

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN**

**- MOHAMED BOUDIAF -**



FACULTE DE GENIE ÉLECTRIQUE  
ÉCOLE DOCTORALE DE GENIE ÉLECTRIQUE  
DEPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

**Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister**

Spécialité : Electronique

Option : Systèmes de Communications Modernes

Présentée par :

**HARHOUZ AHLAM**

Sujet du mémoire :

# **Évaluation Multidate de la Qualité de l'Imageur d'Alsat-1**

Soutenue le / / 2012 devant le jury composé de :

Mr A. BOUDGHENE STAMBOULI	Professeur (USTO-MB)	Président
Mr M. F. BELBACHIR	Professeur (USTO-MB)	Examineur
Mr Y. BENTOUTOU	Maitre de Recherche - CTS	Examineur
Mr A. BELGHORAF	Professeur (USTO-MB)	Rapporteur
Mr A. RACHEDI	Maitre de recherche (CTS)	Co-rapporteur

# Évaluation Multidate de la Qualité de l'Imageur d'Alsats-1

## Résumé

Le contrôle de la qualité des images pour un satellite d'observation de la terre doit se faire pendant toute sa durée de vie en orbite, à cet effet, des images de référence ont été prises par ALSAT-1 entre le début 2004 et la fin 2006 sur trois types de cibles :

- La première est une région enneigée homogène claire (blanche) au-dessus de l'Antarctique (en automne/hiver) et au-dessus de l'Arctique (au printemps/été).
- La deuxième est une région sombre prise de nuit au-dessus de l'Océan pacifique pour mettre en évidence les variations du bruit d'obscurité,
- La troisième est une région claire du Nevada (USA) appelée Rail-Road-Vallée dont la radiation est mesurée au sol pendant l'acquisition de l'image par le satellite et ceci pour ajuster le calibrage absolu des instruments embarqués.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la variation de la qualité de la caméra SLIM-6 d'ALSAT-1 sur une période de trois ans de fonctionnement en analysant les images obtenues par l'observation des cibles de référence prises entre le début 2004 et la fin 2006

Nous avons aussi analysé la sensibilité lumineuse pour chaque canal (vert, rouge et proche infra-rouge), en faisant une comparaison de l'évaluation radiométrique, pixel à pixel, entre deux images de sites homogènes (scènes avec un rayonnement de fond uniforme) à deux dates différentes avec les mêmes conditions de prise de vue. Cette évaluation radiométrique a été faite sur deux types de cibles: cibles noires et cibles lumineuses (claires).

A cet effet, on a utilisé plusieurs méthodes d'évaluation basées sur des outils mathématiques et algorithmiques. On peut citer les méthodes d'évaluation objectives (PSNR, Entropie, AMBE) ainsi que d'autres méthodes d'évaluation subjectives (analyse visuelle, utilisation des indicateurs statistiques).

**Mots Clés:** Alsats-1, image satellitaire, télédétection, qualité radiométrique, capteur CCD, SLIM-6-, bruit d'obscurité.

# Abstract

The control of the image quality of an earth observation satellite must be permanently performed during all its orbit life. To achieve this, reference images of three types of targets were taken by Alsat-1 between early 2004 and late 2006:

- The first target is an homogeneous white region (clear snow) of Antarctica (in fall / winter terms) and above the Arctic region (spring / summer terms).
- The second target is a dark region taken by night over the Pacific Ocean to emphasize variations of dark noise,
- The third target is a clear area along the Rail Road Valley (Nevada, United States) in which radiation is measured on the ground at the same time to get the absolute calibration of on board instruments.

The purpose of this research study is to assess the variation of the camera quality over a three years period of Alsat-1 operations, by analyzing the images reference taken between early 2004 and late 2006.

We also analyzed the channel light sensitivity (green, red and infrared) through a radiometric estimation, pixel by pixel of two images for a typical homogeneous site (scenes with a uniform background radiation) at two distinguished periods of time, while maintaining the same setting. This radiometric evaluation concerned two types of targets only (dark target and bright target).

To this aim, we used a variety of assessment methods, all based on mathematical and algorithmic tools. They includes objective assessment (such as PSNR, entropy, AMBE, etc...) and much more other subjective methods (such as visual analysis, use of statistical indicator, etc...).

# Table des matières

Résumé .....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux .....	x
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>

## Chapitre I

### Satellites et capteurs pour la télédétection

I.1 La télédétection .....	4
I.2 Les satellites d'observation de la terre .....	6
I.2.1 Les types de satellites .....	6
I.2.2 Les différentes résolutions d'un satellite d'observation de la terre.....	7
I.3 Le micro satellite Alsat- 1 .....	7
I.3.1 Description .....	8
I.3.2 La charge utile SLIM-6.....	9
I.3.3 Le bruit dans l'imageur CCD.....	17
I.4 Conclusion.....	19

## Chapitre II

### Outils et méthodes d'évaluation

II.1 Caractérisation radiométrique de la caméra d'Alsat-1 avant le lancement .....	21
II.1.1 Configuration de l'imageur.....	21
II.1.2 Déroulement de l'expérience .....	21
II.1.3 Résultats de test pour chaque canal .....	22
II.2 Les premières évaluations des images d'Alsat-1 .....	25
II.3 Caractérisation radiométrique de la caméra d'Alsat-1 après le lancement.....	27
II.3.1 Position du problème .....	27
II.3.2 Méthodes d'évaluation .....	28

II.4 Conclusion .....	32
-----------------------	----

### **Chapitre III**

#### **Évaluation des réponses radiométriques de l'imageur pour les cibles noires**

III.1 Les cibles noires .....	34
III.2 Les images prises par les caméras du Banc 1 .....	34
III.3 Les images prises par les caméras du Banc 0.....	40
III.4 L'évolution de la réponse des photosites pour les images noires.....	46
III.5 Conclusion.....	49

### **Chapitre IV**

#### **Évaluation des réponses radiométriques de l'imageur pour les cibles lumineuses**

IV.1 Les cibles lumineuses .....	52
IV.2 Les images prises par les caméras du Banc 1 .....	53
IV.2.1 Les images de l'Antarctique.....	56
IV.2.2 Les images de <i>Greenland</i> (Artique).....	59
IV.3 Les images prises par les caméras du Banc 0.....	62
IV.3.1 Les images de l'Antarctique.....	63
IV.3.2 Les images de <i>Greenland</i> (Artique).....	67
IV.4 Conclusion.....	70

<b>Conclusion générale</b> .....	<b>72</b>
----------------------------------	-----------

<b>Bibliographie</b> .....	<b>74</b>
----------------------------	-----------

<b>Annexe</b> .....	<b>77</b>
---------------------	-----------

# Liste des figures

Figure I.1: Principe de la télédétection. ....	4
Figure I.2: Géométrie de mesure de la réflectance.. ....	5
Figure I.3: satellites d'observation de la terre .....	7
Figure I.4: Micro satellite algérien Alsat-1.....	8
Figure I.5: structure du satellite Alsat-1 .....	8
Figure I.6: La charge utile d'Alsat-1.....	10
Figure I.7: Principe du balayage Pushbroom. ....	10
Figure I.8: Schéma interne du KLI 10203. ....	11
Figure I.9: Ligne détectrice. ....	11
Figure I.10: Capacité MOS avec éclairage appliquée à une tension positive.....	12
Figure I.11: Illustration des horloges ( $C_{LOG}$ et PHIA) appliqués aux registres. ....	13
Figure I.12: Principes de transfert de charges.....	14
Figure I.13: Représentation du registre de lecture .....	15
Figure I.14: Effet d'atténuation de la lumière selon la loi en cosinus .....	17
Figure I.15: Bruit d'obscurité ( <i>dark noise</i> ).. ....	18
Figure I.16: Bruit de Remise à zéro. ( <i>Reset Noise</i> ).....	19
Figure II.1: Configuration de l'imageur SLIM-6 . ....	21
Figure II.2 : Sphère d'intégration, photomètre, imageur et ordinateur de contrôle . ....	22
Figure II.3: Exemple d'image de test du canal-3 PIR.....	22
Figure II.4: Courbes de réponse radiométrique des caméras 1,2 et 3 .....	23

Figure II.5: Courbes de réponse radiométrique des caméras 4,5 et 6 .....	24
Figure II.6: Anomalies sur l'extrait de l'image de la Région d'In Azzaoua.....	25
Figure II.7: Extrait de l'image multispectrale de la baie d'Alger (700x900 pixels).....	26
Figure II.8: Anomalie sur les images des caméras 4,5 et 6.....	27
Figure II.9: Réponse radiométrique idéale de la caméra d'Alsat1 .....	28
Figure III.1: Réponses radiométriques moyennes de la caméra-1 pour les images DA000264sm, DA00026csm et DA0002f5sm.....	35
Figure III.2: Différence entre les réponses radiométrique moyennes de la caméra-1 .....	36
Figure III.3: Rapport entre les réponses radiométriques moyennes de la caméra-1 .....	37
Figure III.4: Réponse radiométrique moyenne de la caméra-1 (image DA000264sm) .....	38
Figure III.5: Réponses radiométriques des photosites 6864 et 8902 de la caméra-1 pour l'image DA000264sm .....	39
Figure III.6: Réponses radiométriques moyennes de la caméra-6 pour les images DA000264pm, DA00026cpm et DA0002f5pm .....	41
Figure III.7: Différence entre les réponses radiométriques moyennes de la caméra-6 .....	42
Figure III.8: Rapport entre les réponses radiométriques moyennes de la caméra-6 .....	42
Figure III.9: Réponses radiométriques des images prises par le satellite ALSAT-1 .....	43
Figure III.10: Réponses radiométriques des images prises par le satellite UK-DMC .....	43
Figure III.11: Illustration du problème de l'écart entre les pixels pairs et impairs .....	44
Figure III.12: La réponse radiométrique moyenne de la caméra-1 (image DA000264pm) .....	45
Figure III.13: Les réponses radiométriques du photosite n°50 pour les deux bancs. ....	46
Figure III.14: Les réponses radiométriques du photosite n°5000 pour les deux bancs. ....	47
Figure III.15 : Les réponses radiométriques du photosite n°9500 pour les deux bancs. ....	47
Figure III.16: Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 pour deux images (DA000264sm, DA0002f5sm) .....	48
Figure IV.1: Localisation géographique de la zone « <i>Greenland</i> ».....	52
Figure IV.2: Localisation géographique de la zone « <i>Antarctique</i> ».....	52
Figure IV.3: Réponse radiométrique moyenne de la caméra-1 pour l'image DA000270sm..	53
Figure IV.4: Réponse radiométrique moyenne de la caméra-2 pour l'image DA000270sm ..	54
Figure IV.5: Réponse radiométrique moyenne de la caméra-3 pour l'image DA000270sm ..	55
Figure IV.6: Les images de l'Antarctique et les fenêtres sélectionnées (caméra-1).....	56

Figure IV.7: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 1,2 et 3 pour la 1 <sup>ère</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique .....	58
Figure IV.8: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 1,2 et 3 pour la 2 <sup>ème</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique .....	58
Figure IV.9: Les réponses radiométriques moyennes de la caméra-3 pour la 2 <sup>ème</sup> fenêtre extrait de deux images de l'antarctique .....	59
Figure IV.10 : Les images de <i>Greenland</i> et les fenêtres sélectionnées (caméra-1).....	60
Figure IV.11: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 1,2 et 3 pour une fenêtre extrait de deux images de <i>Greenland</i> . .....	61
Figure IV.12: Les réponses radiométriques moyennes de la caméra 2 pour une fenêtre extrait de deux images de <i>Greenland</i> (DA000208sm et DA0002e7sm) .....	61
Figure IV.13: L'image DA000270pm de l'antarctique prise le 27/12/2004 par la caméra-4 du banc-0- .....	62
Figure IV.14: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4, 5 et 6 pour l'image DA000270pm de l'Antarctique .....	62
Figure IV.15: Les images de l'Antarctique et les fenêtres sélectionnées (caméra-4) .....	63
Figure IV.16: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 1 <sup>ère</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique .....	65
Figure IV.17: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 2 <sup>e</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique .....	65
Figure IV.18: Les réponses radiométriques moyennes de la caméra-6 pour la 1 <sup>ère</sup> fenêtre extrait de deux images de l'Antarctique .....	66
Figure IV.19: Les réponses radiométriques moyennes de la caméra-4 pour la 2 <sup>e</sup> fenêtre extrait de deux images de l'antarctique .....	67
Figure IV.20: Les images de <i>Greenland</i> et les fenêtres sélectionnées (caméra-4).....	67
Figure IV.21: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 1 <sup>ère</sup> fenêtre extrait de deux images de <i>Greenland</i> .....	69
Figure IV.22: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 2 <sup>e</sup> fenêtre extrait de deux images de <i>Greenland</i> .....	69
Figure IV.23: Les réponses radiométriques moyennes de la 2 <sup>ème</sup> fenêtre extrait de deux images de <i>Greenland</i> (caméra-4) .....	70



# Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques techniques d'Alsat-1.....	9
Tableau II.1: Caractéristiques de l'image DA0007Apm (baie d'Alger) .....	26
Tableau III.1: Les images sélectionnées de l'océan pacifique et les informations associées.....	34
Tableau III.2: Analyse quantitative des images de l'océan pacifique du banc-1-.....	34
Tableau III.3: Analyse quantitative des images de l'océan pacifique du banc-0-.....	40
Tableau III.4: L'intervalle de variation des réponses radiométriques des photosites cachés.....	49
Tableau IV.1: Les images sélectionnées de <i>Greenland</i> et les informations associées.....	52
Tableau IV.2: Les images sélectionnées de l'Antarctique et les informations associées.....	52
Tableau IV.3: Les valeurs d'analyse quantitative pour les deux fenêtres extraites des deux images de l'Antarctique (banc-1-). .....	57
Tableau IV.4: Les indicateurs statistiques pour la première fenêtre extraite des deux images de Greenland (banc-1-). .....	60
Tableau IV.5: Les indicateurs statistiques pour les deux fenêtres extraites des deux images de l'antarctique (banc-0-). .....	64
Tableau IV.6: Les indicateurs statistiques pour les deux fenêtres extraites des deux images de <i>Greenland</i> (banc-0-). .....	68

---

# Introduction générale

---

**A**LSAT-1 est le premier satellite Algérien mis en orbite. Il a été lancé le 28 novembre 2002 à 6h07 GMT par le lanceur russe *COSMOS-3M* depuis le cosmodrome de Plesetsk (Russie) sur une orbite héliosynchrone à une altitude de 686km.

Il est doté d'une charge utile de type caméra multispectrale appelée **SLIM-6** et composée de six canaux. Chacun d'eux, est doté d'un capteur CCD et d'une optique convergente associés à des circuits électroniques.

La qualité des images d'ALSAT-1 dépend de la qualité des instruments de prise de vue et de leur conception. Pour la contrôler, un ensemble de mesures radiométriques de l'imageur sont effectuées avant le lancement du satellite et pendant le début de son cycle de vie en orbite, en analysant les premières images de référence: images de test faites à travers une sphère d'intégration, images prises de nuit, images au-dessus de l'océan, ou des images de zones enneigées. Ensuite, il faut détecter et analyser les variations de la qualité radiométrique de la camera causés par le vieillissement des instruments et du satellite lui même. Cette analyse doit être périodique pour localiser les moindres défauts sur les images brutes.

Afin d'évaluer la variation de la qualité de la camera SLIM-6 en vol, on analyse les images obtenues des cibles de référence prises.

Le but de notre travail de recherche est d'analyser la sensibilité de chaque canal, par la comparaison de l'évaluation radiométrique pixel-à-pixel entre deux images de sites homogènes (scènes avec un rayonnement de fond uniforme) acquises à deux dates différentes avec les mêmes conditions de prises de vue.

A cet effet, plusieurs images de référence ont été prises par ALSAT-1 entre le début 2004 et la fin 2006. Elles concernent deux types de cible (l'une lumineuse et l'autre sombre):

- Deux régions enneigées homogènes claires (blanche) l'une au dessus de l'Antarctique (en automne/hiver) et l'autre au dessus de *Groenland* (au printemps/été)
- Une région sombre prise de nuit au dessus de l'océan pacifique pour mettre en évidence les variations du bruit d'obscurité.

Plusieurs modèles ont été proposés pour l'évaluation de ces images. A savoir, les méthodes d'évaluation objective (**Peak Signal to Noise Ratio** - PSNR, Entropie, **Absolute Mean Brightness Error-AMBE**) ainsi que d'autres méthodes d'évaluation subjectives (analyse visuelle, utilisation des indicateurs statistiques).

Ce mémoire est cependant divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux satellites et capteurs de télédétection. Après un bref rappel des notions de base de la télédétection, un aperçu historique nous a conduits à citer les différents types de satellites d'observation de la terre. Ensuite nous avons décrit en détail ALSAT-1 et son imageur SLIM-6.

Le deuxième chapitre est consacré à la mise en œuvre de la méthodologie d'analyse et d'évaluation. Nous avons, en premier lieu, décrit les tests radiométriques de la caméra effectués à Guildford (en Angleterre). Ensuite, nous avons décrit la démarche adoptée ainsi que les méthodes d'évaluation utilisées.

Dans Le troisième chapitre, nous avons présenté et interprété les résultats de l'évaluation radiométrique de l'imageur pour les cibles noires, afin de mettre en évidence les variations du bruit d'obscurité.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'évaluation radiométrique de l'imageur mais cette fois pour les régions lumineuses (claire), ainsi que l'analyse du comportement de la caméra SLIM-6 échelonnée sur une période de trois ans de fonctionnement d'ALSAT-1.

---

# Chapitre I

---

## Satellites et capteurs pour la télédétection

**A**u cours des dernières années, L'emploi de la télédétection pour l'acquisition d'informations sur l'environnement terrestre au moyens de capteurs (embarqués sur des satellites) a eu une diffusion de plus en plus importante grâce aux progrès technologiques. L'un de ces progrès est les nouveaux capteurs ou nouveaux systèmes de détection qui permettent d'avoir accès à des informations beaucoup plus détaillées.

*Dans ce contexte, le premier chapitre de notre travail va être consacré aux satellites et capteurs de télédétection. Après un bref rappel des notions de base de la télédétection, un aperçu historique nous conduira à citer les différents types de satellites d'observation de la terre. Enfin nous allons décrire en détaille le satellite ALSAT-1 et son imageur.*

## I.1 La télédétection

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Télé signifie « à distance » et détection veut dire « découvrir » ou « déceler ». La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information [1].

Le rayonnement solaire dont est à l'origine la lumière, permet la perception des objets par un processus appelé illumination. L'énergie produite par le soleil se propage sous forme d'ondes jusqu'à la surface terrestre. Une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère (25%), une autre partie est diffusée (25%) et le reste atteint la surface terrestre (50%) [2]. La partie du rayonnement qui atteint la surface est absorbée et réfléchi. C'est ce rayonnement qui est capturé par les instruments de télédétection à différentes positions sur le spectre électromagnétique.

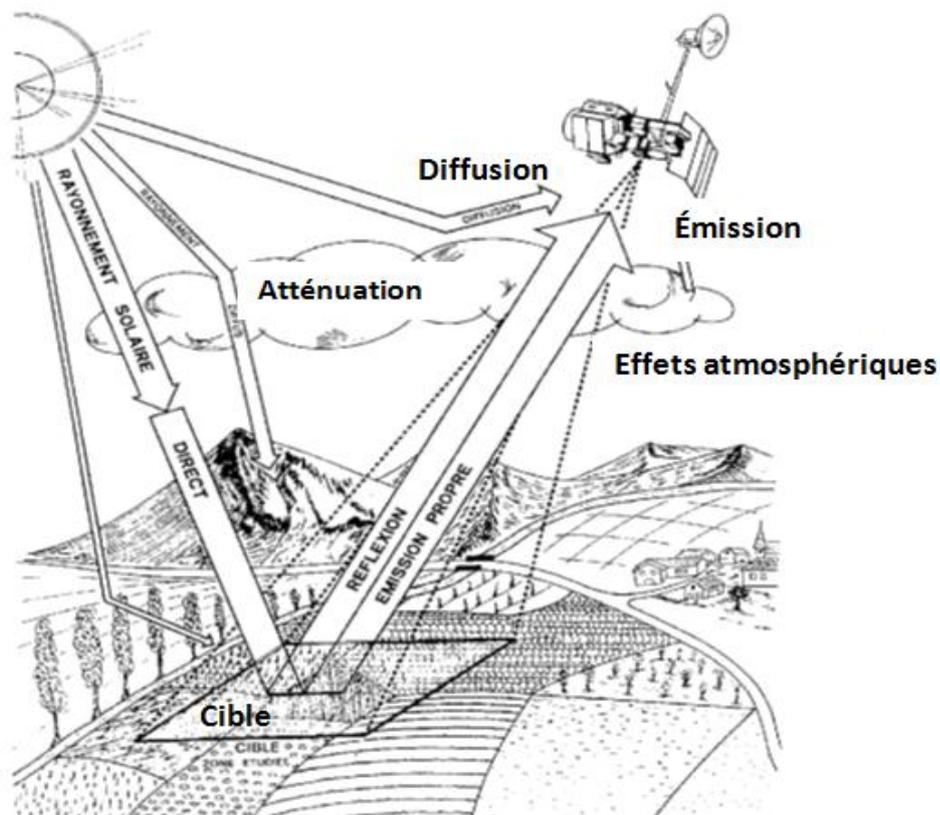
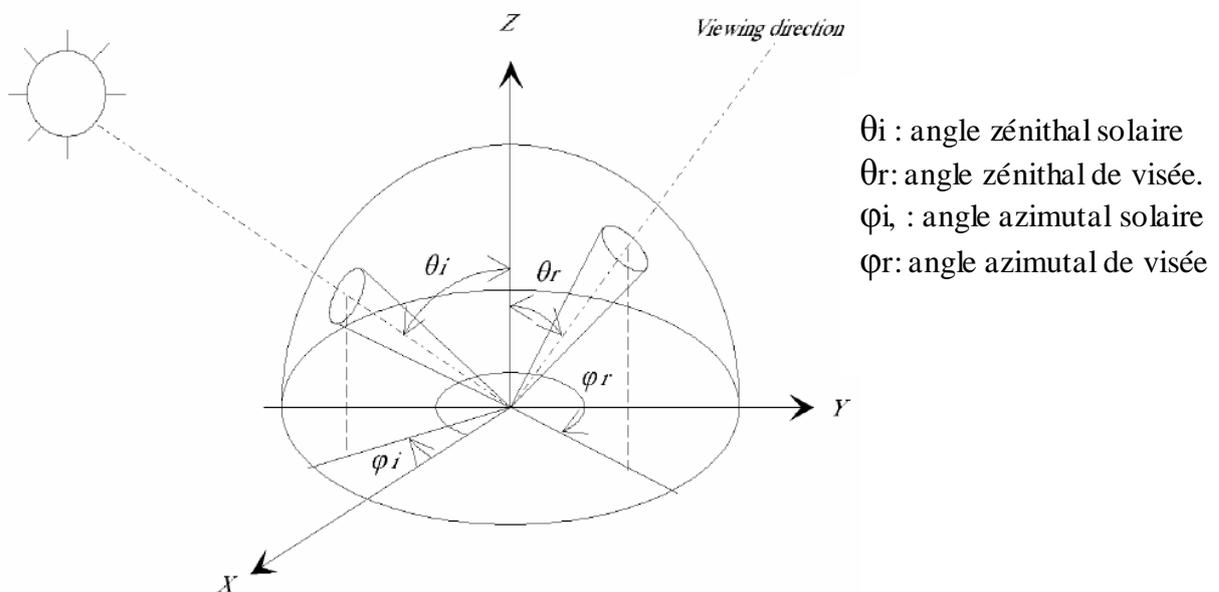


Fig I.1 : Principe de la télédétection [3].

Les propriétés des objets conditionnent la façon dont ils vont réagir au rayonnement. Les propriétés comme l'absorption, la réflexion et la transmission sont particulièrement importantes. C'est le pouvoir d'absorption et de réflexion spectrale propre à chaque objet qui est à l'origine de sa couleur. Par exemple, un objet bleu absorbe les ondes dans le vert et le rouge tout en réfléchissant celles dans le bleu. L'objectif des instruments de télédétection est, au sens large, de capturer ces phénomènes d'ondes de manière numérique [4].

Tous les processus d'interaction rayonnement/matière dépendent de la longueur d'onde d'observation. Une observation est ainsi fonction:

- de la nature de la surface observée;
- de la longueur d'onde du rayonnement;
- de l'énergie incidente au niveau de la surface (intensité et distribution);
- de la géométrie soleil-cible-capteur (Figure I.2) [5].



**Fig I.2:** Géométrie de mesure de la réflectance [5].

## I.2 Les satellites d'observation de la terre

Le 1er avril 1960, les Etats-Unis avaient procédé au lancement du premier satellite météorologique TIROS-1 équipé de caméras de télévision pour le suivi des nuages. Les satellites d'observation de la terre ont franchi de nouvelles étapes en 1972 avec le lancement de Landsat 1 suivi au milieu des années 80 de Landsat 4 et 5 et de SPOT. [6]

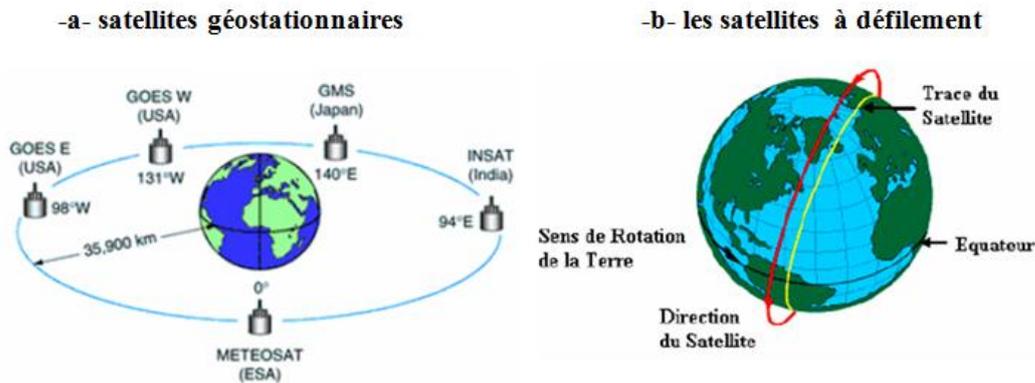
La 1<sup>er</sup> évolution majeure de la famille Spot intervient avec SPOT-4 lancé en 1998. Le satellite peut faire des observations dans le moyen infrarouge et embarque l'instrument appelé 'Végétation'. La 2<sup>ème</sup> évolution arrive en 2002 avec SPOT-5 : le satellite photographie désormais la Terre avec une résolution de 2,5 m [7].

En décembre 2012 le NASA prévoit de lancer LDCM. Cette mission devrait assurer la continuité de la fourniture des données de type Landsat bien au-delà de la fin des missions Landsat-5 et Landsat-7 [8].

### I.2.1 Les types de satellites

On doit, distinguer les satellites d'après leurs caractéristiques orbitales car ceux-ci influent sur leurs facultés d'observation, lesquelles dépendent des divers types de capteurs embarqués à bord. Deux grandes catégories de satellites artificiels de la Terre correspondent à des caractéristiques orbitales différentes (figure I.3) :

- les satellites géostationnaires : tels que (GMS-GEOS-METEOSAT), à fréquence de prise de vue élevée mais à faible résolution. Ils ont une altitude de 36000 km et apparaissent immobiles au-dessus d'un même point de la terre.
- les satellites à défilement : Ils se déplacent à une vitesse d'environ 7 km/seconde par rapport à la surface terrestre, et peuvent couvrir toute la surface de la terre. Ils ont en générale une orbite circulaire héliosynchrone ou très peu excentrique et une altitude inférieure à 1000 km, donnant une répétitivité de 15 à 30 jours. [6]



**Fig I.3:** satellites d'observation de la terre [9].

## I.2.2 Les différentes résolutions d'un satellite d'observation de la terre

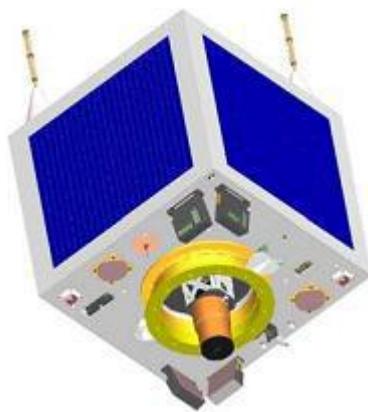
On distingue quatre différentes résolutions :

- 1) Résolution spectrale : Elle correspond aux nombres de bandes spectrales auxquelles les capteurs sont sensibles.
- 2) Résolution spatiale : Elle correspond à la surface élémentaire d'échantillonnage observée instantanément par le capteur d'image (c'est le plus petit point observé au sol (GSD)). Cette surface correspond à celle d'un pixel sur une image acquise par le satellite.
- 3) Résolution Radiométrique : Elle correspond à la capacité d'un système d'acquisition à distinguer deux niveaux d'énergie voisins. Le rayonnement réfléchi par les cibles au sol et enregistré par le capteur, est codé selon un format numérique binaire et l'image résultante est en niveau de gris. Pour un codage en 8bits, le niveau de gris correspondant au rayonnement réfléchi varie entre 0 et 255.
- 4) Résolution Temporelle ou Répétitivité : La résolution temporelle correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène [10].

## I.3 Le micro satellite Alsat- 1

Alsat-1 est le premier satellite Algérien mis en orbite le 28 novembre 2002 à 6h07 GMT par le lanceur russe *COSMOS-3M* depuis le cosmodrome de Plesetsk (Russie). ALSAT1, a été réalisé dans le cadre d'un programme de transfert de savoir faire avec *Surrey*

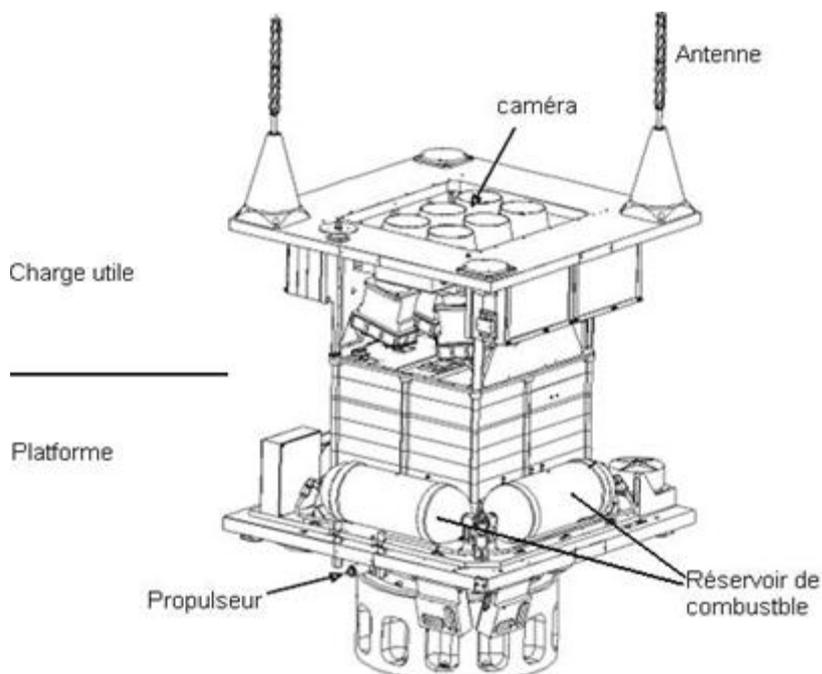
*Satellite Technology Limited (SSTL – Royaume Uni)*. Il est membre d'une constellation de 5 satellites pour le suivi des catastrophes naturelles. [11]



**Fig I.4:** Micro satellite algérien Alsat-1.

### I.3.1 Description

Alsat-1 se présente sous la forme d'un cube de 60 centimètres de côté, pour une masse totale d'environ 90 kilogrammes. Les panneaux solaires recouvrant les quatre faces du satellite utilisent des cellules de GaAs/Ge et fournissent une puissance moyenne disponible d'environ de 70 W. La structure d'Alsat-1 est principalement en aluminium (figure I.5).



**Fig I.5:** Structure du satellite Alsat-1 [12].

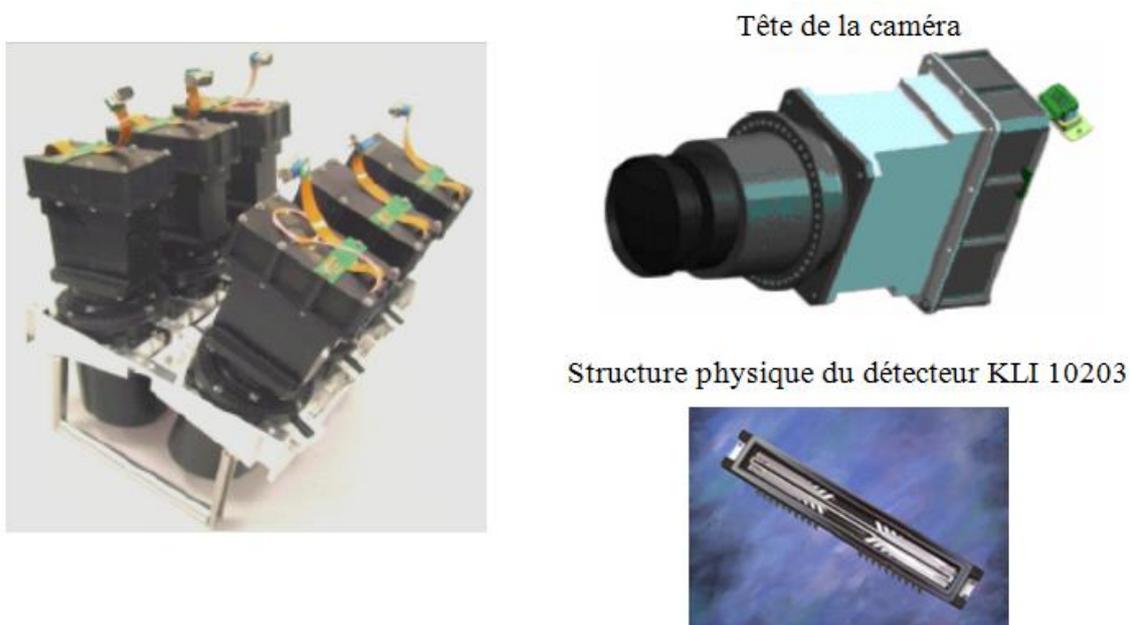
Les caractéristiques techniques d'Alsat-1 sont résumées dans le tableau suivant :

Altitude/inclinaison	680 km / 98 °	
Système de prise de vues	Type de prise de vue	<i>Pushbroom</i>
	Nombre de caméras	2 (avec recouvrement à 5 %).
	Résolution/Fauchée	32 m / 2×300 km
Bandes spectrales	Vert [0.52 – 0.62 μm]	
	Rouge [0.63 – 0.69 μm]	
	Proche d'infrarouge [0.76 – 0.90 μm]	
Taille d'une scène	Jusqu'à 600 x 560 km	
Pseudo-période	5 jours	

**Tab I.1 :** Caractéristiques techniques d'Alsat-1. [12]

### I.3.2 La charge utile SLIM-6

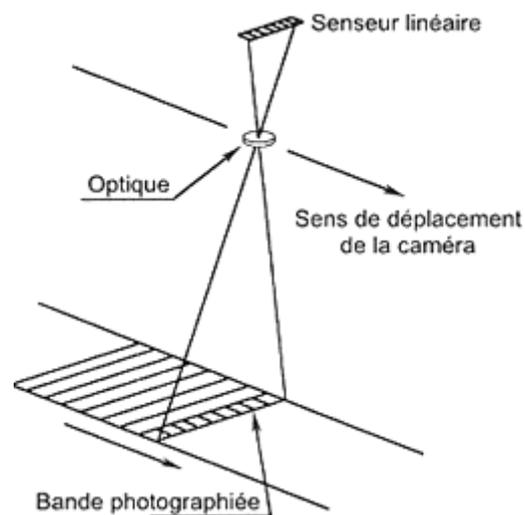
La charge utile d'Alsat1 est une caméra multi spectrale, fonctionnant en mode *pushbroom* dont le balayage en avant est assuré par le mouvement du satellite. C'est un couple de deux imageurs (de 3 bandes spectrales chacun : vert, rouge et proche infra-rouge) qui fonctionnent séparément ou ensemble (figure I.6). L'optique est une lentille Schneider Apo-Componon HM de focale égale à 150 mm et une ouverture de f/6. Les filtres ont été fournis par BARR Associates Inc. A cause des exigences de la mission, les 03 bandes spectrales choisies étaient: le Rouge [523-605] nm, le Vert [629-690] nm et le Proche Infrarouge [774-900] nm. Le détecteur est un capteur CCD linéaire de 10200 pixels, fabriqué par Kodak. Le KLI 10203 est conçu pour des applications d'imagerie couleur, et fonctionne en mode RVB (Rouge - Vert - Bleu). A cause des exigences de la mission, il a été demandé à Kodak de fournir les détecteurs sans les filtres RVB organiques. [13]



**Fig I.6:** La charge utile d'Alsat-1.

### I.3.2 .1 La prise de vue en mode *push-broom*

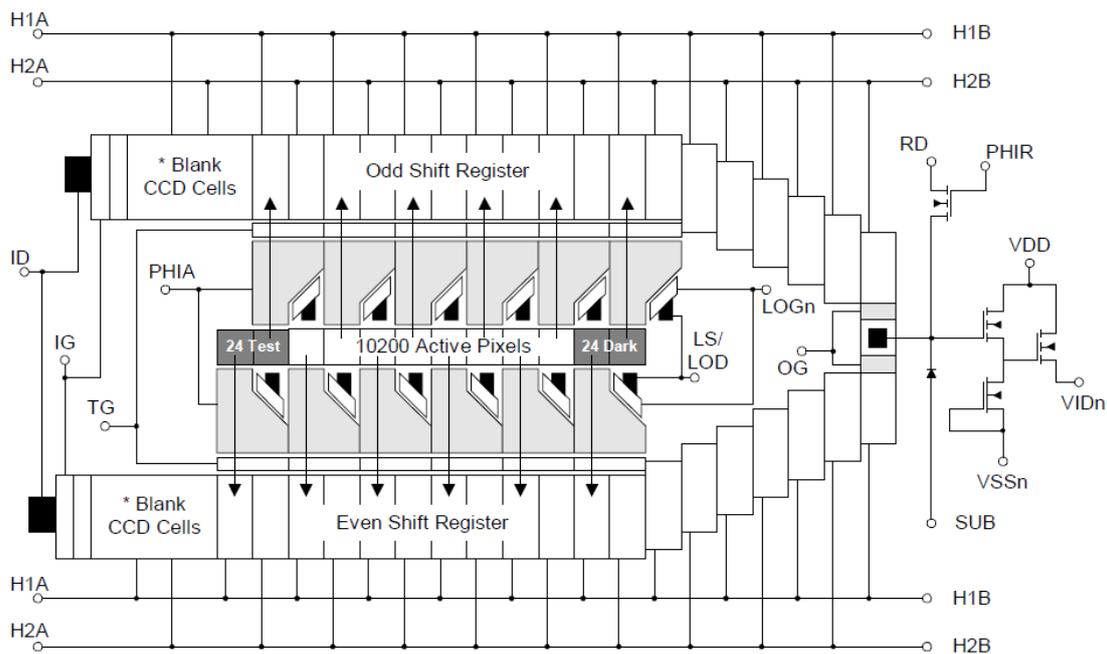
Le principe de l'instrument est d'observer une ligne complète au sol de la largeur du champ que l'on veut acquérir. Ceci permet, grâce à des lignes de 10200 photosites (pour chaque canal) d'acquérir la largeur de la fauchée en une seule opération. Le déplacement du satellite sur son orbite permet l'acquisition continue de l'image, ligne par ligne. Ce mode de fonctionnement utilise donc le principe de prise d'image dite en râteau (ou *Pushbroom*).[14]



**Fig I.7:** Principe du balayage Pushbroom.

### I.3.2 .2 Le capteur CCD KLI 10203

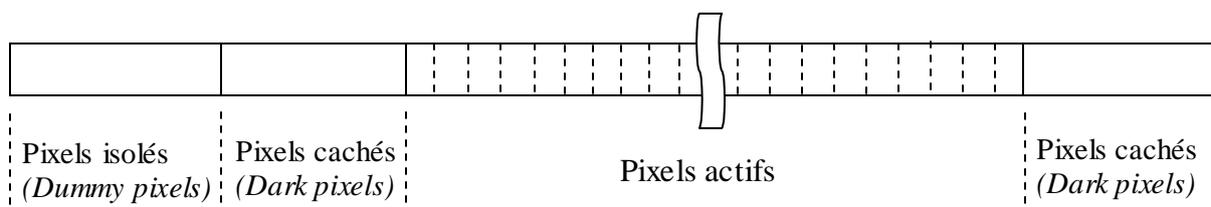
Le KLI-10203 est un capteur multispectral de haute résolution, fabriqué par Kodak, composé de 10200 pixels active, et de (03) trois canaux linéaires. Chaque canal possède deux (02) registres à décalages, un pour les pixels pairs (*even pixels*) et l'autre pour les pixels impairs (*odd pixels*) (figure.I.8) [15]. Dans le cas d'Alsats-1, l'organisation des pixels adoptée est comme suit : (20 noirs + 10000 active + 4 noirs).



**Fig I.8:** Schéma interne du KLI 10203.

#### a) Description de la ligne détectrice

C'est la partie du détecteur qui est en relation directe avec la lumière incidente. Elle est divisée en régions (voir schéma ci-dessous)

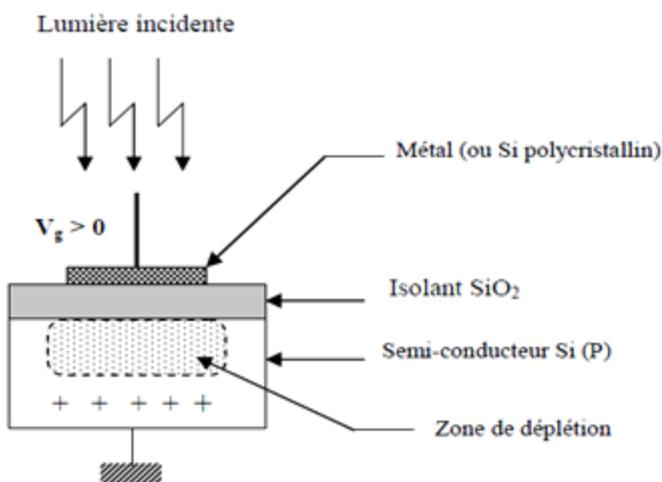


**Fig I.9:** Ligne détectrice. [9]

Les pixels cachés, sont protégés de la lumière incidente par un masque opaque. Ils fournissent le niveau du noir pour le signal vidéo de sortie. Les pixels isolés (*dummy pixels*), permette d'isoler la partie active de la partie référence. La partie sensible est constituée de pixels actifs appelés photosites. Ces photosites réalisés à base de capacité MOS, sont exposés à la lumière incidente et fournissent le signal utile [9].

### b) Le stockage et Mécanisme de transfert de charges

On appelle *effet photoélectrique* l'extraction d'électrons de la matière sous l'effet de la lumière. L'électron est capté dans un puits de potentiel créé par une électrode maintenue à un potentiel  $V_g$ . Au cours du temps, d'autres photoélectrons sont produits à proximité de l'électrode et sont aussi dirigés vers le puits de potentiel. [9]



Il y a ainsi stockage des électrons et création d'une charge électrique dont la valeur est proportionnelle à la quantité de lumière incidente sur le pixel.

**Fig I.10:** Capacité MOS avec éclairage appliquée à une tension positive.

Une fois les électrons stockés au niveau de l'électrode, il est nécessaire de les transférer afin d'en analyser la charge correspondante. C'est le principe du transfert de charges.

A la fin du temps d'exposition, le photosite a acquis des charges qui détermineront la luminosité du pixel correspondant. Le nombre d'électrons produits par un pixel est proportionnel au nombre de photons reçus. Tous les photosites de notre capteur étant chargés, il ne reste plus qu'à les lire pour reconstituer l'image. C'est pendant la phase de lecture que le terme « dispositif à transfert de charge » prend tout son sens, car toutes les charges des photosites doivent être transférées vers une diode de lecture afin d'être converties en tension. Pour déplacer les charges d'un photosite à un autre, il faut attirer les électrons libres d'un

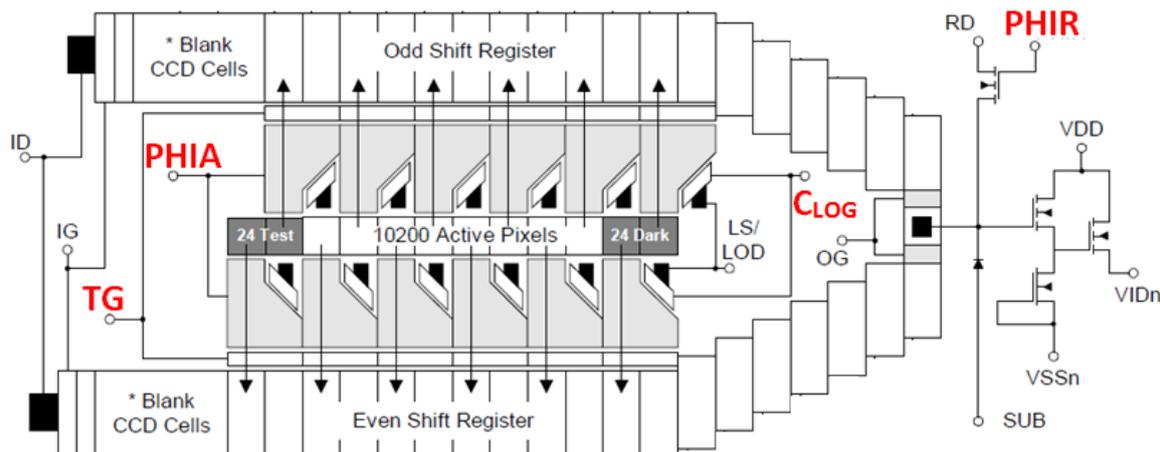
photosite vers le photosite voisin. Pour cela, on applique aux bornes du photosite qui reçoit la charge, une tension plus forte qu'aux bornes du photosite qui perd sa charge. [15]

### c) Le mode du transfert de charge

Dans le cas du capteur CCD KLI-10203 embarqué sur le microsatellite Alsat-1, le transfert de charges est linéaire, utilise la technique *True Two Phase CCD* ( $T2\phi$ ), qui nécessite deux d'horloges :  $C_{LOG}$  et PHIA.

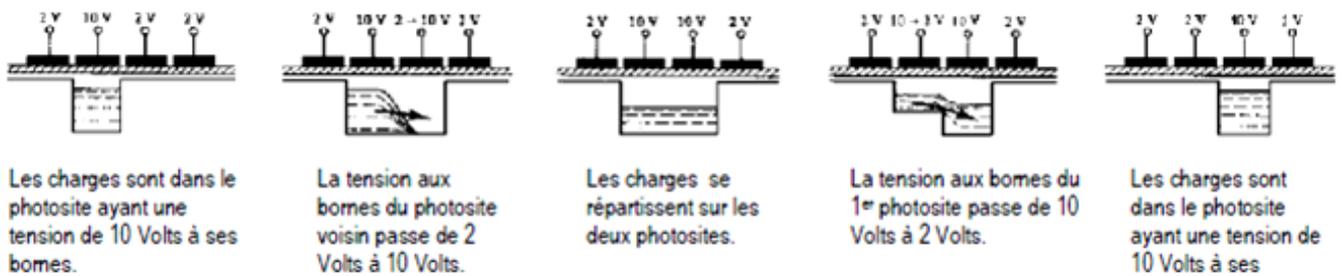
La figure I.11, schématise le transfert séquentiel des charges géré par deux registres de lecture : Pour les pixels de rang pair, et les pixels de rang impair.

- L'horloge  $C_{LOG}$ , (TG) commande à la fin du temps d'intégration, le transfert des charges vers le registre pair ou impair, par la création de puits de potentiel.
- Une horloge PHIA ( $H1n$ ,  $H2n$ ) gère le transfert de charge jusqu'à la diode de sortie.



**Fig I.11:** Illustration des horloges ( $C_{LOG}$  et PHIA) appliqués aux registres [15]

Le transfert des charges est réalisé selon un cycle d'horloge bien précis. A chaque impulsion ( $H1n$ ,  $H2n$ ), les charges électriques situées dans un registre sont transférées vers la droite dans le registre voisin. La charge la plus à droite est transférée dans la diode de lecture, puis toutes les charges sont à nouveau décalées d'une case (registre) vers la droite et sont lues les unes après les autres.



**Fig I.12:** Principes de transfert de charges. [16]

Dans la diode de lecture, la charge du photosite est transférée dans un condensateur. On mesure ensuite la tension aux bornes du condensateur. La charge totale stockée pendant le temps d'exposition est proportionnelle au flux lumineux reçu. Donc, plus un photosite est exposé à une lumière vive, plus la charge du photosite sera importante, plus la tension mesurée sera forte et plus le niveau du pixel correspondant sera important. A la sortie de la diode de lecture le signal électrique est analogique. [16]

#### d) Conversion charge-tension (diode de lecture)

La dernière opération indispensable est la mesure du nombre de charges contenues dans une cellule de base. Cette fonction est assurée par un ensemble constitué d'une diode PN de lecture polarisée en inverse et d'un commutateur de pré-charge ment communément appelé transistor de remise à zéro (*reset transistor*). En effet, cet étage peut être assimilé à un transistor *MOS*, dont le drain et la source sont portés respectivement aux tensions  $V_{rd}$  et  $V_0$  ( $V_{rd} > V_0 > 0$ ). Le schéma simplifié du registre de lecture ou structure de sortie est présenté dans la figure (I.13) [16] :

Le potentiel de la grille  $\Phi_R$  (PHIR) ( $\geq 0$ ) permet de commander la mise en conduction ou le blocage du commutateur MOS. Le processus se décompose en trois étapes :

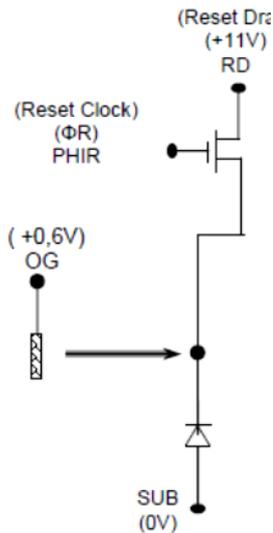


Fig I.13: Représentation du registre de lecture [15]

- le pré-charge de la diode de lecture à travers la tension  $V_{rd}$  par le transistor MOS de pré-charge lorsque le potentiel  $\Phi_R$  appliqué à la grille passe à l'état haut.
- l'isolation de la diode de lecture par rapport à la diode de pré-charge lorsque la polarisation  $\Phi_R$  est nulle (état flottant de la diode de lecture).
- le transfert de charges de la cellule adjacente vers la diode de lecture.

### e) Caractéristiques principales du capteur CCD:

Les principales caractéristiques qui limitent les performances d'un capteur CCD et qui conditionnent son utilisation sont [9] [15] [16][17][18]:

➤ **Sensibilité du capteur :** La sensibilité du capteur lie l'intensité du signal électrique délivré par le capteur à la longueur d'onde de la lumière incidente. Elle dépend des caractéristiques du photosite (*géométrie du pixel*), de la longueur d'onde de la lumière incidente et du gain de conversion charge tension du registre de sortie. Pour le capteur CCD KLI 10203, la sensibilité est de 12,5 ( $\mu\text{V}/\text{é}$ ).

➤ **Efficacité de transfert : (CTE)** L'efficacité du Transfert de la charge (CTE) est une grandeur déterminant la proportion de charges déplacées d'un registre à l'autre lors de l'opération de transfert. Théoriquement, lors du décalage, toutes les charges devraient être transférées vers le puit de potentiel suivant; en réalité un transfert à 100% n'est jamais atteint à cause des impuretés du silicium et des impuretés introduites lors de la fabrication CCD. Néanmoins l'efficacité de transfert de charge est très proche de 1. Pour un capteur linéaire, l'efficacité de transfert de charge est :

$$CTE_{\text{line}} = (CTE)^N \quad (\text{I.1})$$

Où

N: est le nombre de transfert de charges (nombre de registres) et CTE : efficacité de transfert pour un registre.

Dans le cas du KLI 10203, le CTE = 0,999995 pour un registre. Et donc, pour la ligne entière CTE<sub>Line</sub> est :

$$CTE_{line} = (0.999995)^{10268} = 0.95 \Rightarrow 95\% \text{ d'efficacité de transfert.}$$

➤ **Linéarité** : La variation de tension de sortie  $V_{os}$  est proportionnelle à l'éclairement de chaque photosite. En réalité, la linéarité de la réponse du capteur est dégradée par : la non-linéarité de la capacité de la diode de sortie (FD) et celle de l'étage amplificateur à transistors FET. De plus, la capacité limitée de chaque puits de potentiel introduit un effet de saturation lorsque le capteur est sur éclairé.

➤ **Réponse spectrale** : La réponse spectrale lie la tension de sortie à l'énergie du flux lumineux incident sur le détecteur, elle est exprimée en volts par micro joule par centimètre carré ( $v/\mu j/cm^2$ ). Elle peut être calculée à partir du rendement quantique ( $QE$ ), du photosite, du facteur de conversion charge-tension ( $dV/dN$ ), de l'énergie par photon ( $E$ ), et de la surface active ( $A$ ) du photosite :

$$R(\lambda) = \frac{A \cdot \frac{dV}{dN} \cdot QE(\lambda)}{E(\lambda)} \quad \text{et} \quad E(\lambda) = h \cdot \nu ; \nu = c/\lambda$$

$$\text{D'où :} \quad R(\lambda) = A \cdot \frac{dV}{dN} \cdot QE(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \quad (\text{I.2})$$

Comme le rendement quantique et l'énergie du photon sont des fonctions de la longueur d'onde ( $\lambda$ ), la réponse spectrale dépendra également de la longueur d'onde.

➤ **Dynamique (DR)** : La dynamique du signal (DR) est le rapport entre le signal de sortie à la saturation et le niveau du bruit d'obscurité du capteur. Le niveau du bruit d'obscurité, qui est exprimé typiquement comme la valeur efficace (rms) de la variation de la tension d'obscurité, inclut : le courant d'obscurité, le bruit de remise à zéro (reset transistor), le bruit de l'amplificateur de sortie, et le bruit de l'horloge.

Typiquement, la dynamique est donnée par l'expression suivante :

$$DR = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{sat}}{V_{dark, rms}} \right) \quad (\text{I.3})$$

Dans le cas du capteur CCD KLI 10203, DR = 74dB.

### I.3.3 Le bruit dans l'imageur CCD

Il existe en général deux types de bruit ou d'événements indésirables :

- Les problèmes liés aux défauts optiques.
- Les problèmes de bruit dû au capteur CCD, et à l'électronique associée.

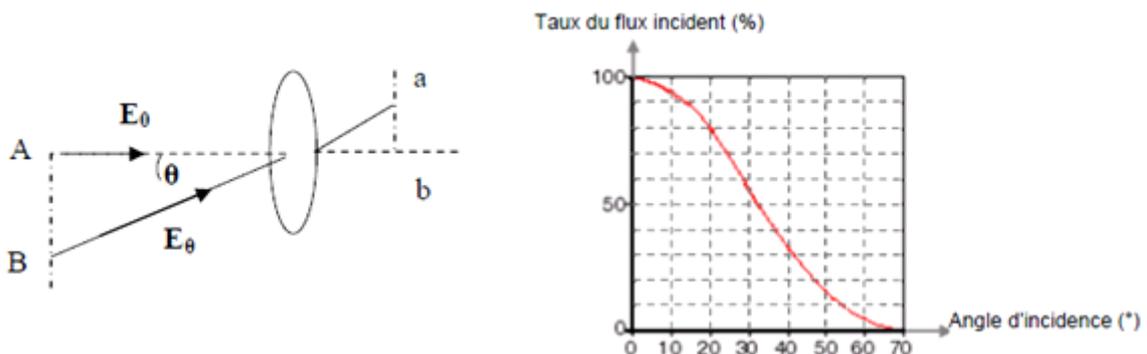
#### I.3.3.1 Les défauts dus à l'optique

Dans une image la distribution de lumière n'est pas uniforme. L'image peut-être plus sombre en sa périphérie qu'en son centre. Ce défaut est appelé vignettage et suit la loi du cosinus puissance 4 [19].

➤ **Le vignettage** : Il se traduit par un assombrissement des bords de l'image. Il est plus visible à pleine ouverture, et sur une couleur unie (longueur d'onde monochromatique). La lumière est répartie inégalement à travers l'optique et le phénomène se traduit par une réduction de la luminosité aux bords de l'image. Les rayons incidents obliques (bord de l'image), ne parviennent pas à atteindre correctement le plan de formation de l'image. Nous pouvons éliminer le vignettage si le diamètre de la lentille était suffisamment important.

➤ **La loi du cosinus puissance 4** : La circonférence de l'image est formée par des faisceaux de rayons lumineux qui traversent la lentille selon un certain angle par rapport à l'axe optique (centre ;  $0^\circ$  d'incidence). La baisse de luminosité est proportionnelle au cosinus de cet angle élevé à la puissance 4.

$$E_\theta = E_0 \cdot \cos^4 \theta \quad (\text{I.4})$$



**Fig I.14:** Effet d'atténuation de la lumière selon la loi en cosinus

### I.3.3.2 Les bruits dûs au capteur :

Il existe différents types de bruit dûs au capteur et à l'électronique associée sont [15] [20] :

➤ **Le bruit de photons (*Shot Noise*)** : C'est un bruit quantique, spécifique à la source observée. Il ne dépend pas de l'instrument utilisé, et est dû à l'arrivée aléatoire des photons incidents sur le détecteur.

➤ **Le bruit de courant d'obscurité (*Dark Noise*)**: Il est dû à l'agitation thermique des électrons par effet de température dans le cristal du semiconducteur. L'agitation thermique crée des électrons qui s'ajoutent aux charges générées, ceci est d'autant plus vrai que la température et le temps d'intégration sont élevés. Ces charges excédentaires peuvent être mesurées grâce à des photosites dits de références (recouverts d'un masque opaque) et le signal de sortie CCD peut ainsi être corrigé.

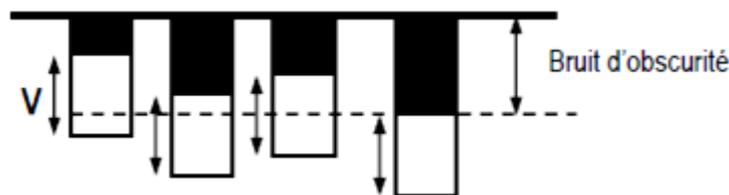


Fig I.15: Bruit d'obscurité.

➤ **Le bruit de Remise à zéro (Reset Noise)**: C'est un bruit engendré par le transistor MOS qui établit la tension de référence aux bornes du condensateur (FD : diode de lecture) de conversion de charges collectées. Il en résulte un bruit de nature thermique généré par la résistance du canal du transistor FET de remise à zéro. Ce bruit peut être évalué en *volts* ou en *électrons* :

$$\text{En volts par : } \sigma_{RESET} = \sqrt{\frac{4.k.T.B}{R}} \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Et en électrons par : } \sigma_{RESET} = \sqrt{\frac{k.T.C}{q}} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

**K**: C<sup>ste</sup> de Boltzman (J/k).

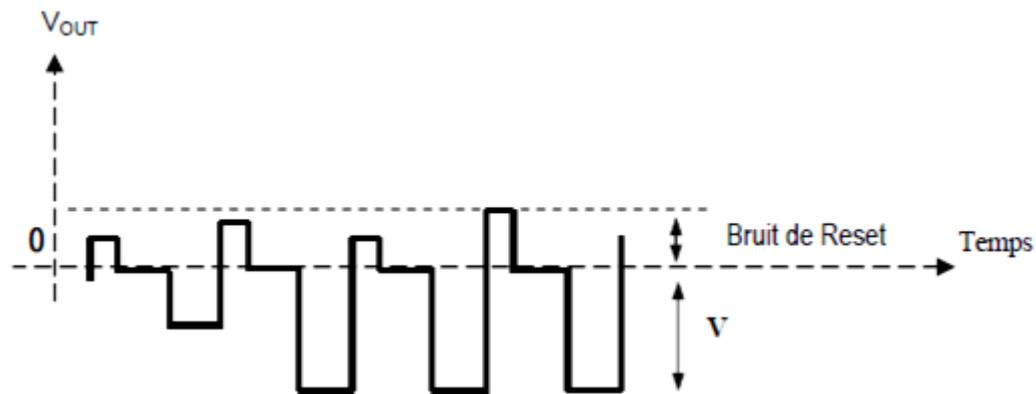
**B**: bande passante de la puissance du bruit (Hz).

**C** : capacité de la diode de sortie (F).

**T**: température (K).

**R** : résistance effective du canal ( $\Omega$ )

**q** : la charge d'électron  $-1.602 \times 10^{-19}$  coulomb



**Fig I.16:** Bruit de Remise à zéro.

➤ **La non uniformité de la réponse photonique (PRNU) :** Malgré les soins extrêmes apportés à la fabrication du capteur CCD, chaque photosite ne se comporte pas exactement comme ses voisins (défauts de géométrie, défaut optique de la fenêtre de la zone sensible, impureté du Silicium, variation dans le processus de fabrication etc.). Ceci affecte l'efficacité quantique  $\eta(\lambda)$ , qui n'est pas la même pour chaque pixel. Cette dispersion est vue comme un bruit permanent, d'autant plus grand que le signal est important. Ce paramètre est caractérisé par un rapport signal à bruit :

$$PRNU(\%) = \frac{\text{Bruit}}{\text{Signal}} \cdot (100) \quad (\text{I.7})$$

## I.4 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons défini la télédétection, et présenté les satellites d'observation de la terre, leurs types, et leurs différentes résolutions. Nous avons décrit le satellite algérien d'observation de la terre ALSAT-1. Par la suite nous avons présenté en détail la charge utile d'ALSAT-1, son imageur, et le capteur CCD utilisé ainsi que les différents types de bruit rencontrés.

---

# Chapitre II

---

## Outils et méthodes d'évaluation

**L**es images acquises par la caméra d'Alsats-1, avaient malgré leur bonne qualité quelques défauts visibles, liés d'une part à la conception de l'imageur, et d'autre part, aux éléments constituant chaque canal. Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation de l'imageur à partir des images de test, avant le lancement du microsatellite (pre-flight image tests), et analysé les premières images acquises par la caméra d'Alsats-1. Ensuite nous avons présenté la démarche de travail adoptée pour caractériser le capteur durant ses 3 ans de fonctionnement, ainsi que les différentes méthodes existant aussi bien objectives que subjectives pour évaluer les images multitemporales.

## II.1 Caractérisation radiométrique de la caméra d'Alsat-1 avant le lancement

### II.1.1 Configuration de l'imageur :

Rappelons que la charge utile d'Alsat-1 est composée de deux bancs, doté chacun de trois (03) caméras. (Figure II.1).

- Le banc 1 : comprend les canaux 1, 2 et 3.
- Le banc 0 : comprend les canaux 4, 5 et 6.



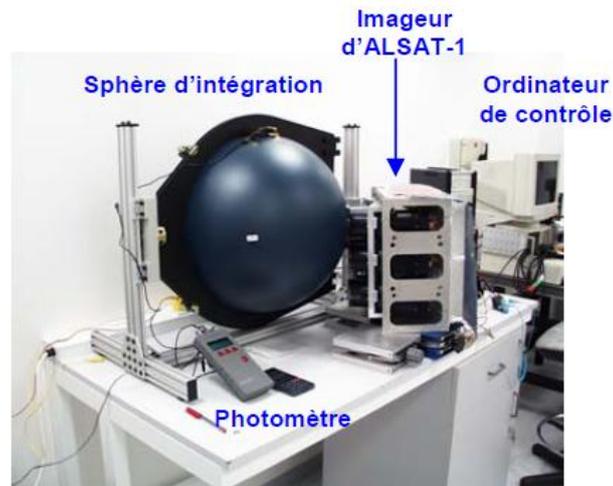
**Fig.II.1 :** Configuration de l'imageur SLIM-6.

### II .1.2 Déroulement de l'expérience :

Une série d'expériences sur la charge utile d'Alsat-1 a été faite en laboratoire (en Angleterre) avant le lancement du satellite, dans le but d'établir la réponse radiométrique en fonction des gains, linéarité, variation inter-photosites de chacun des six canaux pour différents gains et temps d'exposition.

Ces tests radiométriques ont été effectués dans le laboratoire d'optique en salle blanche, qui comprenait une sphère d'intégration de 50,8 centimètres de diamètre, et qui intègre tous les éléments nécessaires (Figure II.2). Le flux de la lumière radiante à l'intérieur de la sphère d'intégration, a été mesuré par un photomètre laser. [19]

- L'imageur est posé verticalement et orienté vers le port d'illumination de la sphère d'intégration.
- Le photomètre permet de mesurer la quantité de lumière reçu par la camera en ( $W/cm^2$ ).
- L'ordinateur raccordé au banc de test, contrôle l'expérience et collecte les résultats de test.

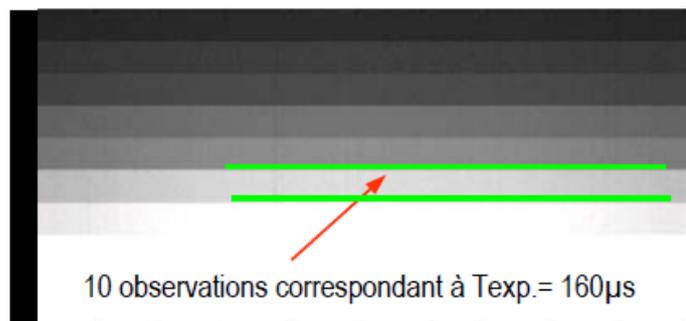


**Fig II.2** : Sphère d'intégration, photomètre, imageur et ordinateur de contrôle [19]

### II.1.3 Les résultats de test pour chaque canal

Les résultats étaient stockés sous forme de fichiers images brutes. Chaque pixel de l'image avait un niveau de gris codé sur 8 bits, valeurs de [0-255]. Chaque caméra a son propre résultat de test, stocké dans un fichier. La mesure de flux lumineux en Watt par centimètre carré ( $W/Cm^2$ ) a été prélevée par le photomètre.

Les images brutes stockées dans l'ordinateur représentaient plusieurs bandes horizontales superposées les unes sur les autres, chaque bande représentait 10 lignes acquises par temps d'exposition donné. Avec 14 temps d'exposition (de 20 à 2048 $\mu$ s), une image de 10x14=140 lignes a été obtenue.



**Fig II.3** : Exemple d'image de test du canal-3 PIR. [19]

Les résultats des tracés de courbes (fig II.4 et fig II.5) décrivent la caractéristique radiométrique de chaque caméra. C'est la réponse réelle de l'imageur qui représente le

comportement du capteur CCD KL-10203, du filtre Vert, rouge et PIR de l'optique et de l'électronique associée.

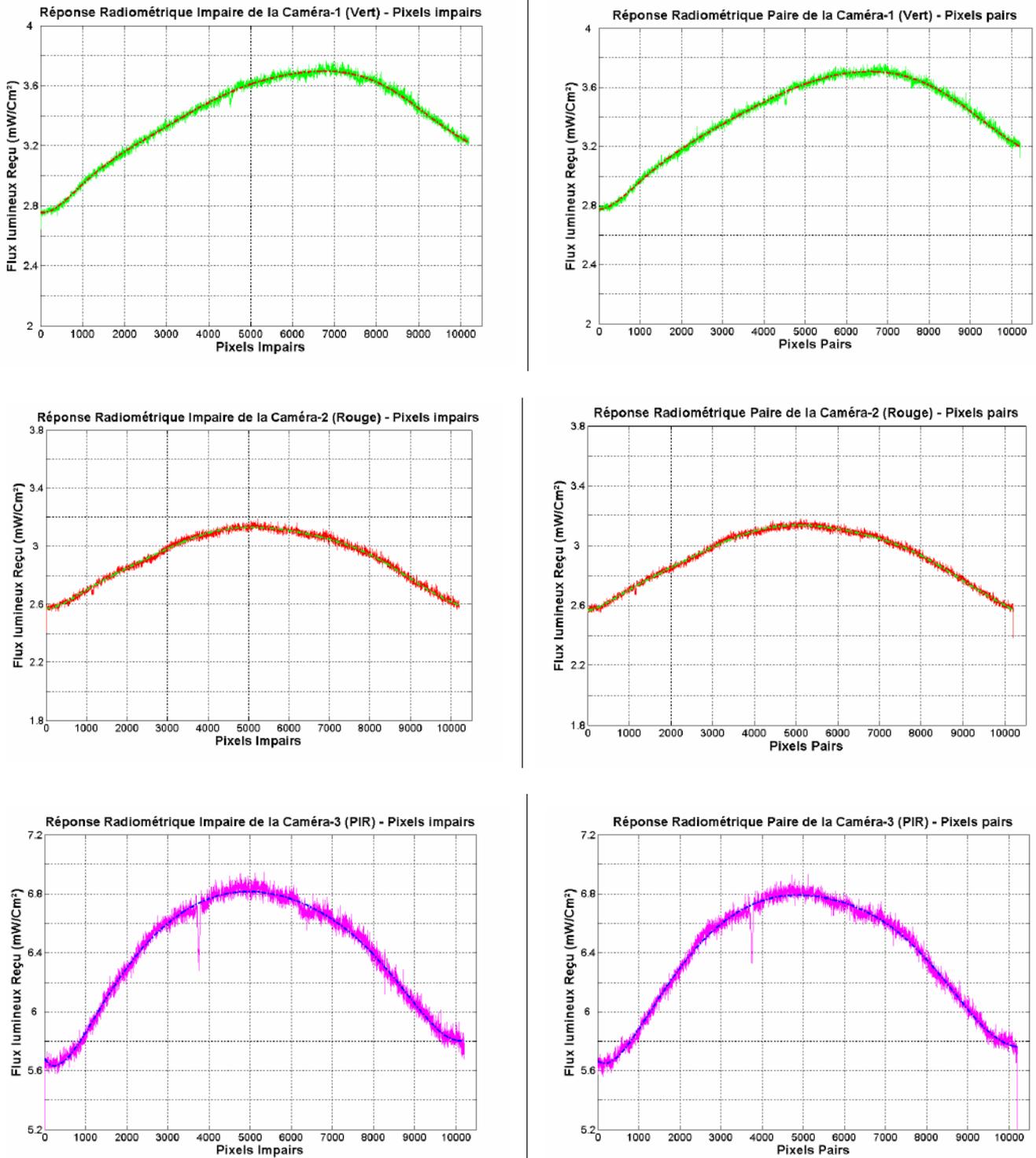
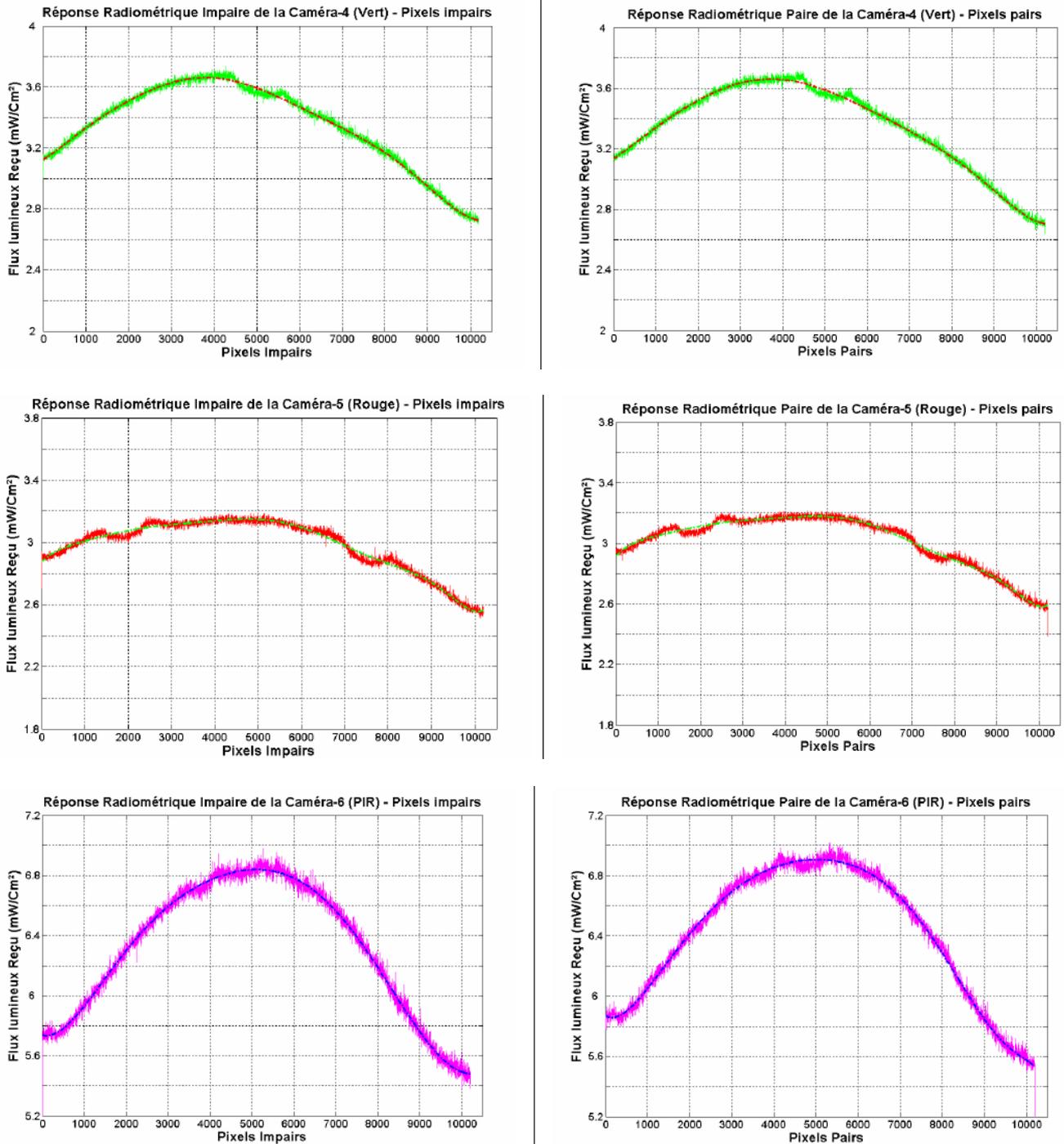


Fig II.4 : Courbes de réponse radiométrique des caméras 1,2 et 3 [9].



**Fig II.5 :** Courbes de réponse radiométrique des caméras 4,5 et 6 [9].

Les courbes des réponses radiométriques des six caméras montrent une forte dispersion et plusieurs anomalies :

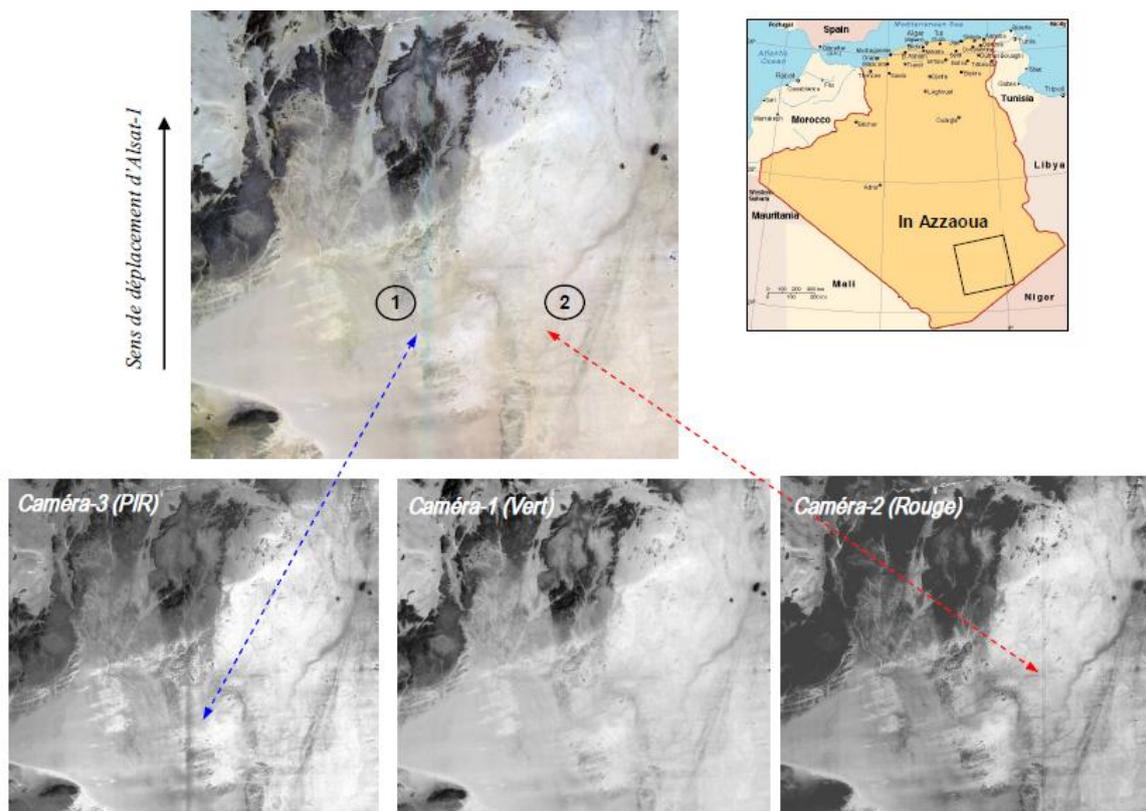
- Une allure asymétrique, décalée vers la gauche pour les caméras 4 et 5, et vers la droite pour la caméra 1.

- Un aplatissement sur les bords, liés au vignettage dû à l'optique. Ce phénomène se traduit par un assombrissement des bords de l'image. La lumière est répartie inégalement à travers l'optique.
- une importante baisse de sensibilité, de 3722 à 3810 pixels (88 pixels - caméras 3). Cette anomalie peut être associée à la présence de poussière ou à une tâche soit au niveau de l'optique ou au niveau du détecteur CCD.

## II.2 Les premières évaluations des images d'Alsat-1 :

Les premières évaluations des images d'Alsat-1 avaient montré de bonnes qualités aussi bien radiométriques que géométriques mais également des limites liées à la conception même de la caméra.

L'analyse d'une image de la région d'In-Azzaoua prise par Alsat-1 à la frontière avec le Niger à 400km au sud-est de Tamanrasset, le Mardi 06 mai 2003 à 09:22:27s, avait montré la présence des anomalies le long de certaines colonnes [9].



**Fig II.6 :** Anomalies sur l'extrait de l'image de la Région d'In Azzaoua (3600x3336 pixels)

C'est une composition colorée des 3 canaux du Banc-1 (Vert, Rouge, PIR) globalement de bonne qualité, mais qui présente quelques défauts apparents: deux lignes verticales (1) et (2) le long des colonnes de l'extrait de l'image (Fig II.6).

- La première de couleur verte correspond à une bande verticale de 69 pixels de largeur à partir du pixel n°1715.
- La deuxième est plus à droite, de couleur plus sombre, est étalée sur une bande verticale de 39 pixels, plus étroite que la première, entre les pixels n°2496 et n°2535.

Ces défauts peuvent provenir d'une différence de sensibilité des photosites, d'un dépôt d'impureté sur la lentille ou du détecteur lui-même.

Une autre image brute de la Baie d'Alger acquise par le Banc-0 de l'imageur d'Alsat-1 (canal Vert, Rouge et PIR) a été analysée. Elle présentait des défauts sous forme de bandelettes verticales apparentes sur l'image entière et qui présente des différences de niveau de gris causés par la séparation des charges des pixels pairs et impairs lors de l'opération de transfert vers l'étage de sortie de la barrette CCD [9].

Date d'acquisition	Lundi 10 mars 2003 a 09h : 22min :27sec
Elevation	36° (cible par rapport au soleil)
Distance (Alsat-1 et la cible)	110,5 km vers l'Ouest
Temps d'exposition	1200 $\mu$ s
Taille de l'image	700x900

**Tab II.1** Caractéristiques de l'image DA0007Apm (baie d'Alger)



**Fig II.7** Extrait de l'image multispectrale de la baie d'Alger (700x900 pixels)

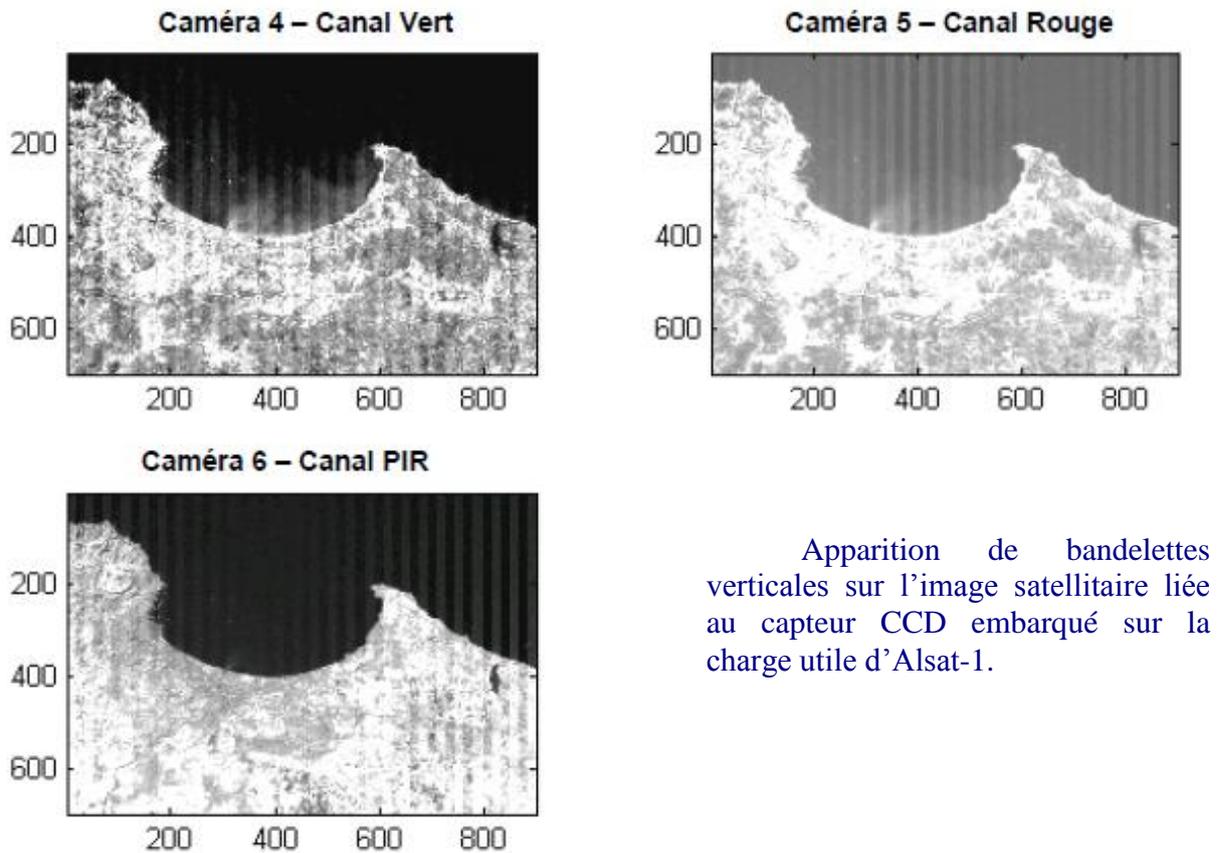
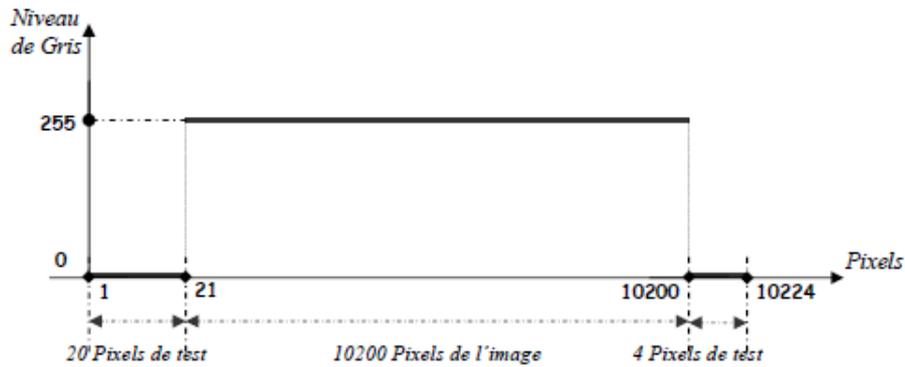


Fig II.8 Anomalie sur les images des caméras 4,5 et 6 [9]

## II.3 Caractérisation radiométrique de la caméra d'Alsatsat-1 après lancement

### II.3.1 Position du problème

La réponse radiométrique d'une caméra CCD doit être uniforme et linéairement proportionnelle aux flux lumineux reçus par le capteur. En pratique, une caméra présente une réponse radiométrique gaussienne due à la lentille, avec une légère variation de niveau de gris pour tous les photosites constituant le capteur.



**Fig II.9 :** Réponse radiométrique idéale de la caméra d'Alsat-1.

Pour faire l'évaluation en vol de l'imageur Alsat-1, nous devons comparer les réponses radiométriques obtenues à différentes dates, dans deux cas ; les réponses radiométriques des images claires où le flux lumineux reçu est important, et les réponses des images noires où le flux lumineux reçu est nul, ceci est pour mettre en évidence les variations de bruit d'obscurité.

Dans notre travail la majorité des images sélectionnées étaient nuageuses, donc il était difficile d'évaluer les réponses de tous les photosites du capteur CCD. Dans ce cas nous avons pris le plus grand nombre de fenêtres claires possibles (sans nuage).

Dans tous les résultats, nous avons séparé les réponses des pixels pairs et impairs. Pour éviter l'écart important existant entre eux. « Ce problème est lié à la séparation des voies pour les pixels pairs et impairs dans l'architecture interne du capteur CCD KLI-10203 [9]»

## II.3.2 Méthodes d'évaluation

### II.3.2.1 Images utilisées :

La caractérisation radiométrique nécessite deux types d'images : les images de niveau du "noires" et les images de niveau du "blanc".

Les images utilisées pour l'évaluation multi date sont :

- des images d'une région enneigée homogène claire (blanche) au dessus de l'antarctique (en automne /hiver) et au dessus de l'arctique (au printemps/été).
- des images d'une région sombre prise de nuit au dessus de l'océan pacifique.

Les images et les informations de prise de vue ont été obtenues du centre des techniques spatiales (CTS) d'Arzew.

#### **-a- Sélection des images :**

Nous avons une liste de 143 images ainsi que les données de prise de vue, acquises durant la période allant du 30 mai 2004 au 28 octobre 2006. Pour faire la comparaison entre images, nous avons sélectionné toutes celles qui répondent aux conditions suivantes (voir les listes des images dans l'annexe A) :

- Images multitudes clairs de la même région avec les mêmes conditions de prise de vue.
- Distance entre la trace du satellite (*track*) et la cible comprise entre 130 et 170 km, de sorte que le centre de l'image soit proche de l'axe optique où la réponse radiométrique est maximale.

#### **-b- Informations sur les images sélectionnées :**

Les informations disponibles sur les images sont :

- La date et l'heure de prise de vue et la taille de l'image.
- L'angle solaire « *Solar angle* » : c'est l'angle d'élévation du soleil par rapport à l'horizon.
- L'angle d'azimut « *Azimuth angle* » : c'est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu de prise de vue. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest
- Le « *Centre offset* » : C'est le décalage horizontal en pixel par rapport à la première colonne de l'image.
- Le « *Start offset* » : C'est le décalage de la cible dans le sens de déplacement du satellite.
- La distance de la cible « *X-Track* » : c'est la distance la plus courte entre la trace du satellite (*track*) et la cible.
- Les coordonnées : ce dont la latitude et le longitude de la cible.
- Le temps d'exposition « *Exposure time* » : Il représente le temps en microseconde pendant lequel le pixel reçoit la lumière provenant de la cible.

- Le nom des images prises par les caméras du banc-1 « *starboard camera* » prennent « sm » à la fin, et celles prises par les caméras du banc-0 « *port camera* » prennent « pm ».

Toutes les images utilisées sont des images brutes (sans traitement). Chaque pixel constituant l'image avait un niveau de gris codé sur 8 bits, valeur de [0-255].

### II.3.2 .2 Les critères d'évaluation visuels

Recommandée dans la littérature, l'analyse visuelle des images est nécessaire pour vérifier et évaluer les résultats et les différences de qualité. L'analyse visuelle est subjective car le jugement d'une personne sur le résultat qualitatif d'une image va dépendre de ses connaissances, de ses attentes et de l'application considérée. L'analyse visuelle permet de localiser et d'identifier des défauts affectant la qualité d'une image, sa géométrie, ou encore sa radiométrie (déformation des éléments linéaires, saturation des couleurs, couleur dominante.....etc).

### II.3.2 .3 Les critères d'évaluation statistique

Dans notre travail plusieurs paramètres statistiques (moyenne, variance, écart type, entropie ...etc) sont utilisés pour l'évaluation quantitative :

#### a-L'entropie :

L'entropie est un indicateur dont l'objectif est similaire à celui de la dynamique de l'image : il permet d'évaluer la richesse informative de l'image. Il se définit à partir de la probabilité d'apparition d'une valeur par rapport à l'ensemble de l'image.

$$H(x) = - \sum_i P_i \log_2(P_i) \quad (2.1)$$

- Où  $P(i)$  est la probabilité d'avoir le niveau de gris  $i$ . Il se calcule en divisant le nombre de pixels qui possèdent la valeur  $i$  par le nombre total de pixels de l'image [3].

**b- AMBE :** l'erreur moyenne absolue de luminosité (Absolute Mean Brightness Error-AMBE), est définie comme la différence absolue entre la valeur moyenne de la luminosité de l'image d'entrée et la valeur moyenne de la luminosité de l'image de sortie. L'AMBE est

utilisé pour observer le changement global de la luminosité de l'image et la préférence va aux valeurs basses [21].

$$AMBE = | E(X) - E(Y) | \quad (2.2)$$

Où :

- $E(X)$  : la valeur moyenne de la luminosité de l'image prise comme référence.
- $E(Y)$  : la valeur moyenne de la luminosité de l'image à évaluer.

**d- MSE et PSNR :** le critère quantitatif le plus utilisé est basé sur la mesure de l'erreur quadratique moyenne (MSE) calculée entre les pixels originaux et dégradés:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I(m, n) - \hat{I}(m, n))^2 \quad (2.3)$$

Où

- $(M \times N)$  : la taille de l'image.
- $I$  et  $\hat{I}$  sont respectivement les amplitudes de pixel sur les images original et dégradée.

Le PSNR est une mesure donnée en décibels, et se calcule à partir de la mesure MSE, comme suit :

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{I_{max}^2}{MSE} \right) \quad (2.4)$$

Avec  $I_{max}$  correspondant à la valeur maximale que peut prendre un pixel (typiquement 255 pour un pixel codé sur 8 bits). La métrique MSE mesure la différence entre deux images, alors que le PSNR mesure la fidélité entre deux images. Une valeur de PSNR supérieure à 30 dB indique une assez bonne qualité d'image. MSE et PSNR sont largement utilisés car leur implémentation est facile et leur complexité faible. [22]

#### II.3.2 .4 Programmation :

Pour visualiser, analyser et comparer les images d'Alsac-1, nous avons utilisé trois logiciels : ENVI 4.0, PSP 10 .0 et MATLAB 7.0.1.

ENVI (*Environment for Visualizing Images*), est un logiciel de visualisation et de traitement d'images de télédétection. Il permet de lire, visualiser, traiter et analyser différents formats d'images satellitaires.

PSP (paint-shop-pro 10.0), est un logiciel qui nous permet de lire, sélectionner des fenêtres, manipuler et enregistrer les images dans de nombreux formats.

Le logiciel MATLAB 7.0.1 est utilisé pour faire les mesures de test de qualité des images sélectionnées; étudier et évaluer les réponses radiométriques des différents pixels dans ces images.

## **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, l'expérience de test radiométrique et l'analyse des réponses pour les six caméras ont été exposées d'une manière simple. Suivis par l'évaluation des premières images prises par la caméra d'ALSAT-1 en identifiant les anomalies constatées.

Nous avons présenté par la suite, la méthode d'évaluation radiométrique de la caméra d'Alsar-1 durant les 3 années de fonctionnement du satellite (2004-2006) et la description de la méthode de travail adoptée.

---

## Chapitre III

---

# Évaluation des réponses radiométrique de l'imageur pour les cibles noires

**A**près avoir toutes les données, dont nous avons en besoin pour notre étude, nous avons consacré ce chapitre d'une part, à la présentation et l'analyse de la réponse radiométrique des six canaux de l'imageur pour les cibles noires, et d'autre part à l'évaluation de la variation de la qualité de la caméra SLIM-6 durant une période de trois ans de fonctionnement.

### III.1 Les cibles noires

Pour mettre en évidence les variations du bruit d'obscurité, nous avons sélectionné les images de l'océan pacifique prises de nuit. Les images sélectionnées et les informations de prise de vue sont regroupées dans tableau ci-dessous :

Image	Date	Heure	Observation
DA000264sm	12/12/2004	05:12:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coordonnées (latitude, longitude) :-7.79, -147.99</li> <li>• <i>Centre offset</i> : 0</li> <li>• <i>Start offset (%)</i> : 50 %</li> <li>• Temps d'exposition : 2048 <math>\mu</math>s</li> </ul>
DA00026csm	23/12/2004	05:32:00	
DA0002f5sm	24/06/2005	05:18:22	
DA000264pm	12/12/2004	05:12:15	
DA00026cpm	23/12/2004	05:32:00	
DA0002f5pm	24/06/2005	05:18:22	

**Tab III.1** : Images sélectionnées de l'océan pacifique et les informations associées.

### III.2 Les images prises par les caméras du Banc -1-

Avant d'analyser et comparer les réponses radiométriques de l'imageur pour ces images, nous avons calculé quelques mesures quantitatives qui traduisent le comportement général des pixels. Nous avons fait une analyse des réponses radiométrique des pixels pairs et impairs des images acquises par le banc-1- dans les trois bandes spectrales (vert, rouge et proche infrarouge).

Nous avons pris les images DA000264sm, DA00026csm et DA0002f5sm de taille 10000×2500 pixels, acquises respectivement le 12/12/2004, le 23/12/2004 et le 24/06/2005. L'ensemble des résultats obtenus pour les indicateurs statistiques est présenté au tableau (III.2)

Caméra	Image	date	Pixels pairs			Pixels impairs		
			Min/Max	Moyenne	Ecart type	Min/Max	Moyenne	Ecart type
Caméra-1- « Vert »	DA000264sm	12/12/2004	0/17	7.2914	1.0460	2/16	8.1732	1.3681
	DA00026csm	23/12/2004	0/17	7.6858	1.0507	0/16	7.8734	1.0673
	DA0002f5sm	24/06/2005	0/16	7.3113	1.0316	2/16	8.1321	1.3183
Caméra-2- « Rouge »	DA000264sm	12/12/2004	1/14	7.3139	0.8877	4/16	8.3654	1.3654
	DA00026csm	23/12/2004	0/13	7.0598	0.8899	3/15	8.2229	1.4645
	DA0002f5sm	24/06/2005	0/14	7.1289	0.8828	3/15	8.1304	1.3351
Caméra-3- « PIR »	DA000264sm	12/12/2004	0/16	7.9985	0.9841	2/15	7.0078	1.3964
	DA00026csm	23/12/2004	0/16	7.8261	0.9911	2/16	7.5577	1.0268
	DA0002f5sm	24/06/2005	0/16	8.2970	0.9839	1/17	6.9724	1.3500

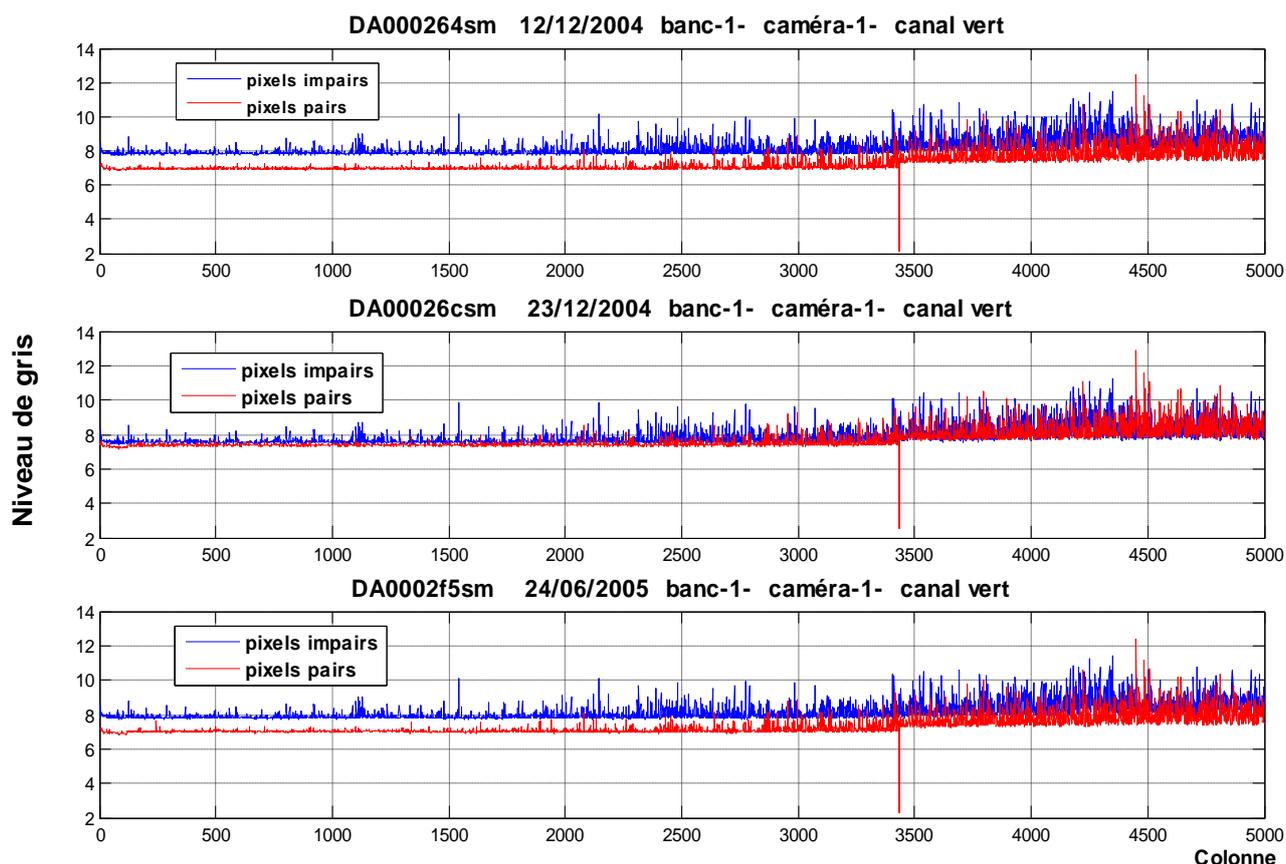
**Tab III.2:** Analyse quantitative des images de l'océan du banc-1- .

**Remarques :**

- Le tableau montre que tous les niveaux de gris sont regroupés entre les valeurs 0 et 17 autour de la valeur moyenne. Les valeurs de l'écart type confirment ce résultat.
- Pour tous les canaux les valeurs minimales, maximales, moyennes et l'écart type des pixels pairs sont plus proches que pour celle des pixels impairs. Les valeurs de l'écart type montrent que les niveaux de gris des pixels pairs présentent une dispersion plus faible.

Pour simplifier la comparaison entre ces images nous avons calculé la moyenne de chaque colonne de l'image et obtenu une seule ligne qui représente toute l'image (chaque pixel de cette ligne est la moyenne de sa colonne).

Nous avons pris la réponse du canal vert, qui présentait une dispersion plus importante par rapport aux autres canaux (voir annexe B: réponse radiométrique (canal rouge et PIR))



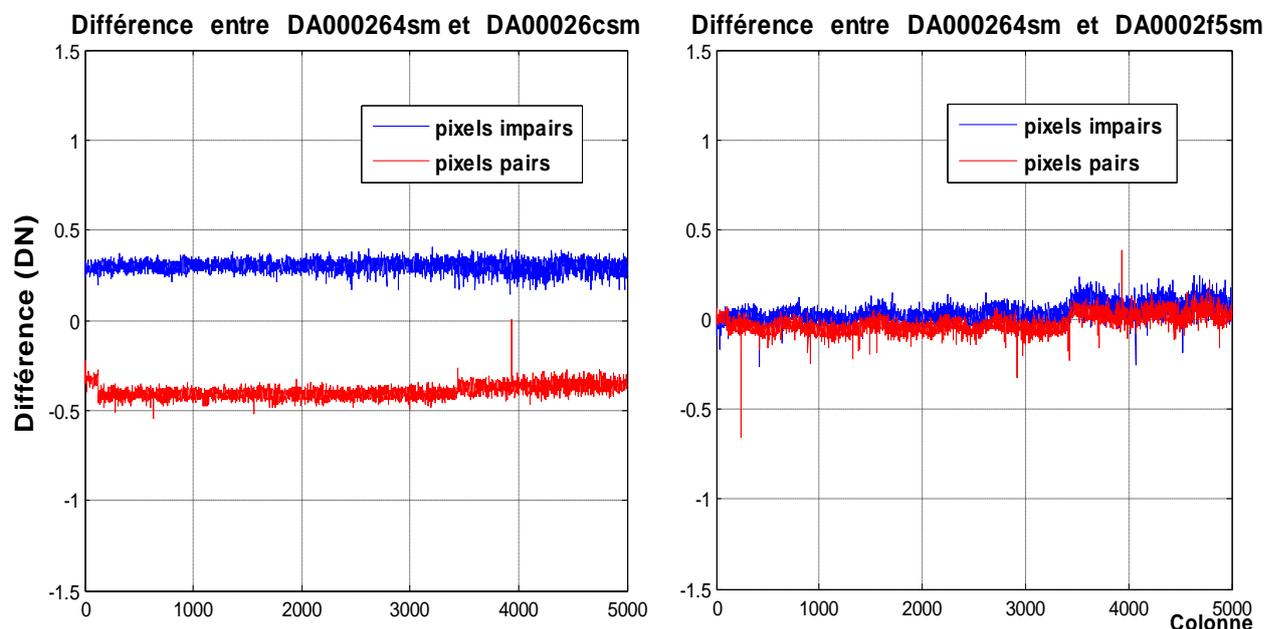
**Fig III.1 :** Réponses radiométriques moyennes de la caméra-1 pour les images DA000264sm, DA00026csm et DA0002f5sm.

La figure (III.1) montre les réponses radiométriques séparées (de la valeur moyenne de chaque colonne) des pixels pairs et impairs.

### Interprétations :

- les réponses radiométriques moyennes de la caméra-1 pour les trois images ont la même allure.
- une petite différence d'environ 1 niveau de gris existe entre les réponses des pixels pairs et impairs.
- l'apparition de pics similaires en emplacement et en amplitude (colonne 3432, environ 2 niveaux de gris et colonne 4451, environ 12 niveaux de gris).
- Apparition de quelques anomalies similaires apparentes dans l'allure générale des trois courbes qui seront expliquées plus tard (colonnes 3432 à 5000).

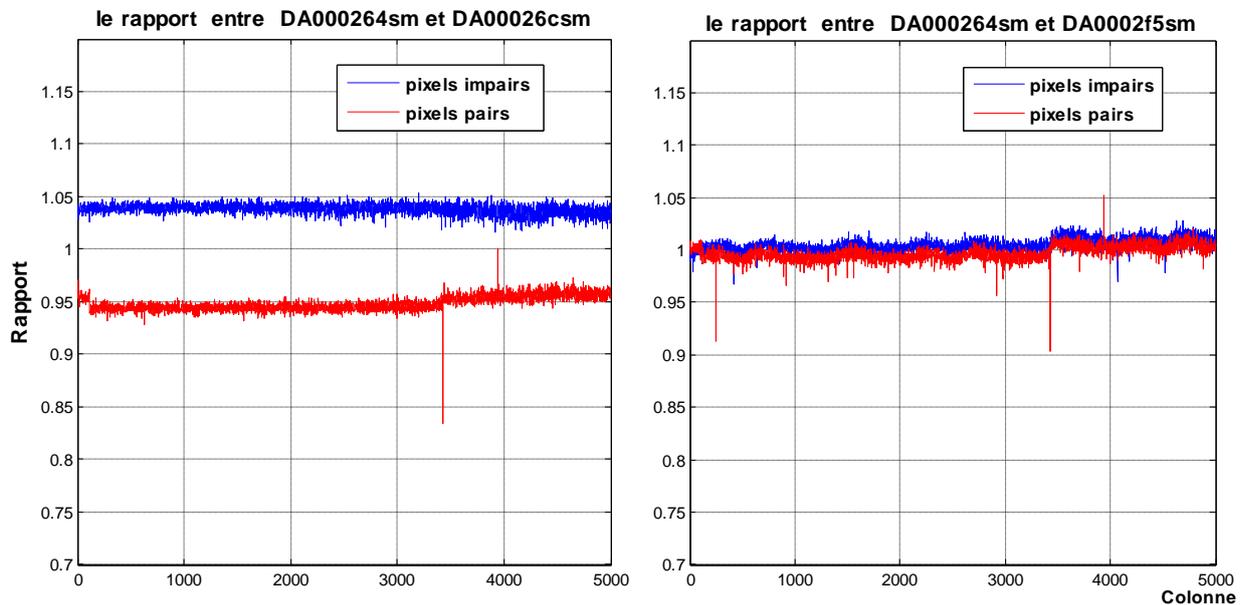
Pour montrer plus clairement les variations entre ces trois images, nous avons calculé, dans l'étape suivante la différence et le rapport entre les réponses radiométriques moyennes de la caméra-1 pour les images (DA000264sm, DA00026csm) et (DA000264sm, DA0002f5sm).



**Fig III.2:** différence entre les réponses radiométrique moyennes de la caméra-1.

La figure (III.2) montre la différence entre les réponses radiométrique moyennes de la caméra-1. La soustraction pixel à pixel donne une variation de 0,3 en niveau de gris pour les pixels impairs et 0,4 pour les pixels pairs entre l'image DA000264sm prise le 12/12/04 et

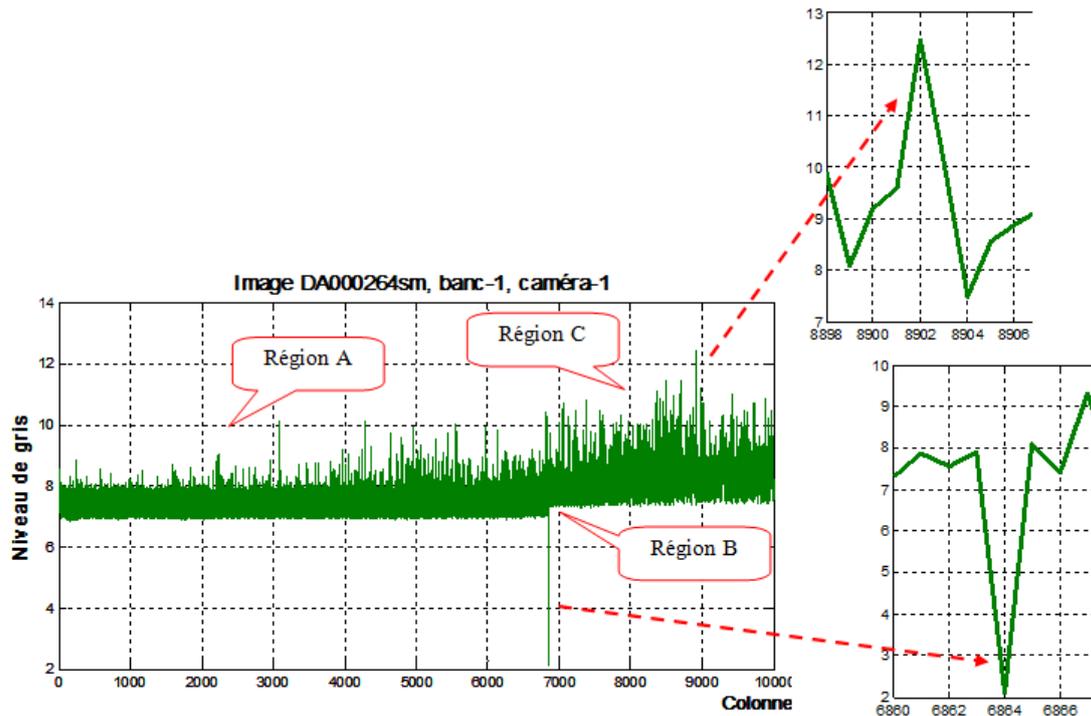
DA00026csm prise le 23/12/04. Et une variation de 0.1 en niveau de gris entre l'image DA000264sm prise le 12/12/04 et DA0002f5sm prise le 24/06/04 pour les pixels pairs et impairs.



**Fig III.3:** Rapport entre les réponses radiométriques moyennes de la caméra-1.

Le rapport dans (figure III.3) montre une différence entre les images (DA000264sm, DA00026csm) d'environ 4% pour les pixels impairs et d'environ 5% pour les pixels pairs. Et elle est d'environ 2% identique pour les pixels impairs et pairs entre les images (DA000264sm, DA0002f5sm).

Nous avons pris note des comparaisons, l'existence de quelques anomalies similaires dans les trois images. Puisque, l'allure des courbes de réponse radiométrique moyenne sont similaires; nous avons pris, pour la suite de ce travail, la réponse radiométrique de l'image DA000264sm pour illustrer ces anomalies.



**Fig III.4 :** Réponse radiométrique moyenne de la caméra-1 pour l'image DA000264sm.

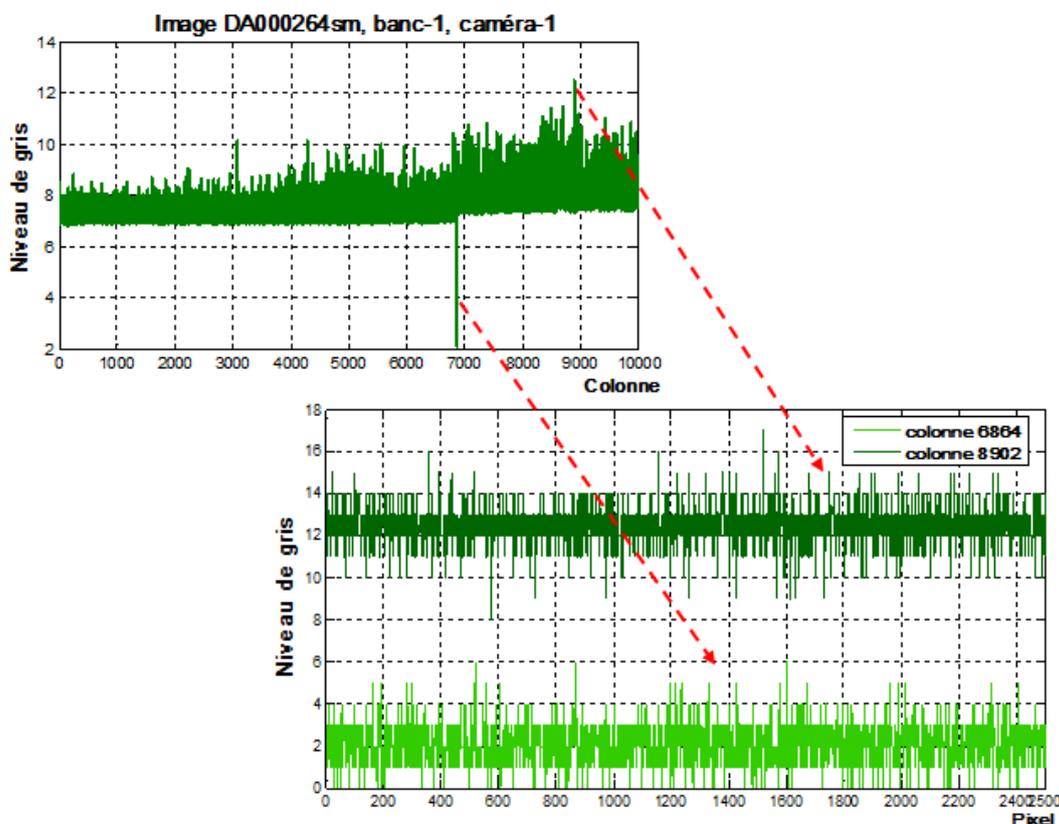
#### Interprétations :

L'analyse de la figure (III.4) ; montre quelques anomalies apparentes dans l'allure générale de la courbe qui a été divisée en régions :

- Région A : de la colonne 1 à 6862. La courbe apparaît stable et correspond à une réponse radiométrique moyenne constante (niveau de gris variant entre 7 et 10).
- Région B : de la colonne 6863 à 6867. dans cette zone nous avons remarqué au début un petit décalage des niveaux de gris, ainsi que l'apparition d'un pic vers le bas au niveau de la colonne 6864.
- Région C : de la colonne 6868 à 10000. L'apparition d'une augmentation assez importante de la réponse radiométrique moyenne, ainsi que l'apparition d'un pic vers le haut du niveau de gris de la réponse radiométrique moyenne dans la colonne 8902.

Ces deux pics qui prennent des valeurs très différentes par rapport aux autres dans les régions B et C de la courbe, nous a amené à rechercher l'origine de ces valeurs anormaux. Rappelons que chaque valeur de cette courbe représente la valeur moyenne de la colonne de l'image (sur 2500 lignes). Pour analyser l'évolution des

colonnes 6864 et 8902 qui sont différentes des autres, nous avons tracé leurs réponses radiométriques réelles (correspondent aux 2500 lignes) (fig III.5).



**Fig III.5** : Réponses radiométriques des photosites 6864 et 8902 de la caméra-1 pour l'image DA000264sm.

L'analyse de la réponse radiométrique des deux colonnes, dans la figure III.5, montre que :

- la colonne 6864 a une réponse radiométrique stable plus faible, et qui varie autour d'une valeur moyenne égale à 2 en niveau de gris.
- la colonne 8902 a une réponse radiométrique plus élevée, et qui varie autour d'un niveau de gris moyen égal à 12.

Nous avons remarqué que ces deux pics apparaissent dans tous les résultats, ce qui confirme que le photosite 6864 de la barrette CCD du banc-1- a une très faible sensibilité lumineuse et le photosite 8902 a au contraire une sensibilité plus élevée. Ceci pourrait être du à :

- ✓ La variation dans le processus de fabrication : Malgré les soins extrêmes apportés à la fabrication du capteur CCD, chaque photosite est différent et ne se comporte pas exactement comme ses voisins (défauts de géométrie, défaut optique de la fenêtre de la zone sensible, impureté du SI etc). Cette hypothèse peut être juste pour le

changement subit par le photosite 8902, car sa réponse radiométrique est proche des autres photosites.

- ✓ Par contre le pic qui existe au niveau de la colonne 6864 est toujours apparu accompagné d'un petit saut, donc cette baisse de valeur peut être liée à une mauvaise lecture de la réponse du photosite 6864 (voir paragraphe A page 44).

### III.3 Les images prises par les caméras du Banc -0-

Comme pour le banc-1- nous avons pris Cette fois les images de la même région DA000264sp, DA00026csp et DA0002f5sp de taille 10000×2500 pixels, acquises respectivement le 12/12/2004, le 23/12/2004 et le 24/06/2005.

Le tableau (III.3) montre les résultats des indicateurs statistiques obtenus pour les pixels pairs et impairs.

Caméra	Image	date	Pixels pairs			Pixels impairs		
			Min/Max	Moyenne	Ecart type	Min/Max	Moyenne	Ecart type
Caméra -4- « Vert »	DA000264pm	12/12/2004	1/15	8.5270	0.8046	2/13	5.9593	2.6907
	DA00026cpm	23/12/2004	1/15	8.5150	0.8191	2/12	6.0311	2.6154
	DA0002f5pm	24/06/2005	0/15	8.5035	0.8065	2/13	6.0372	2.5948
Caméra -5- « Rouge »	DA000264pm	12/12/2004	0/17	10.0265	0.7954	2/12	5.4539	4.6412
	DA00026cpm	23/12/2004	0/16	9.6558	0.7824	2/12	5.3591	4.3674
	DA0002f5pm	24/06/2005	0/16	9.8323	0.7802	1/12	5.1968	4.7008
Caméra -6- « PIR »	DA000264pm	12/12/2004	1/19	11.8380	0.9013	0/14	3.5082	8.3784
	DA00026cpm	23/12/2004	1/19	11.6016	0.9404	0/14	3.4893	8.1666
	DA0002f5pm	24/06/2005	0/19	11.5224	0.9241	0/14	3.5371	8.0386

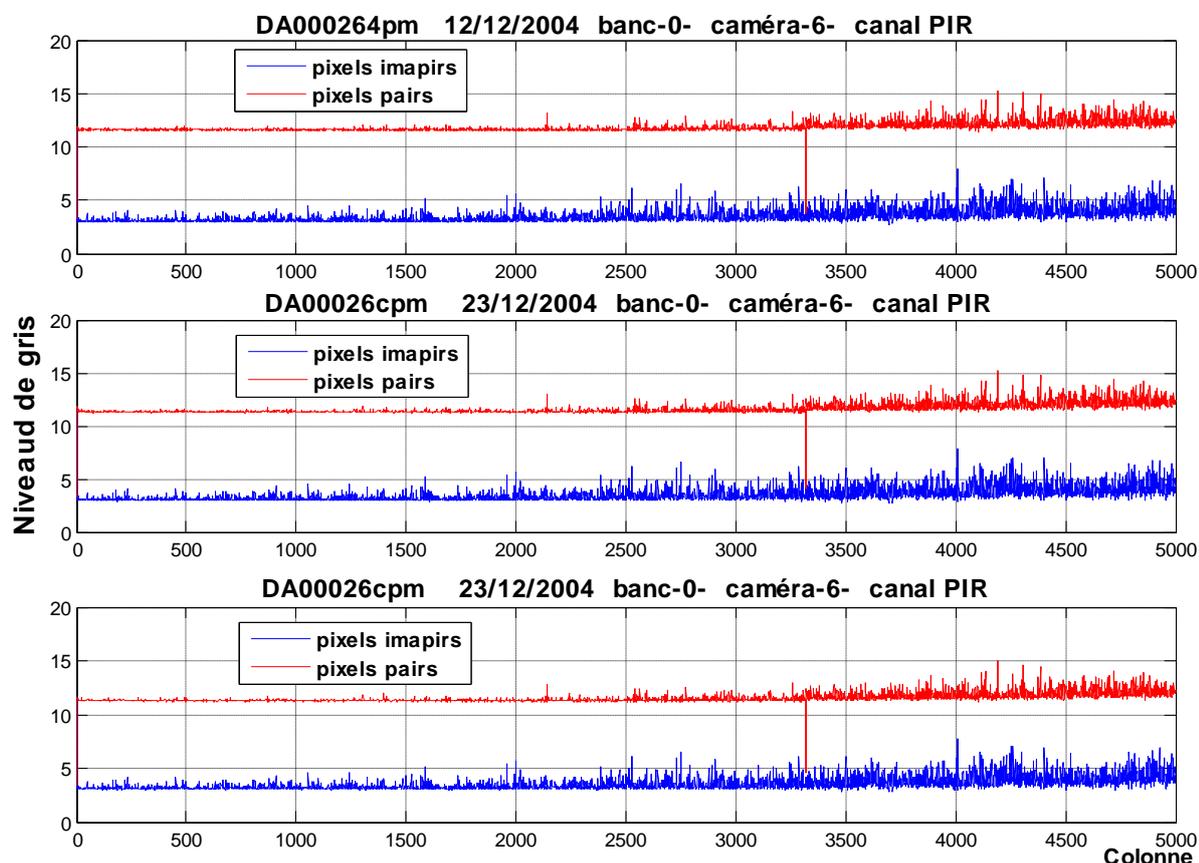
Tab III.3 : Analyse quantitative des images de l'océan pacifique du banc-0-.

#### Remarques :

L'analyse des données statistiques montre pour les trois dates que :

- Toutes les valeurs minimales, maximales, moyennes et les écarts types sont proches.
- Une grande différence existe entre les pixels pairs et impairs pour les valeurs minimales, maximales, moyennes et les écarts types.
- Tous les niveaux de gris des pixels pairs sont regroupés entre les valeurs 0 et 19 autour d'une valeur moyenne (la valeur de l'écart type confirme ce résultat).
- Les valeurs du niveau gris pour les pixels impairs présentent plus de dispersion par rapport à celle des pixels pairs (écart type entre 2 et 8.3784 pour les pixels impairs).

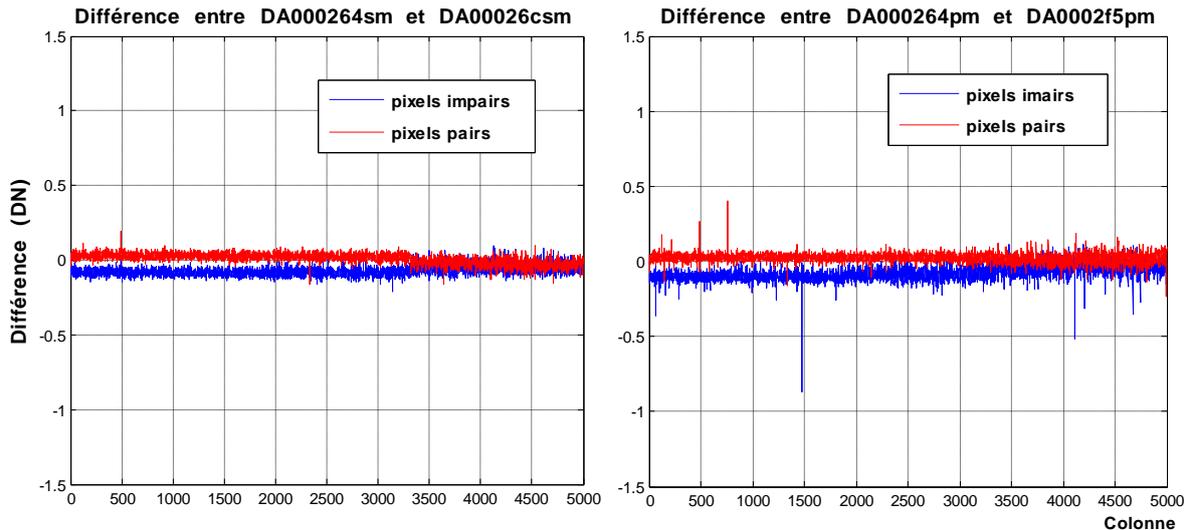
Nous avons pris la réponse du canal proche infrarouge, qui présentait une plus grande dispersion par rapport aux autres canaux (voir les réponses radiométrique des autres canaux, en annexe B). Et pour simplifier la comparaison entre ces images nous avons fait le même travail que pour le banc-1 (calcul de la moyenne de chaque colonne de l'image).



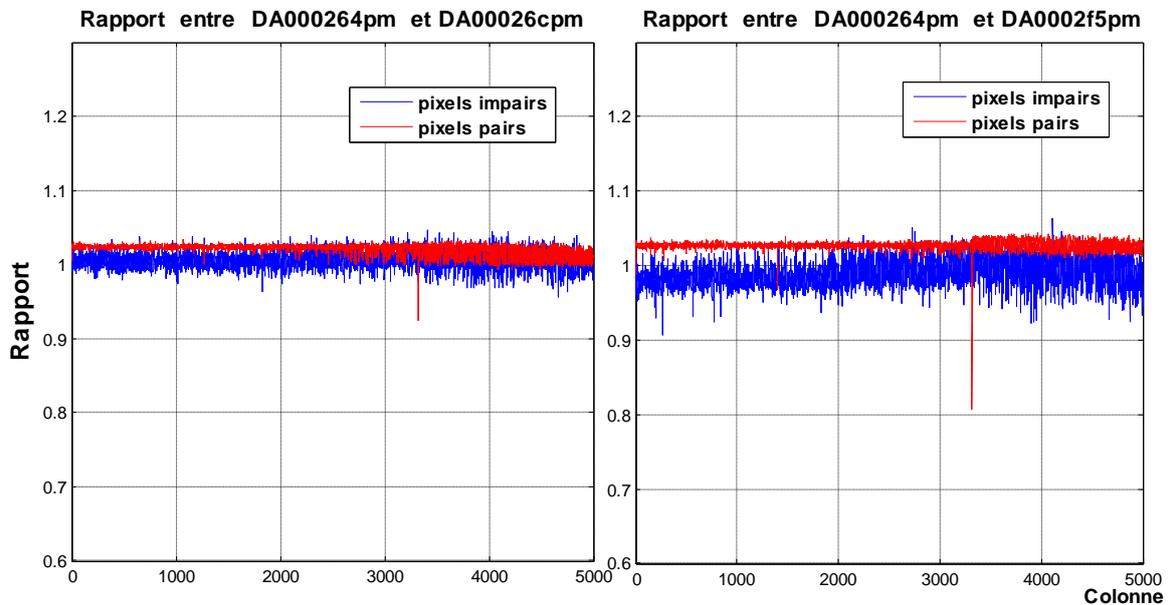
**Fig III.6 :** Réponses radiométriques moyennes de la caméra-6 pour les images DA000264pm, DA00026cpm et DA0002f5pm.

Les résultats montrent des réponses radiométriques moyennes stables, et l'apparence d'un pic similaire en emplacement et en amplitude pour les trois images (colonne 3432). On remarque que l'écart entre les réponses des pixels pairs et impairs est plus important par rapport à celui du banc-1- (un écart de 8 en niveaux de gris pour le banc-0- contre un écart de 1 pour le banc-1-).

Nous avons calculé comme pour le banc-1- la différence et le rapport pixel à pixel entre les réponses radiométriques de la caméra-6 pour les images (DA000264pm, DA00026cpm) et (DA000264pm, DA0002f5pm).



**Fig III.7 :** Différence entre les réponses radiométrique moyenne de la caméra-6.



**Fig III.8 :** Rapport entre les réponses radiométriques moyennes de la caméra-6.

La figure (III.7) montre la différence entre les réponses radiométrique moyenne de la caméra-6. La soustraction pixel à pixel donne une variation d'environ 0,1 en niveau de gris pour les pixels impairs et 0.3 pour les pixels pairs.

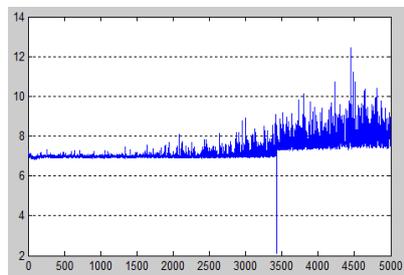
Le rapport (figure III.8) entre les deux images montre une différence d'environ 2% pour les pixels impairs et d'environ 2.5% pour les pixels pairs.

D'après ces résultats, nous avons remarqué que, malgré l'augmentation de l'écart en niveau de gris existant entre les pixels pair et impairs, une petite différence du niveau du noir existe entre les trois images acquises par les caméras du banc-0.

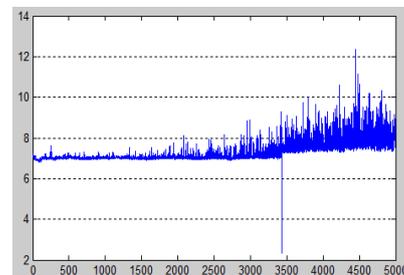
### a) Le décalage des réponses des photosites pairs

Nous avons remarqué dans toutes les réponses radiométriques des deux bancs (III.9), l'apparition d'un petit saut (clair dans les réponses des pixels pairs) similaire en emplacement dans toutes les images (pixel 6864 pour le banc-1-, et pixel 6640 pour le banc-0).

DA000264s (Océan pacifique, temps d'exposition =2048  $\mu$ s, pixels pairs, ALSAT-1)

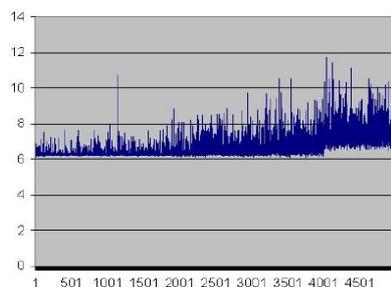


DA0002f5s (Océan pacifique, temps d'exposition =2048  $\mu$ s, pixels pairs, ALSAT-1)

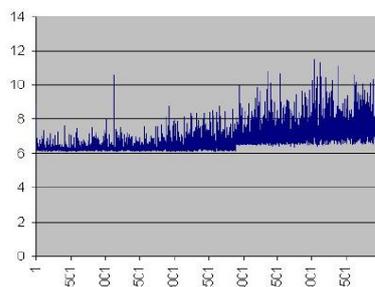


**Fig III.9 :** Réponses radiométriques des images prises par le satellite ALSAT-1.

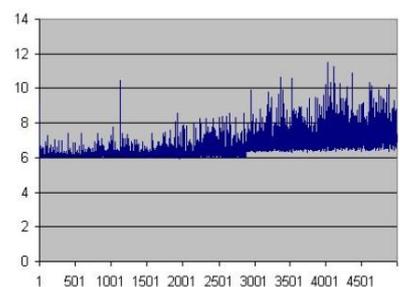
DU000009pm (Espace lointain, temps d'exposition =1500  $\mu$ s, pixels pairs - UK-DMC)



DU000010pm (Espace lointain, temps d'exposition=2400  $\mu$ s, pixels pairs - UK-DMC)



DU000026pm (Océan pacifique, temps d'exposition=2400  $\mu$ s, pixels pairs- UK-DMC)



**Fig III.10 :** Réponses radiométriques des images prises par le satellite UK-DMC [23].

Nous avons aussi remarqué (fig III.10) l'apparition du même phénomène dans toutes les réponses des images du noir acquises par la caméra du satellite UK-DMC (même type de caméra que pour ALSAT-1) [23]. Mais cette fois ci, Le saut change d'emplacement en

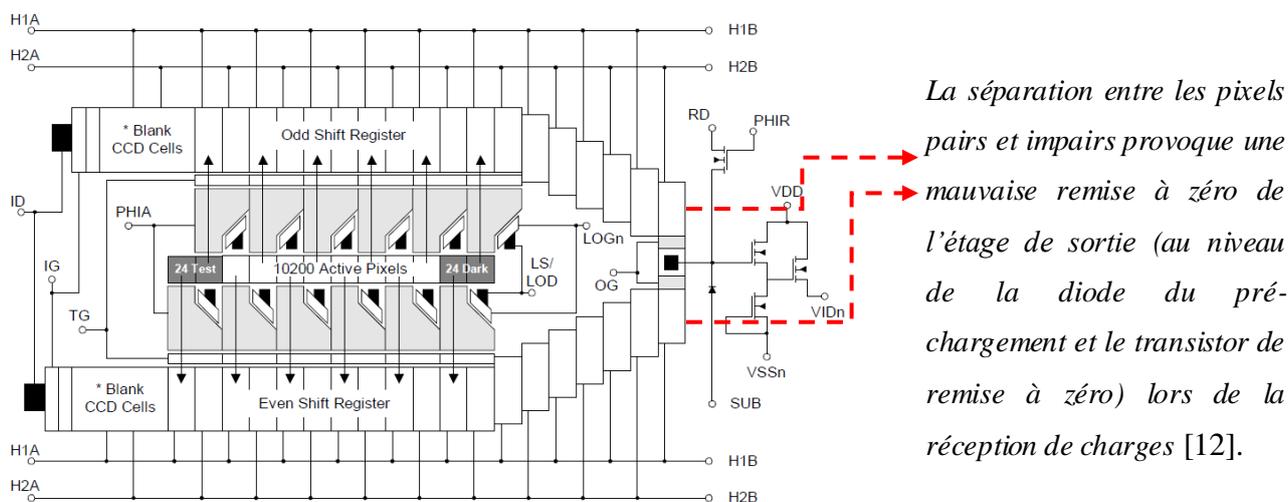
fonction du temps d'exposition (pixel 4000 pour un temps d'exposition=1500  $\mu$ s, et pixel 2750 pour un temps d'exposition=2400  $\mu$ s).

Par ailleurs, nous avons observé d'après les deux figures (III.9 et III.10), que la réponse radiométrique de l'imageur d'ALSAT-1 est plus stable que celle du satellite UK-DMC.

D'après le docteur Steve Mackin responsable de laboratoire de calibration (*DMC International Imaging*), la présence de cette anomalie (parfois, absente) était liée à la synchronisation de la lecture des détecteurs, et apparaît juste dans la première génération des imageurs DMC.

### b) l'écart entre les pixels pairs et impairs

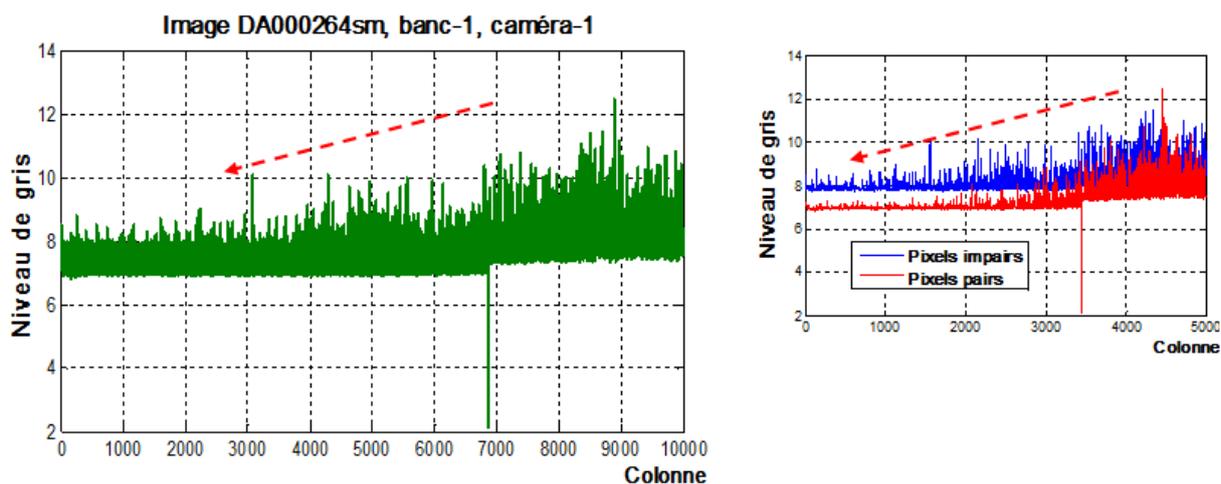
Dans toutes les réponses radiométriques des deux bancs, nous remarquons une différence entre les réponses des pixels pairs et impairs plus visible dans le banc 0 (un écart de huit niveaux de gris), Ceci est dû à la séparation des voies pour les pixels pairs et impairs dans l'architecture interne du capteur CCD KLI-10203.



**Fig III.11** : illustration du problème de l'écart entre les pixels pairs et impairs.

### c) La dégradation de la réponse radiométrique

Une autre anomalie apparaît dans toutes les réponses radiométriques des deux bancs de l'imageur d'ALSAT-1 et aussi dans les réponses de l'imageur du satellite UK-DMC (même type caméra que pour ALSAT-1) (fig III.9 et III.10), qui est la diminution du niveau de gris dès qu'on approche vers les premiers pixels.



**Fig III.12** : la réponse radiométrique moyenne de la caméra-1 pour l'image DA000264sm.

En réalité un transfert de 100% n'est jamais atteint à cause des impuretés du silicium et des impuretés introduits lors de la fabrication CCD. Donc cette diminution du niveau de gris (fig III.12) est due aux dégradations des charges déplacées d'un registre à un autre vers la droite lors de l'opération de transfert.

Pour confirmer cette hypothèse, nous avons calculé l'ordre de cette atténuation pour cela. On a mesuré la réponse radiométrique et calculé sa moyenne pour la caméra-1 avec l'image DA000264s en sachant que l'efficacité de transfert de KLI-10203 est de l'ordre 95%.

Après nous avons subdivisé la courbe (fig III.12) en deux régions, la région A, de 0 à 6864 et la région B, de 6865 à 10000.

Nous avons ensuite calculé les valeurs moyennes des deux régions, et on a supposé que la valeur moyenne de la région B est la valeur réelle de la réponse radiométrique, car les réponses de ces régions sont les premières réponses lues par l'étage de lecture (la première charge transférée vers la diode de lecture est la charge du photosite 10000, donc la lecture sera de droite à gauche). Par contre les valeurs de la région A ont été considérées comme des valeurs atténuées.

Les valeurs obtenues sont :

La moyenne B = 8.0556, la moyenne A = 7.4936

La valeur moyenne de la région A est de l'ordre de 93,023% que celle de la région B. donc on a eu une atténuation du niveau de gris dès qu'on s'est approchée vers les pixels de gauche de l'ordre de 6,97%.

### III.4 l'évolution de la réponse du photosite pour les images noires

Pour évaluer l'effet du courant d'obscurité qui est dû à l'agitation thermique des électrons par effet de température dans le cristal du semiconducteur, nous avons analysé le comportement de quelque pixel de trois images différentes prises de nuit (au dessus de l'océan pacifique) acquises durant un temps exposition  $2048\mu s$ . En suite nous avons comparé ces résultats avec les réponses des premiers pixels cachées (pixels de référence) du capteur CCD.

Nous avons sélectionné dans la suite du travail les photosites n° : 50, 5000 et 9500 (gauche, droite et le milieu de la barrette CCD) pour éviter les variations liées à l'effet d'optique.

Les courbes ci-dessous montrent les réponses radiométriques de chaque photosite pour chacune des trois images.

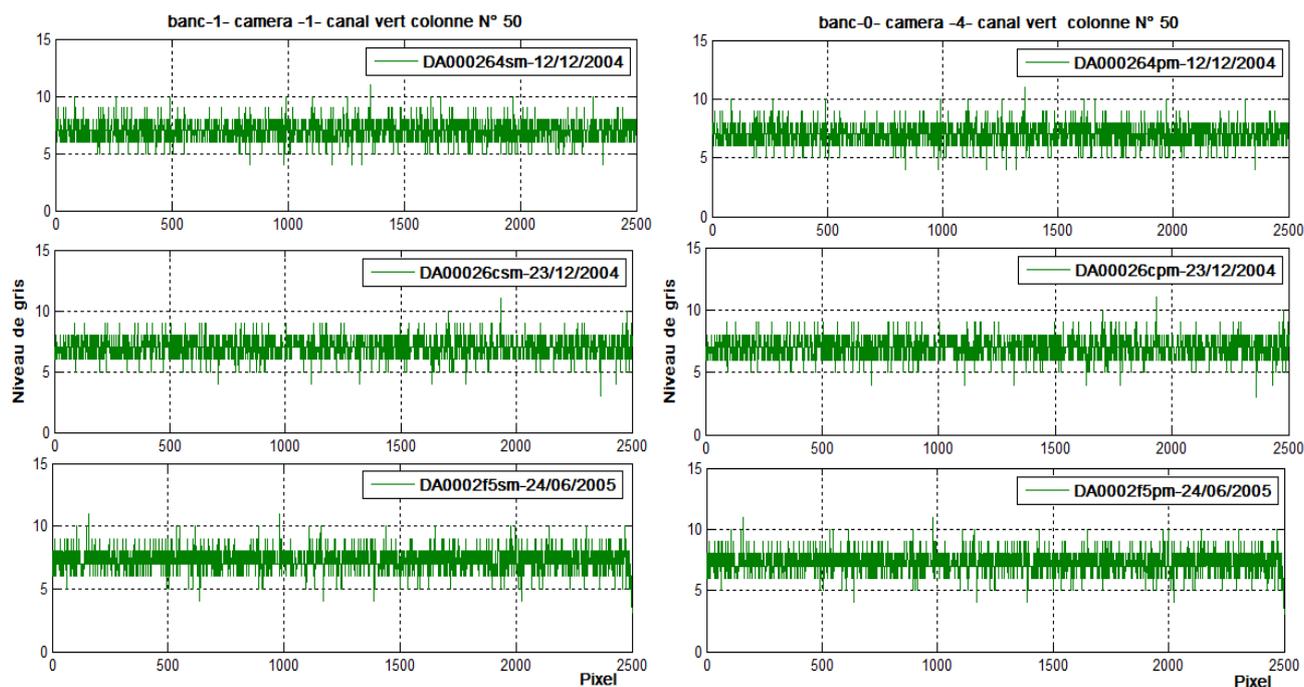
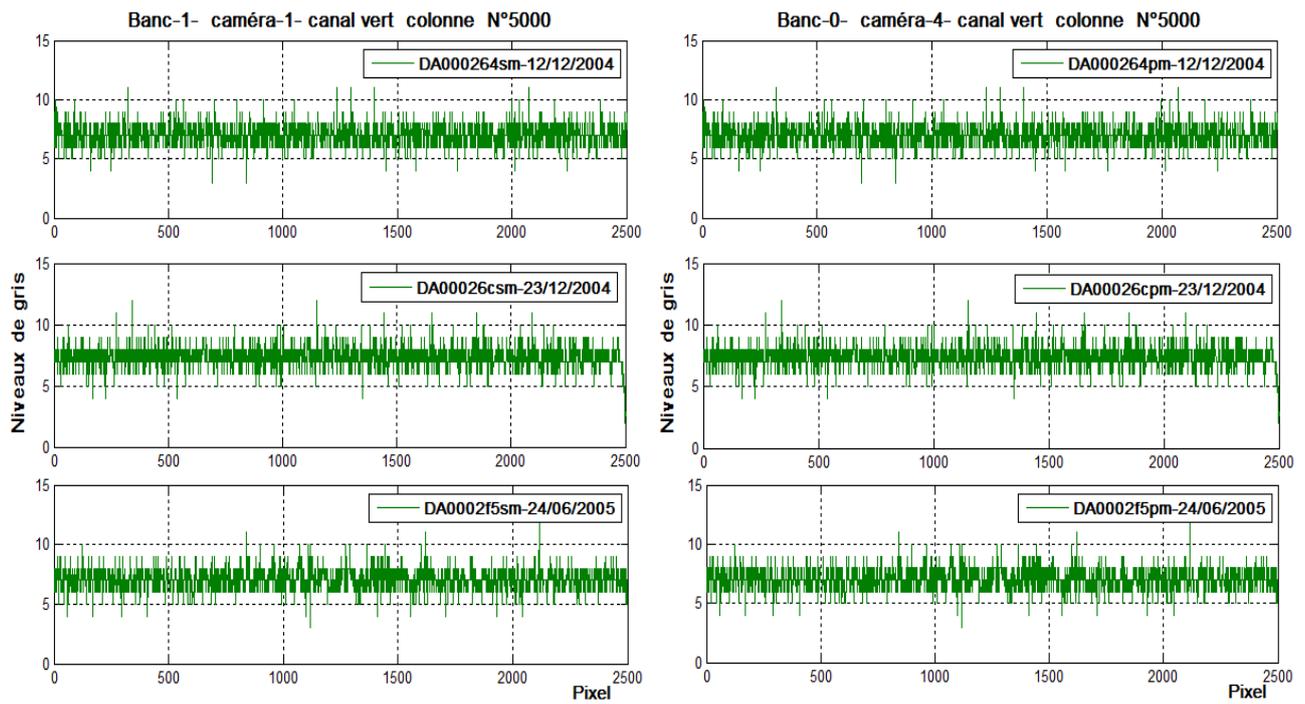
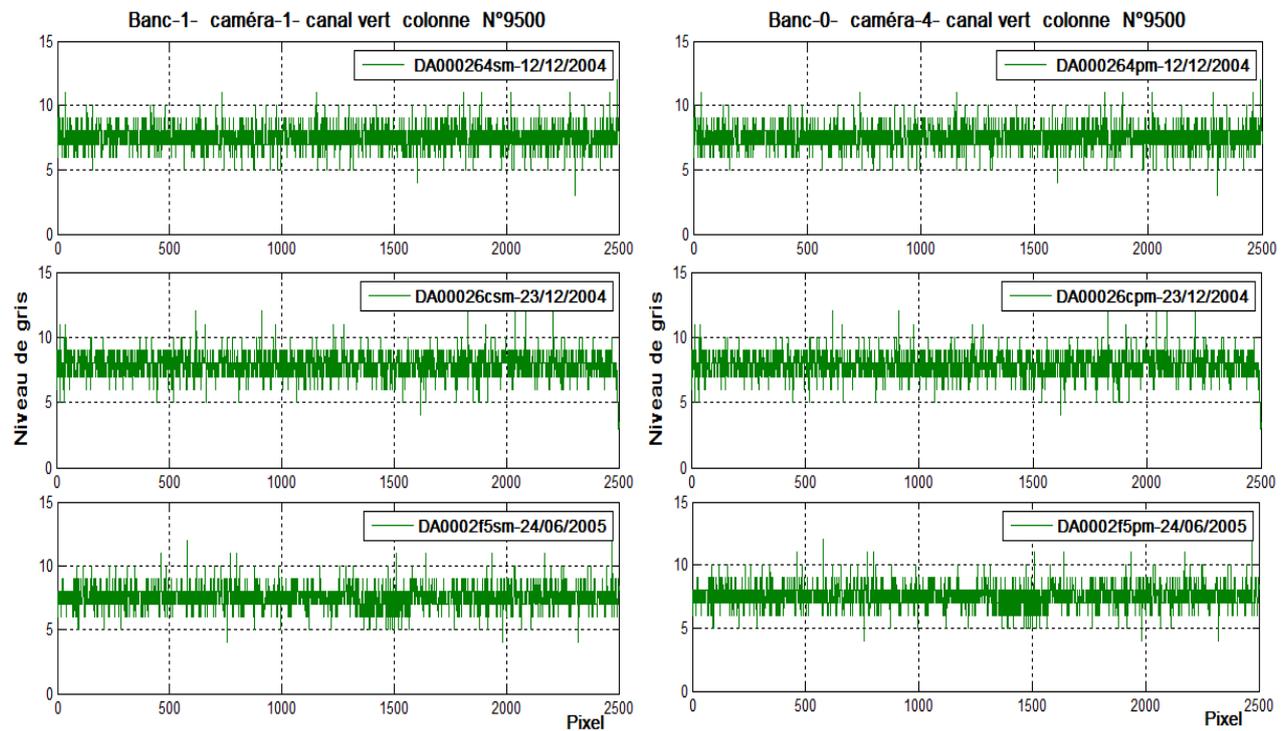


Fig III.13: les réponses radiométriques du photosite n°50 pour les deux bancs.



**Fig III.14:** les réponses radiométriques du photosite n°5000 pour les deux bancs.



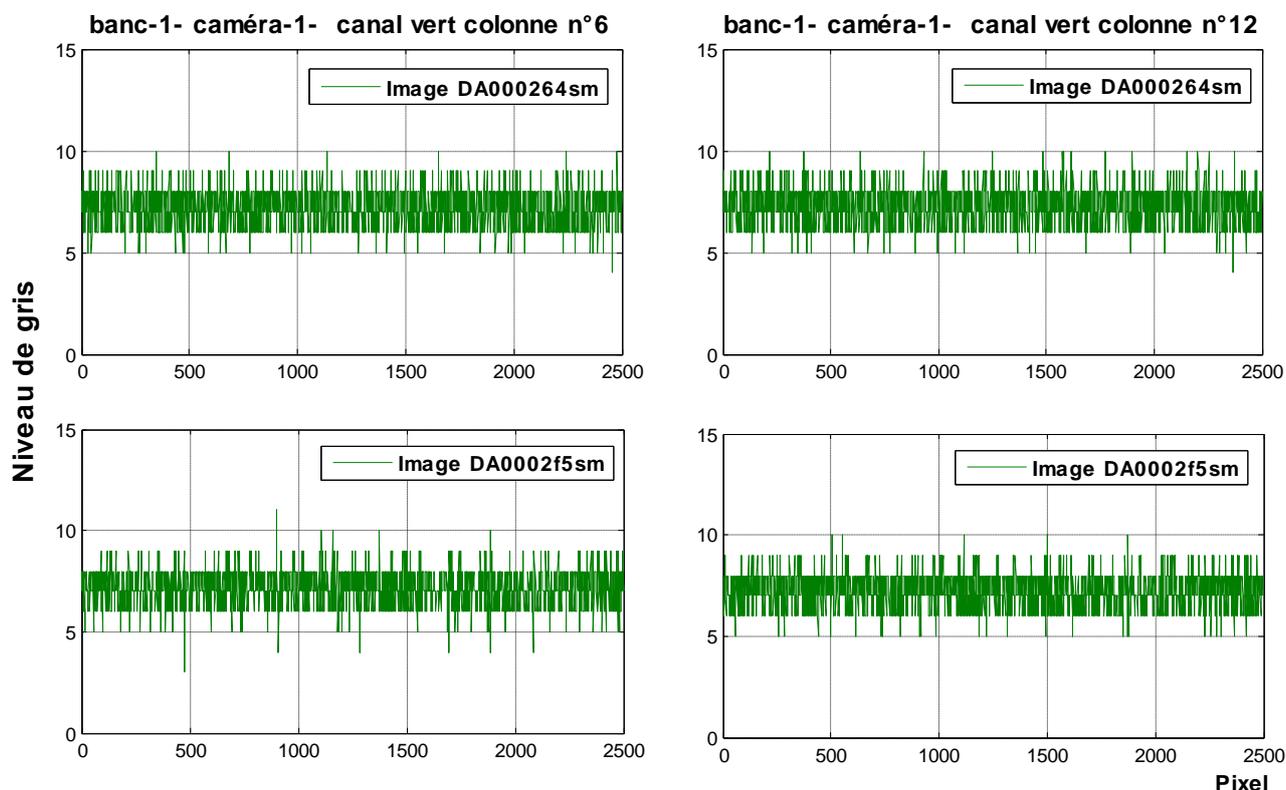
**Fig III.15:** les réponses radiométriques du photosite n°9500 pour les deux bancs.

Les trois figures (fig III.13, fig III.14 et fig III.15) montrent l'évolution multidade des réponses des trois photosites pour les trois images (DA0002f5sm, DA00026csm, et DA000264sm). D'après ces réponses radiométriques, nous avons remarqué des variations dans l'intervalle de 5 à 10 en niveau de gris, sauf qu'il y a un ensemble de photosites qui prennent des valeurs en dehors de cet intervalle. Les réponses radiométriques multidade de ces trois photosites des deux caméras (1 et 4) sont stables et identiques.

Ensuite nous avons comparé les réponses radiométriques de ces trois photosites actifs avec celles des photosites cachés.

Rappelons que la charge utile d'ALSAT-1 est équipé d'une caméra multispectrale munie d'un capteur CCD linéaire de marque Kodak KLI-10203, dans ce type de capteur on trouve un ensemble de photosites cachés appelé pixels noirs (les 20 pixels à gauche sur les images d'Alsats-1), l'objectif est de mesurer le niveau du courant d'obscurité.

Nous avons pris Dans cette étape les réponses de quelques photosites cachés (pixels noirs), et nous avons fait une comparaison avec celle des photosites actifs pour des images prises de nuit (l'océan pacifique).



**Fig III.16:** Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 pour deux images (DA000264sm, DA0002f5sm)

La figure (III.16) montre les réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12. Et d'après ces réponses, nous avons remarqué que

- Toutes les réponses des pixels des deux images sont stables et identique.
- La variation des quatre pixels est dans l'intervalle de 5 à 10 en niveaux de gris,
- Les variations des pixels cachés pour chaque caméra en niveaux de gris est à l'intérieur d'un intervalle spécifique (voir l'annexe C pour les réponses des autres caméras).

caméra 1	l'intervalle de 5 à 10
caméra 2	l'intervalle de 5 à 9
caméra 3	l'intervalle de 6 à 10
caméra 4	l'intervalle de 7 à 10
caméra 5	l'intervalle de 8 à 12
caméra 6	l'intervalle de 9 à 14

**Tab III.4 :** L'intervalle de variation des réponses radiométriques des photosites cachés.

- Et si nous comparons ces résultats avec celles des photosites actifs pour des images prises de nuit, nous remarquons que les réponses sont identiques.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude comparative entre des images noires multitudes. En premier lieu, nous avons analysé les réponses radiométriques des images prises par les caméras des deux bancs, puis nous avons montré qu'il existe quelque anomalie apparues dans toutes les réponses liées à l'architecture de la caméra. Ensuite nous avons analysé le comportement de quelques pixels et comparé leurs réponses avec les réponses des premiers pixels cachés (pixels noir) du capteur CCD pour mettre en évidence les variations du bruit d'obscurité.

D'après tous les résultats obtenus dans ce chapitre, En peut conclure ce qui suit:

- ✓ Des réponses radiométriques identiques pour plusieurs images multitudes, avec une faible différence entre les indicateurs statistiques témoignent d'une petite variabilité entre ces images.
- ✓ Un écart entre les réponses des pixels pairs et impairs plus visible dans les images acquises par les caméras du banc 0.
- ✓ Trois photosites de la barrette CCD ont une réponse radiométrique différente des autres. le photosite 6864 de la barrette CCD du banc-1-, le photosite 6640

de la barrette CCD du banc-0- ont une baisse de sensibilité et le photosite 8902 a une sensibilité plus élevée que celle des autres.

- ✓ Un petit saut (visible dans les réponses des pixels pairs) similaire en emplacement dans toutes les images (pixel : 6864 banc-1-, 6640 banc-0-).
- ✓ Une diminution des niveaux de gris liée aux dégradations des charges déplacées d'un registre à l'autre vers la droite lors de l'opération de transfert.
- ✓ Les variations des niveaux de gris des pixels cachés (pixels de référence) pour chaque caméra est à l'intérieur d'un intervalle spécifique.
- ✓ les pixels des noirs nous donnent une information importante sur le niveau du bruit thermique qu'on peut utiliser dans le traitement de l'image.

---

## Chapitre IV

---

# Évaluation des réponses radiométriques de l'imageur pour les cibles lumineuses

**N**ous avons vu dans le chapitre précédent l'évaluation radiométrique de l'imageur pour les images noires où le flux lumineux reçu est nul. Le travail que nous avons effectué dans ce chapitre consiste à évaluer les réponses radiométriques de l'imageur pour les images lumineuses où le flux lumineux reçu est important. Prenant en compte la taille importante de la scène et l'exigence d'avoir une luminosité uniforme, nous avons choisis les images des régions enneigées de l'Antarctique et de Greenland (Arctique).

### IV.1 Les cibles lumineuses

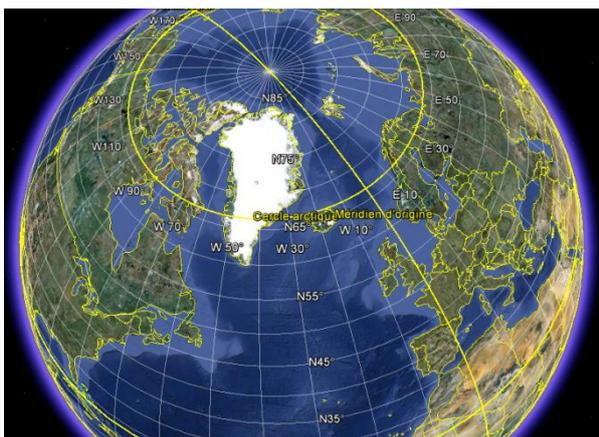
Les images sélectionnées et les informations de prise de vue sont regroupées dans les deux tableaux ci-dessous :

Image « <i>greenland</i> »	date	heure	Centre offset	Start offset (%)	Angle solaire (°)	Angle d'azimut (°)	Distance XT (km) (X-Track )	Observation
DA000208s m	07/07/2004	10:27:58	0	50%	27,76	-16,98	134,69	Nuageuse (75%)
DA0002e7sm	12/06/2005	10:21:52	0		28,81	-18,55	142,8	clair
DA000208p m	07/07/2004	10:27:58	0		27,76	-16,98	134,69	Nuageuse (50%)
DA0002e7p m	12/06/2005	10:21:52	0		28,81	-18,55	142,8	clair
DA0001dap m	03/06/2004	10:25:47	0		27,9	-18,18	144,94	Nuageuse
DA0001ebp m	16/06/2004	10:23:47	0		28,57	-16,73	158,24	clair
DA00021bpm	20/07/2004	10:25:52	2500		25,64	-16,68	147,37	Nuageuse (50%)

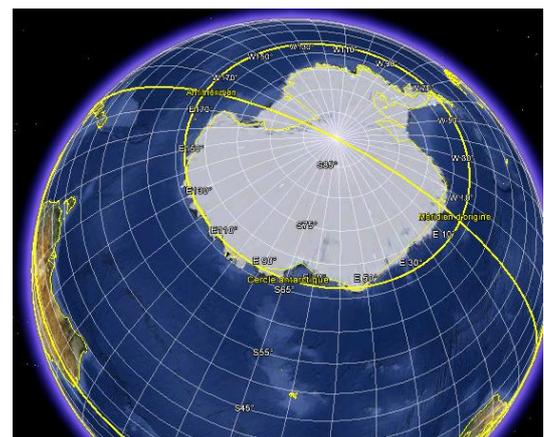
**Tab IV.1 :** les images sélectionnées de *Greenland* et les informations associées

Image « <i>Antarctique</i> »	date	heure	Centre offset	Start offset (%)	Angle solaire (°)	Angle d'azimut (°)	Distance XT (km) (X-Track )	Observation
DA000286s m	17/01/2005	11:37:56	0	50%	14,53	-153,81	156,01	Nuageuse (50%)
DA000270s m	27/12/2004	11:35:41	0		16,69	-151,58	169,12	clair
DA000286p m	17/01/2005	11:37:56	0		14,53	-153,81	156,01	Nuageuse (30%)
DA000270p m	27/12/2004	11:35:41	0		16,69	-151,58	169,12	clair

**Tab IV.2 :** les images sélectionnées de L'Antarctique et les informations associées



**Fig IV.1 :** localisation géographique de la zone « *Greenland* ».

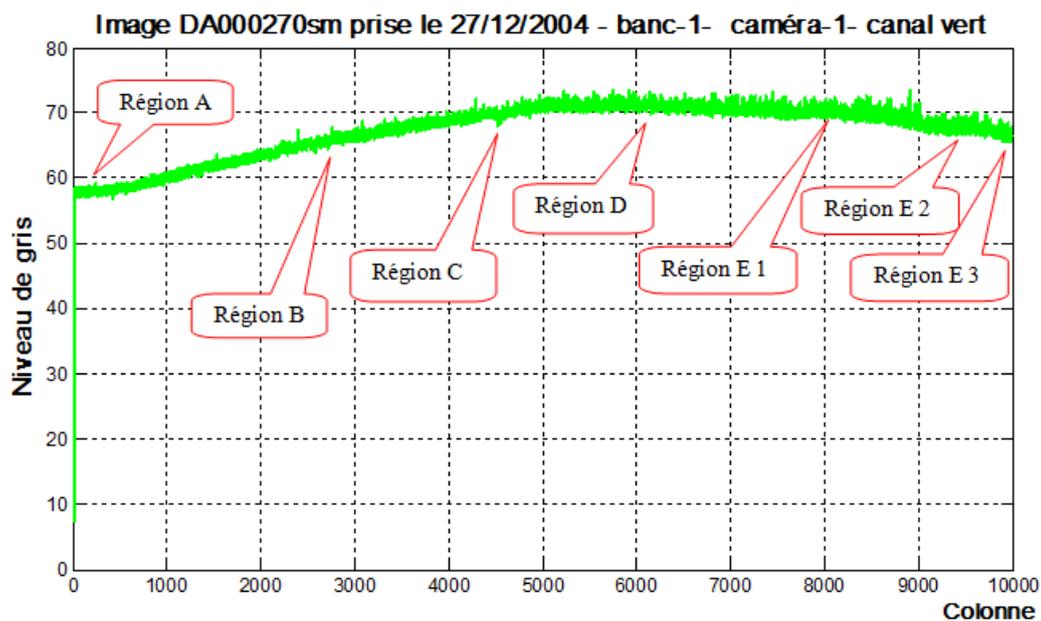


**Fig IV.2 :** localisation géographique de la zone « *Antarctique* ».

Nous avons remarqué d'après les deux tableaux, qu'une image sur deux est nageuse sachant quelles ont été prises avec les mêmes conditions de prises de vue, donc il est difficile pour nous de les comparer. Pour résoudre ce problème, nous avons analysé la réponse radiométrique de chaque caméra pour des cibles claires de l'antarctique (prendre une image complète), juste pour avoir une idée du comportement générales des réponses lorsque la cible est lumineuses. Ensuite, nous avons essayé de prendre le plus possible de fenêtres claires pour faire la comparaison multitudes.

## IV.2 Les images prises par les caméras du Banc -1-

Parmi les images sélectionnées de *Greenland* et de l'Antarctique, nous avons analysé des images capturés par les caméras du banc-1-, et fait des comparaisons de fenêtres de zones claires. Avant cela, nous avons commencé par l'analyse des réponses radiométrique moyenne des caméras 1, 2 et 3 pour une image de l'Antarctique DA000270sm de taille 10000×2500 prise le 27/12/2004.

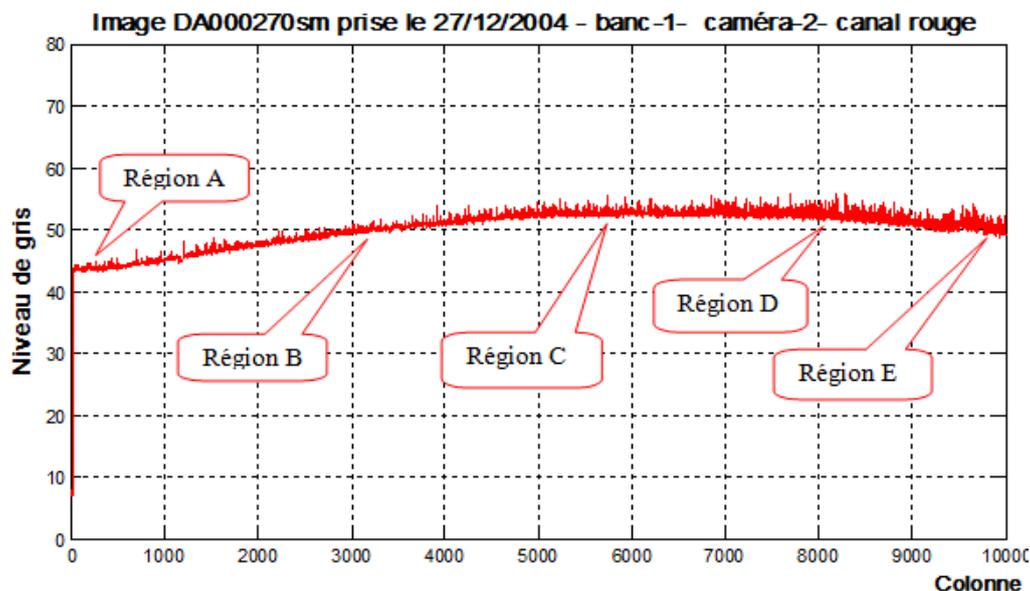


**Fig IV.3:** Réponse radiométrique moyenne de la caméra-1 pour l'image DA000270sm.

L'analyse de la réponse radiométrique de la caméra-1 (vert) montre plusieurs anomalies apparentes dans l'allure générale de la courbe qui a été divisée en régions (par types de déformations) :

De façon générale, la courbe présente des dispersions et une allure asymétrique. Nous avons subdivisé la courbe en sept (07) régions en fonction des anomalies constatées:

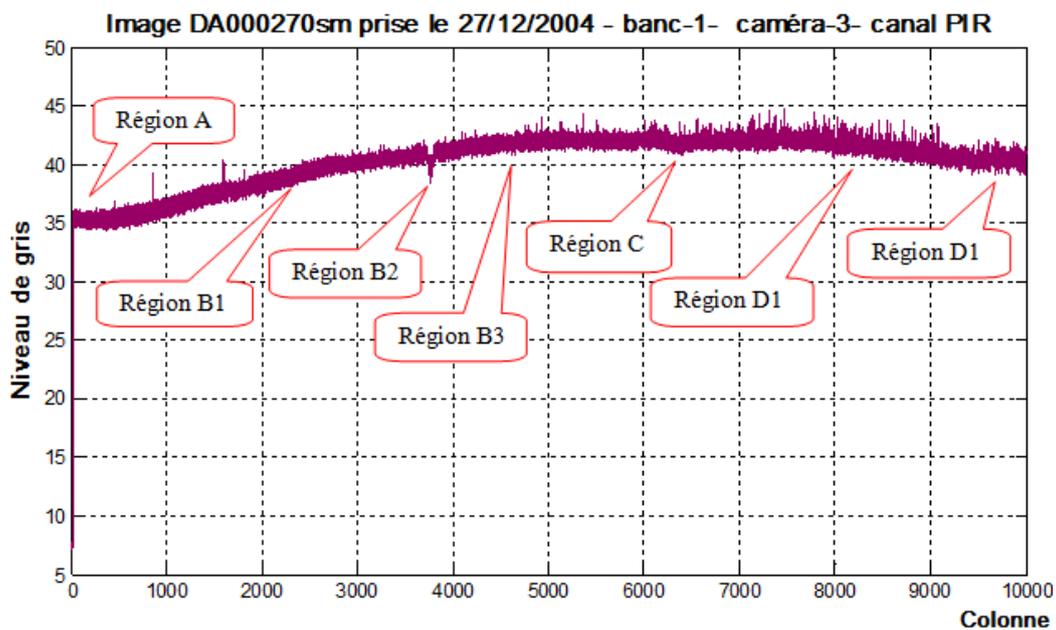
- Région A : de la colonne 22 à 400. la courbe apparaît stable et correspond à une sensibilité constante (niveaux de gris variant entre 57 à 59).
- Région B : de la colonne 400 à 1000 la courbe croît rapidement, suivi par un maintien de l'accroissement linéaire de niveau de gris de la colonne 1000 jusqu'à 4522 (niveau de gris varie de 59 à 72)
- Région C : Une légère baisse de sensibilité apparaît brusquement, touchant 48 pixels. Elle est limitée entre les colonnes 4522 et 4570, suivi par une région croissante linéairement, entre les pixels 4570 à 5000. « Cette anomalie de baisse de sensibilité apparaît dans les premiers résultats de test de l'imager d'Alsat-1-, et peut être associée à la présence de poussière ou dépôt d'impureté sur l'optique ou sur le détecteur CCD.[9] ».
- Région D : apparaît stable entre la colonne 5000 à 7000 (niveau de gris varie de 70 à 73).
- Région E : se compose de trois (03) régions:
  - E1 : une région qui présente une sensibilité linéaire décroissante entre les pixels 7000 à 9065.
  - E2 : apparaît stable entre la colonne 9065 à 9500 comme pour la région A.
  - E3 : une région qui présente une sensibilité linéaire décroissante de colonne 9500 à 10000.



**Fig IV.4:** réponse radiométrique moyenne de la caméra-2- pour l'image DA000270sm. Dans le cas du canal rouge, l'allure de la courbe est similaire à la réponse du canal vert.

- Région A : de la colonne 22 à 400. la courbe apparaît stable et correspond à une sensibilité constante avec une moyenne des niveaux de gris de 44.

- Région B : Une région qui présente une sensibilité linéaire croissante et rapide entre les colonnes 400 à 5000.
- Région C : apparaît stable entre colonnes de 5000 à 7000 avec une moyenne des niveaux de gris de 53.
- Région D : une région qui présente une sensibilité linéaire décroissante et lente entre les colonnes 7000 à 9200.
- Région E : de la colonne 9200 à 1000. la courbe apparaît stable (niveaux de gris variant entre 49 à 53).



**Fig IV.5:** réponse radiométrique moyenne de la caméra-3- pour l'image DA000270sm.

Dans le cas du canal infra rouge, la courbe présente des dispersions plus importantes et une allure asymétrique. Nous avons remarqué un aplatissement sur les bords. Ils sont désignés par des régions A et E. Cette anomalie est liée au phénomène de vignettage qui est dû à l'optique.

- Région A : de la colonne 22 à 400. la courbe apparaît stable et correspond à une sensibilité constante avec une moyenne des niveaux de gris de 35.
- Région B : se compose de trois (03) régions :
  - B1 : une région qui présente une sensibilité linéaire croissante et rapide entre les colonnes 400 à 3722.
  - B2 : apparition d'une baisse de sensibilité de 3 niveaux de gris au niveau des colonnes 3722 à 3810. « Cette anomalie de baisse de sensibilité apparaît dans les premiers résultats de test d'imager d'alsat-1-, et peut être associée à la

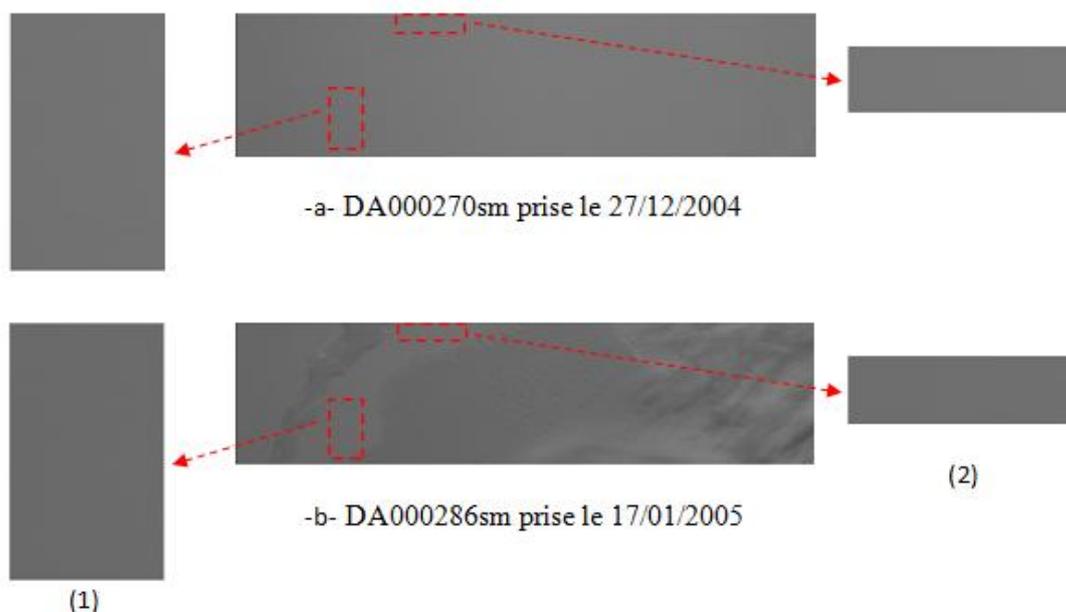
présence de la poussière ou dépôt d'impureté sur l'optique ou sur le détecteur CCD. [9] ».

- B3 : une région qui présente une sensibilité linéaire croissante et lente entre les colonnes de 3810 à 5000
- Région C : apparaît stable entre colonnes de 5000 à 7000 avec une moyenne des niveaux de gris de 42.
- Région D : se compose de deux (02) régions :
  - D1 : une région qui présente une sensibilité linéaire décroissante de colonnes 8000 à 9100.
  - D2 : de la colonne 9100 à 10000. la courbe apparaît stable (niveaux de gris variant entre 39 à 42).

Dans l'étape suivante, nous avons fait une comparaison entre des images prises en différentes dates avec les mêmes conditions de prise de vue.

### IV.2 .1 Les images de l'Antarctique

Nous avons pris les images DA000270sm, DA000286sm de taille 10000×2500 pixels, prises respectivement le 27/12/2004 et le 17/01/2005. Et nous avons remarqué que l'une des deux images est nuageuse (DA000286sm). Donc, nous avons sélectionné des fenêtres claires de taille 600 x 1000 et 1000x300 pixels, extraites des deux images précédentes



**Fig IV.6 :** les images de l'Antarctique et les fenêtres sélectionnées (caméra-1).

Avant d’analyser et comparer les réponses radiométriques des fenêtres sélectionnées, nous avons calculé quelques valeurs significatives. L’ensemble des résultats obtenus pour les indicateurs statistiques est restitué au tableau (IV.3).

<b>La première fenêtre (600x1000)</b>								
Caméra	Image	date	Min/Max	Moyenne	Ecart type	H	AMBE	PSNR
Caméra -1- « Vert »	DA000270sm	27/12/2004	54/71	63.0685	1.4363	2.5683	7.9041	29.9911
	DA000286sm	17/01/2005	47/62	55.1644	1.2852	2.4055		
Caméra -2- « Rouge »	DA000270sm	27/12/2004	41/54	47.3963	1.1206	2.2051	5.5545	32.9774
	DA000286sm	17/01/2005	35/49	41.8419	1.0457	2.1023		
Caméra -3- « PIR »	DA000270sm	27/12/2004	32/46	38.2267	1.3279	2.4493	4.5580	34.4825
	DA000286sm	17/01/2005	27/41	33.6687	1.2644	2.3766		
<b>La deuxième fenêtre (1000x300)</b>								
Caméra -1- « Vert »	DA000270sm	27/12/2004	61/76	68.8044	1.4742	2.6065	9.1685	28.7497
	DA000286sm	17/01/2005	52/66	59.6359	1.3234	2.4493		
Caméra -2- « Rouge »	DA000270sm	27/12/2004	45/58	51.2700	1.1334	2.223	6.3100	31.9263
	DA000286sm	17/01/2005	39/52	44.9601	1.0532	2.1141		
Caméra -3- « PIR »	DA000270sm	27/12/2004	35/48	41.2110	1.2872	2.4033	5.2794	33.3182
	DA000286sm	17/01/2005	29/43	35.9316	1.2689	2.3807		

**Tab IV.3 :** les indicateurs statistiques pour les deux fenêtres extraites des deux images de l’antarctique (banc-1-).

Le tableau (IV.3) montre les valeurs d’analyse quantitative des fenêtres sélectionnées dans les trois bandes (Vert, Rouge, Proche d’infra-rouge) pour les deux différentes dates. On remarque globalement que pour chaque canal toutes les valeurs sont proches.

Pour chaque canal, tous les niveaux de gris sont regroupés autour de la valeur moyenne. Les valeurs de l’écart type confirment ce résultat.

Les faibles différences de l’écart type et de l’entropie témoignent d’une petite variabilité entre les images multidates.

Les valeurs de l’AMBE indiquent pour les trois canaux une petite dégradation de l’éclat de l’image.

Les valeurs de PSNR sont comprises entre 28 et 34.5, ce qui signifie que les toutes fenêtres sont plus proches au niveau de la qualité.

*Remarque : pour le calcul de PSNR et de l’AMBE, nous avons pris l’image acquise en 2004 comme image de référence*

Ensuite, pour voir clairement la différence entre chaque deux fenêtre prises dans les mêmes conditions, nous avons analysé les réponses radiométriques moyennes de la caméra 1, 2 et 3 pour les quatre fenêtres.

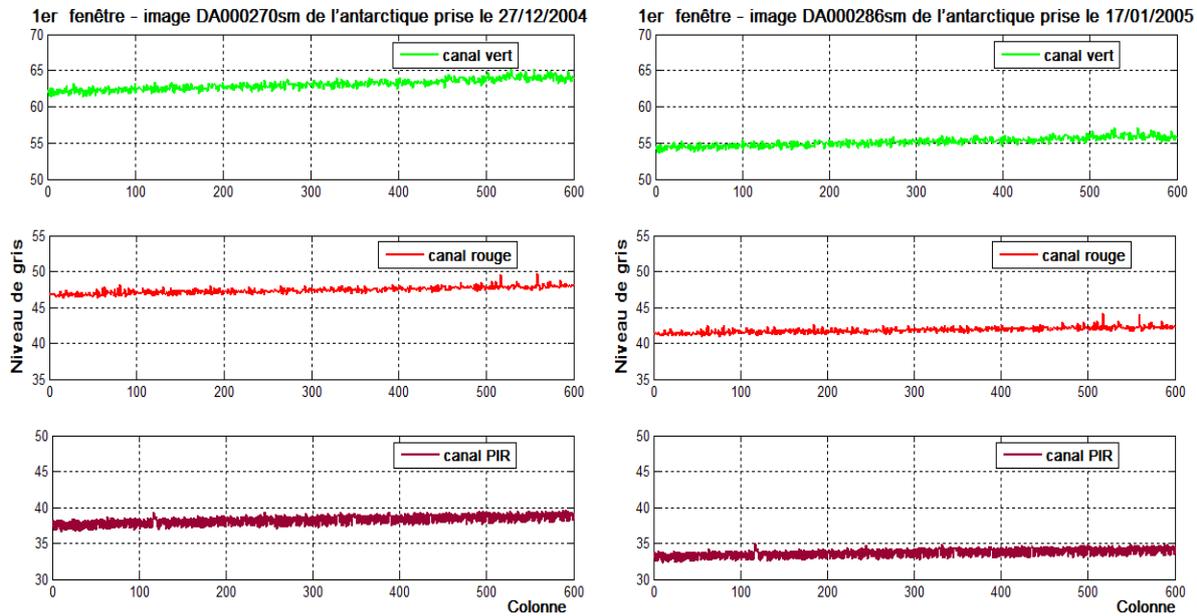


Fig IV.7: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 1, 2 et 3 pour la 1<sup>ère</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique.

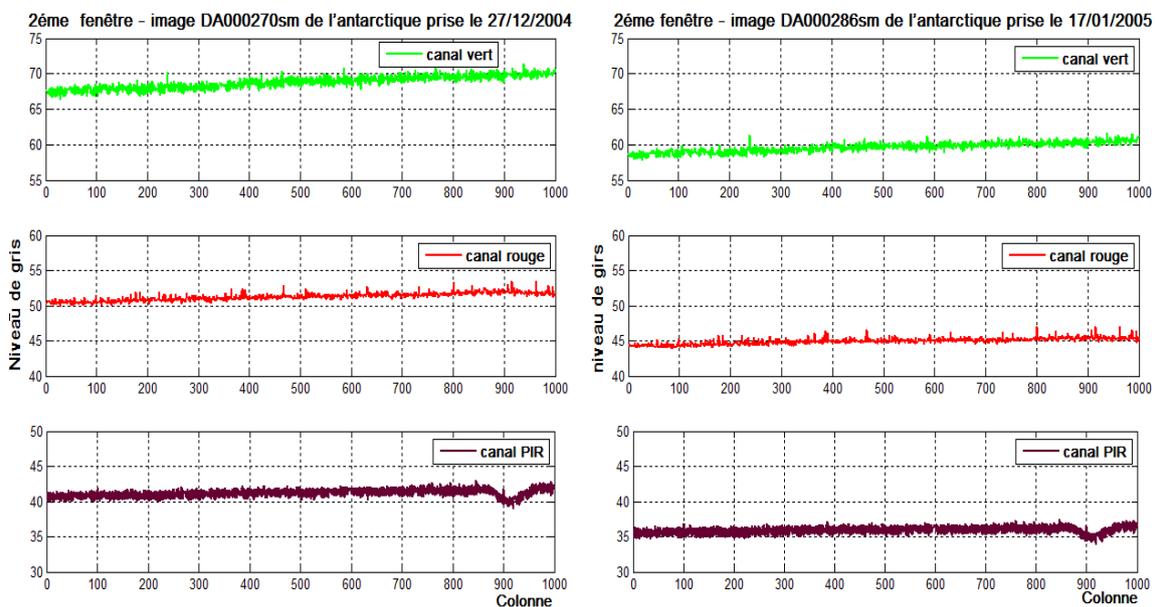
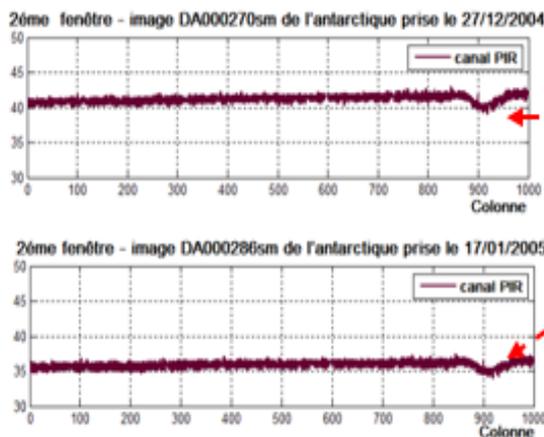


Fig IV.8: Les réponses radiométriques moyennes des caméras 1, 2 et 3 pour la 2<sup>e</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique.

L'analyse des réponses radiométriques moyenne (figures IV.7 et IV.8) confirme les résultats précédents. Pour chaque canal, toutes les niveaux de gris sont regroupés autour de la

valeur moyenne et une dégradation de l'éclat de l'image entre les deux fenêtres celle qui a été prise le 27/12/2004 et l'autre qui a été prise le 17/01/2005. Nous avons remarqué d'après les informations des prises de vue, une différence de l'angle solaire de deux degrés ( $14.53^\circ$  pour l'image DA000270sm et  $16.69^\circ$  pour l'image DA000286sm), et d'après la littérature, lorsque la variation de l'angle solaire est inférieure de  $6^\circ$  l'influence sur la luminosité d'image est faible. Donc, dans ce cas la dégradation de l'éclat n'est pas liée à cette variation.

Dans l'allure générale de toutes les courbes nous avons remarqué une réponse radiométrique croissante, cette anomalie liée à l'effet d'optique.



*Présence d'une bande sombre sur l'image (pixels 3722 à 3810). Elle correspond à une baisse de sensibilité des photosites correspondants de la caméra-3.*

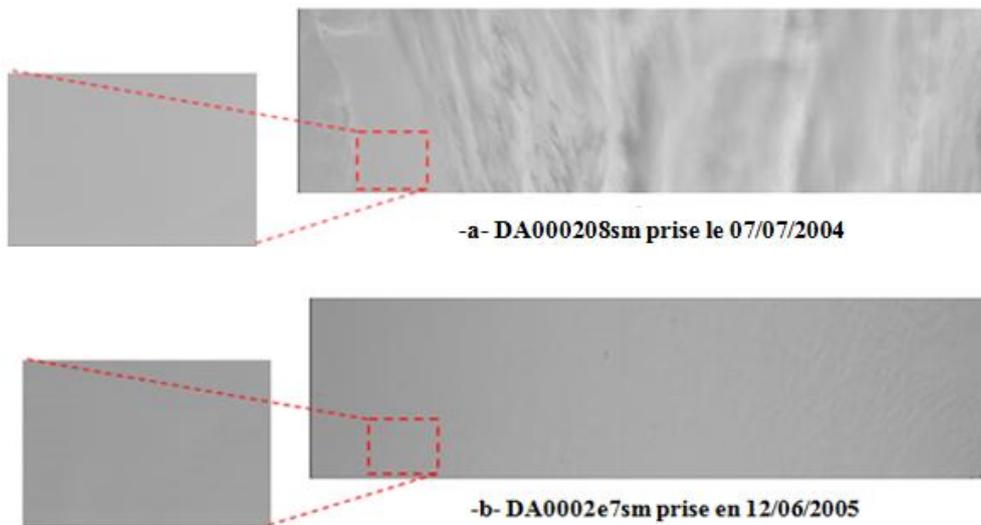
*Cette anomalie a été remarquée dans les premières évaluations des images d'Alsac-1, prises par la caméra-3.*

**Fig IV.9:** Les réponses radiométriques moyennes de la caméra-3 pour la 2<sup>ème</sup> fenêtre extraite de deux images de l'antarctique.

## IV.2.2 Les images de *Greenland*

Parmi les images sélectionnée de *Greenland*, il ya deux images prises par les caméras du banc-1-, l'image DA000208sm prise le 07/07/2004 et l'image DA0002e7sm prise le 12/06/2005 l'un des deux images est nuageuse.

Nous avons sélectionné des fenêtres claires de taille 1000x600 pixels, extraites des deux images précédentes



**Fig IV.10 :** les images de *Greenland* et les fenêtres sélectionnées (caméra-1).

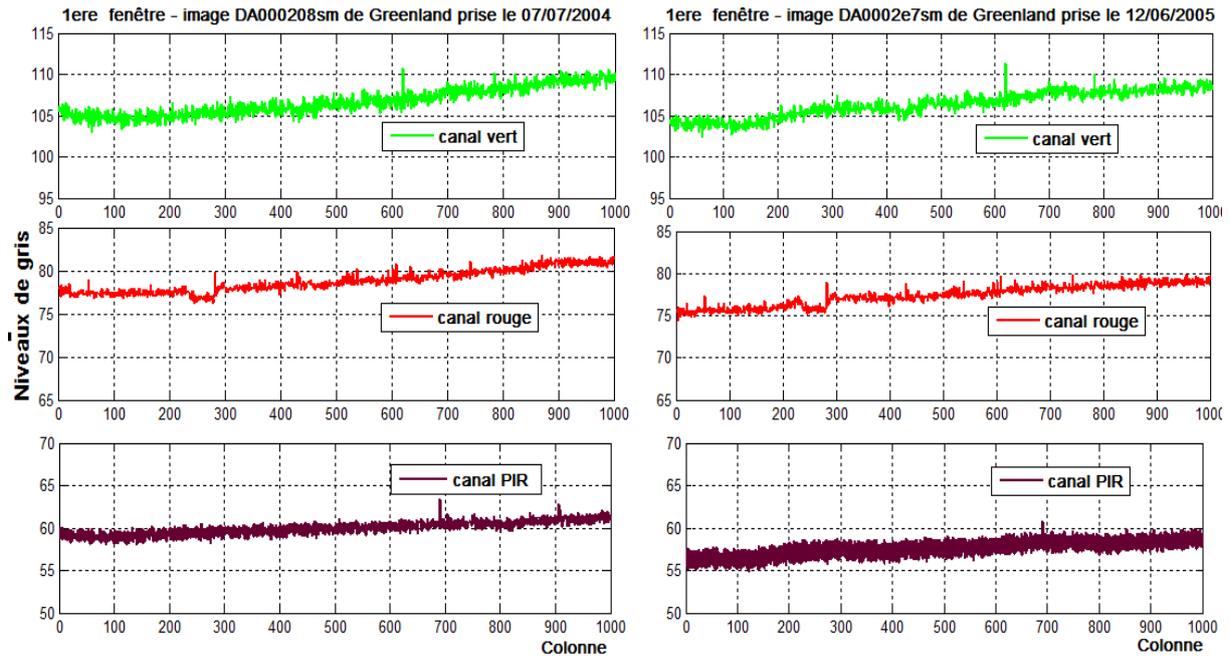
Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour les indicateurs statistiques des deux fenêtres sélectionnées.

Caméra	Image	date	Min/Max	Moyenne	Ecart type	H	AMBE	PSNR
Caméra -1- « Vert »	DA000208sm	07/07/2004	66/ 118	108.8580	3.0910	3.3673	2.3860	35.6796
	DA0002e7sm	12/06/2005	57/119	106.4720	3.4035	3.3618		
Caméra -2- « Rouge »	DA000208sm	07/07/2004	57 /85	78.9263	2.0652	2.9951	1.4689	38.2703
	DA0002e7sm	12/06/2005	50/ 86	77.4574	2.3898	3.0042		
Caméra -3- « PIR »	DA000208sm	07/07/2004	43/65	59.0789	1.6449	2.7264	1.3886	40.3693
	DA0002e7sm	12/06/2005	38/67	57.6903	1.9756	2.9474		

**Tab IV.4 :** les indicateurs statistiques pour la première fenêtre extraite des deux images de *Greenland* (banc-1-).

L'analyse des valeurs statistiques des fenêtres sélectionnées dans les trois bandes (Vert, Rouge, Proche d'infra-rouge) pour les deux dates différentes, montre que :

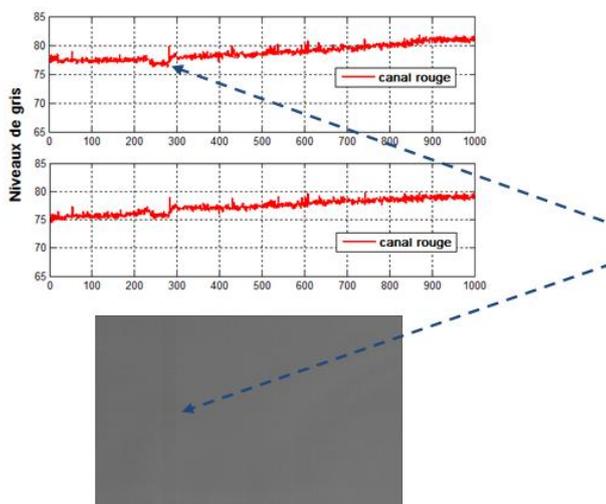
- Le canal vert présente une petite dispersion par rapport aux autres canaux.
- Des différences de l'écart type, d'AMBE et d'entropie faibles témoignent une petite variabilité entre les images multodate.
- Les valeurs de PSNR acceptable comprises entre 35 et 41, ce qui signifie que les toutes fenêtres sont plus proches au niveau de qualité.



**Fig IV.11:** Les réponses radiométriques moyennes des caméras 1,2 et 3 pour une fenêtre extraite de deux images de *Greenland*.

L'analyse des réponses radiométrique moyennes des deux fenêtres montre que :

- l'allure générale de toutes les courbes possède une réponse radiométrique croissante et lente, cette anomalie liée à l'effet d'optique.
- Une dégradation de l'éclat de l'image entre les deux fenêtres celle qui a été prise le 07/07/2004 et l'autre qui à été prise le 12/06/2005
- la présence d'une bande sombre sur les deux images prises par la caméra-2-.



*Une bande sombre correspond à une baisse de sensibilité des 48 photosites.*

*Cette anomalie a été remarquée dans les premières évaluations des images d'Alsac-1, prises par la caméras-2- .*

**Fig IV.12:** Les réponses radiométriques moyennes de la caméra 2 pour une fenêtre extraite de deux images de *Greenland* (DA000208sm et DA0002e7sm).

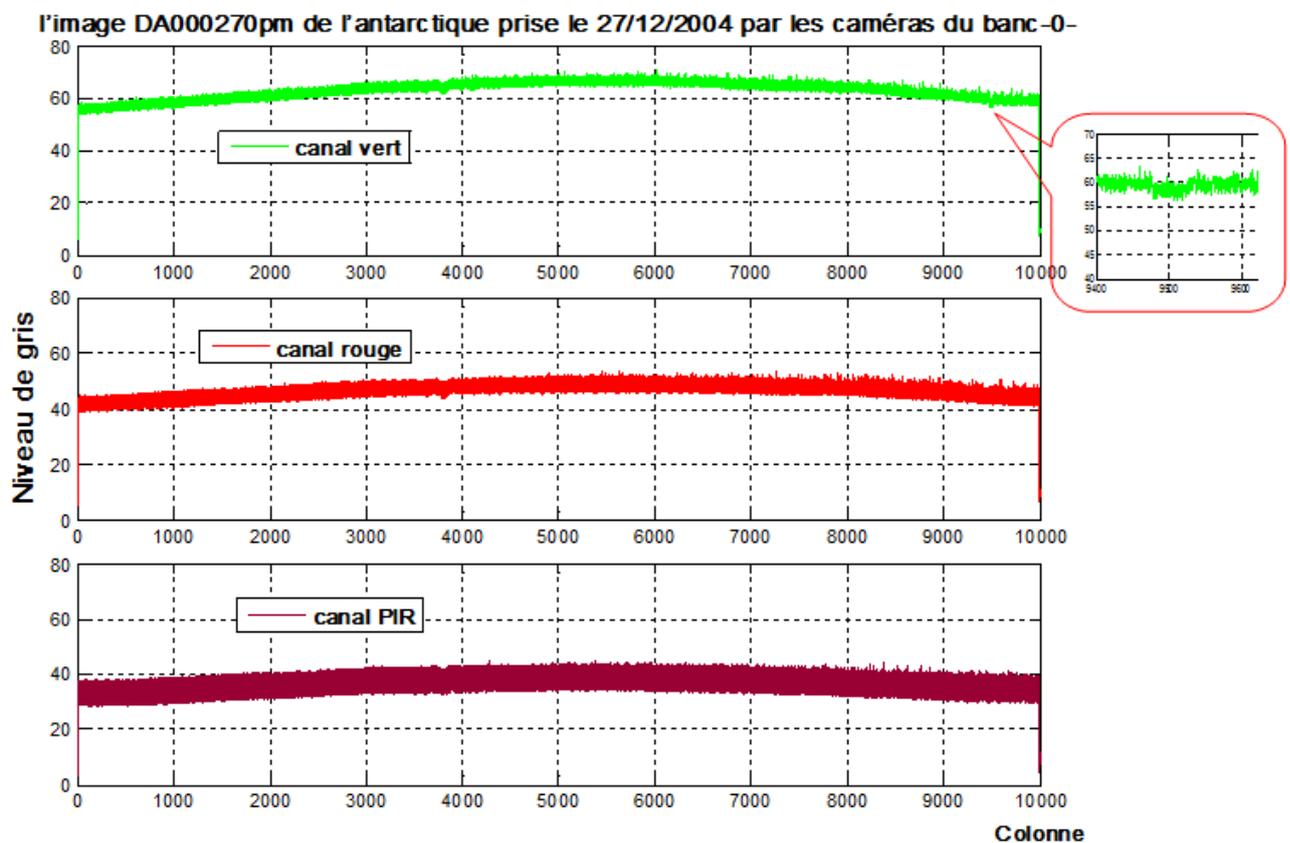
### IV.3 Les images prises par les caméras du Banc -0-

Dans cette étape nous avons fait le même travail pour les images prises par les caméras du banc-0- et nous avons pris le nombre possible des fenêtres clairs.

Avant faire la comparaison multirate des images, nous avons commencé par l'analyse des réponses radiométrique moyenne d'image de l'Antarctique DA000270pm de taille 10000×2500 prise le 27/12/2004.



**Fig IV.13:** l'image DA000270pm de l'antarctique prise le 27/12/2004 par la caméra-4 du banc-0-



**Fig IV.14:** Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4, 5 et 6 pour l'image DA000270pm de l'Antarctique.

La figure (IV.14) présente la réponse radiométrique moyenne de l'image DA000270pm dans les trois bandes spectrale (vert, rouge, PIR). A partir de cette figure nous remarquons :

- L'allure générale des trois courbes est symétrique et centrée par rapport à la barrette CCD.
- Un aplatissement sur les bords. Cette anomalie est liée au phénomène de vignettage qui est dû à l'optique.
- la présence d'une bande sombre le long de 44 colonnes dans réponse du caméra-4.

Nous avons fait dans l'étape suivante une comparaison entre des images prises en différentes dates avec les mêmes conditions de prise de vue.

### IV.3 .1 Des images de l'Antarctique :

Parmi les images sélectionnées nous avons deux images de l'antarctique prise par les caméras du bans- 0-, DA000270pm et DA000286pm de taille 10000×2500 pixels, prises respectivement le 27/12/2004 et le 17/01/2005. Nous avons remarqué que l'une des deux images est nuageuse (DA000286pm). Donc, nous avons sélectionné des fenêtres claires de taille 1000x2500 pixels, extraites des deux images précédentes

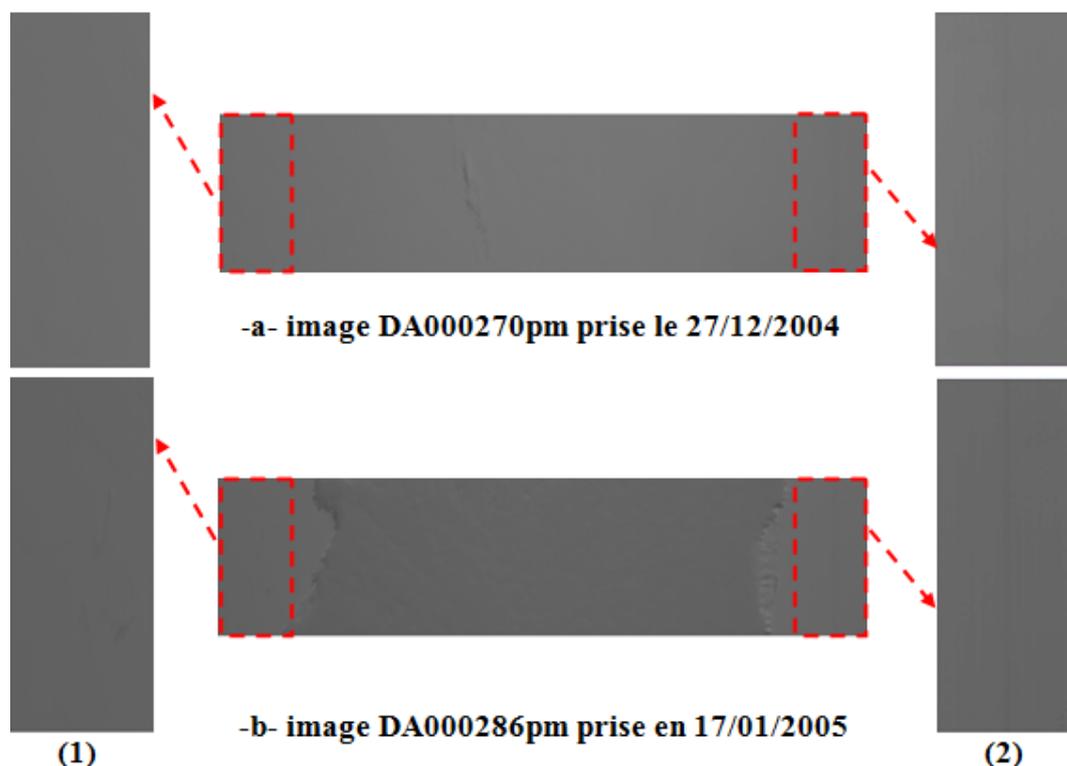


Fig IV.15 : les images de l'Antarctique et les fenêtres sélectionnées (caméra-4).

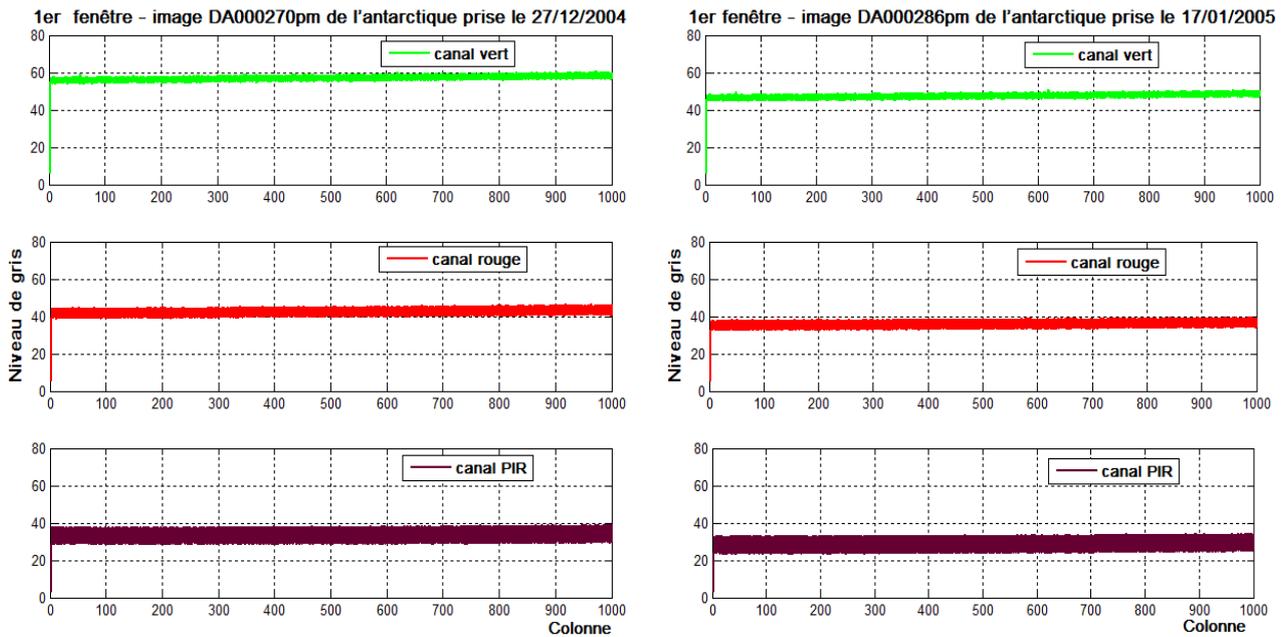
Dans ce qui suit, nous avons appliqué les mesures statistique sur les zones sélectionnées, les différents résultats obtenus sont regroupé sur le tableau suivant :

La première fenêtre (1000x2500)								
Caméra	Image	date	Min/Max	Moyenne	Écart type	H	AMBE	PSNR
Caméra -4- « Vert »	DA000270pm	27/12/2004	0/67	57.0270	3.1355	3.1797	9.5619	28.4173
	DA000286pm	17/01/2005	0/56	47.4651	2.7740	3.1157		
Caméra -5- « Rouge »	DA000270pm	27/12/2004	0/51	42.4789	3.2613	3.2282	6.5516	31.6379
	DA000286pm	17/01/2005	1/45	35.9272	3.0646	3.1336		
Caméra -6- « PIR »	DA000270pm	27/12/2004	0/44	33.4805	4.8089	3.1846	4.7826	34.1612
	DA000286pm	17/01/2005	0/40	28.6979	4.8516	3.2589		
La première fenêtre (1000x2500)								
Caméra -4- « Vert »	DA000270pm	27/12/2004	0/70	59.7778	3.8478	3.2152	7.8430	30.0761
	DA000286pm	17/01/2005	1/61	51.9347	3.2879	3.0152		
Caméra -5- « Rouge »	DA000270pm	27/12/2004	1/55	44.9122	3.6621	3.4391	5.4000	33.2315
	DA000286pm	17/01/2005	3/63	39.5123	3.3702	3.2669		
Caméra -6- « PIR »	DA000270pm	27/12/2004	0/47	34.9401	4.7960	3.4412	4.0215	35.5509
	DA000286pm	17/01/2005	1/42	30.9186	4.7032	3.3645		

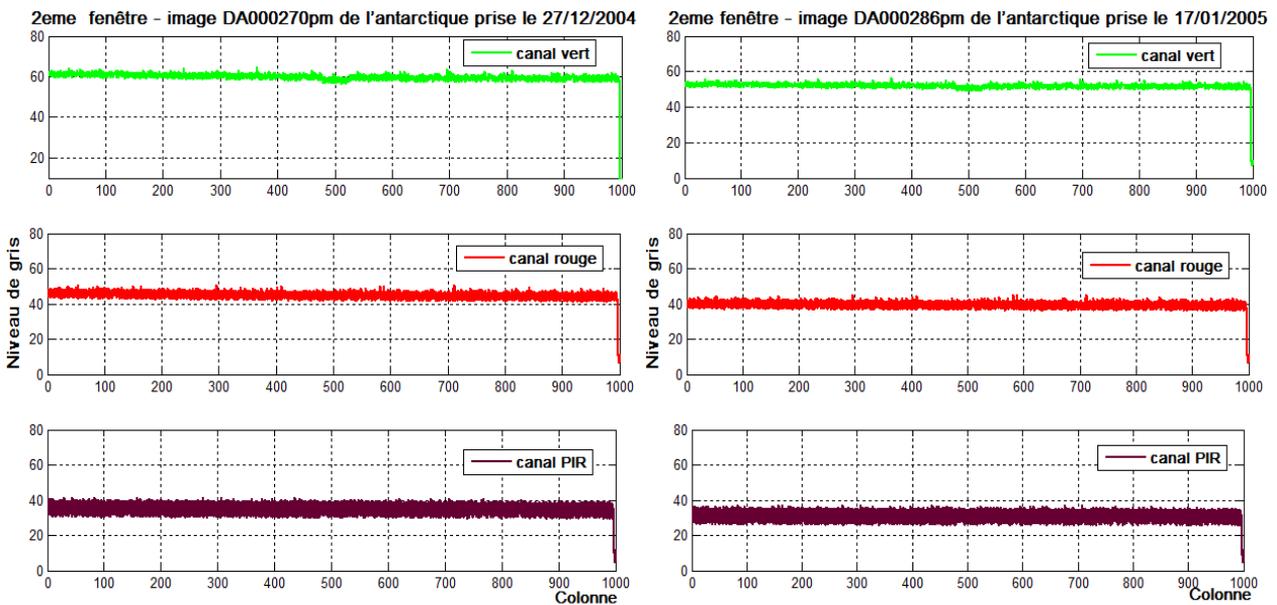
**Tab IV.5 :** les indicateurs statistiques pour les deux fenêtres extraites des deux images de l'antarctique (banc-0-).

Le tableau IV.5 montre les valeurs d'analyse statistiques des fenêtres sélectionnées dans les trois bandes (Vert, Rouge, Proche d'infra-rouge) pour les deux dates différentes. L'analyse des valeurs quantitative des fenêtres, montre que :

- Le canal proche d'infra-rouge présente une petite dispersion par rapport aux autres canaux.
- Les valeurs de l'AMBE indiquent une petite dégradation de l'éclat de l'image entre les deux images DA000286pm et DA000270pm.
- Toutes les fenêtres sont plus proches au niveau de qualité.



**Fig IV.16:** Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 1<sup>ère</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique.

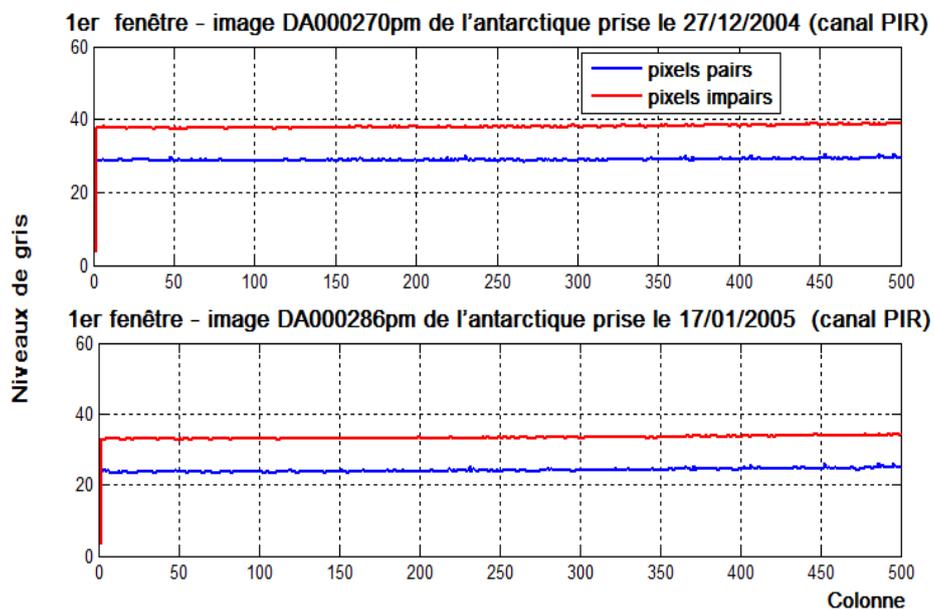


**Fig IV.17:** Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 2<sup>ème</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique.

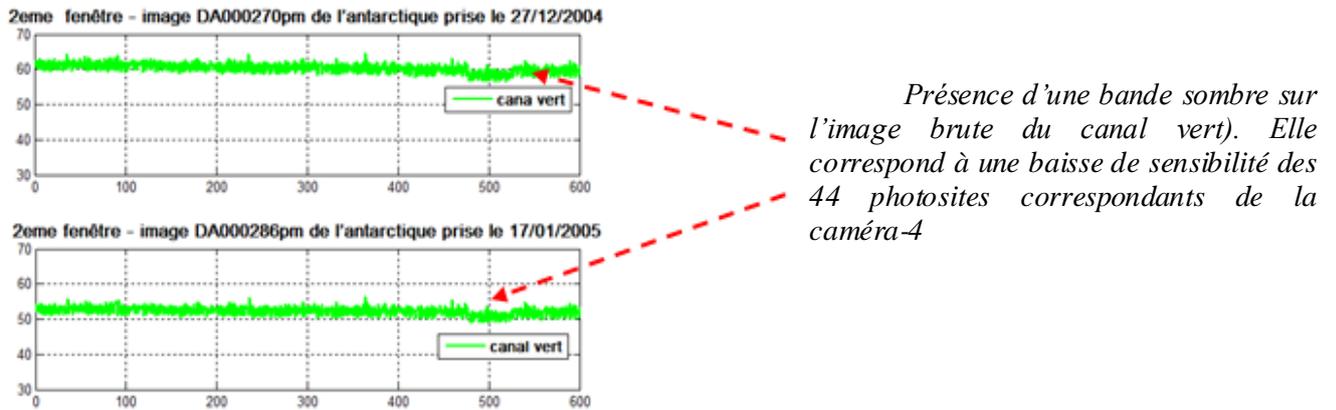
D'après ces résultats nous pouvons dire :

- dans toutes les réponses radiométriques moyennes, une petite différence de l'éclat de l'image entre les deux fenêtres celle qui a été prise le 27/12/2004 et l'autre qui a été prise le 17/01/2005. Cette dégradation n'est pas liée à la différence de l'angle solaire, car cette dernière est d'environ de 2°.

- Dans l'allure générale de toutes les courbes nous remarquons une réponse radiométrique croissante et lente pour la 1<sup>er</sup> fenêtre et décroissante pour la 2<sup>ème</sup> fenêtre, cette anomalie est liée à l'effet d'optique. Cette dégradation n'est pas liée à l'élévation solaire.
- L'apparence de quatre pixels noirs (cachés) dans les dernières fenêtres extraits des bords droits des images.
- Pour les canaux rouge et proche infrarouge, les variations des niveaux de gris est à l'intérieure d'un intervalle un peu plus large par apport au canal vert et aux autres canaux du banc 1 (un intervalle de huit niveaux de gris). C'est un problème qui est lié au fait qu'un écart important existe entre les pixels pairs et impairs. Le fait que la bande spectrale du PIR soit large fait que l'amplitude du signal est plus importante que pour les autres bandes spectrales, cela implique un écart plus important entre les pixels pairs et impairs. Et cette anomalie est plus visible dans les réponses des caméras du banc-0- (fig IV .17).



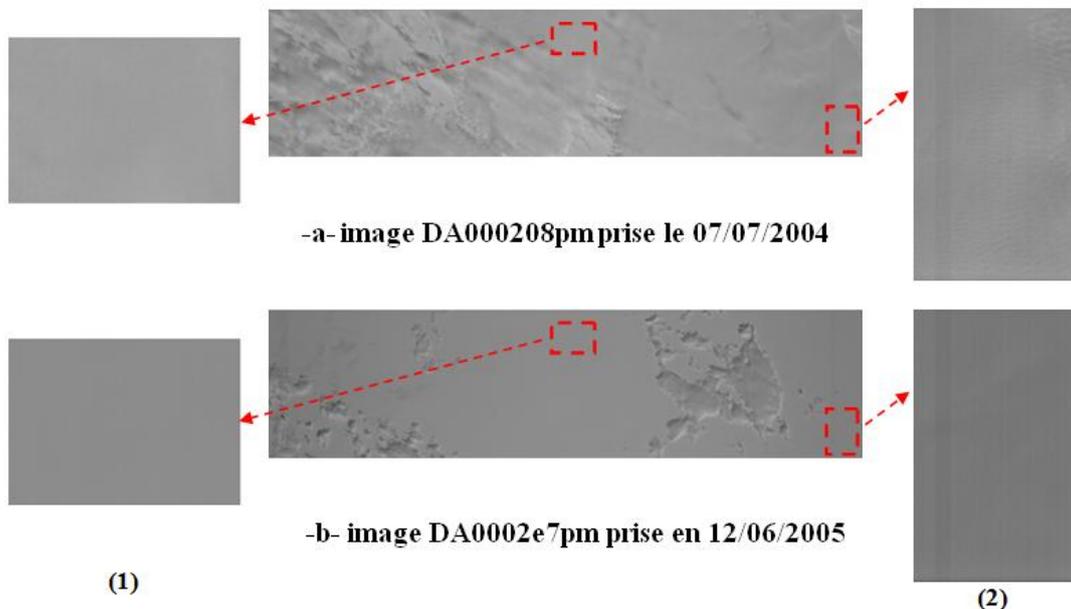
**Fig IV.18:** Les réponses radiométriques moyennes de la caméra-6 pour la 1<sup>ère</sup> fenêtre extraite de deux images de l'Antarctique.



**Fig IV.19:** Les réponses radiométriques moyennes de la caméra-4 pour la 2<sup>ème</sup> fenêtr e extraite de deux images de l'antarctique.

### IV.3.2 Les images de Greenland

Nous avons fait dans ce qui suit le même travail pour des fenêtr es claires extraites de deux images nuageuses de *Greenland* prises respectivement le 07/07/2004 et le 12/06/2005.



**Fig IV.20 :** les images de *Greenland* et les fenêtr es sélectionnées (caméra-4).

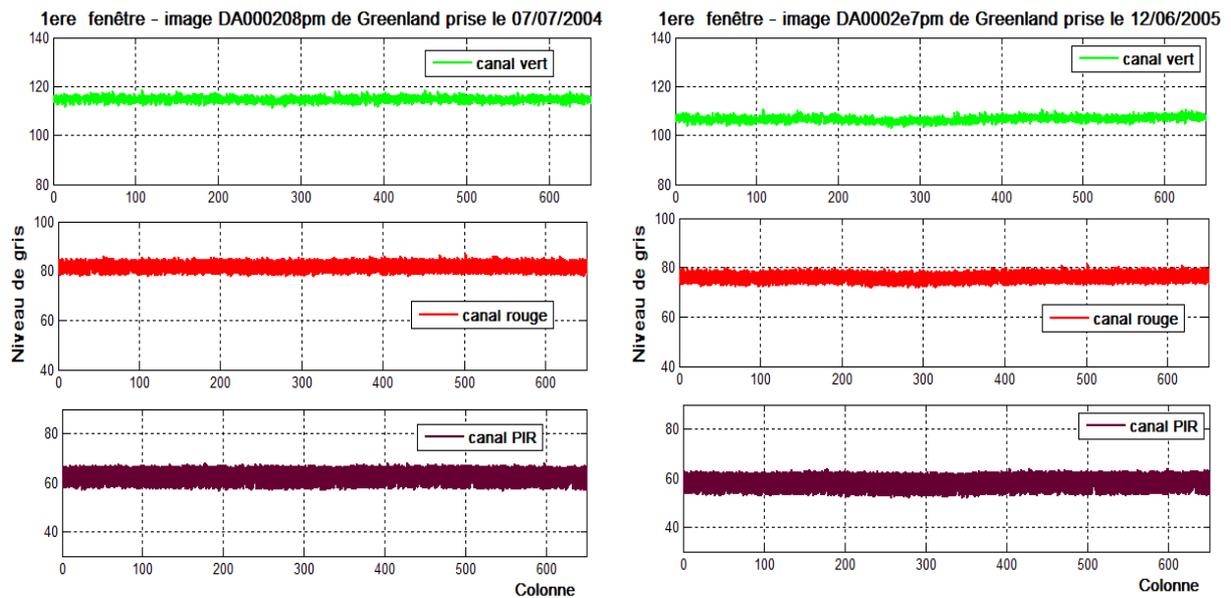
La première fenêtre (650x505)								
Caméra	Image	date	Min/Max	Moyenne	Ecart type	H	AMBE	PSNR
Caméra -4- « Vert »	DA000208pm	07/07/2004	107/123	114.7498	2.1892	3.1289	8.0819	29.6449
	DA0002e7pm	12/06/2005	105/120	106.6680	2.6561	3.4490		
Caméra -5- « Rouge »	DA000208pm	07/07/2004	73/90	81.7794	3.2489	3.2092	5.7128	32.5688
	DA0002e7pm	12/06/2005	74/88	76.0666	3.3705	3.6011		
Caméra -6- « PIR »	DA000208pm	07/07/2004	52/73	62.3114	4.6557	3.2846	4.3848	34.6424
	DA0002e7pm	12/06/2005	46/70	57.9266	4.8168	3.6104		
La première fenêtre (550x900)								
Caméra -4- « Vert »	DA000208pm	07/07/2004	57/113	102.7083	2.9579	3.1914	6.2117	31.4660
	DA0002e7pm	12/06/2005	62/111	96.4966	3.3718	3.6923		
Caméra -5- « Rouge »	DA000208pm	07/07/2004	47/85	74.4098	3.5340	3.5144	4.6221	33.8786
	DA0002e7pm	12/06/2005	51/83	69.7877	3.6380	3.8537		
Caméra -6- « PIR »	DA000208pm	07/07/2004	35/65	53.9993	4.7016	3.4789	2.7214	37.7398
	DA0002e7pm	12/06/2005	35/63	51.2779	4.7109	3.7974		

**Tab IV.6 :** les indicateurs statistiques pour les deux fenêtres extraites des deux images de *Greenland* (banc-0-).

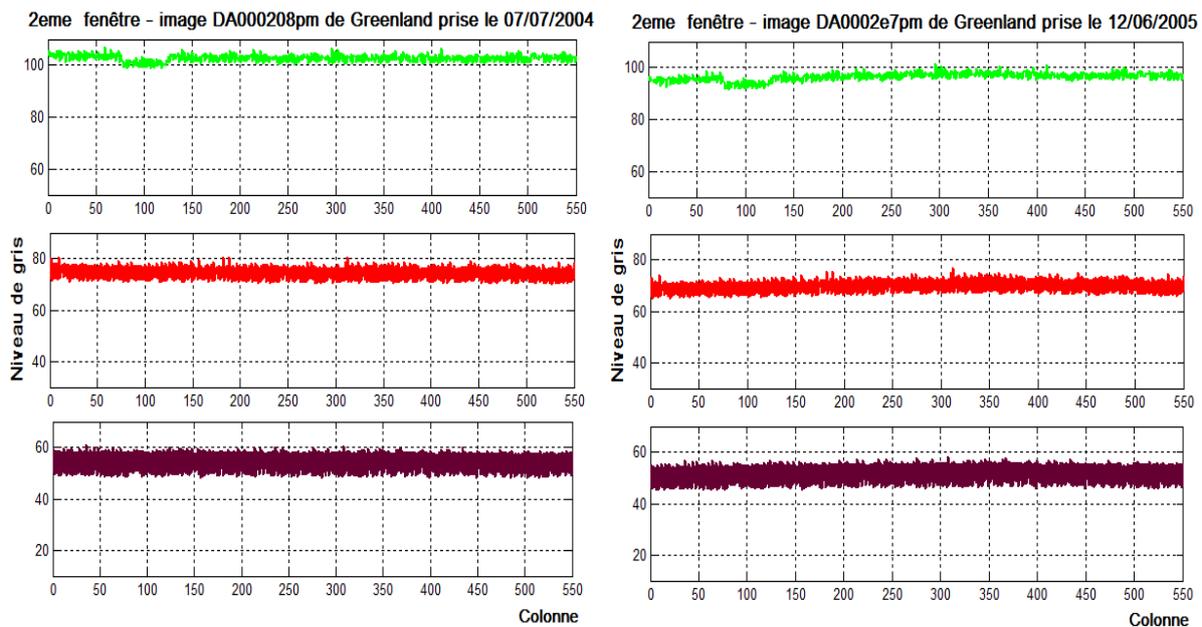
À partir du tableau en peut noter quelques informations :

- Pour chaque canal, toutes les valeurs des indicateurs statistiques sont proches.
- Les valeurs d'AMBE, indiquent une petite dégradation de l'éclat entre les deux images.
- Le canal proche d'infrarouge présente une petite dispersion par apport aux autres canaux.

Ensuite, nous avons montré les réponses radiométriques moyennes des deux fenêtres ; la première qui a été extrait au milieu des deux images et l'autre aux bords.



**Fig IV.21:** Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 1<sup>ère</sup> fenêtre extrait de deux images de *Greenland*.



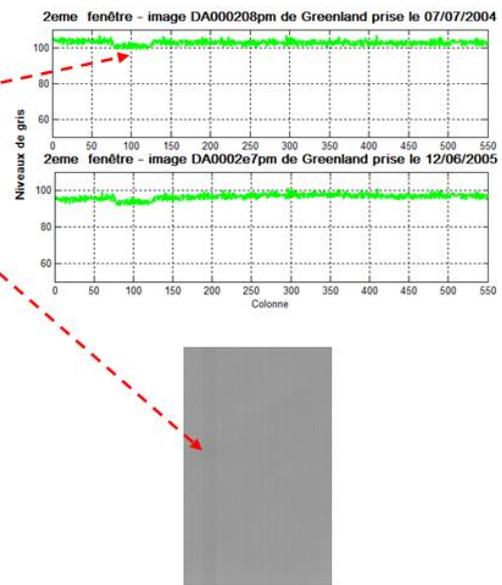
**Fig IV.22:** Les réponses radiométriques moyennes des caméras 4,5 et 6 pour la 2<sup>ème</sup> fenêtre extraite de deux images de *Greenland*.

Au vu des résultats, nous remarquons que l'allure générale des courbes apparait stable pour les deux fenêtres, avec une petite différence de l'éclat entre les deux fenêtres celle qui a été prise le 07/07/2004 et l'autre qui a été prise le 12/06/2005.

Nous avons aussi remarqué, pour les canaux rouge et proche d'infrarouge, les variations des niveaux de gris est à l'intérieure d'un intervalle un peu plus large par rapport au canal vert et aux les autres canaux du banc 1. Et cette anomalie liée a l'augmentation de la différence entre les pixels pairs et impairs dans ce banc(0).

*Présence d'une bande sombre correspond à une baisse de sensibilité des 44 photosites (caméra-4).*

*Nous avons remarqué l'apparence de cette bande dans les images de l'antarctique.*



**Fig IV.23:** Les réponses radiométriques moyennes de la 2<sup>ème</sup> fenêtre extrait de deux images de *Greenland* (caméra-4).

## IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude comparative entre des images lumineuses multidates. Nous avons analysé en premier lieu, les réponses radiométriques des images prises pas les caméras des deux bancs. L'analyse des images lumineuses, ont permis d'obtenir des courbes de réponses radiométriques non homogènes et non uniformes, mais identiques pour toutes les images multidates avec l'apparence d'une petite différence d'éclat entre les images multidates, ce qui indique une faible variabilité entre ces images. Cette faible variabilité est peut être liée au vieillissement de la caméra, et ceci reste une hypothèse, car le nombre d'images n'est pas suffisant pour la valider.

Nous avons, aussi, montré qu'il existe plusieurs anomalies liées à l'architecture de la caméra :

- ✓ L'apparence de l'effet d'optique dans toutes les réponses des six (6) caméras.
- ✓ L'écart entre les réponses des photosites pairs et impairs dû à la séparation des voies pour les pixels pairs et impairs dans l'architecture interne du capteur CCD KLI-10203, plus visible dans les réponses des caméras du banc 0.
- ✓ présence d'une baisse de sensibilité le long de certaines colonnes pour quatres caméras. Cette anomalie peut être associée à une différence de sensibilité des photosites,

ou à la présence de poussière ou tâche soit au niveau de l'optique ou au niveau du détecteur CCD :

- caméras-1 (vert) : du photosite 4522 à 4570.
- caméras-2 (rouge) : du photosite 1140 à 1200.
- caméras-3 (proche de l'infrarouge) : du photosite 3722 à 3810.
- caméras-4 (vert) : du photosite 9479 à 9523.

---

# Conclusion et Perspectives

---

**L**e but du travail a été d'une part, de présenter et d'analyser la réponse radiométrique des six canaux du premier satellite algérien d'observation de la terre: ALSAT-1, et d'autre part d'évaluer la variation de la qualité de la caméra SLIM-6 durant une période de trois ans de fonctionnement. Cette évaluation est basée sur l'analyse d'images obtenues à partir des cibles de référence prises entre le début 2004 et la fin 2006.

Pour cela, nous nous sommes intéressés en premier lieu à la description en détail de l'imageur et puis nous avons présenté les caractéristiques orbitales et instrumentales du satellite Alsat-1. On s'est focalisé sur la charge utile d'ALSAT-1 et ensuite nous avons décrit en détail les différents composants de la caméra sans oublier les différents signaux générés et les bruits associés.

Nous nous sommes ensuite interrogés dans un deuxième chapitre sur la façon d'obtenir un bilan de qualité sur la réponse radiométrique de l'imageur. Pour cela:

- On a exposé brièvement les tests radiométriques ainsi que l'analyse des réponses des six caméras avant lancement.
- Ensuite, on a évalué les premières images prises par la caméra en identifiant les anomalies constatées.

Nous avons ensuite restreint les limites de notre évaluation. Malgré le grand nombre d'images de référence disponible (143 images), prises durant la période allant du 30 mai 2004 jusqu'au 28 octobre 2006, car seules quelques-unes des images répondent aux conditions d'évaluation multitudes. Une autre difficulté rencontrée est que la plupart des images lumineuses sélectionnées étaient nuageuses. Cela nous a amené à extraire un nombre important de fenêtres de zones claires pour effectuer la comparaison.

Nous avons ensuite subdivisé notre évaluation radiométrique en deux grandes parties:

1. La première étude était consacrée aux images sombres où nous avons constaté l'existence d'anomalies qui apparaissaient dans toutes les réponses liées à

l'architecture des caméras. Nous avons aussi déduit que les réponses radiométriques de l'imageur d'ALSAT-1 sont plus stables que celle du satellite anglais UK-DMC (même type de caméra que pour ALSAT 1).

2. La deuxième étude était consacrée aux images lumineuses (claires), celle-ci nous a montré l'existence d'anomalies et la présence d'un écart visible entre les réponses des photosites paires et des photosites impaires.

Nous avons aussi remarqué une baisse de sensibilité le long de certaines colonnes pour les réponses de quatre caméras (1, 2, 3 et 4) où nous avons supposé que cette anomalie était due à la différence de sensibilité des photosites, ou à la présence de poussière ou tâche au niveau de l'optique ou au niveau du détecteur CCD.

Pour finir nous avons présenté et interprété les résultats des évaluations multidates, qui montraient une stabilité de la qualité de l'imageur durant ses 3 années de fonctionnement. Certaines anomalies restaient visiblement liées d'une part à la conception de l'imageur, et d'autre part, aux éléments constituant chaque canal (caméra). Nous avons également constaté l'apparence d'une petite différence d'éclat entre les images multidates, ce qui indique une faible variabilité entre ces images. Cette faible variabilité est peut être liée au vieillissement de la caméra, et ceci reste une hypothèse car le nombre d'images n'est pas suffisant pour la valider.

## Perspectives:

Plusieurs voies peuvent être envisagées pour développer ce travail.

- Étudier d'autres images de zones déjà parfaitement localisées au préalable (déserts) pour valider et confirmer ces résultats,
- Élargir cette étude sur les performances du capteur SLIM-6 et spécialiser des méthodes de correction radiométrique, tenant compte des défauts et des variations de la qualité radiométrique détectée sur le capteur pour augmenter sa qualité de service.

# Bibliographie

- [1] M.C GIRARD et C.M GIRARD. " Traitement des données de télédétection". Edition DUNOD. Paris, 2004. 529 p.
- [2] R. DESJARDINS et J. DUBOIS. " La Télédétection - Perspective Analytique". Edition ESTEM, 2000. 226 p
- [3] R. CALOZ et C. COLLET, Précis de la télédétection : traitement numérique d'images de télédétection, volume 3. Presses de l'Université du Québec, 2001, 386 p.
- [4] R. CALOZ et C. COLLET, "Précis de télédétection: Méthodes de photointerprétation et d'interprétation", volume 4. Presses de l'Université du Québec, 2007, 468 p.
- [5] Les Cahiers pédagogiques du GDTA, Cahier B3, 66 p. CNES Toulouse, 1991.
- [6] J.CAZAUX. " Les systèmes spatiaux d'observation de la terre". Montpellier, France Edition CIHEAM- IAMM, 1991.
- [7] site de l'Agence Française d'études spatiale <http://www.cnes.fr> (accès le 19/12/2011).
- [8] Site de la NASA. <http://www.nasa.gov> (accès le : 16/11/2011).
- [9] K. BELKACEMI. " Caractérisation Radiométrique de la Caméra d'Alsat-1". Thèse de Magister. Centre des Techniques Spatiales, 2007.
- [10] J.WILEY & James R.WERTZ, " Space Mission Analysis and Design ", 2nd edition (Space Technology Library), 1992. 904p.
- [11] P. STEPHENS & all. "Launch of the International Disaster Monitoring Constellation; the development of a novel international partnership in space". Conference Proceedings of RAST 2003. IEEE conference publications 0-7803-8 142-4/03, 2003.

- [12] A. RACHEDI, N. HADJ-SAHRAOUI, & A. BREWER. ‘‘Alsat-1 First Results of Multispectral Imager’’. The XXth international Congress for Photogrammetric and remote sensing, July 2004, Istanbul, Turkey.
- [13] A.B. BENBOUZID, A. RACHEDI & K. LAIDI. ‘‘ A New Micro-Satellite CCD Camera Controller Design’’. Conference Proceedings of RAST 2005: Recent Advances in Space Technologies. IEEE conference publications 10.1109/RAST.2005.1512552.
- [14] K. MAMMERI. ‘‘Contribution Méthodologique au Prétraitement d’Images Satellitaire: Application Des Techniques d’Amélioration de Contraste’’. Thèse de Magister. USTO 2010.
- [15] Kodak KLI 10203 Technical data. Revision: 06, 12/5/01 document of Eastman Kodak Company from <http://www.kodak.com> (accès le 21/05/2011).
- [16] M. JUNG. ‘‘ Etude, réalisation et caractérisation d’une caméra CCD numérique rapide à mémoire intégrée et pilotable par lien SCSI’’. Thèse de Doctorat. L’Université du Louis Pasteur Strasbourg, 1998. 205p
- [17] G. HOLST, ‘‘CCD arrays, Cameras, and Displays’’. 2nd edition JCD Publishing. Mars 1996, 332p.
- [18] ‘‘KODAK Image Sensor Solutions, Revision’’. Version N° 2. September 30, 2002 document of Eastman Kodak Company from <http://www.kodak.com> (accès le 21/05/2011).
- [19] ‘‘Alsat pre-flight radiometric calibration’’, document interne CTS, 2003, 16p.
- [20] H. MATHIEU. ‘‘Physique des Semiconducteurs et Composants Electroniques’’. Edition Masson, 1996. 580p.
- [21] S. D. CHEN and A. RAMLI, ‘‘Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement’’ IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 49, no.4, pp. 1310–19, 2003.
- [22] A.M. ESKICIOGLU and P.S. FISHER. ‘‘Image quality measures and their performance’’. IEEE Transactions on Communications, 43(12) :2959–2965, Dec 1995.

[23] S.MACKIN. *Post-launch Calibration of the UK-DMC Satellite Sensor*. Document du laboratoire de calibration (DMC International Imaging) from [www.dmc.org](http://www.dmc.org). Surrey Space Centre University of Surrey Guildford Surrey. Version 1.3. Réf : 0115052-01, WMEA Project. 18 June 2008.

# Annexes

**Annexe A:** *les listes des images et leur information, prises durant la période allant du 30 mai 2004 jusqu'au 28 octobre 2006.*

**Annexe B:** *Les réponses radiométriques des caméras 2, 3, 4 et 5 pour des cibles noires*

**Annexe C:** *les réponses radiométrique des pixels cachés (noires)*

# Annexe A

## Les images de Test et les informations de prise de vue

Image	Target	Stat	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Exposure Time (µs)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)
DA0001d3pm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	30/05/2004	11:11:25	30,12	-30,18	320	0	50	144,54
DA0001d3sm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	30/05/2004	11:11:25	30,12	-30,18	320	0	50	144,54
DA0001d5pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	31/05/2004	10:11:15	26,66	-14,77	320	0	50	-227,61
DA0001d7pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	01/06/2004	10:48:35	29,06	-24,13	320	0	50	-4,73
DA0001d8pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	02/06/2004	03:20:32	7,37	82,06	320	0	50	-83,27
DA0001d9sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	02/06/2004	11:26:00	31,29	-33,77	320	0	50	242,89
DA0001dapm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	03/06/2004	10:25:47	27,9	-18,18	320	?	?	-144,94
DA0001dbsm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	04/06/2004	02:57:43	7,47	87,46	320	?	?	61,64
DA0001dcsm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	04/06/2004	11:03:09	30,23	-27,64	320	?	?	89,29
DA0001ddpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	05/06/2004	03:35:04	7,87	78,8	320	?	?	-169,62
DA0001depm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	05/06/2004	10:03:00	26,68	-12,32	320	?	?	-273,09
DA0001e0pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	06/06/2004	10:40:19	29,07	-21,63	320	0	50	-57,37
DA0001e2sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	07/06/2004	11:17:43	31,32	-31,21	320	0	50	186,21
DA0001e3sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	09/06/2004	10:54:52	30,16	-25,12	320	?	?	34,61
DA0001e4sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	10/06/2004	11:32:18	32,32	-34,83	?	7500	?	285,09
DA0001e5pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	11/06/2004	10:32:03	28,91	-19,16	?	1875	?	-108,63
DA0001e6sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	12/06/2004	11:09:26	31,17	-28,68	?	2750	?	129,89
DA0001e7pm	Greenland, test site	D	2500 ?	<b>2500 ?</b>	13/06/2004	10:09:16	27,58	-13,29	320 ?	6250	?	-240,24
DA0001e8pm	Greenland, test site	D	2500 ?	<b>2500 ?</b>	14/06/2004	10:46:35	29,91	-22,64	320 ?	0	?	-19,14
DA0001easm	Greenland, test site	D	2500 ?	<b>2500 ?</b>	15/06/2004	11:24:00	32,08	-32,28	320 ?	5843	?	227
DA0001ebpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	16/06/2004	10:23:47	28,57	-16,73	320 ?	0	?	-158,24
DA0001ecpm	Greenland, test site	D	10000	<b>500</b>	17/06/2004	11:01:08	30,83	-26,19	320	0	50	74,44

Image	Target	Stat	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Exposure Time (µs)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)
DA0001ecsm	Greenland, test site	D	10000	<b>500</b>	17/06/2004	11:01:08	30,83	-26,19	320	0	50	74,44
DA0001edpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	18/06/2004	10:01:00	27,16	-10,92	320 ?	?	?	-284,81
DA0001eepm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	19/06/2004	10:38:19	29,49	-20,22	320 ?	?	?	-71,3
DA0001f0sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	20/06/2004	11:15:42	31,67	-29,79	320 ?	?	?	170,68
DA0001f1pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	21/06/2004	10:15:31	28,06	-14,36	320	2500	?	-205,57
DA0001f2sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	22/06/2004	10:52:51	30,32	-23,76	320	?	?	19,94
DA0001f4sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	23/06/2004	11:30:16	32,42	-33,45	320	5000	?	268,88
DA0001f5pm	Greenland, test site	Error	2500	<b>2500</b>	24/06/2004	10:30:02	28,88	-17,86	320	0	?	-121,89
DA0001f7sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	25/06/2004	11:07:24	31,07	-27,37	320	0	?	114,35
DA0001f8sm	Greenland, test site	Error	2500	<b>2500</b>	26/06/2004	10:07:14	27,37	-12,06	320	4000	?	-251,65
DA0001f9pm	Greenland, test site	Error	2500	<b>2500</b>	27/06/2004	10:44:33	29,63	-21,41	320	0	?	-33,37
DA0001fasm	Greenland, test site	Error	2500	<b>2500</b>	28/06/2004	11:21:57	31,74	-31,04	320	4000	?	211,1
DA0001fbpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	29/06/2004	10:21:44	28,11	-15,57	320	2500	?	-170,78
DA0001fcsm	Greenland, test site	D	2500	<b>1250</b>	30/06/2004	02:53:41	8,15	89,65	512	?	?	89,88
DA0001fepm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	30/06/2004	10:59:05	30,3	-25,03	320	?	?	59,07
DA0001fesm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	30/06/2004	10:59:05	30,3	-25,03	320	?	?	59,07
DA0001ffpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	01/07/2004	09:58:58	26,53	-9,85	320	5000	?	-295,19
DA000200pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	02/07/2004	10:36:16	28,78	-19,15	320	0	?	-84,95
DA000202sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	03/07/2004	11:13:38	30,89	-28,71	320	2500	?	154,26
DA000203sm	RRV test site	D	5000	<b>5000</b>	03/07/2004	17:37:19	58,17	-19,83	606,2	5000	?	222,4
DA000204pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	04/07/2004	10:13:27	27,18	-13,38	320	5000	?	-217,57
DA000205sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	05/07/2004	10:50:47	29,37	-22,78	320	0	?	4,95
DA000206pm	RRV test site	D	5000	<b>5000</b>	05/07/2004	17:14:29	53,73	-14,5	644	5000	?	-295,12
DA000207sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	06/07/2004	11:28:12	31,4	-32,46	320	6000	?	251,29
DA000208pm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	07/07/2004	10:27:58	27,76	-16,98	320	0	?	-134,69
DA000208sm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	07/07/2004	10:27:58	27,76	-16,98	320	0	?	-134,69
DA000209sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	08/07/2004	11:05:19	29,88	-26,49	320	1250	?	98,37
DA00020asm	RRV test site	D	5000	<b>5000</b>	08/07/2004	17:29:00	56,17	-18,26	622	0	?	31,34

Image	Target	Stat	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Exposure Time (µs)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)
DA00020bpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	09/07/2004	10:05:10	26,09	-11,29	320	6000	?	-262,17
DA00020cpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	10/07/2004	10:42:28	28,27	-20,64	320	0	?	-47,47
DA00020esm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	11/07/2004	11:19:52	30,31	-30,26	320	4500	?	194,02
DA00020fpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	12/07/2004	10:19:40	26,59	-14,91	320	4000	?	-182,62
DA000210sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	13/07/2004	10:57:00	28,71	-24,37	320	0	?	43,69
DA000211pm	RRV test site	D	5000	<b>5000</b>	13/07/2004	17:20:42	54,1	-17,05	640	2500	?	-158,44
DA000212sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	14/07/2004	11:34:26	30,66	-34,1	320	6500	?	291,34
DA000214pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	15/07/2004	10:34:11	27,03	-18,61	320	1250	?	-98,26
DA000215sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	16/07/2004	11:11:33	29,07	-28,17	320	2500	?	137,73
DA000216sm	RRV test site	D	5000	<b>5000</b>	16/07/2004	17:35:13	56,44	-21,25	620	2500	?	168,87
DA000217pm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	17/07/2004	10:11:23	25,28	-12,96	320	0	?	-228,63
DA000217sm	Greenland, test site	D	10000	<b>2500</b>	17/07/2004	10:11:23	25,28	-12,96	320	0	?	-228,63
DA000218pm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	18/07/2004	10:48:42	27,397	-22,36	320	?	?	-9,68
DA000219pm	Greenland, test site	L	2500 ?	<b>2500 ?</b>	19/07/2004	11:26:06	29,36	-32,035	320	5000	?	233,79
DA00021csm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	20/07/2004	10:25:52	25,64	-16,68	320	2500	?	-147,37
DA00021bpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	21/07/2004	11:03:13	27,69	-26,19	?	1200	?	82,49
DA00021epm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	22/07/2004	10:03:05	23,83	-11,11	?	6500	?	-272,6
DA00021fpm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	23/07/2004	10:40:23	25,948	-20,48	?	500	?	-61,43
DA000220sm	Greenland, test site	D	2500	<b>2500</b>	24/07/2004	11:17:46	27,92	-30,08	?	3900	?	177,19
DA000222pm	Greenland, test site	D	2500 ?	<b>2500 ?</b>	25/07/2004	10:17:34	24,13	-14,87	?	4000	?	-194,63
DA000222sm	Greenland, site	D ??	2500 ?	<b>2500 ?</b>	25/07/2004 ?	10:17:34 ?	24,13 ?	-14,87	??	4000 ?	?	-194,63
DA000223sm	Greenland, Tet site	D	2500 ?	<b>2500 ?</b>	26/07/2004	10:54:54	26,186	-24,33	?	?	?	28,38
DA000225sm	Greenland,	D	2500	<b>2500</b>	27/07/2004	11:32:19	28,07	-34,04		6500		273,58
DA000226sm	Greenland,	D	2500	<b>2500</b>	01/08/2004	11:23:49	26,45	-32,23		6000		216,66
DA000227pm	Greenland,	D	2500	<b>2500</b>	04/08/2004	10:00:54	20,76	-11,56		6500		-284,18
DA000228pm	Greenland,	D	2500	<b>2500</b>	05/08/2004	10:38:11	22,81	-20,94		1000		-75,89
DA00022apm	Greenland,	D	2500	<b>2500</b>	06/08/2004	11:15:33	24,72	-30,53		3500		160,7
DA00022bpm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	07/08/2004	10:15:21	20,89	-15,45				-207,6752

Image	Target	Stat	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Exposure Time (µs)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)
DA00022bsm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	07/08/2004	10:15:21	20,89	-15,45				-207,6752
DA00025cpm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	23/11/2004	07:59:54			2000	0	50	
DA000264pm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	12/12/2004	05:12:15			2048	0	50	
DA000264sm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	12/12/2004	05:12:15			2048	0	50	
DA000266pm	Pacific @ Night, Test	D	10000	<b>2500</b>	15/12/2004	05:26:24			2048			
DA000266sm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	15/12/2004	05:26:24			2048			
DA00026apm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	20/12/2004	05:17:45			2048			
DA00026asm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	20/12/2004	05:17:45			2048			
DA00026bpm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	20/12/2004	12:07:24	14,91	-143,4	320	0	50	-19,54
DA00026cpm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	23/12/2004	05:32:00			2048			
DA00026csm	Pacific @ Night,	D	10000	<b>2500</b>	23/12/2004	05:32:00			2048			
DA000270pm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	27/12/2004	11:35:41	16,69	-151,58	320	0	50	169,12
DA000270sm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	27/12/2004	11:35:41	16,69	-151,58	320	0	50	169,12
DA000277pm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	03/01/2005	04:36:08	37,65	99,085	320			88,66
DA000277sm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	03/01/2005	04:36:08	37,65	99,085	320			88,66
DA00027epm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	10/01/2005	12:09:43	13,81	-145,5	320	0	50	-32,63
DA00027esm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	10/01/2005	12:09:43	13,81	-145,5	320	0	50	-32,63
DA000286pm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	17/01/2005	11:37:56	14,53	-153,81	320	0	50	156,01
DA000286sm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	17/01/2005	11:37:56	14,53	-153,81	320	0	50	156,01
DA000299pm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	26/01/2005	12:20:40	10,29	-144,87	320	0	50	-100,47
DA000299sm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	26/01/2005	12:20:40	10,29	-144,87	320	0	50	-100,47
DA0002a2pm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	28/01/2005	11:57:37	11,07	-150,49	320	0	50	42,15
DA0002a2sm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	28/01/2005	11:57:37	11,07	-150,49	320	0	50	42,15
DA0002abpm	Antarctica,	D	10000	<b>2500</b>	31/01/2005	04:06:31	32,35	87,9	320	0	50	-93,67
DA0002absm	Antarctica,	D	10000	<b>2500</b>	31/01/2005	04:06:31	32,35	87,9	320	0	50	-93,67
DA0002aepm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	31/01/2005	12:11:51	9,5	-147,46	320	0	50	-44,84
DA0002aesm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	31/01/2005	12:11:51	9,5	-147,46	320	0	50	-44,84

Image	Target	Stat	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Exposure Time (µs)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)
DA0002b7pm	Antarctica	D	10000	<b>2500</b>	03/02/2005	04:20:45	31,49	91,81	320	0	50	-4,88
DA0002b7sm	Antarctica	D	10000	<b>2500</b>	03/02/2005	04:20:45	31,49	91,81	320	0	50	-4,88
DA0002e0pm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	05/06/2005	10:54:03	30,24	-27,3	320	0	50	57,32
DA0002e0sm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	05/06/2005	10:54:03	30,24	-27,3	320	0	50	57,32
DA0002e3pm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	07/06/2005	10:30:55	29,05	-21,21	320	0	50	-88,93
DA0002e3sm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	07/06/2005	10:30:55	29,05	-21,21	320	0	50	-88,93
DA0002e7pm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	12/06/2005	10:21:52	28,81	-18,55	320	0	50	-142,8
DA0002e7sm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	12/06/2005	10:21:52	28,81	-18,55	320	0	50	-142,8
DA0002e9pm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	13/06/2005	10:59:04	31,07	-28,01	320	0	50	89,82
DA0002e9sm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	13/06/2005	10:59:04	31,07	-28,01	320	0	50	89,82
DA0002efpm	Pacific Ocean (	D	10000	<b>2500</b>	19/06/2005	05:27:20			2048	0	51	
DA0002efsm	Pacific Ocean	D	10000	<b>2500</b>	19/06/2005	05:27:20			2048	0	51	
DA0002f1sm	Greenland,	L	10000	<b>2500</b>	20/06/2005	10:26:50	29,27	-19,29	320	0	50	-112,44
DA0002f4pm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	23/06/2005	10:40:54	30,07	-22,71	320	0	50	-26,79
DA0002f4sm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	23/06/2005	10:40:54	30,07	-22,71	320	0	50	-26,79
DA0002f5pm	Pacific Ocean (	D	10000	<b>2500</b>	24/06/2005	05:18:22			2048	0	50	
DA0002f5sm	Pacific Ocean	D	10000	<b>2500</b>	24/06/2005	05:18:22			2048	0	50	
DA0002fbpm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	04/07/2005	10:59:57	30,5	-27,22	320	0	50	94,69
DA0002fbsm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	04/07/2005	10:59:57	30,5	-27,22	320	0	50	94,69
DA000300pm	RRV Test site	L	7500	<b>5500</b>	25/07/2005	17:24:24	53,32	-20,69	550	0	50	-125,52
DA000303sm	RRV Test site	L	7500	<b>5500</b>	28/07/2005	17:38:27	55,42	-25,28	550	2500	50	188,12
DA000307pm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	07/08/2005	10:56:29	23,9	-27,78	320	0	50	72,84
DA000307sm	Greenland,	L	10000	<b>2500</b>	07/08/2005	10:56:29	23,9	-27,78	320	0	50	72,84
DA00030dpm	RRV Test site	D	7500	<b>5500</b>	15/08/2005	17:25:04	50,03	-28,21	550	0	50	-109,49
DA00030fpm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	22/08/2005	10:29:01	17,94	-22,79	320	0	50	-99,66
DA00030fsm	Greenland,	D	10000	<b>2500</b>	22/08/2005	10:29:01	17,94	-22,79	320	0	50	-99,66
DA000315pm	RRV Test site	D	7500	<b>5500</b>	28/08/2005	17:20:46	46,7	-32,46	550	2500	50	-205,5
DA000334pm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	08/11/2005	04:23:55	31,33	101,14	320	0	50	23,71

Image	Target	Stat	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Exposure Time (µs)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)
DA000334sm	Antarctica, Test	D	10000	<b>2500</b>	08/11/2005	04:23:55	31,33	101,14	320	0	50	23,71
DA000336pm	Pacific Ocean (	L	10000	<b>2500</b>	08/11/2005	17:47:58			2048	0	50	
DA000336sm	Pacific Ocean	L	10000	<b>2500</b>	08/11/2005	17:47:58			2048	0	50	
DA00036epm	Chilbolton, Test	D	5000	<b>5000</b>	16/06/2006	09:29:55	49	0	795	0	50	-76,54
DA000370sm	Chilbolton, Test	D	5000	<b>5000</b>	19/06/2006	09:43:42	50,85	0	774	2500	50	169,71
DA000397sm	RRV, NV, USA 2006	L	5000	<b>5000</b>	21/09/2006	17:28:08	42,03	0	650	0	50	107,61
DA000399pm	RRV, NV, USA 2006	L	5000	<b>5000</b>	26/09/2006	17:18:29	39,31	0	700	0	50	-108,19
DA0003a6pm	Antarctica (radion-calib)	D	10000	<b>2500</b>	21/10/2006	04:28:20	25,34	0	320	0	50	96,66
DA0003a6pm	Antarctica (radion-calib)	D	10000	<b>2500</b>	21/10/2006	04:28:20	25,34	0	320	0	50	96,66
DA0003aapm	Antarctica (radion-calib)	D	10000	<b>2500</b>	28/10/2006	04:32:22	28,03	0	320	0	50	121,49
DA0003aasm	Antarctica (radion-calib)	D	10000	<b>2500</b>	28/10/2006	04:32:22	28,03	0	320	0	50	121,49

## Liste des images sélectionnées

<i>Greenland</i>															
Image	Target	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)	Taille	Observation	Coordinates (latitude, longitude)		Exposure Time
<b>Starboard Camera</b>															
DA000208sm	Greenland, test site	10000	2500	07/07/2004	10:27:58	27,76	-16,98	0	50%	-134,69	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Nuageuse (75%)	75,	-40	320µs
DA0002e7sm	Greenland, Rad-Cal	10000	2500	12/06/2005	10:21:52	28,81	-18,55	0	50%	-142,8	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Clair	75,	-40	320µs
<b>Port Camera</b>															
DA000208pm	Greenland, test site	10000	2500	07/07/2004	10:27:58	27,76	-16,98	0	0,5	-134,69	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Nuageuse (50%)	75,	-40	320µs
DA0002e7pm	Greenland, Rad-Cal	10000	2500	12/06/2005	10:21:52	28,81	-18,55	0	50%	-142,8	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Clair	75,	-40	
DA0001dapm	Greenland, test site	2500	2500	03/06/2004	10:25:47	27,9	-18,18	0	50%	-144,94	3 x 5,9Mo = 17,9 Mo	Nuageuse	75,	-40	
DA0001ebpm	Greenland, test site	2500	2500	16/06/2004	10:23:47	28,57	-16,73	0	50%	-158,24	3 x 5,9Mo = 17,9 Mo	Clair	75,	-40	
DA00021bpm	Greenland, test site	2500	2500	20/07/2004	10:25:52	25,64	-16,68	2500	50%	-147,37	3 x 5,9Mo = 17,9 Mo	Nuageuse (50%) ???	75,	-40	
<b>Starboard Camera</b>															
DA0001f0sm	Greenland, test site	2500	2500	20/06/2004	11:15:42	31,67	-29,79	0	0,5	170,68	3 x 5,9Mo = 17,9 Mo	Nuageuse (%) ???	75,	-40	320µs
DA000215sm	Greenland, test site	2500	2500	16/07/2004	11:11:33	29,07	-28,17	2500	0,5	137,73	3 x 5,9Mo = 17,9 Mo	Nuageuse (%) ???	75,	-40	
DA000202sm	Greenland, test site	2500	2500	03/07/2004	11:13:38	30,89	-28,71	2500	0,5	154,26	3 x 5,9Mo = 17,9 Mo	Nuageuse (%) ???	75,	-40	

<i><b>Pacific Ocean</b></i>											
Image	Target	Colones	Line	Date	Time	Centre offset	Start offset (%)	Taille	Observation	Coordinates (latitude, longitude)	Exposure Time
<b>Starboard Camera</b>											
DA000264sm	Pacific @ Night, Test	10000	2500	12/12/2004	05:12:15	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
DA00026csm	Pacific @ Night, Test	10000	2500	23/12/2004	05:32:00	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
DA0002efsm	Pacific Ocean (Eclipse)	10000	2500	19/06/2005	05:27:20	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	? Introuvable	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
DA0002f5sm	Pacific Ocean (Eclipse)	10000	2500	24/06/2005	05:18:22	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
<b>Port Camera</b>											
DA000264pm	Pacific @ Night, Test	10000	2500	12/12/2004	05:12:15	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
DA00026cpm	Pacific @ Night, Test	10000	2500	23/12/2004	05:32:00	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
DA0002efpm	Pacific Ocean (Eclipse)	10000	2500	19/06/2005	05:27:20	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	? Introuvable	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S
DA0002f5pm	Pacific Ocean (Eclipse)	10000	2500	24/06/2005	05:18:22	0	50%	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-7.79, -147.99	2048 $\mu$ S

*Antarctica*

Image	Target	Colones	Line	Date	Time	Solar Angle (°)	Azimuth Angle (°)	Centre offset	Start offset (%)	X-Track (km)	Taille	Observation	Coordinates (latitude, longitude)	Exposure Time
<b>Starboard Camera</b>														
DA000286sm	Antarctica, Test	10000	2500	17/01/2005	11:37:56	14,53	-153,81	0	50%	156,01	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	nuageuse (30%) - exploitable	-75, 120	320µs
DA000270sm	Antarctica, Test	10000	2500	27/12/2004	11:35:41	16,69	-151,58	0	50%	169,12	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	surexposé - exploitable	-75, 120	320µs
<b>Port Camera</b>														
DA000286pm	Antarctica, Test	10000	2500	17/01/2005	11:37:56	14,53	-153,81	0	50%	156,01	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	Good	-75, 120	320µs
DA000270pm	Antarctica, Test	10000	2500	27/12/2004	11:35:41	16,69	-151,58	0	50%	169,12	3 x 24,5Mo = 71,5 Mo	surexposé - exploitable	-75, 120	320µs

# Annexe B

Les réponses radiométriques des caméras 2, 3, 4 et 5 pour des cibles noires

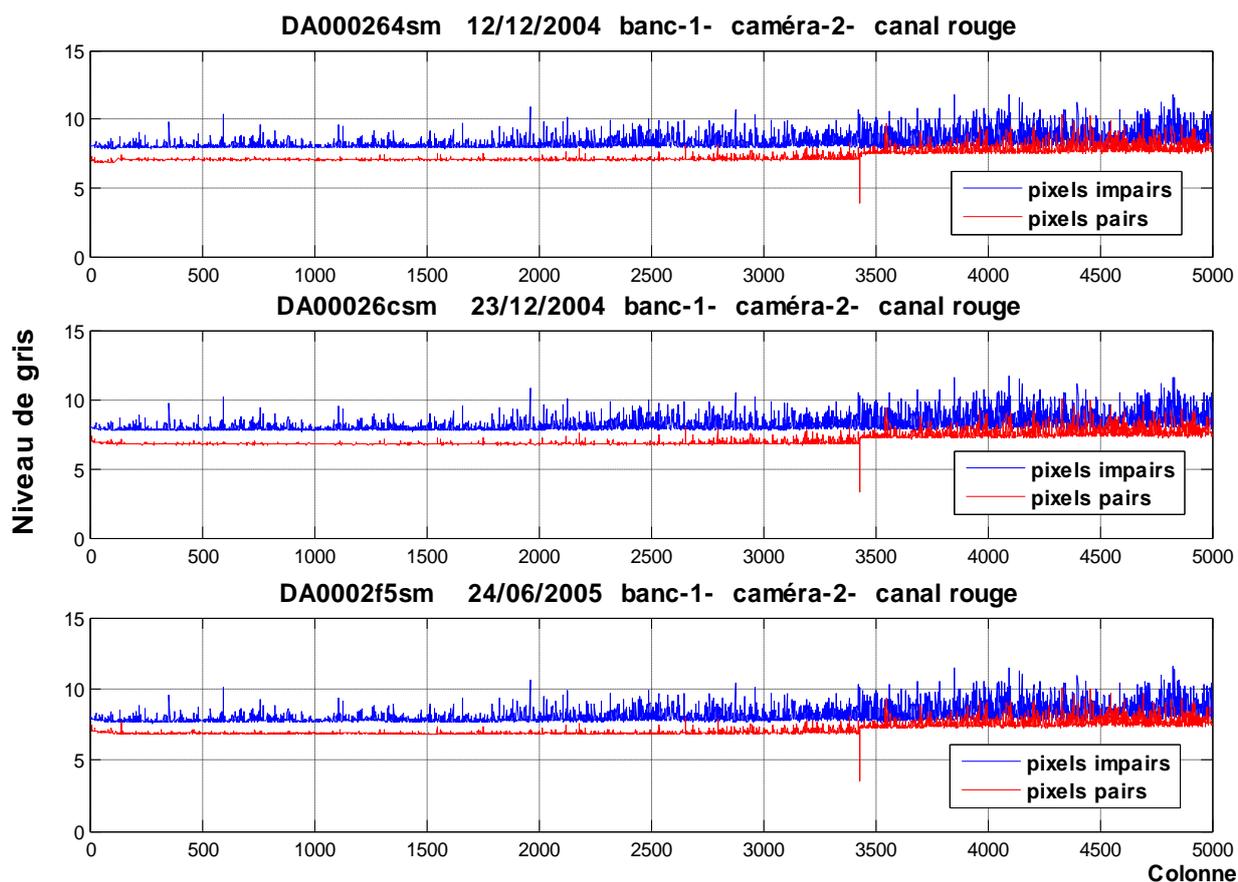


Figure : Réponses radiométriques moyennes de la caméra-2 pour les images DA000264sm, DA00026csm et DA0002f5sm.

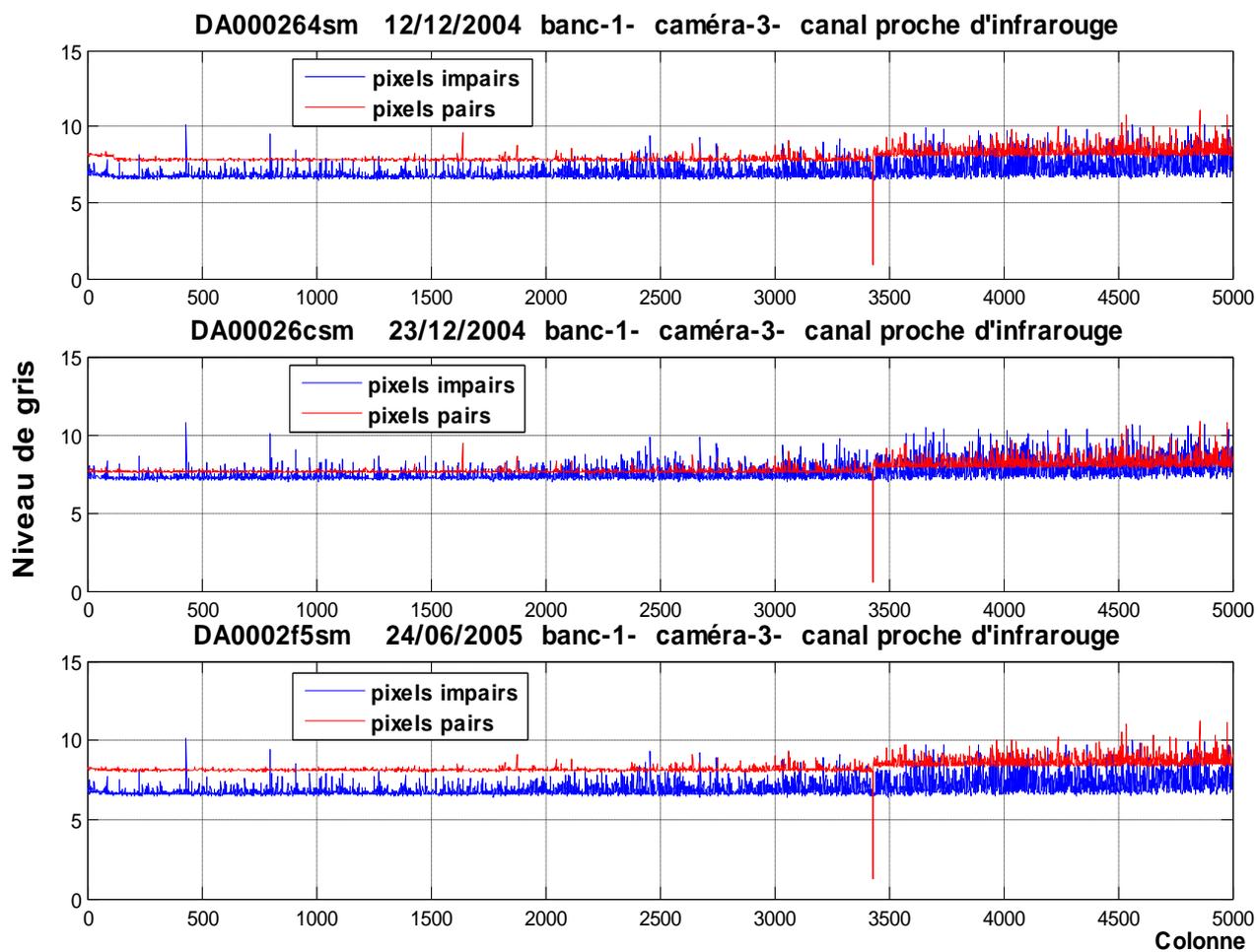


Figure : Réponses radiométriques moyennes de la caméra-3 pour les images DA000264sm, DA00026csm et DA0002f5sm.

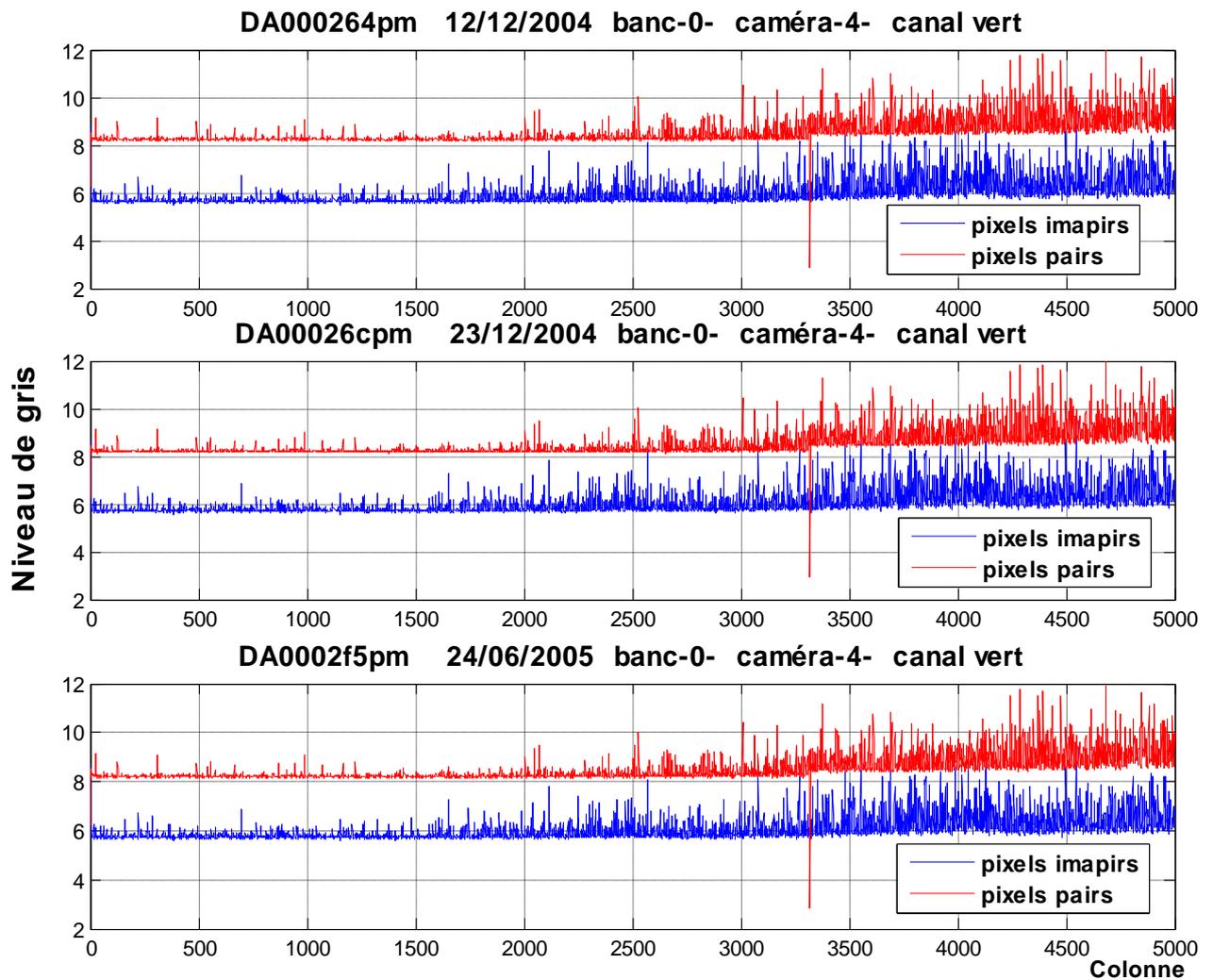


Figure : Réponses radiométriques moyennes de la caméra-4 pour les images DA000264pm, DA00026cpm et DA0002f5pm.

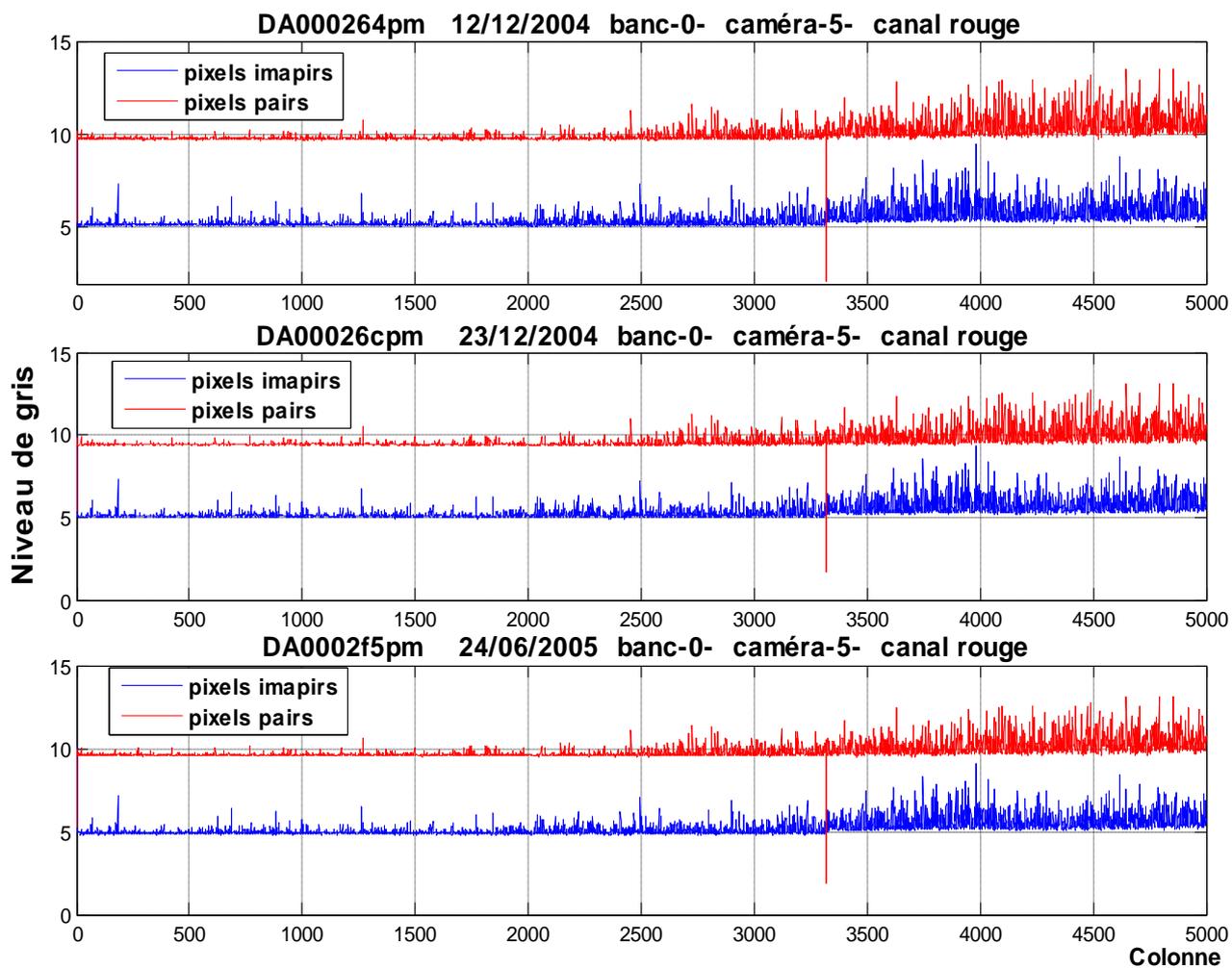


Figure : Réponses radiométriques moyennes de la caméra-5 pour les images DA000264pm, DA00026cpm et DA0002f5pm.

# Annexe C

## Les réponses radiométriques des pixels cachés (noires)

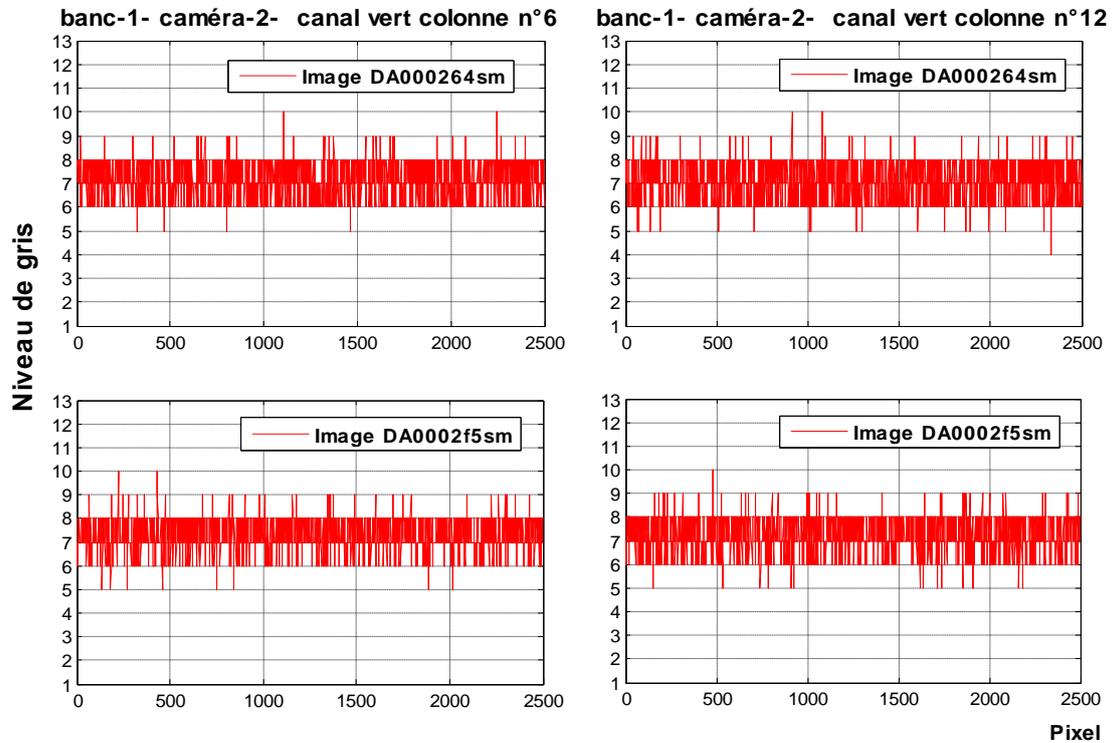


Figure : Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 de la caméra 2.

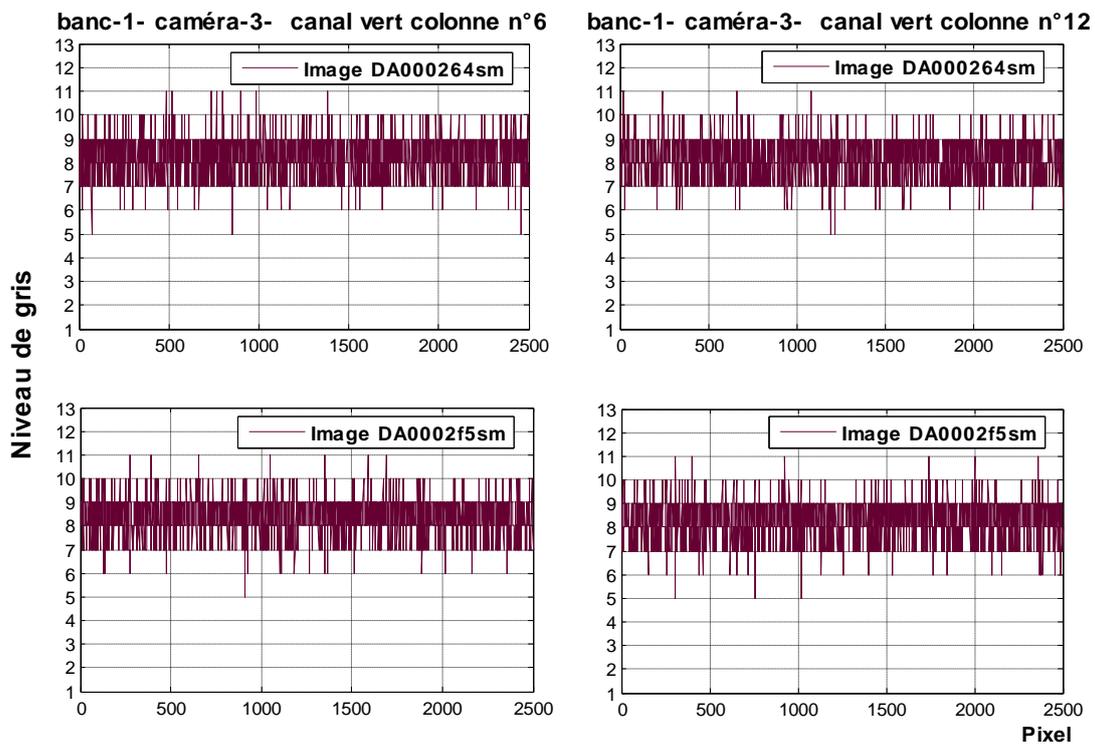


Figure : Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 de la caméra 3.

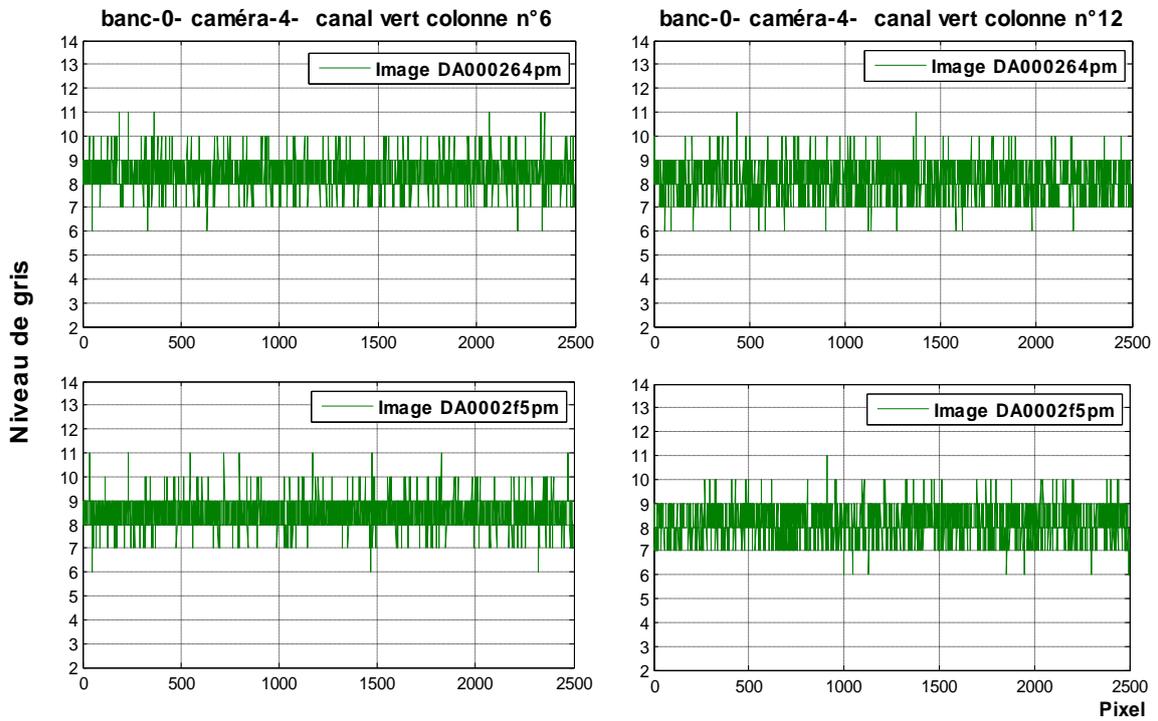


Figure : Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 de la caméra 4.

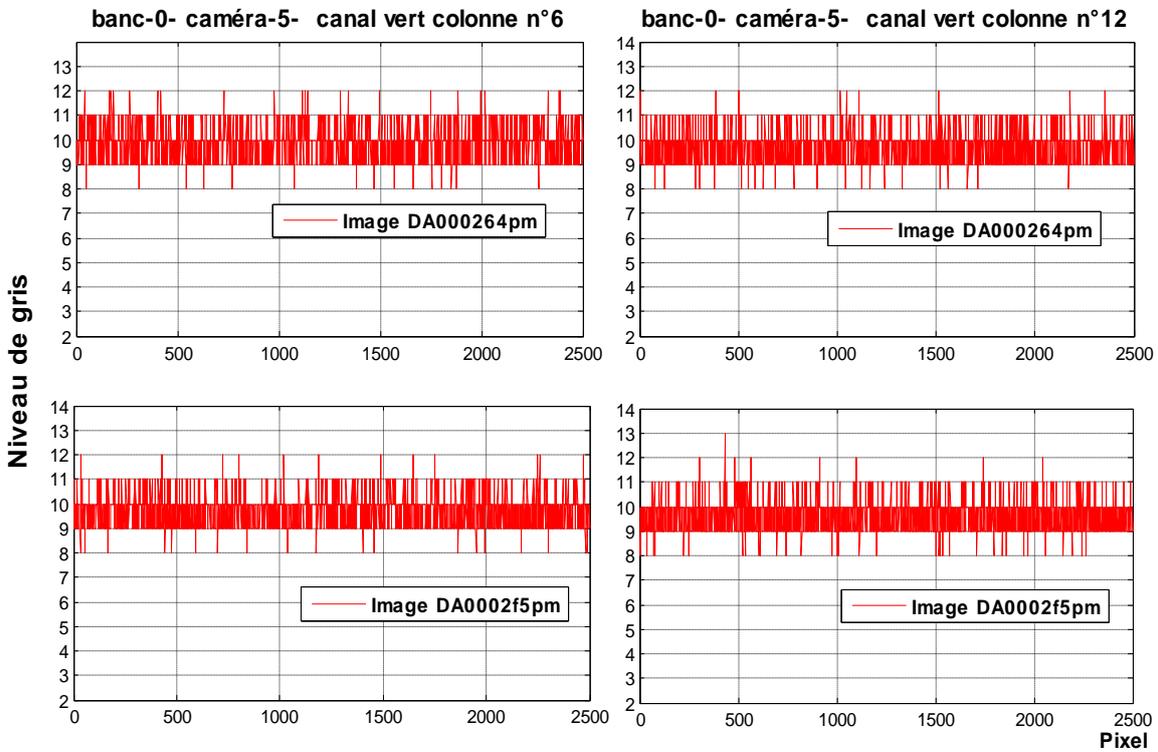


Figure : Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 de la caméra 5.

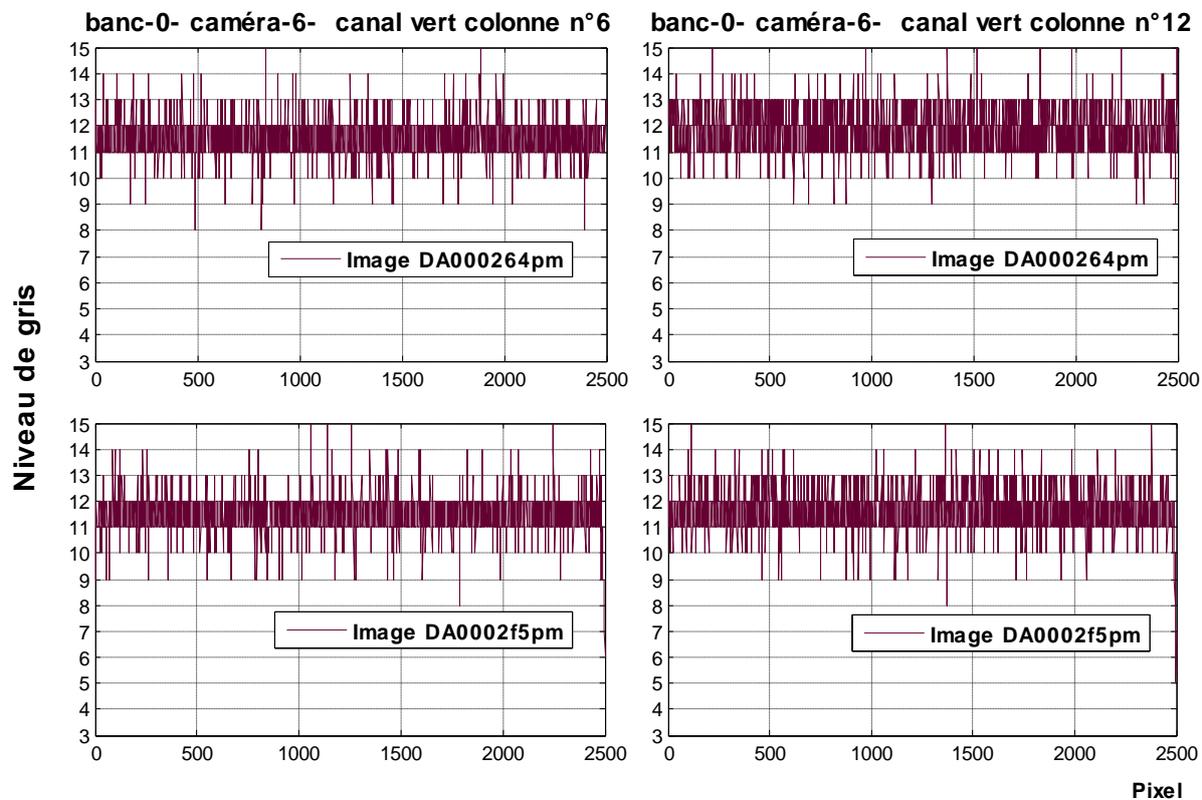


Figure : Réponses radiométriques des photosites cachés n° 6 et 12 de la caméra 6.