pour imager une surface observée. Ce capteur linéaire est toujours fixé sur une plateforme mobile, il acquiert une image 1-D à chaque instant de temps et utilise le mouvement rectiligne de la plateforme pour balayer une zone à photographier. lorsqu'elles sont successivement collées entre elles, l'ensemble des images 1-D forment une image 2-D complète. La stabilité du satellite est un point crucial lors de l'acquisition d'une image 2-D complète. Cette acquisition peut prendre plusieurs secondes, et de légères variations de l'attitude<sup>1</sup> du satellite peuvent provoquer des déformations géométriques importantes dans l'image acquise. Dans cet article, nous proposons une méthode de recalage multi-image permettant d'estimer toute variation d'attitude du satellite afin de rectifier les images acquises. Nous utilisons une méthode de type Lucas Kanade associée à un modèle polynomial par morceaux des variations d'attitude. Nous démontrons les performances de notre approche sur deux jeux de données satellitaires.

## Mots clefs

Camera pushbroom, recalage d'image, modèle polynomial par morceaux, satellite.

## 1 Introduction

L'imagerie aérienne et satellitaire est un domaine de recherche très actif pour plusieurs applications : reconstruction 3-D, super-resolution, fusion d'information pour ne citer que ceux-ci [1]. Dans la plupart des cas, les images sont supposées être prises par des caméras de type sténopé, alors que les applications d'observation de la terre utilisent majoritairement des capteurs de type pushbroom. Ce dernier est un CCD (Charge-Coupled Device) linéaire qui capture une image 1-D par instant de temps. Il est généralement embarqué sur une plateforme qui se déplace perpendiculairement à son axe au cours du temps, et l'ensemble des images 1-D accolées forment une image 2-D. Son principe

1. L'attitude (ou orientation) en aéronautique correspond à la direction des axes d'un engin spatial par rapport à un repère de référence. Elle se définit par le lacet, le roulis et le tangage (les rotations autour des 3 axes).

d'acquisition peut se résumer à la figure 1. Les raisons de

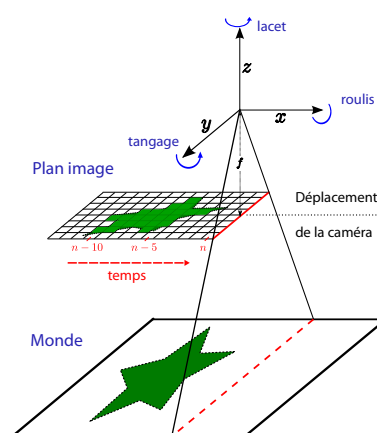


Figure 1 – Principe de l'acquisition pushbroom : la caméra se déplace le long de l'axe x et enregistre une image 1-D à chaque pas de temps n ; l'ensemble des images 1-D accolées forment une image 2-D. y est l'axe de la caméra et z l'axe orthogonal au plan image. L'orientation de la caméra est défini par le lacet (rotation autour de l'axe z), le roulis (rotation autour de l'axe x) et le tangage (rotation autour de l'axe y)

son utilisation très courante pour les applications d'observation sont les suivantes [2] :

- une caméra pushbroom peut enregistrer plus de 25000 pixels sur une seule ligne (image 1-D), en se déplaçant elle forme une bande d'image de résolution très importante ;
- à résolution équivalente, un capteur pushbroom coûte nettement moins cher qu'un capteur sténopé (qui correspond à un CCD 2-D).

Afin de couvrir différentes bandes spectrales telles que le rouge, le vert et le bleu, plusieurs capteurs pushbroom sont montés en parallèle sur un même plan focal, la restitution d'une image colorée se faisant par superposition des images des trois bandes. La figure 2 montre un exemple typique de ce plan focal. Le capteur pushbroom est également présent dans des applications plus courantes : scanner de documents, imageurs médicaux à rayons X et scanner d'inspection pour la surveillance aux aéroports.

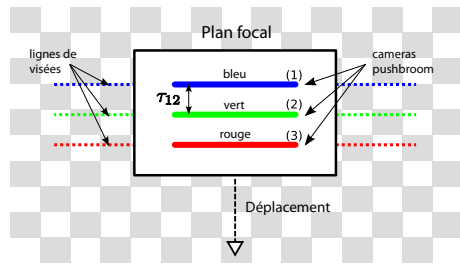


Figure 2 – Géométrie standard d’un plan focal de satellite d’observation possédant 3 caméras pushbroom de radiométrie différente : rouge, verte et bleue (respectivement énumérées par 1, 2 et 3). Notons que ce qui est vu par la caméra 2 à l’instant  $n$  sera vu par la caméra 1 à l’instant  $n + \tau_{12}$ .

Peu de travaux prennent en compte la spécificité de ce capteur, et jusqu’à maintenant il était supposé stable lors de l’acquisition d’une image 2-D [3, 4]. Cependant dans le contexte de l’imagerie aérienne et satellitaire, cette hypothèse est fragilisée par l’environnement dans lequel évolue l’imageur, ainsi que par sa structure mécanique. Des perturbations atmosphériques et des vibrations liées aux moteurs peuvent engendrer des variations de son attitude lors du processus d’acquisition. En conséquence, des déformations plus ou moins importantes peuvent apparaître dans l’image. La figure 3 présente un exemple synthétique de déformation suivant différentes variations d’attitude. Ce

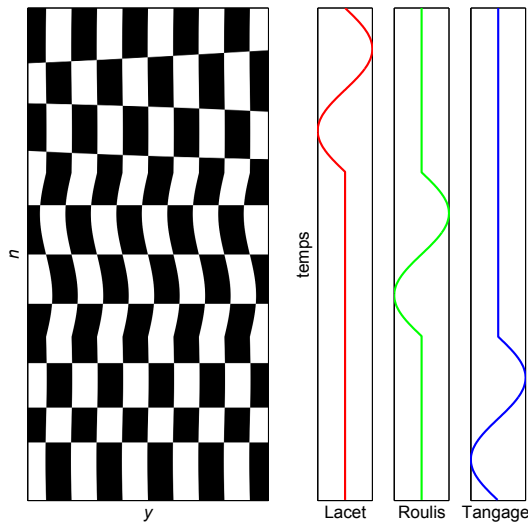


Figure 3 – Exemple de déformations observées sur un damier régulier lorsque l’attitude de la caméra pushbroom varie lors de l’acquisition. Sur le damier, le lacet fait varier l’inclinaison des lignes horizontales, le roulis provoque l’oscillation des lignes verticales et le tangage augmente ou diminue la hauteur des cases.

phénomène existe depuis plusieurs années dans le contexte de l’imagerie aérienne [5], et il pourrait apparaître et s’amplifier dans le domaine de l’imagerie satellitaire avec le

design de satellite plus petit et possédant une résolution d’image plus importante [6].

L’utilisation de gyroscopes, GPS et senseurs stellaires – dans le cas satellitaire pour ce dernier – permet de contourner ce problème ; plusieurs travaux font état de résultats satisfaisants dans la restitution de l’attitude à l’aide de ces capteurs [5] et, *in fine*, la correction des images. Cependant, la fréquence d’échantillonnage de ces capteurs comprise entre 4 et 16 Hz est nettement inférieure à la fréquence d’acquisition de chaque image 1-D faite par le capteur pushbroom (de l’ordre de 2500Hz). Par conséquent, une partie de l’information de mouvement de l’imageur ne peut pas être restituée par ces capteurs. De même dans le contexte satellitaire, les contraintes liées à l’environnement spatial rendent coûteuses l’utilisation de ce type de capteur ; pouvoir s’affranchir de ceux-ci serait un bénéfice non négligeable.

Comme nous l’avons remarqué précédemment, plusieurs capteurs pushbroom de modalités différentes sont généralement associés sur un même plan focal. De fait, une variation de l’attitude du satellite lors de l’acquisition perturbe l’ensemble des images. Par comparaison et recalage de l’ensemble de ces images, il serait possible de restituer les mouvements d’attitude inconnus du satellite. Cette idée a été suggérée par [6] ; leur approche utilise des corrélations locales sur des points d’intérêts extraits entre les différentes images. Cependant le caractère local de leur méthode d’estimation du mouvement contraint à procéder par blocs successifs pour restituer une variation d’attitude **absolue**. Dans ce cas, le problème de recalage multi-image ne peut pas être considéré globalement comme décrit dans [7], et l’estimation est sous optimale.

Dans ce papier, nous proposons de résoudre le problème d’estimation des variations d’attitude du satellite par un recalage multi-image et selon une méthode de type Lucas-Kanade [8, 7] ; ces techniques sont très bien adaptées à des problèmes de recalage sous-pixeliques. Nous exploitons la géométrie du plan focal ainsi que les origines mécaniques des variations d’attitude pour recalibrer les images dans un même système de coordonnées. Nous modélisons les variations d’attitude par une fonction polynomiale par morceaux sous contraintes. L’algorithme proposé est simple et ne nécessite pas de paramètres de régularisation, dont la détermination est souvent difficile.

## 2 Estimation de l’attitude

Par la suite, nous appellerons  $\mathbf{I} = \{I_1, I_2, I_3\}$  l’ensemble des trois images rouge, verte et bleue, conformément au plan focal de la figure 2 ; les valeurs radiométriques de chaque image appartiennent à un même ensemble  $\mathcal{V}$ . Les pixels de chaque image sont référencés par leur coordonnées  $[n, y]$  et appartiennent à l’ensemble  $\mathcal{S}$  ;  $n \in [1, N]$  correspond également aux instant de temps discrétisés de prise des images 1-D par la caméra pushbroom et  $N$  est le nombre total d’échantillons de temps (il est aussi équivalent au nombre de lignes de chaque image 2-D de  $\mathbf{I}$ ).

Nous appelons  $\tau_{ij}$  le temps qui espace l'observation d'une même scène entre les caméras pushbroom  $i$  et  $j$ . Nous supposons qu'à l'échelle de l'acquisition d'une image, le satellite maintient une vitesse constante et effectue un mouvement de translation rectiligne ; ces hypothèses sont généralement très fiables [2]. En supposant que le satellite maintienne son attitude constante lors de la prise de vue, le cas idéal nous donnerait la relation suivante :

$$I_i(n, y) - f_{ij}(I_j(n + \tau_{ij}, y)) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (1)$$

où  $f_{ij} : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{V}$  est une fonction linéaire chargée de compenser les différences radiométriques entre les images  $i$  et  $j$ , et  $\sigma^2$  denote la variance d'un bruit gaussien centré i.i.d. sur tous les pixels de l'image. Afin d'obtenir une formulation plus réduite, nous appelons  $I_j^{\tau_{ij}}$  l'image  $I_j$  décalée en temps telle que  $I_j^{\tau_{ij}}(n, y) = I_j(n + \tau_{ij}, y)$ , et  $\mathbf{y} = [n, y]^T$  le vecteur des coordonnées de chaque pixel, l'équation (1) peut se réécrire de la façon suivante :

$$I_i(\mathbf{y}) - f_{ij}(I_j^{\tau_{ij}}(\mathbf{y})) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2). \quad (2)$$

En réalité, les images sont déformées par les mouvements de rotation du plan focal autour de ses trois axes. Nous nommons  $\theta(n) \in \Theta$  l'attitude inconnue du satellite pour l'instant de temps  $n$  ; c'est un vecteur  $(3 \times 1)$  dont les composantes respectives sont le lacet  $\theta_l(n)$ , le roulis  $\theta_r(n)$  et le tangage  $\theta_t(n)$ . Afin d'éviter toute redondance dans les équations en section 2.2, nous nous référons à  $\theta_\alpha(n)$  où  $\alpha$  correspond séparément au lacet, au roulis et au tangage. Nous appelons  $\theta$  le vecteur  $(3N \times 1)$  qui rassemble l'attitude pour tous les instants de temps :

$$\theta = [\theta_l(1) \dots \theta_l(N), \theta_r(1) \dots \theta_r(N), \theta_t(1) \dots \theta_t(N)]^T. \quad (3)$$

Soit  $W : \mathcal{S} \times \Theta \rightarrow \mathcal{S}$  la fonction de déformation qui déplace le pixel à une nouvelle coordonnée suivant l'attitude du satellite. A partir de l'équation (2), ce que nous observons réellement est :

$$I_i(W(\mathbf{y}; \theta(n))) - f_{ij}(I_j^{\tau_{ij}}(W(\mathbf{y}; \theta(n + \tau_{ij})))) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2), \quad (4)$$

il est important de noter ici que les deux images sont déformées par  $\theta$ , mais pour des instants de temps différents.

## 2.1 Recalage multi-image global

Une technique courante de résolution de l'équation (4) est la méthode de Lucas Kanade qui utilise de façon optimale tous les pixels des images [8]. Cette méthode s'applique d'autant mieux à notre contexte puisque les déformations observées sont de quelques pixels et que nous souhaitons avoir une précision sous-pixelique dans le recalage d'images. Nous appelons  $T_{\tau_{ij}}$  l'opérateur qui décale les échantillons de  $\theta$  d'un facteur  $\tau_{ij}$ . Cet opérateur est une matrice creuse  $(3N \times 3N)$  qui, pour chaque ligne  $n \in [1, 3N]$  et colonne  $m \in [1, 3N]$ , vaut :

$$T_{\tau_{ij}}(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{pour } n = m - \tau_{ij}, \text{ et } n \notin [N - \tau_{ij}, N] \\ & \cup [2N - \tau_{ij}, 2N] \cup [3N - \tau_{ij}, 3N] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

L'équation globale multi-image à minimiser est la suivante :

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \sum_{i,j;i \neq j} \sum_{\mathbf{y} \in \mathcal{S}} \left( I_i(W(\mathbf{y}; \theta)) - f_{ij}(I_j^{\tau_{ij}}(W(\mathbf{y}; T_{\tau_{ij}}\theta))) \right)^2. \quad (5)$$

En opposition à la méthode de Lucas Kanade traditionnelle, notons qu'ici, il n'y a pas d'image référence à laquelle une image déformée vient se rattachier. Dans ce contexte, les deux images sont déformées. En choisissant l'une des deux images comme référence, ce que une technique par corrélation locale impose, la minimisation aboutirait à une estimation **relative** des déformations du type  $\theta(n) - \theta(n + \tau_{ij})$ . Retrouver la variation **absolue**  $\theta(n)$  nécessiterait une étape de déconvolution pour retrouver la variation d'attitude **absolue**  $\theta(n)$ . Cette observation constitue un des défauts majeurs de [6] qui procède par corrélation locale sur des points d'intérêts. Dans notre cas, la méthode que nous définissons permet une estimation directe de l'attitude **absolue**.

Estimer directement  $\theta$  à partir de l'équation (5) est un problème mal posé si aucune contrainte n'est définie pour orienter la minimisation. Il serait possible d'ajouter un *a priori* sur  $\theta$  dans l'équation à minimiser, mais le choix de la fonction régularisante n'est pas toujours aisé. De plus, le calcul du coefficient de régularisation, qui équilibre le terme d'attache aux données (images) et le terme de régularisation, n'est pas trivial et est généralement coûteux en temps de calcul. En analysant de plus près les origines du problème, nous savons que les variations d'attitude du satellite sont principalement liées aux moteurs du satellite. Une propriété importante de ce type de mouvement est leur forme stationnaire dans le temps ; l'utilisation de modèles polynômiaux par morceaux est particulièrement appropriée pour approximer ce type de signaux très réguliers.

## 2.2 Modèle polynômial par morceaux

Pour modéliser les variations d'attitude, nous utilisons un modèle polynômial par morceaux où chaque polynôme est lié à ses voisins par des contraintes ; nous notons les polynômes  $\Phi_{k,\alpha}$ ,  $k \in [1, M]$ .  $M$  est le nombre de polynômes nécessaire pour restituer les variations d'attitude. Il peut également être vu comme le nombre de fenêtres successives dans le temps qui englobent  $\theta$ . Nous appelons  $n_k$  pour  $k \in [1, M - 1]$  les instants de temps où les contraintes entre deux polynômes successifs sont définies. Ceux-ci peuvent être mis en lien avec les points de contrôle des splines [9], à l'exception que nos points sont séparés par plusieurs échantillons de temps. Nous exposons le principe de ces polynômes par morceaux en figure 4. Nous pouvons écrire les variations d'attitude de la façon suivante :

$$\theta_\alpha(n) = \sum_{k=1}^M w_k(n) \Phi_{k,\alpha}(n), \quad (6)$$

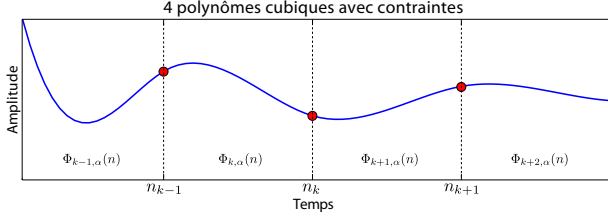


Figure 4 – Exemple de fonction polynômiale par morceaux où 4 polynômes ( $\Phi_{k-1,\alpha}$ ,  $\Phi_{k,\alpha}$ ,  $\Phi_{k+1,\alpha}$ ,  $\Phi_{k+2,\alpha}$ ) sont contraints aux instants de temps  $n_{k-1}$ ,  $n_k$  et  $n_{k+1}$ . Les points rouges montrent l'emplacement des contraintes et les lignes pointillées verticales délimitent chaque polynôme local. Dans cette exemple, nous avons choisi des polynômes de degré 3 et des contraintes jusqu'à leur dérivée seconde.

où les  $w_k(n)$  correspondent à des fonctions de pondération telles que :

$$w_k(n) = \begin{cases} 1 & \text{pour } n \in [n_{k-1}, n_k[ \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases} \quad (7)$$

Enfin les polynômes d'ordre  $P$  sont définis tels que :

$$\Phi_{k,\alpha}(n) = \sum_{p=0}^P a_{p,k,\alpha} n^p. \quad (8)$$

Les coefficients polynomiaux  $a_{p,k,\alpha}$  caractérisent entièrement les variations d'attitude. Nous appelons  $\mathbf{a}$  le vecteur ( $3MP \times 1$ ) qui contient l'ensemble des coefficients polynomiaux. Les contraintes entre chaque polynôme aux points  $n_k$  où  $k \in [1, M-1]$  sont définies comme suit :

$$\Phi_{k,\alpha}^{(p)}(n_k) = \Phi_{k+1,\alpha}^{(p)}(n_k) \text{ pour } p \in [0, P-1]. \quad (9)$$

La relation (9) impose la continuité aux points  $n_k$  pour les dérivées jusqu'à l'ordre  $P-1$ . De façon similaire aux splines [9], il n'y a plus qu'un seul degré de liberté par segment de temps  $[n_k, n_{k+1}[$ . Il faut noter que l'équation (9) définit des contraintes d'égalité linéaires en  $\mathbf{a}$ , de sorte qu'on ait la relation matricielle suivante :

$$C\mathbf{a} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

où  $C$  est une matrice creuse de taille  $(3(M-1)P \times 3MP)$  et  $\mathbf{0}$  est le vecteur nul de dimension  $(3(M-1)P \times 1)$ . Enfin, la combinaison des équations linéaires (6), (7) et (8) nous donne l'équation matricielle suivante :

$$\boldsymbol{\theta} = H\mathbf{a}, \quad (11)$$

où  $H$  est une matrice creuse de dimension  $(3N \times 3MP)$  prenant en compte les  $w_k(n)$  de l'équation (7) et les  $n^p$  de l'équation (8). Nous pouvons désormais reformuler le problème de recalage multi-image exposé en section

2.1 par la minimisation d'une équation non linéaire sous contraintes d'égalité linéaires :

$$\hat{\mathbf{a}} = \underset{\mathbf{a}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i,j;i \neq j} \sum_{\mathbf{y} \in \mathcal{S}} \left( I_i(W(\mathbf{y}; H\mathbf{a})) - f_{ij}(I_j^{T_{ij}}(W(\mathbf{y}; T_{\tau_{ij}} H\mathbf{a}))) \right)^2, \text{ tel que } C\mathbf{a} = \mathbf{0}. \quad (12)$$

Cette équation globale est minimisée itérativement ; les contraintes d'égalité sont utilisées pour réduire la dimension du problème avec une factorisation QR. Les variables restantes sont ensuite estimées avec une procédure des moindres carrés.

En pratique, la fonction de correction radiométrique  $f_{ij}$  définie au paragraphe 2 décrit une relation linéaire entre chaque paire d'image :

$$f_{ij}(I_j(\mathbf{y})) = r_{ij,1} + r_{ij,2} I_j(\mathbf{y}) \quad (13)$$

où les coefficients  $[r_{ij,1}, r_{ij,2}]$  sont estimés au début de l'algorithme par une méthode des moindres carrés. La fonction de déformation  $W$  peut avoir une formulation analytique pour les trois angles de rotation dans le cas où la scène observée est plane. Dans les autres cas, il faut utiliser des dérivées numériques, corrélées à un modèle numérique d'élévation du terrain (Digital Elevation Model) pour estimer les variations d'attitude. Nous présentons les résultats suivants en choisissant la deuxième possibilité.

### 3 Expériences

Nous présentons des résultats obtenus sur deux jeux de données satellite qui ont été simulés par la société EADS Astrium. Dans ce contexte, la vérité terrain est connue, mais le processus de création des données nous est totalement inconnu. Ce dernier recrée des conditions réelles d'acquisition et le traitement de ces données peut être considéré comme aussi complexe que sur des données réelles. L'algorithme a été implémenté avec Matlab sur une machine possédant un Core2duo à 3GHz et 3.8GiB de mémoire RAM. Dans les deux jeux de données, les caméras 1-2 et 2-3 sont respectivement espacées de 40 et 20 échantillons de temps conformément à la figure 2 ( $\tau_{12} = 40$  et  $\tau_{23} = 20$ ). Toutes les images sont de dimension  $(2564 \times 900)$  pixels.

Le premier jeu de données est composé de 3 images multi-spectrales (rouge, verte et bleue). Nous avons fixé le degré  $P$  à 3 et la taille des fenêtres polynomiales à 15 échantillons de temps. L'algorithme a convergé en 230 secondes sur 10 itérations. L'écart type de l'erreur sur l'estimation de l'attitude en roulis et en tangage est inférieur à  $\frac{15}{100}$  (résultats détaillés en figure 5(a)). Le second jeu de données comporte 3 images monomodales. Ce second cas est complexe car le signal à estimer comporte plusieurs basses fréquences de forte amplitude. Nous avons choisi de fixer  $P$  à 3 et la taille des fenêtres polynomiales à 20 instants de temps. L'algorithme a convergé en 20 itérations et 410 secondes ; l'écart type observé sur l'erreur d'estimation de

l'attitude est inférieur à  $\frac{20}{100}$  pour le roulis et le tangage (figure 5(b)). Il faut noter que nous ne donnons pas d'estimation du lacet dans ces résultats car les déformations induites par celui-ci sont inférieures à  $\frac{2}{100}$  sur les extrémités des images. En pratique, le roulis et le tangage sont des transformations perspectives de la caméra, ils dominent les déformations géométriques observées.

Les résultats des figures 5(a) et 5(b) montrent les performances et les limites de notre algorithme. La plupart des basses fréquences sont restituées, et le recalage possède une bonne précision sous-pixelique. Le modèle polynomial par morceaux s'applique particulièrement bien dans notre contexte d'estimation d'un processus stationnaire. Cependant dans les deux cas, l'erreur résiduelle contient toujours des composantes hautes fréquences. Ceci est principalement lié au choix de la taille de fenêtre lors de l'estimation. Une petite fenêtre pourra plus facilement restituer des hautes fréquences car le modèle aura plus de degrés de liberté, mais le conditionnement du problème sera moins bon. A l'inverse une grande fenêtre restituera bien les basses fréquences.

Nous sommes actuellement en train de rechercher des solutions permettant de sélectionner automatiquement la taille de fenêtre la plus adaptée. De même, une analyse de la sensibilité de l'algorithme suivant les fréquences des variations d'attitude sera menée afin de confirmer sa robustesse et ses limites exactes. Enfin, notons que le modèle polynomial que nous avons adopté est très similaire aux méthodes de recalage par splines [10, 9], il serait intéressant d'étendre notre travail sur ces techniques sans introduire de fonction régularisante.

## 4 Conclusion

L'originalité de ce travail repose sur l'estimation de l'attitude d'un satellite par l'utilisation d'une méthode de recalage multi-image de type Lucas Kanade, et pour des images acquises par des caméras pushbroom. Les résultats montrent que la propriété stationnaire du mouvement d'attitude est bien prise en compte dans le modèle polynomial par morceaux. Ce problème est très mal conditionné puisque toutes les images acquises sont déformées, cependant notre algorithme est simple et ne nécessite pas de régularisation.

Nous cherchons maintenant à tester notre algorithme sur plusieurs données satellitaires simulées et réelles. Le problème ouvre plusieurs perspectives de travail intéressantes sur le recalage multi modal qui dans notre cas est approché par un modèle linéaire simple. Une analyse géométrique de l'acquisition pushbroom dans ce contexte devrait également permettre d'obtenir des fonctions de déformations analytiques simplifiées. Enfin, l'utilisation de techniques de sélection de modèle devrait nous permettre de déterminer une taille de fenêtre optimale pour ce problème de recalage.

## Références

- [1] Z. Liu R. S. Blum. *Multi-sensor image fusion and its applications*. Taylor and Francis, 2005.
- [2] Gordon Petrie. Airborne pushbroom line scanners : An alternative to digital frame scanners. *Geoinformatics*, 8(1) :50–57, 2005.
- [3] Rajiv Gupta et Richard I. Hartley. Linear pushbroom cameras. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(9) :963–975, 1997.
- [4] Jamil Drareni, Peter Sturm, et Sébastien Roy. Plane-Based Calibration for Linear Cameras. Dans *The 8th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras - OMNIVIS*, 2008.
- [5] Daniela Poli. General model for airborne and spaceborne linear array sensors. Dans *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume 34, 2002.
- [6] F. de Lussy, D. Greslou, et L. Gross Colzy. Process line for geometrical image correction of disruptive microvibrations. Dans *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, pages 27–35, 2008.
- [7] S. Farsiu, M. Elad, et P. Milanfar. Constrained, globally optimal, multi-frame motion estimation. Dans *Proc. of the 2005 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*, pages 1396 – 1401, 2005.
- [8] Richard Szeliski. Image alignment and stitching : a tutorial. *Found. Trends. Comput. Graph. Vis.*, 2(1) :1–104, 2006.
- [9] M. Unser. Splines : A perfect fit for signal and image processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 16(6) :22–38, November 1999.
- [10] Adrien Bartoli, Mathieu Perriollat, et Sylvie Chambon. Generalized thin-plate spline warps. *Int. J. Comput. Vision*, 88(1) :85–110, 2010.

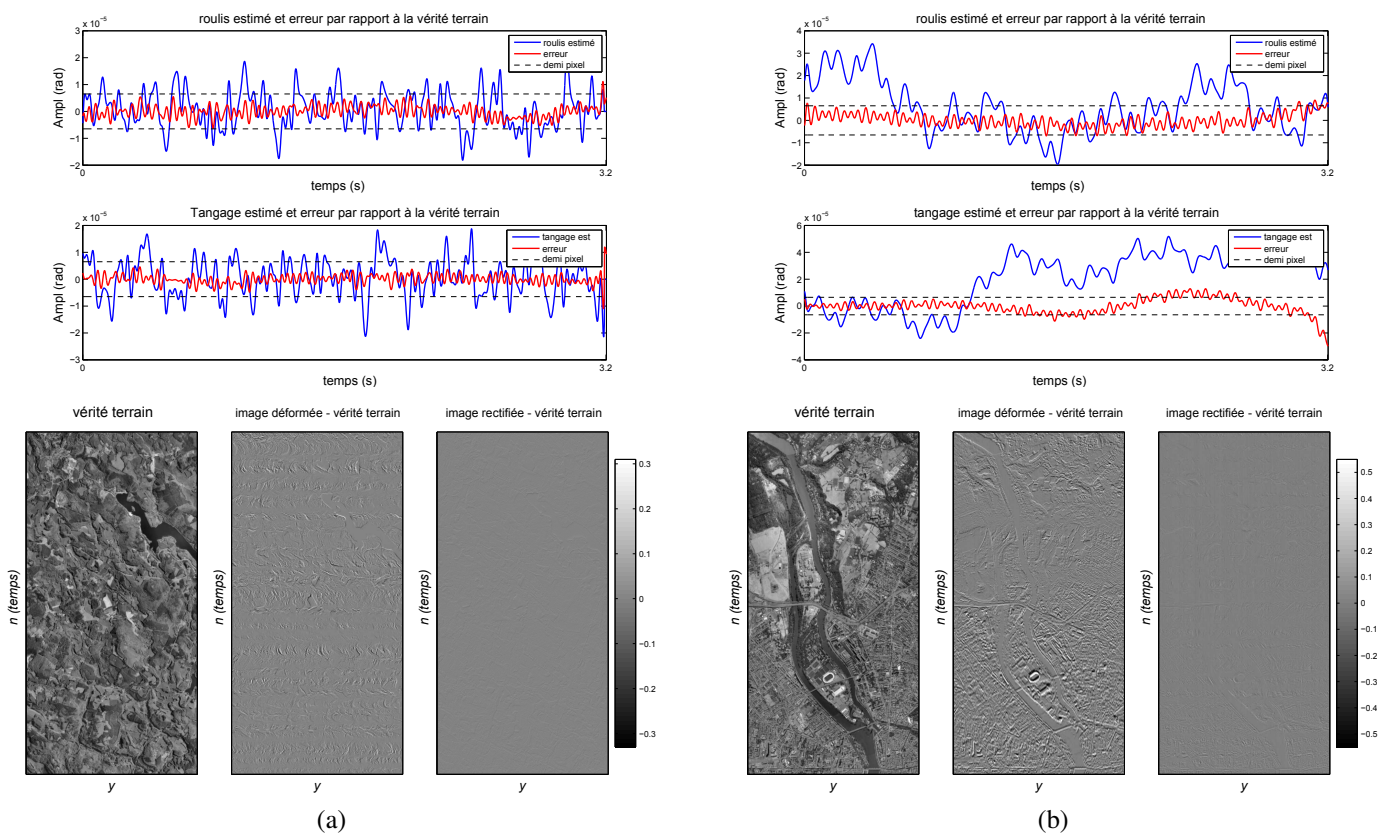


Figure 5 – (a) Résultats sur le premier jeu de données (b) Résultats sur le second jeu de données : les deux figures du haut montrent l'estimation finale de l'attitude pour le roulis et le tangage, et l'erreur faite en comparaison à la vérité terrain. En dessous, la figure de gauche présente une image extraite de la vérité terrain de taille  $(1000 \times 500)$ . Les deux figures suivantes montrent l'erreur entre l'image acquise et la vérité terrain avant et après rectification.