

Estimation de la FTM en vol du satellite PLEIADES HR à partir d'images de la Terre acquises de nuit

GWENDOLINE BLANCHET¹, ARNAUD KELBERT², JEAN-MARC DELVIT¹

¹ Centre National d'Etudes Spatiales
18 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

² Thales Services
290 allée du Lac, 31670 Labège, France

Gwendoline.Blanchet@cnes.fr, Arnaud.Kelbert@thales-services.fr
Jean-Marc.Delvit@cnes.fr

Résumé – Cet article présente une nouvelle approche pour la mesure de FTM d'un satellite d'observation de la Terre en vol. Les méthodes classiquement utilisées pour l'étalonnage en vol de tels satellites sont basées sur des images de la Terre acquises de jour sur sites spécifiques, ou bien sur des étoiles si le satellite est suffisamment agile pour pouvoir les viser. Les images de la Terre prises de nuit peuvent cependant être exploitées pour mesurer la FTM en considérant les sources lumineuses sur Terre tel que l'éclairage urbain comme des sources quasi-ponctuelles. Pour ce faire, une nouvelle méthodologie a été mise en place et testées sur des images des satellites d'observation de la terre haute résolution Pléiades.

Abstract – This paper presents a new approach to measure in-flight MTF of an Earth observation satellite. Classical methods for such satellite calibration are based on Earth images acquired during the day on specific target, or by night on stars if the satellite is sufficiently agile to acquire quickly off-nadir images. However night images of the Earth can also be useful to measure MTF by considering light emission like urban lightings as quasi-ponctual sources. To do so, a new methodology has been developed and tested on images acquired by the high resolution Earth observation Pléiades satellites.

1 Présentation du satellite PLEIADES HR

1.1 Le programme PLEIADES

Le programme Pléiades est constitué de deux satellites d'observation de la Terre haute résolution (PHR1A et PHR1B) lancés respectivement le 17/12/2011 et 01/12/2012 par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Le système permet une capacité d'accès journalière en tout point du globe. Ces satellites acquièrent des images optiques de 20km de fauchée pour les besoins duaux, civil et défense, à la résolution nadir de 70cm pour sa voie la plus résolue. Des images panchromatiques (PAN) et multi-spectrales (XS constituée de 4 bandes : B0 bleue, B1 verte, B2 rouge, et B3 proche infra-rouge) sont acquises simultanément, permettant de produire des images couleur fusionnées à la résolution de 70cm, en prenant en compte le différentiel de FTM (Fonction de Transfert de Modulation) PAN et XS à Nyquist 0.15 contre 0.30.

Une des caractéristiques majeures de ces satellites est leur grande agilité, c'est-à-dire la capacité à enchaîner rapidement l'acquisition de scènes dépointées. Cette performance est atteinte grâce aux actionneurs gyroscopiques nouvelle génération mis à bord du satellite. Le système peut ainsi délivrer des images stéréoscopiques à faible coefficient stéréoscopique, des mosaïques d'images, et des images sur différents sites éloignés de la trace du satellite. Cette capacité a été largement utilisée pendant la recette en vol Pléiades [2] pour mesurer la qualité des images, notamment dans le

cadre de la mesure de la FTM et de la refocalisation, par l'acquisition d'images étoile et application de la méthode « étoile » spécifiquement développée pour Pléiades et actuellement méthode opérationnelle de référence [1]. Ces images étoiles peuvent en particulier être acquises sur les orbites de nuit, ne perturbant ainsi pas la mission principale de jour. Pour les satellites moins agiles, c'est-à-dire ne pouvant pas dépointer fortement et suffisamment vite, la méthode « étoile » n'est pas directement utilisable par absence d'images d'étoiles, mais nous montrons dans cet article qu'elle est cependant applicable sur des images de Terre de nuit en comparant les résultats à notre méthode de référence.

1.2 La mesure de FTM sur PLEIADES

Historiquement le calcul de FTM en vol était fait à partir d'images de mires radiométriques disposées sur la Terre, telle que les mires « damier » ou « radiale » (et plus occasionnellement avec des projecteurs de lumières) [4]. Cependant cette méthode est plus contraignante que la méthode « étoile ». De plus elle ne mesure la FTM que selon des directions privilégiées alors que la méthode « étoile » donne une estimation complète de la FTM dans tout le plan fréquentiel.

La méthode étoile est particulièrement intéressante pour mesurer la FTM en vol, les images n'étant pas perturbées par les conditions atmosphériques au moment de la prise de vue. De plus les étoiles sont des corps célestes bien caractérisés radiométriquement et parfaitement localisés, pouvant être considérées comme

des sources ponctuelles parfaites ce qui permet d'avoir directement accès à la FTM. Cette méthode est également intéressante d'un point de vue opérationnel car on peut acquérir ces images sur les orbites de nuit sans gêner les utilisateurs du satellite qui utilisent uniquement les images sur orbites de jour. La seule contrainte est éventuellement la visibilité de l'étoile à la période souhaitée qui n'est pas toujours assurée selon la configuration astrale du moment (la terre ou le soleil pouvant masquer l'étoile au satellite) et la position du satellite sur l'orbite, ce qui est potentiellement dommageable pour un suivi de la FTM tout au long de l'année.

Nous proposons dans cet article d'appliquer la méthode « étoile » sur des images de nuit de la Terre car elles ont l'avantage d'être toujours accessibles, bien que soumises aux conditions météorologiques, et ne perturbent pas la mission d'observation de jour. Cependant cela nécessite de prendre en considération la particularité des signaux lumineux terrestres. En se concentrant sur les sources lumineuses émettant suffisamment de signal visible au niveau du capteur [3] et suffisamment ponctuelles, seul l'éclairage anthropique est utilisable. En effet l'éclairage par la pleine lune est un signal trop faible dans les bandes spectrales PHR pour pouvoir espérer recueillir assez de photons. On estime un rapport de l'ordre de 10^7 entre l'éclairage du soleil et l'éclairage lune, ce chiffre pouvant varier selon de nombreux paramètres tels que l'azimut des astres ou les conditions atmosphériques d'acquisitions.

2 Eclairage urbain

Parmi les différentes sources de lumières anthropique, les lampes de l'éclairage urbain sont de bonnes candidates. Tout comme dans le cas de la méthode « étoile », une sélection des lampes est faite de sorte à avoir suffisamment de signal utile pour ne pas être dominé par le bruit tout en restant en dessous de la saturation. La puissance des lampes, leurs réponses spectrales (Figure 1) et les gabarits spectraux des imageurs sont à considérer, notamment pour la mesure de la FTM XS. Dans cet article, seule la FTM PAN est calculée.

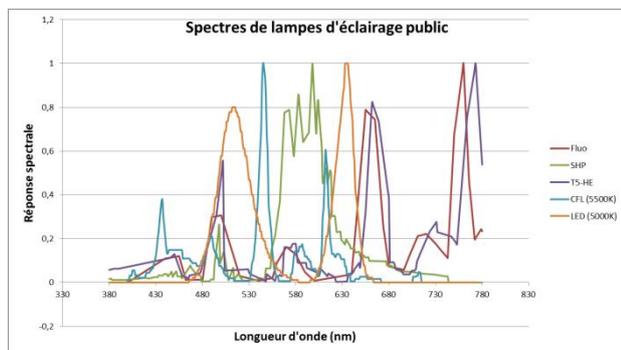


Figure 1 : Exemple de spectres de lampes (CEREMA/IGN)

A la différence des images étoiles pour lesquelles le signal lumineux de l'étoile est principalement entouré

de noir (fond cosmique), les images d'éclairage urbain souffrent de la présence de signal de fond qui ne peut pas être négligé car bien supérieur au signal d'obscurité. En effet, les lampes éclairent le paysage alentour (c'est l'objectif premier de ces lampes d'éclairer autour d'elles, les plus écologiques d'entre elles éclairant principalement vers le sol donc elles sont moins visibles depuis le satellite).

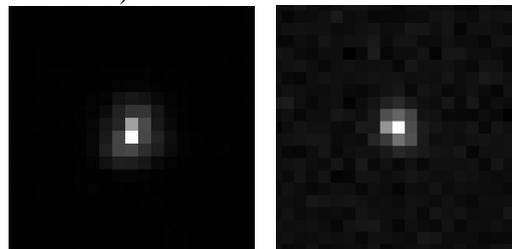


Figure 2 : Exemple d'étoile (à gauche) et de lampadaire (à droite) pour une image PHR PAN.

3 Choix des images

Un tri semi-automatique des images disponibles est fait de sorte à sélectionner des lampes non saturées de radiométrie adaptée, typiquement de valeur max supérieure à 150 pas codeurs (Figure 3), isolées dans un rayon de 20 pixels et suffisamment ponctuelles (voir Figure 4).

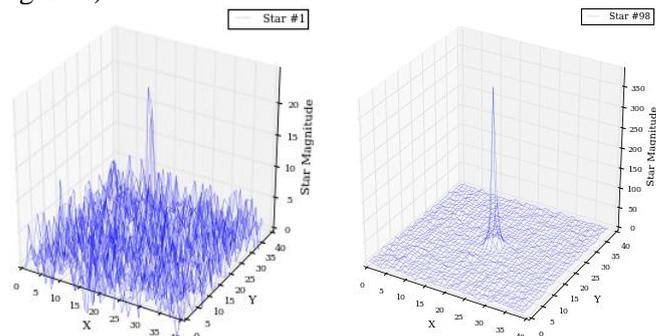


Figure 3 : Imagerie 40x40 pixels PHR PAN : (à gauche) lampe refusée car son niveau de signal est trop proche du bruit (à droite) lampe sélectionnée

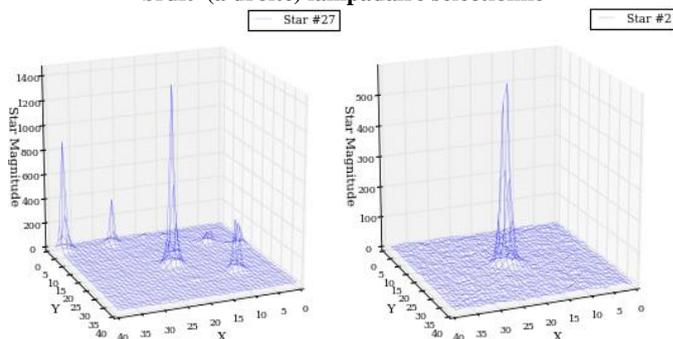


Figure 4 : Exemple d'imagerie 40x40 pixels PHR PAN refusée car elle contient plusieurs lampes (à gauche), ou elle a un support trop large (à droite)

Un prétraitement des images est appliqué pour corriger le fond de l'image. En effet, l'image PHR est acquise avec 20 étages TDI (Time Delay Integration) de sorte à augmenter le signal reçu au niveau du détecteur et donc d'avoir un meilleur RSB. La contrepartie est la présence de résidus d'égalisation sur les images, notamment des courants d'obscurité, car les coefficients d'égalisation sont valables pour la configuration nominale de 13 étages TDI (potentiellement corrigable

en vol en calculant au préalable des coefficients d'égalisation spécifiques à TDI 20 mais non réalisé en pratique). De plus l'éclairage du paysage autour de chaque lampadaire ne permet pas d'avoir un fond uniforme proche de l'obscurité. Pour traiter ces deux problèmes, un simple calcul de correction des courants d'obscurité obs_R est appliqué par imagerie S :

$$\forall(i, j) \in imagerie, S_c(i, j) = S(i, j) - obs_R$$

Les étapes d'égalisation et de correction d'obscurité résiduelle produisent des images signées réelles (à la différence des images d'entrée qui sont forcément des entiers positifs sur 12bits). Aucun seuillage de l'image n'est fait, notamment pour les valeurs négatives, pour préserver la radiométrie et ne pas introduire d'artefacts pour le calcul de la FTM.

Cette obscurité résiduelle est calculée par simple moyenne des valeurs de pixels situés sur une couronne de l'imagerie centrée sur chaque lampadaire.

$$obs_R = \frac{1}{\sum_{r=1}^R 4(N - 2r + 1)} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{k=0}^{N-1} S(r - 1, k) + S(N - r, k) + S(k, r - 1) + S(k, N - r) - S(r, r) - S(N - r, N - r) - S(N - r, r) - S(r, N - r) \right)$$

Où:

- S correspond à l'imagerie NxN pixels
- N est la taille de l'imagerie (typiquement 40 pixels dans nos tests)
- R est la largeur de la couronne (typiquement 5 pixels dans nos tests)

Equation 5 : Formule du calcul du correctif d'obscurité

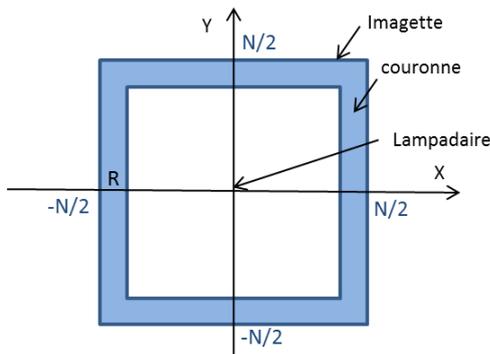


Figure 6 : La moyenne des niveaux de gris des pixels de la couronne (en bleu) donne une estimation des résidus d'obscurité

4 Mesure de la FTM

La mesure de la FTM via la méthode « étoile » consiste pour chaque imagerie k à calculer le centrage sous-pixelique (dx_k, dy_k) de chaque étoile et de résoudre le calcul par moindres carrés en entreliant toutes les images avec la connaissance de leur centrage. En pratique toutes les équations sont écrites dans le domaine de Fourier grâce à la propriété de linéarité de la TF, de la simplicité d'une multiplication (par rapport à une convolution dans le domaine spatial)

et par l'écriture de l'aliasing (*alias*) qui est présent dans les images PHR.

Le calcul du centrage se fait sous l'hypothèse que la partie imaginaire de la FTM est nulle. Le centrage sous-pixelique est obtenu par la recherche de la meilleure translation dans le domaine spatial, ou de manière équivalente par la recherche de l'exponentielle complexe (nommée « rampe » dans Equation 7) dans le domaine fréquentiel, de sorte à annuler la partie imaginaire basse fréquence.

Le calcul de la FTM se fait en transposant les équations aux lampadaires.

$$TF(lampadaire k) = alias (FTM \times rampe (dx_k, dy_k))$$

Equation 7 : Formule générale de la TF du lampadaire

Toutes ces équations permettent de construire un système linéaire avec autant d'équations que de lampadaires. Les inconnues étant tous les coefficients fréquentiels de la FTM discrète (définie sur un carré fréquentiel de pas l'inverse de la résolution spatiale de l'image, typiquement 1/0.7m Hz pour le PAN). Typiquement avec la méthode « étoile » plus de 50 équations sont écrites en combinant toutes les images d'étoiles acquises sur une trentaine d'images, ce qui permet d'avoir assez d'observables par rapport au nombre d'inconnues du système. Sur les images de la Terre de nuit, une seule image Pléiades suffit dès lors que l'on prend un centre urbain éclairé. En effet, sur une zone terrestre de 20kmx20km, les lampadaires exploitables sont très nombreux (une bonne trentaine) (Figure 8), alors que sur une zone astrale, seules quelques étoiles sont utilisables.



Figure 8 : Exemple du quartier résidentiel de Magny (~1kmx1km). En haut : image de jour avec les lampadaires du quartier. En bas : superposition de l'image PHR de nuit où chaque point blanc correspond à un lampadaire

5 Résultats sur des images satellites

Les tests réalisés sur une image PHR acquise de nuit sur la ville de Metz à TDI 20 montrent une très bonne estimation de la mesure de la FTM. Parmi la centaine d'images lampadaires disponibles, une sélection des 32 meilleures d'entre elles a été faite, c'est-à-dire les plus lumineuses (tout en écartant les saturantes ou les projecteurs qui n'ont pas un support ponctuel) (Figure 9) et celles dont le centrage est le mieux réparti dans le pixel $[-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$ (Figure 10) tout en écartant les images contenant plusieurs lampadaires.

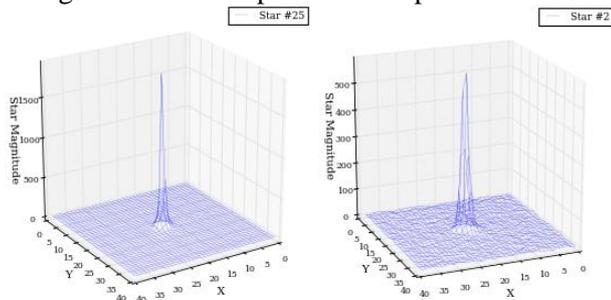


Figure 9 : A gauche : exemple de lampadaire choisi pour l'estimation de la FTM. A droite : lampadaire écarté car il a un support très large (il s'agit probablement d'un gros projecteur).

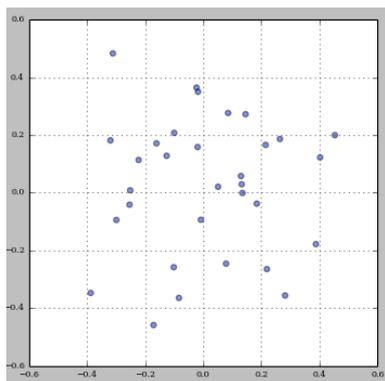


Figure 10 : répartition du centrage des 32 lampadaires choisis. La courbe de FTM obtenue est très propre (Figure 11) et les valeurs obtenues à Nyquist (fréquence normalisée 0.5) sont 0.152 en ligne, et 0.141 en colonne. Ces valeurs sont très proches des valeurs de FTM calculées avec la méthode « étoile » (Tab 1).

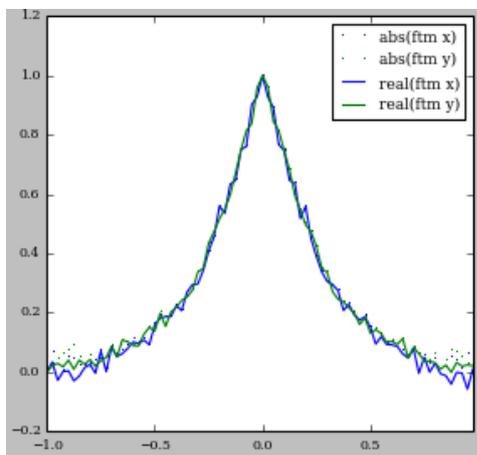


Figure 11 : (Traits pleins) partie réelle de la TF. (Traits pointillés) module de la TF.

Tab 1 : FTM PHR1B calculée par la méthode étoile

Fréquence normalisée	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Ligne	1	0,69	0,488	0,321	0,218	0,154
Colonne	1	0,695	0,471	0,305	0,206	0,152

Tab 2 : FTM PHR1B calculée sur lampadaires

Fréquence normalisée	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Ligne	1	0,75	0,56	0,303	0,227	0,156
Colonne	1	0,749	0,509	0,338	0,218	0,143

6 Conclusion

Nous avons proposé dans ce papier une application de la méthode « étoile », méthode opérationnelle PHR pour le calcul de la FTM, à des images de nuit de la Terre. Les résultats obtenus sur la voie PAN sont très proches de ceux obtenus sur des images d'étoiles ce qui permettrait donc de l'envisager opérationnellement sur PHR ou sur des systèmes d'observation de la Terre moins agiles.

La méthode reste sensible à la bonne sélection des sources lumineuses selon leur radiométrie (puissance de la lampe, source ponctuelle) et également leur bonne répartition en termes de phasage sur la grille d'échantillonnage (tout comme les étoiles). Cependant elle présente le grand avantage de permettre d'acquérir une multitude de sources lumineuses à partir d'une seule image ce qui permet d'avoir une barre d'erreur statistiquement plus faible. Plusieurs images acquises sur le même site doivent permettre d'améliorer encore les résultats et contrairement aux étoiles il est possible de par la multitude d'observables dans le champ d'estimer les variations même faibles de FTM dans le champ ou dans le temps. Une perspective intéressante consiste maintenant à faire une analyse statistique poussée des résultats sur la voie PAN en acquérant de nouvelles images de nuit et à étudier la faisabilité de la mesure de la FTM XS sur ces images.

7 Bibliographie

- [1] S. Fourest & al, "Star-based methods for Pléiades HR commissioning", ISPRS Melbourne 2012
- [2] G. Blanchet & al, "Mesures automatiques des performances radiométriques et géométriques des satellites Pléiades. Détail de la mesure de la FTM", GRETSI, 2013
- [3] B. Cutler & al, "Pléiades 1B et SPOT6. Image quality status after commissioning and 1st year in orbit", JACIE, 2014
- [4] D. Léger & al, «On-orbit MTF assessment of satellite cameras », ISPRS Gulfport 2003