

# Mesures automatiques des performances radiométriques et géométriques des satellites Pléiades.

## Détail de la mesure de la FTM.

GWENDOLINE BLANCHET, CHRISTOPHE LATRY, SEBASTIEN FOUREST

Centre National d'Études Spatiales  
18 av Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9, France

[gwendoline.blanchet@cnes.fr](mailto:gwendoline.blanchet@cnes.fr), [christophe.latry@cnes.fr](mailto:christophe.latry@cnes.fr), [sebastien.fourest@cnes.fr](mailto:sebastien.fourest@cnes.fr)

**Résumé** – Dans cet article, nous présentons les satellites Pléiades, constellation de deux satellites permettant l'observation de la Terre très haute résolution. Ses performances en termes de qualité image sont mesurées en vol pendant la recette en vol et pendant toute la durée de vie des satellites. Les principales performances sont données dans cet article. Une des spécificités de Pléiades est sa grande agilité, qui a permis l'acquisition des étoiles. De nouvelles méthodes de mesure de FTM et de refocalisation ont été mises au point à partir de ces images étoile. L'article présente ces nouvelles techniques.

**Abstract** – In this paper are presented the Pléiades constellation, a pair of Earth observation satellites allowing very high resolution imagery. Its performances are measured in flight, during the inflight commissioning and its lifetime. Its main performances are given in this paper. The specificity of the Pléiades satellite is its high agility which enables star acquisition. Consequently new methods have been designed to measure MTF and focus based on star images. This article presents those new techniques.

## 1 Les satellites Pléiades

### 1.1 Le programme Pléiades

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'Études 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 de 70cm. 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 à la résolution de 70cm. A noter qu'une nouvelle technique de fusion a été mise au point sur Pléiades [1] pour traiter la différence de résolution (70cm pour le PAN, 2.80m pour les XS) et de FTM (Fonction de Transfert et de Modulation) à Nyquist (de l'ordre de 0.15 pour le PAN, 0.30 pour les XS) entre les bandes PAN et XS.

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 [3]. Ces images peuvent être acquises sur les orbites de nuit, ne perturbant ainsi pas les contraintes opérationnelles.

### 1.2 Les performances

La recette en vol consiste à mesurer les performances du satellite juste après le tir et à valider les traitements sol. Elle se découpe en deux grands volets : radiométrie [4] et géométrie [5]. Les performances sont rappelées dans les deux tableaux ci-dessous.

Pour la partie radiométrie, les critères sont les résidus d'égalisation (NeDLI : mesure de la performance de normalisation des détecteurs CCD entre eux situés sur la barrette d'acquisition, et évolution temporelle du NeDLI dû à l'évolution de la réponse des détecteurs dans le temps), la précision de l'étalonnage absolu (capacité de conversion entre les comptes numériques des images en pas codeurs et des valeurs physiques sol en luminance), la valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist le long des axes et le rapport signal sur bruit (RSB) à la luminance de référence L2 (luminance à mi-dynamique utile).

Pour la partie géométrie, les critères sont la précision de localisation au sol des images (à 90%) (mesure de l'écart en mètre au sol entre la position visée par le satellite et la position réellement atteinte), le recalage des bandes PAN et XS (capacité de superposer différentes images acquises simultanément à bord à

différentes résolutions et décalées entre elles), et les résidus planimétriques dus aux défauts de modélisation des directions de visée et la méconnaissance de l'attitude fine du satellite. L'objectif de la recette en vol est de mesurer ces performances et de vérifier que les spécifications sont respectées afin de satisfaire les besoins des utilisateurs finaux.

Par conception instrumentale, les valeurs des FTM sont élevées pour toutes les bandes spectrales, et particulièrement pour les bandes XS (Figure 1). Par conséquent les images sont perturbées par l'artefact de repliement fréquentiel (aliasing), ce qui rend difficile l'estimation de la FTM (car la tâche image est très petite) et la fusion des images PAN et XS (car le recalage des images aliasées est difficile pour obtenir une bonne superposition sans artefact).

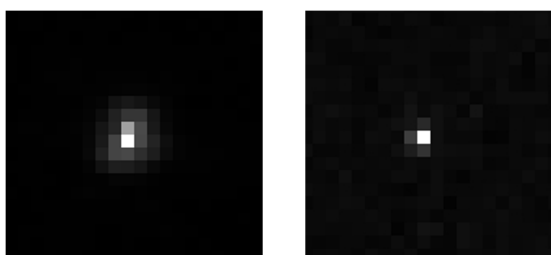


Figure 1 : Exemple d'étoile : PAN (à gauche) et XS (à droite)  
La tâche image est moins étalée pour le XS car il est plus aliasé.

Critères qualité image	Performance
Localisation à 90% PHR1A	10 m
PHR1B	5 m
Recalage PA/XS en pixel XS (RMS)	0.25
Recalage XS/XS en pixel XS (RMS)	0.25
Planimétrie en pixels PA (à 90%)	0.35
Planimétrie en mètres (à 99.7%)	0.5 m

Tab 1 : performances géométriques

Critères qualité image		Performance
NeDLI evolution (3 premiers mois)	PA	+0.08
	B0	+0.15
	B1	+0.2
	B2	+0.3
	B3	+0.3
Abs.	Précision de l'étalonnage absolu	5 %
FTM	FTM PA	0.16
	FTM XS (axe X)	0.33
	FTM XS (axe Y)	0.27
RSB	PA RSB @ L2	150
	B0 RSB @ L2	174
	B1 RSB @ L2	151
	B2 RSB @ L2	136
	B3 RSB @ L2	142

Tab 2 : performances radiométriques

## 2 Calcul de la FTM à partir d'images étoile

Les objets célestes de type étoile sont particulièrement intéressants car ils représentent une source ponctuelle, ils sont immobiles pendant la prise de vue, et très bien caractérisés dans la littérature (position dans le repère J2000, magnitude, température, ...) dans

les catalogues Hipparcos et Tycho. Leur utilisation pour le calcul de la FTM est une approche dans la lignée des mesures de FTM sur mire présentés dans des travaux récents [7], bien que pour Pléiades la méthode soit déjà opérationnelle sur deux satellites en vol.

L'estimation de la FTM à partir d'images étoile consiste tout d'abord à choisir une zone du ciel  $1.6 \times 1.6 \text{deg}^2$  (champ des images Pléiades) riche en étoiles de magnitude suffisamment faible pour avoir une bonne visibilité de l'étoile par rapport au bruit instrumental. Typiquement dans les mois d'hiver, la constellation des Pléiades est acquise car elle comporte un grand nombre d'étoiles accessibles (13 environ par image). Plusieurs acquisitions successives (typiquement 6) de la même zone du ciel sont faites de sorte à avoir assez d'images d'étoiles : des imagerie de taille (L,M) sont ensuite extraites centrées sur chaque étoile identifiée. Typiquement, les imagerie ont des tailles  $32 \times 32$  pixels.

Une vérification visuelle de la qualité des imagerie est réalisée afin de supprimer les étoiles trop peu brillantes (c'est à dire les imagerie où le bruit est trop important par rapport au signal acquis) et les cas où plusieurs étoiles sont présentes sur la même imagerie. L'estimation de la FTM PAN et XS se fait à partir de deux jeux d'images différents. En effet pour essayer de palier au très fort aliasing des images XS, des acquisitions spécifiques XS sont réalisées avec un fort ralenti du satellite (typiquement un facteur 6), de sorte à sur-échantillonner dans la direction d'avancement du satellite, c'est-à-dire le long des colonnes.

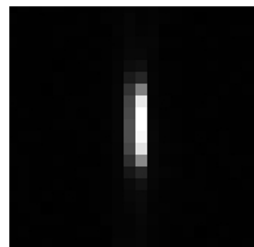


Figure 2 : Exemple d'étoile bande B0 acquise avec ralenti 6 : l'étoile est sur-échantillonnée le long des colonnes uniquement

La deuxième étape consiste à calculer le centrage de chaque étoile sur la grille d'acquisition afin de pouvoir par la suite faire un bon entrelacement des différentes imagerie. Le calcul du centrage de chaque étoile sur l'imagerie se fait sous l'hypothèse que la FTM est réelle (partie imaginaire 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 la meilleure rampe de phase dans le domaine fréquentiel, de sorte à annuler la partie imaginaire basse fréquence. La Figure 3 montre les centrages obtenus pour 36 images Pléiades. Pour le cas des images XS, les images sont ensuite sous-échantillonnées du facteur de ralenti pour obtenir un grand nombre d'imagerie.

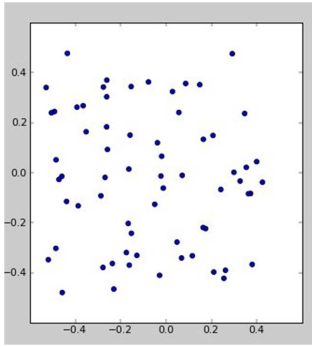


Figure 3 : Centrages des images étoiles

La dernière étape consiste à calculer la FTM par moindres carrés en entreaçant toutes les imgettes avec la connaissance de leur centrage  $(dx,dy)$ . Or la grille d'échantillonnage est ajustée en fonction de ce décalage, par conséquent le décalage de la réponse impulsionnelle est équivalent à multiplier sa TF (autrement dit la FTM) par une rampe de phase. Ainsi chaque élément de la TF de l'image est la somme de la FTM aliasée multipliée par la rampe de phase (Equation 4). La FTM est calculée de manière itérative sur toutes les images. Les détails mathématiques sont précisés ci-dessous. La TF de chaque étoile  $k$  sur chaque image est une matrice de taille  $(L,M)$  qui couvre le domaine fréquentiel normalisé  $[-0.5, 0.5]^2$ . Elle a pour seule inconnue la FTM car le centrage  $(dx_k,dy_k)$  de cette étoile  $k$  a été calculé précédemment.

$$TF(\text{étoile } k) = \text{alias} (FTM * \text{rampe} (dx_k, dy_k))$$

Equation 4 : Formule générale de la TF d'une étoile

En considérant toutes les acquisitions d'étoiles réalisées sur la même zone, Equation 4 est valable pour toutes les imgettes étoiles. Toutes ces équations permettent de construire un système linéaire avec autant d'équations que d'étoiles (typiquement plus de 50 équations) (Equation 6). Une résolution par moindres carrés permet de calculer la FTM. En effet, par linéarité de la TF, la TF de l'image est la somme des TF(étoile). De plus, si l'on souhaite restituer la FTM sur un domaine fréquentiel plus grand que avec un facteur de sur-échantillonnage  $s$ , alors  $s^2$  termes de cette FTM contribuent à chaque TF(étoile). Typiquement pour la voie PAN, nous fixons  $s=2$ , car l'instrument coupe les fréquences supérieures à  $[-1,1]$  (Figure 5).

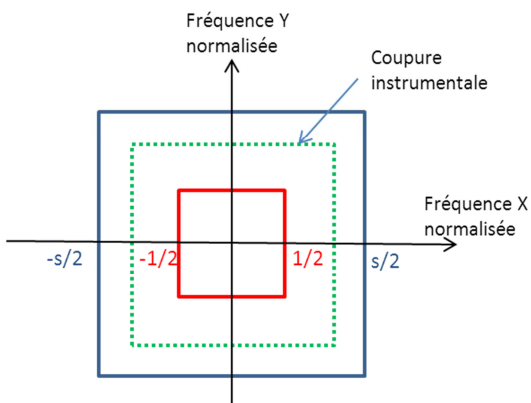


Figure 5 : Domaines fréquentiels accessibles par l'imgette étoile (carré rouge), recherché (carré bleu), instrument (carré vert)

Dans l'équation ci-dessous l'exposant indique le numéro de l'étoile considérée, et l'indice la position dans la matrice.

$$TF_{l,m}^k = \sum_{u=0}^{s-1} \sum_{v=0}^{s-1} \left( \text{rampe}(dx_k, dy_k)_{l+u*s, m+v*s} \cdot FTM_{l+u*s, m+v*s} \right)$$

Equation 6 : TF d'une étoile sur-échantillonnée

Cette équation peut être écrite pour toutes les images étoiles détectées dans toutes les images acquises. Au final, nous obtenons un système linéaire par position fréquentielle  $(l,m)$ . Un terme de régularisation peut être ajouté à la résolution par moindres carrés afin de prendre en compte la coupure fréquentielle instrumentale (connaissance a priori).

Figure 7 et Figure 8 montrent la FTM calculée et la PSF (Point Spread Function) de l'instrument.

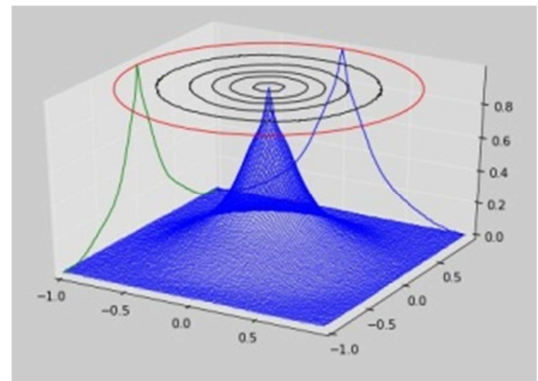


Figure 7 : Estimation de la FTM

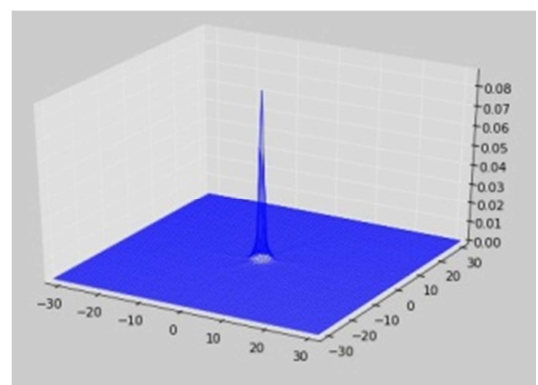


Figure 8 : Estimation de la réponse impulsionnelle

Le calcul de la FTM peut se faire en utilisant toutes les imgettes, quelques soient leur position dans le champ. Dans ce cas, la FTM mesurée est une FTM moyenne de l'instrument (comme indiquée dans les tableaux des performances). Une estimation par sous-fauchée a également été réalisée et a montré des variations significatives dans le champ.

La FTM est calculée lorsque l'instrument est bien focalisé. Sur Pléiades, un mécanisme thermique permet de déplacer la position du plan focal le long de l'axe instrumental, de sorte à se positionner au meilleur point de focalisation. Cela permet de suivre la défocalisation naturelle de l'instrument en vol en refocalisant régulièrement.

### 3 Refocalisation instrumentale

Pour calculer la refocalisation instrumentale, des campagnes d'acquisition d'images étoile à différents états de défocalisation sont réalisées (c'est-à-dire à différentes températures de l'anneau de refocalisation). La Figure 2 montre l'élargissement de la tâche image lorsque l'instrument est défocalisé. Le modèle de diminution de la FTM en fonction de la défocalisation théorique suivant est utilisé pour pondérer la FTM de chacune des étoiles considérées (en fonction de son état de défocalisation) [6] :

$$\text{Perte FTM [f]} = 2 \cdot J_1(|f|) / |f|$$

Où :

-f est la fréquence :

$$f = \pi \cdot \text{defocalisation} / \text{ouverture} \cdot f_r \cdot f_c \cdot (1 - f_r \cdot f_c / f_{\text{opt}})$$

- $f_r$  est la fréquence radiale

- $f_c$  est la fréquence de Nyquist

- $f_{\text{opt}}$  est la fréquence de coupure optique

- $J_1$  la fonction de Bessel.

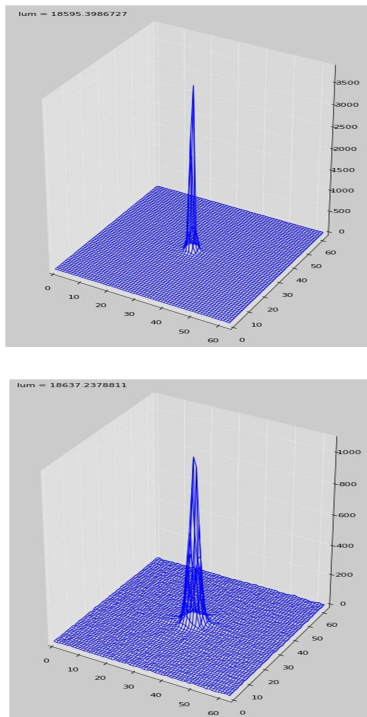


Figure 9 : Même image bien focalisée (en haut) et mal focalisée (en bas)

Le meilleur point de focalisation est obtenu avec la même méthode par moindres carrés que pour le calcul de la FTM : il s'agit du point pour lequel les résidus obtenus sont les plus faibles (Figure 10).

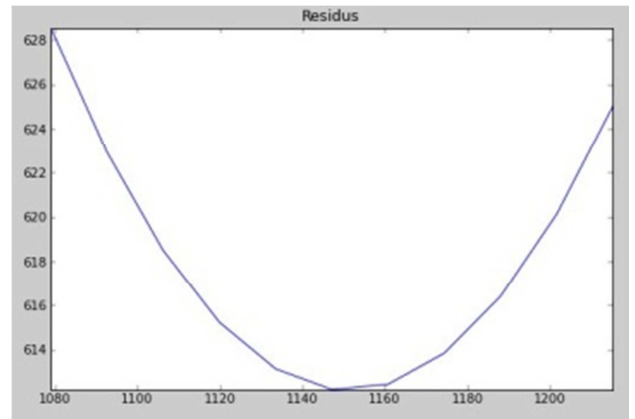


Figure 10 : Minimisation du résidu

### 4 Conclusion

Grâce à l'agilité des satellites Pléiades, une méthode originale de calcul de FTM et de refocalisation à partir d'images étoiles a été présentée. Elle s'appuie sur une connaissance a priori de l'instrument (aberrations optiques mineures, modèle de défocalisation, présence d'aliasing) pour faire des estimations très fines de la FTM instrumentale et de refocalisation.

### 5 Bibliographie

- [1] C. Latry & al, «Chaine de fusion P+XS des images Pléiades-HR », GRETSI 2013
- [2] L. Lebègue & al, «Pleiades-HR Image Quality Commissioning », ISPRS Melbourne 2012
- [3] S. Fourest & al, «Star-based methods for Pleiades HR commissioning », ISPRS Melbourne 2012
- [4] G. Blanchet & al, «Pleiades-HR innovative techniques for radiometric image quality commissioning », ISPRS Melbourne 2012
- [5] D. Greslou & al, «Pleiades-HR innovative techniques for geometric image quality commissioning », ISPRS Melbourne 2012
- [6] W.H Steel, «The Defocused Image of Sinusoidal Gratings», W.H Optica Acta, 1956, Vol 3, Ed 2, pages 65-74
- [7] M. Delbraccio & al, «The Non-parametric Sub-pixel Local Point Spread Function Estimation Is a Well Posed Problem», IJCV 2012