



UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES

FACULTE DE TECHNOLOGIE

# Thèse

Présentée par

**BENBOUZID AYHANE BEY**

Pour obtenir le titre de Docteur en Sciences en Electronique  
Option : Traitement des images et du signal

## Blind deconvolution for noise reduction in satellite imaging

Soutenue le: 05 / 10 / 2015  
devant le jury composé de :

M. BOUNOUA Abdenacer	Pr., UDL, Sidi Bel Abbès	Président
M. TALEB Nasreddine	Pr., UDL, Sidi Bel Abbès	Directeur de Thèse
M. BENTOUTOU Youcef	Dir. Rech., CDS, Oran	Examineur
M. SI MOHAMMED Med Arezki	Dir. Rech., CDS, Oran	Examineur
M. BESSAID Abdelhafid	Pr., Université de Tlemcen	Examineur
M. CHIKR EL MEZOUAR Miloud	MCA, UDL, Sidi Bel Abbès	Examineur

## ملخص:

بسبب الاهتزازات الناجمة عن عملية الإطلاق وبسبب البيئة الفضائية الصعبة قد تختلف جودة الاقمار الصناعية البصرية بين القياسات الأرضية وتلك التي تجرى على المدار مما يتطلب تقييم و مراقبة مستمرة للصور التي تصل الى الأرض للتخفيف من اثار التشويش و إزالة العيوب من على الصور و تحسين إمكانية معالجتها، توضع دالة انتشار النقطة من اجل تقييم فعالية نظام التصوير وكذلك لإنتاج برمجة لتصحيح الصور عن طريق إزالة الالتفاف. في هذا العمل نركز على تكيف و تطبيق طريقة لتقدير الإجابة الإشارية للأقمار الصناعية البصرية فالمدار دون أي معرفة سابقة لمميزات النظام و عوامله، لذلك الهدف استعملنا في هذه الأطروحة التفاصيل الطبيعية الكامنة في الصور كحواف الانتقال لتقدير الاستجابة النبضية من خلال تقييم دالة نقل التعديل للصور، النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة وواحدة هذا الأسلوب يسمح لنا باستعمال المعلومات الكامنة في الصورة دون علم مسبق عن الاداة او القمر الصناعي الذي سجل الصورة. طبقنا هذه الطريقة لتقدير دالة نقل التعديل على صور اقمار صناعية بصرية عالية الدقة، في هذه العملية منحنيات دالة نقل التعديل استنتجت عن طريق تحويل فوريي لدالة انتشار الخط التي هي في حد ذاتها مستمدة من دالة انتشار الحافة، من ناحية ثانية استخلصنا ان جودة دالة انتشار الحافة لها تأثير كبير على عملية اعادة بناء دالة نقل التعديل، قمنا بتطوير و تنفيذ خوارزمية تركز على عدة خطوات حسابية لتقدير دالة نقل التعديل لصور عالية الدقة بحيث تكون الطريقة قيد البحث قابلة لإعادة وممانعة للضوضاء

**الكلمات الرئيسية :** التشويش ،قمر صناعي،إزالة التفاف اعمى،دالة نقل التعديل ، دالة تمديد النقطة

### **Résumé :**

En raison des vibrations dues au lancement et à cause de environnement spatial hostile, les systèmes satellitaires d'imagerie optique à haute résolution nécessitent une évaluation et un contrôle continu de la qualité des images délivrées au sol. Ces performances peuvent varier entre les mesure au sol, le lancement et durant l'exploitation du satellite en orbite.

Afin d'atténuer les effets du bruit, supprimer les artefacts et améliorer l'interprétabilité des images satellitaire la fonction d'étalement de point PSF du système d'imagerie est estimée en vue de produire des outils de restauration des images à travers notamment la déconvolution. L'usage de la fonction de transfert de modulation est répandue en raison de la facilité de son implémentation.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'adaptation et l'application d'une méthode univariante et sans référence d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un satellite optique en orbite

Nous utilisons les détails naturels contenus dans les images en tant que bords de transitions pour estimer la réponse impulsionnelle par l'évaluation de la MTF des images. Les résultats obtenus sont encourageants et prometteurs.

Cette méthode nous permet d'exploiter les informations contenues dans l'image, sans connaissance préalable de l'instrument ou le satellite qui a enregistré l'image. Nous avons appliqué cette méthode pour estimer la MTF d'un satellite haute résolution optique. Dans ce procédé, le profil de la MTF résulte de la transformée de Fourier de la fonction d'étalement de ligne LSF, qui est lui-même dérivé de la fonction d'étalement de bord ESF.

La qualité de la ESF impact grandement la reconstruction de la MTF. Nous avons mis en œuvre un algorithme articulé sur plusieurs étapes de calcul pour estimer la MTF d'une image haute résolution de manière à être reproductible et robuste au bruit.

**Mots clefs :** bruit, satellite, deconvolution aveugle, FTM, réponse impulsionnelle

**Abstract:**

Due to launching vibrations and space harsh environment, high resolution remote sensing satellite imaging systems require permanent assessment and control of image quality, which may vary between ground pre-launch measurements, after launch and over satellite lifetime. In order to mitigate noise, remove artifacts and enhance image interpretability, the Point Spread Function PSF of the imaging system is estimated. Image deconvolution can be performed across the characterization of the actual Modulation Transfer Function MTF of the imaging system. In this work we focus on adapting and applying a no reference method to characterize in orbit high resolution satellite images in terms of geometrical performance. Moreover, we use natural details contained in images as edges transitions to estimate the impulse response via the assessment of the MTF image. The obtained results are encouraging and promising.

This method allows us to exploit the information contained in the image without prior knowledge of the instrument or the satellite which recorded the image. We applied this method to estimate MTF of an optical high resolution satellite. In this method, the MTF profile results from the Fourier transform of LSF, which is itself derived from ESF. The quality of the ESF estimation impacts mainly the MTF rebuilding. We have implemented an algorithm through several stages of calculations to estimate MTF of an image in such a way to be reproducible and robust to noise.

**Key words:** noise, satellite, blind deconvolution, MTF, PSF

## **Remerciement**

*Tout d'abord je voudrais remercier infiniment le Professeur Nasreddine TALEB d'avoir accepté de m'encadrer et me diriger tout au long de ces longues années de thèse, plus particulièrement pour le support continu qu'il m'a apporté pour l'accomplissement de ce travail. Je le remercie pour sa rigueur, sa méthodologie, ses commentaires enrichissant qui m'ont beaucoup appris.*

*Je tiens à remercier également le président du Jury et les honorables membres du Jury d'avoir accepté de relire ce travail et de prendre part à son évaluation et enrichissement. Je remercie enfin, mes deux familles la petite et la grande de m'avoir soutenu et supporté durant ces années même dans les moments de doute, de fatigue et d'absence et plus particulièrement ma mère qui m'a tout donné. Je remercie également mes collègues, copain et amis du CTS, du CDS et de l'ASAL pour leur contact enrichissant et leur professionnalisme. Enfin je salue particulièrement l'équipe projet Alsat-1B et leur souhaite une bonne continuation dans ce que nous faisons de bien. Une mention particulière s'adresse enfin à ma femme pour ses encouragements et aussi à mes enfants pour cette longue période d'absence.*

## Introduction générale

A bord d'un satellite d'observation de la Terre, l'image enregistrée de la scène observée est le résultat d'un processus complexe. La lumière provenant de la scène observée traverse d'abord l'atmosphère où elle subit les effets de la turbulence, puis le système optique où agissent principalement la diffraction et les aberrations. L'image qui se forme ainsi au niveau du capteur est floue. Il est alors délicat de remonter à la scène originale n'ayant que l'image enregistrée elle-même comme entrée du problème. Le problème de la déconvolution de l'image est alors posé.

L'industrie et la technologie spatiale de part leurs spécificités ne peuvent se permettre de se satisfaire de résultats approximatifs et grossiers en termes d'estimation de la qualité des images des plates-formes en orbite. C'est ainsi que le besoin de nouvelles approches fiables qui tiennent en compte la spécificité des données en question est devenu pressant.

La déconvolution des images satellitaires en présence de bruit quand seulement l'image enregistrée est disponible quand le modèle de dégradation est inconnu est assimilée à un problème de déconvolution aveugle. Le problème consiste à calculer en même temps une approximation de l'image réelle et le modèle de dégradation ou la réponse impulsionnelle du système imageur ainsi que les paramètres de bruit. Un grand nombre d'inconnus et une multitude de solutions possibles combinés à une instabilité des solutions rendent le problème particulièrement complexe. Ceci représente un problème inverse doublement posé en regards du cadre de la déconvolution traditionnelle. La déconvolution aveugle est assimilée à une estimation univariante et sans référence du noyau de convolution.

D'un point de vue purement pratique, la connaissance de la réponse impulsionnelle d'une charge utile optique permet une estimation de la qualité optique et par conséquent les des dégradations des images et facilite ainsi l'élaboration des solutions de restauration.

Le développement des outils d'évaluation systématique de la réponse impulsionnelle et de restauration dans une deuxième phase devient primordial quand le nombre d'images considéré est important comme dans le cas de systèmes satellitaires qui fournissent plusieurs Giga octets d'images par jour.

D'une part l'opération de lancement du satellite peut causer des déplacements mécaniques dans le système optique de la camera suite aux vibrations dues au lanceur ce qui peut induire une défocalisation et une modification des paramètres opto-mécaniques de la charge utile. En bout de course les images produites par la camera une fois en orbite peuvent souffrir de problèmes de flou.

D'autre part l'environnement spatial, en orbite, particulièrement hostile dans lequel le satellite évolue peut produire des perturbations qui affectent le système optique. C'est ainsi que les approches les plus viables d'estimation de la réponse impulsionnelle doivent tenir en compte qu'il n'est plus possible d'intervenir physiquement et directement sur la camera du satellite après son lancement et sa mise en orbite.

L'estimation de la réponse impulsionnelle d'un système imageur représente une importante approche pour évaluer la qualité des images d'un système satellitaire d'observation de la Terre. La réponse impulsionnelle est principalement utilisée pour quantifier la capacité du système imageur de distinguer les détails (fins) de la scène (image) enregistrée. La connaissance de la réponse impulsionnelle est essentielle pour des raisons pratiques de quantification de la défocalisation du système optique en orbite et contribuer ainsi à la réalisation de solutions de restauration basées sur la déconvolution.

L'objet de cette thèse traite de la problématique d'estimation univariante et sans à priori de la réponse impulsionnelle d'un système imageur optique satellitaire en vue de la réduction du bruit des images satellitaires. En se basant sur l'état de l'art disponible, nous avons réduit le problème à l'estimation univariante ou aveugle de la réponse impulsionnelle du système imageur réduite elle-même à l'estimation aveugle de son amplitude qui est la fonction de transfert de modulation MTF. La connaissance de la MTF permet d'estimer et de comparer les performances en vol de différents satellites et contribue grandement à l'élaboration de solutions de restauration des images acquises.

Les caractéristiques géométriques d'un système d'imagerie spatiale ne peuvent être exprimées par un numéro unique ou une simple interprétation. La Fonction de Transfert de Modulation (MTF) est une très bonne approche pour déterminer la qualité spatiale d'un système d'imagerie.

Notre document s'articule autour de cinq chapitres.

**Le premier chapitre** est une introduction aux chaînes d'acquisition d'images satellite. Nous y aborderons les définitions des notions nécessaires à la compréhension de ce qu'est l'acquisition d'images. Les caractéristiques des images satellite seront abordées ensuite. Enfin nous décrivons le principe de fonctionnement d'une chaîne d'acquisition d'image et les éléments constitutifs de cette chaîne.

**Le deuxième chapitre** présente les étapes de formation d'une image ; une partie est consacrée aux différents facteurs de dégradations subies par la scène originale dans le processus de formation d'image. Enfin ce chapitre aborde le modèle de dégradation des images satellitaires.

**Le troisième chapitre** porte sur les différentes méthodes d'estimation de la réponse impulsionnelle au sol et en vol des dispositifs d'acquisition des images. Après de brèves descriptions des différentes méthodes, leurs avantages et inconvénients sont ensuite passés en revue. Une partie est réservée à l'estimation au sol de la réponse impulsionnelle d'un système imageur embarqué sur satellite.

**Le quatrième chapitre** est consacré quant à lui à la méthode investiguée et implémentée en vue de l'estimation en vol de la réponse impulsionnelle en utilisant l'approche des réseaux de neurones

**Le cinquième chapitre** est consacré à la méthode développée et implémentée pour les fins d'estimation de la réponse impulsionnelle basée sur la méthode de bord, après une discussion de l'état de l'art de méthodes similaires. Les phases d'implémentation de cette méthode, ses résultats et les améliorations apportées sont notamment présentés et discutés en détails.

En conclusion générale, nous résumons notre contribution et tirerons les conclusions sur l'approche développée et basée sur la méthode de bord de plage sans omettre d'évoquer quelques améliorations éventuelles en perspectives de ce travail.



# Table des matières

## Table des matières

Liste des figures .....	8
Liste des Tableaux .....	10
Chapitre 1: Acquisition des images satellite.....	11
Introduction.....	12
1 Sources d'images.....	12
2 Les images satellite.....	13
3 Acquisition des images Satellite.....	14
4 L'image en tant que signal.....	15
5 Mode d'acquisition des images.....	16
5.1 Mode Push broom.....	16
5.2 Mode whisk broom .....	17
6 Modalités des Images.....	18
6.1 Image Panchromatique .....	18
6.2 Image multispectrale.....	19
6.3 La modalité Pan-Sharpning.....	20
7 Caractéristiques des images.....	21
7.1 Dynamique de l'image.....	21
7.2 Rapport Signal sur Bruit.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
7.3 GSD et Résolution.....	22
7.4 Fonction de transfert de modulation .....	23
8 Produit image .....	24
9 De la commande au Produit :.....	25
10 Chaîne d'acquisition d'image .....	26
10.1 Les capteurs.....	27
10.2 Le convertisseur analogique-numérique.....	29
Conclusion .....	30
Chapitre 2 : Dégradations de la chaîne d'acquisition des images.....	33
Introduction.....	34

1	Modèle d'observation .....	35
2	Dégradation de la chaîne d'acquisition des images .....	38
2.1	Types de dégradations .....	39
2.2	Dégradation due à l'acquisition.....	41
2.3	Dégradation due au capteur.....	41
2.4	Dégradation due à l'échantillonnage. ....	42
2.5	Dégradation due au CAN .....	42
2.6	Dégradation due à la nature de la scène.....	43
3	Modèle de Dégradation.....	43
	Conclusion .....	45
	Chapitre 3 : Estimation de la réponse impulsionnelle d'un système imageur .....	47
	Introduction.....	48
1	Fonction d'étalement de point.....	49
2	La réponse impulsionnelle d'un système imageur.....	49
2.1	Effet fréquentiel .....	50
3	Méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle .....	51
3.1	Estimation au sol .....	52
3.2	Méthode de génération de fréquence .....	53
3.3	Méthode Scan .....	54
3.4	Méthode Vidéo.....	54
3.5	Méthode interférométrique.....	55
4	Cas d'une caméra satellitaire : .....	55
5	Estimation en vol .....	56
5.1	Méthode de l'Impulsion .....	57
5.2	Procédure opérationnelle .....	58
5.3	Méthode de bord de plage.....	62
5.4	Cibles utilisées : .....	62
5.5	Cibles artificielles dédiées .....	64
	Conclusion .....	65
	Chapitre 4 : Approche neuronale pour l'estimation de la réponse impulsionnelle.....	67
	Introduction.....	68

1	Description de l'approche RNA .....	69
2	Implémentation de la méthode RNA .....	71
3	Validation des résultats .....	72
3.1	Construction du Vecteur Caractéristique .....	73
3.2	Statistiques d'ordre 1 des images .....	73
3.3	Netteté des images .....	75
3.4	Défocalisation des images .....	78
3.5	Energie et contraste des images .....	79
3.6	Contribution du Variogramme .....	79
3.7	Spectre des images .....	83
	Conclusion .....	86
	Chapitre 5 : Estimation univariante de la réponse impulsionnelle basée sur l'approche de bord.....	88
	Introduction.....	89
1	Estimation de la réponse impulsionnelle .....	91
2	Description de la Méthode .....	94
2.1	Implémentation la méthode proposée.....	95
2.2	Algorithme de la méthode proposée .....	95
2.3	Sélection du bord de plage.....	98
2.3.1	Règles de sélection du bord.....	99
2.3.2	Sélection de la région d'intérêts .....	100
2.4	Détermination sou-pixellique du bord .....	101
2.5	Extraction de la ESF .....	103
2.6	ESF et LSF.....	107
2.7	Réduction de la LSF.....	113
2.8	Calcul de la MTF .....	115
2.9	MTF et bruit.....	116
	Conclusion .....	124
	Conclusion Générale.....	126

# Liste des figures

Figure 1.1	Synoptique de la chaîne d'acquisition d'images .....	15
Figure 1.2	Le mode Push Brum .....	17
Figure 1.3	Le mode Whiskbroom .....	18
Figure 1.4	Image satellite enregistrée en modalité panchromatique.....	19
Figure 1.5	Image satellite enregistrée en modalité multispectrale .....	20
Figure 1.6	Image satellite produite en modalité pan-Sharpning.....	21
Figure 1.7	Notion de résolution et son interaction avec l'altitude du satellite et sa trace au sol.....	23
Figure 1.8	Effet de la camera sur le contenu fréquentiel de la scène enregistrée .....	24
Figure 1.9	Architecture d'un système imageur satellitaire .....	26
Figure 1.10	Principe de fonctionnement d'un substrat CCD.....	27
Figure 1.11	Principe de fonctionnement d'un capteur CCD .....	28
Figure 1.12	Le convertisseur analogique numérique dans la chaîne image.....	29
Figure 1.13	Fonction de transfert du convertisseur analogique-numérique .....	34
Figure 2.1	Principaux contributeurs de la dégradation d'une image satellitaire.....	35
Figure 2.2	Chaîne de dégradation des images satellitaires.....	36
Figure 2.3	Echantillonnage des images .....	48
Figure 3.1	Illustration du disque d'Airy .....	49
Figure 3.2	Effet d'une caméra sur une entrée impulsionnelle.....	50
Figure 3.3	Effet d'une caméra sur entrée sinusoïdale.....	51
Figure 3.4	Dispositif d'estimation de la réponse impulsionnelle au sol .....	52
Figure 3.5	Le pattern USAF 1951 utilisé par la méthode génération de fréquence.....	55
Figure 3.6	Dispositif de mesure de la réponse impulsionnelle d'une caméra satellite	57
Figure 3.7	Principe de la méthode de l'impulsion.....	58
Figure 3.8	Exemple de cible artificielle au sol utilisée par la méthode d'impulsion.....	59
Figure 3.9	Principe de reconstitution de la réponse impulsionnelle à n niveaux sub-pixelliques.....	60
Figure 3.10	Effet de la taille de la cible sur les valeurs de la MTF	61
Figure 3.11	Principe de la méthode des bords de plage.....	62
Figure 3.12	Exemples de parkings utilisés comme cible par la méthode bord de plages.....	62
Figure 3.13	Exemples de piste d'aéroports utilisés comme cibles par la méthode bord de plages.....	63
Figure 3.14	Exemples de cibles artificielles au sol dédiées aux mesures de la MTF.....	72
Figure 4.1	Paramètre de la moyenne des images utilisées dans le vecteur caractéristique .....	73
Figure 4.2	Paramètre de la variance des images utilisées dans le vecteur caractéristique.....	73
Figure 4.3	Paramètres asymétrie et aplatissement des images utilisées dans le vecteur caractéristique.....	74
Figure 4.4	Paramètres sharpness des images utilisées dans le vecteur caractéristique.....	75
Figure 4.5	Principe de la méthode d'estimation de la netteté des images.....	75
Figure 4.6	Image acquise le 13 janvier 2012 avec coefficient de netteté de 0.4639.....	76
Figure 4.9	Image acquise le 25 avril 2013 avec coefficient de netteté de 0.4046 .....	77
Figure 4.8	Image acquise le 20 février 2013 avec coefficient de netteté de 0.4336.....	78
Figure 4.7	Image acquise le 10 juin 2012 avec coefficient de netteté de 0.4663.....	80

Figure 4.10 Image acquise le 17 février 2013 avec coefficient de netteté de 0.4639.....	81
Figure 4.11 Paramètre de défocalisation des images.....	84
Figure 4.12 Investigation de plusieurs modèles de variogrammes.....	93
Figure 4.13 Investigation du variogramme à modèles linéaire généralisé.....	96
Figure 4.14 Vérification de la sensibilité du sous-vecteur fréquentiel à diverses dégradations.....	99
Figure 5.1 Organigramme général de la méthode de Choi pour l'estimation de la réponse impulsionnelle	101
Figure 5.2 Organigramme général de la méthode proposée.....	103
Figure 5.3 Echantillon d'une image utilisée et l'agrandissement de la ROI associée.....	105
Figure 5.4 Détermination Sub-pixellique du profil de bord.....	105
Figure 5.5 Extraction des valeurs de la ESF à partir des lignes perpendiculaires au profil de bord.....	110
Figure 5.6 Débruitage de la fonction ESF Edge Spread Function.....	111
Figure 5.7 L'effet du filtrage cubique sur la réponse de bord.....	111
Figure 5.8 Exemple du moyennage de la ESF et du calcul de la LSF par différentiation.....	112
Figure 5.9 Classification automatique en trois groupe de DN de la ESF.....	113
Figure 5.10 Exemple de l'image d'Alger avec la ROI utilisée pour la sélection du bord.....	114
Figure 5.11 Le profil déterminé et les lignes perpendiculaires pour le calcul de la ESF.....	115
Figure 5.12 Profil déterminé à trois positions par interpolation de FERMI de la ESF.....	116
Figure 5.13 Technique de réduction automatique de la LSF.....	117
Figure 5.14 Exemple de LSF brute avant et après sa réduction par la méthode proposée.....	117
Figure 5.15 Profile A-cross track et A-long track de la MTF donnés par la méthode.....	117
Figure 5.16 Principe de calcul du rapport signal à bruit .....	118
Figure 5.17 Une mise en relief de l'étape de calcul du SNR telle qu'intégrée dans la méthode.....	118
Figure 5.18 Exemples de MTF estimées avec les SNR associés calculés.....	118
Figure 5.19 Valeurs de MTF estimées avec correspondances SNR.....	119
Figure 5.20 Image test de 'Salon de Provence' .....	119
Figure 5.21 Zoom sur une mire bruitée .....	119
Figure 5.22 Processus d'addition du bruit blanc gaussien à la mire de Salon de Provence, France.....	119
Figure 5.23 Valeurs de MTF estimées avec correspondances WGN avec mire en damier de Salon.....	120

## Liste des Tableaux

<i>Tableau 2.1 Postes de dégradation des images satellitaires</i>	39
<i>Tableau 2.2 Classification des dégradations subie par les des images satellitaires</i>	40
<i>Tableau 4.1 Optimisation des paramètres du model GLM du Variogramme</i>	81
<i>Tableau 4.2 Sous-vecteur fréquentiel de quelques images de la base de données</i>	83

## Chapitre 1

# Acquisition des images satellite

### **Introduction**

Ce chapitre tente de présenter les notions nécessaires à la compréhension du principe de l'acquisition des images. Etant donné que l'objet exclusif de notre thèse demeure les images satellite, nous nous focaliserons dans les chapitres introductifs sur les images satellitaires bien que celles-ci partagent avec les images issues des capteurs classiques les mêmes principes physiques et ne s'en distinguent que par des particularités propres dues aux systèmes utilisés : satellites, ou encore avions pour les caméras aéroportées. C'est ainsi que l'organisation de ce chapitre emprunte les mêmes phases du processus d'acquisition d'une image que nous détaillerons plus loin.

Une image n'est que l'interprétation, que peut produire un système physique qu'est la camera, d'une scène appartenant au monde réel [1]. La constitution d'un système imageur : camera, télescope ou instrument (ces appellations seront indifféremment utilisées tout au long de cette thèse) de prise d'image reflète le principe physique de l'opération de capture de l'image. La lumière captée passe par un étage optique qu'est l'objectif composé de lentilles ou encore de miroirs, cette lumière est amenée au niveau du détecteur (ou capteur) qui la convertit en signal électrique. Ce signal subit des traitements d'amplification et de quantification [1]. Le signal utile sous forme de pixels est ensuite enregistré dans une mémoire et est automatiquement, ou à la demande d'un opérateur au sol, transmis à une station de réception qui après plusieurs traitements de corrections radiométriques et géométriques permet de le délivrer à son utilisateur final par un système de dissémination et de diffusion des données mission (DVD, liaison FTP, etc.).

### **1 Sources d'images**

Une image, dont nous verrons un peu plus loin la définition, peut avoir une origine synthétique si elle fabriquée par l'intermédiaire d'un logiciel ou d'un programme informatique [2]. Elle peut être naturelle si elle délivrée par tout instrument de mesure ou d'enregistrement d'un signal optique (thermique ou radar) en deux dimensions ou plus.



L'instrument de mesure peut avoir une large acception : camera, appareil photographique, Iphone, satellite d'observation, avion de reconnaissance, etc.

Une image enregistrée par une plate-forme embarquée peut être réalisée par tout système aéroporté ou spatial en mouvement: avion, ballon, satellite, station spatiale internationale, etc. Le système de mesure n'étant pas en contact avec la cible mesurée. C'est la définition communément acceptée de la télédétection. Cette dernière utilise la mesure des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets étudiés dans un certain domaine de fréquences (infrarouge, visible, micro-ondes). La mesure peut être passive: la cible est illuminée par une source séparée du satellite comme le soleil ou active où la source provient du satellite lui même comme l'exemple des satellites qui utilise des Radars.

Dans notre présente thèse nous nous intéresserons exclusivement aux images naturelles de télédétection issues d'un satellite d'observation de la Terre dans le domaine optique. Nous utiliserons principalement les images de modalité panchromatique à cause de leurs propriétés qui sont en adéquation avec les traitements et développement sujets de cette thèse. Nous expliciterons les justifications ayant présidé à ces choix plus en avant de ce travail.

### **2 Les images satellite**

Une image numérique peut être considérée comme une matrice de pixels dont les points (mxn) sont le compte numérique ou Digital Number DN des pixels. Une charte de couleurs est utilisée pour représenter les couleurs de l'image.

Traditionnellement les concepteurs des instruments embarqués sur satellite les dotent de capacités d'observation soit en mode panchromatique soit en mode multispectral. Le capteur qui donne l'image panchromatique est équipé d'un filtre qui laisse passer les principales composantes de la lumière blanche. Les intensités de la matrice de l'image associée sont représentées par une gamme couleur appropriée.

A chaque pixel de cette matrice est associée une valeur correspondant à une intensité lumineuse. Une palette de couleurs est utilisée pour représenter cette intensité lumineuse. Pour les images monochromatiques, ces intensités sont en général représentées par une gamme de gris allant du noir pour la plus faible intensité au blanc pour la plus forte.

### **3 Acquisition des images Satellite**

Le processus d'acquisition d'une image comporte les phases qui permettent d'obtenir via un dispositif électronique une représentation d'une scène réelle C'est ainsi que l'enregistrement initial de la scène subit des transformations successives pour aboutir à une forme manipulable, intelligible, reproductible et diffusable de l'image. Cette représentation est accompagnée du paramétrage de l'affichage et de l'édition qui permettent à l'utilisateur une exploitation en adéquation avec ses propres objectifs : reconnaissance, photo-interprétation, segmentation, classification ou autre.

Un dispositif d'acquisition d'image établit le rapport entre le monde réel et l'enregistrement ou la représentation électronique et informatique de cette réalité [2] ; ainsi stockée sur un support matériel l'image peut être éditée et traitée.

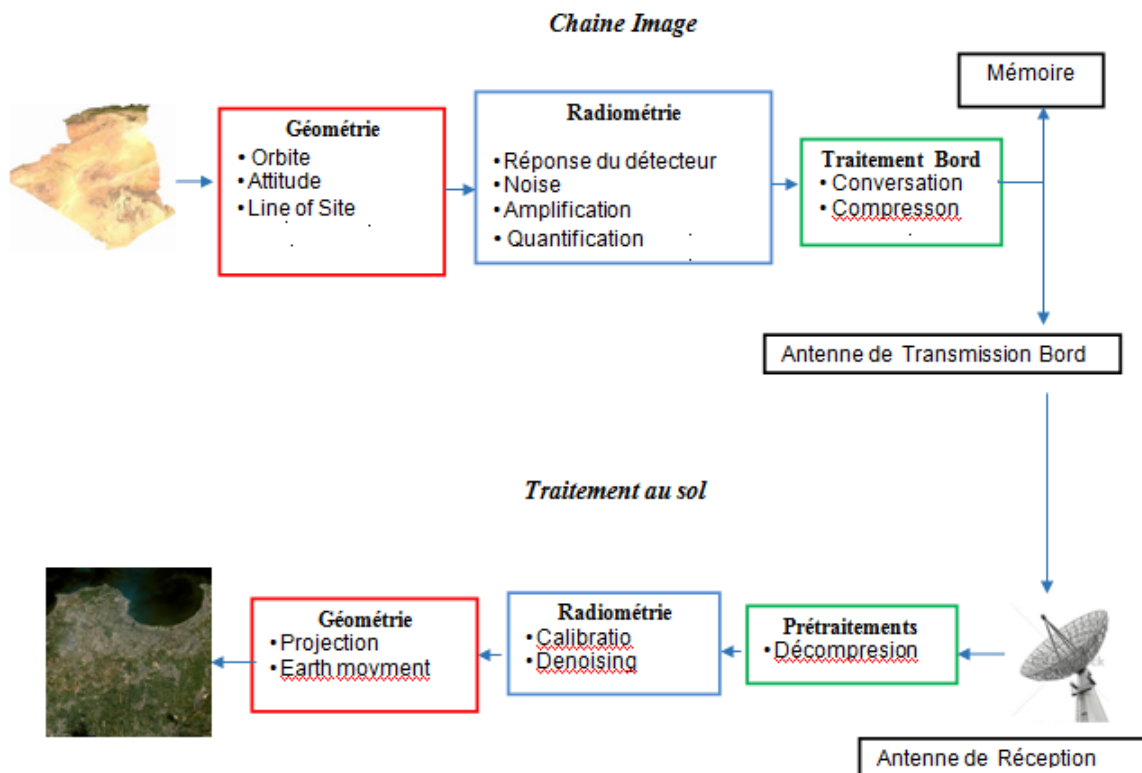


Figure 1.1 Synoptique de la chaîne d'acquisition d'images

#### 4 L'image en tant que signal

Une image peut être formalisée et définie comme étant une fonction à deux dimensions  $f(x, y)$  où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées spatiales, et la valeur prise par  $f$  (son amplitude) est appelée intensité ou niveau de gris DN. Dans un monde idéal, les deux variables  $x$  et  $y$  sont à intervalle mathématique et leur support est continu. Dans le monde réel (physique), ces deux quantités sont discrètes et peuvent ainsi permettre de les manipuler avec des ressources informatiques raisonnables sans trop s'écarter de leurs valeurs originales (mathématiques).

L'image qui peut être naturelle ou synthétique, outre le fait quelle soit formalisée comme une matrice de pixels, peut être appréhendée comme étant un signal et sera sujette à tous les traitements offerts par la panoplie d'outils de traitement du signal disponibles comme la DFT et la FFT. C'est le traitement du signal qui permet d'appréhender les notions d'échantillonnage, de

contenu fréquentiel et de qualité géométrique des images comme nous le verrons plus loin dans cette thèse.

Généralement il est plus préférable de manipuler l'image sous la forme d'un signal. Le filtre adéquat est alors construit et appliqué à l'image en tant que signal à deux dimensions. Le passage du domaine spatial à un signal 2D est assuré par les séries de Fourier si l'image est appréhendée dans sa globalité ou encore par les ondelettes si un traitement à des échelles locales est nécessaire.

### **5 Mode d'acquisition des images**

Plusieurs modes existent comme : l'acquisition par matrices CCD, l'acquisition par balayage et l'acquisition de type scanner. Les matrices de CCD sont plus généralement utilisées pour des missions d'observation astronomiques telles que celle du satellite américain Clémentine, lancé en 1994, qui a cartographié l'ensemble de la surface de la Lune et dont le module de compression d'images a été fourni par le CNES ou le télescope spatial Corot, lancé fin 2006, dont la maîtrise d'œuvre a été conduite par le CNES [3]. Les barrettes CCD sont plus utilisées pour l'acquisition des images d'observation de la Terre par balayage.

Deux modes majeurs d'acquisition des images se dégagent : le mode push broom et le mode whisk broom. L'image est construite ligne par ligne au cours du défilement du satellite sur son orbite.

#### **5.1 Mode Push broom**

Dans ce mode, le capteur linéaire enregistre des images 1-D et utilise le défilement du satellite autour de la Terre pour construire des bandeaux d'image ; son principe de fonctionnement est identique aux scanners et photocopieurs que l'on peut utiliser tous les jours. Les avantages liés à cette technologie sont principalement une résolution d'image étendue qui va bien au delà des caméras perspectives, un coût d'exploitation faible et une robustesse au contexte spatial.

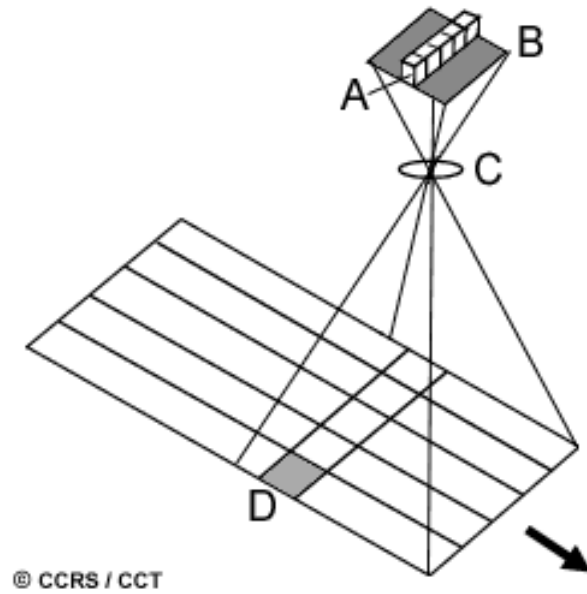


Figure 1.2 Le mode Push Brum

## 5.2 Mode whisk broom

Dans ce mode, le balayage est perpendiculaire à la trajectoire. Le satellite ratisse la Terre en une série de lignes. Le balayage s'effectue d'un côté du capteur vers l'autre, en utilisant un miroir rotatif (A). Ainsi, la radiation atteignant le capteur est divisée en plusieurs composantes spectrales détectées séparément.

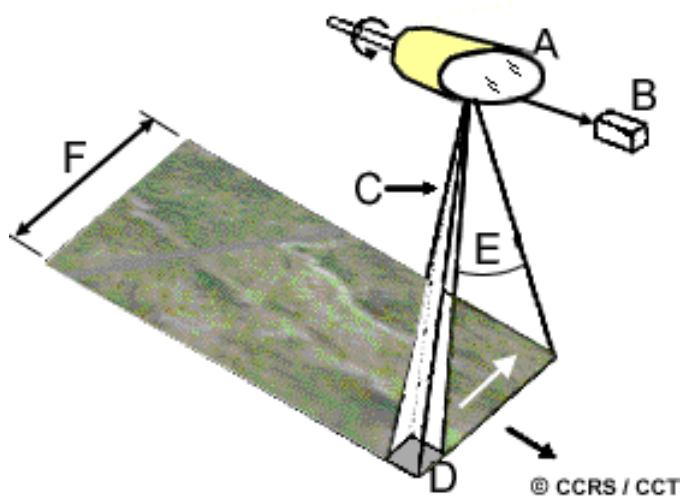


Figure 1.3 Le mode Whiskbroom

## 6 Modalités des Images

### 6.1 Image Panchromatique

On appelle panchromatique (du grec pan, tout et chroma, couleur) une réponse physico-chimique (émulsion photographique, pigment photosensible, etc.) qui ne discrimine pas les couleurs, c'est-à-dire dont la sensibilité à la longueur d'onde de la lumière est similaire à celle de la vision humaine. Le terme panchromatique s'applique particulièrement à la photographie argentique sans reproduction des couleurs, dite en noir et blanc [4].

Les images panchromatiques sont obtenues à partir de l'enregistrement du rayonnement dans un unique intervalle de longueur d'onde situé dans le domaine du visible, c.à.d. entre 400 et 700 nm [4].



Figure 1.4 Image satellite enregistrée en modalité panchromatique

Comme les données ne sont acquises que dans un seul canal spectral, seules des images en noir et blanc peuvent être obtenues (si l'image est codée sur 8 bits, elle sera visualisable en 255 niveaux de gris distincts). Bien que moins riche du point de vue de la résolution spectrale, l'image panchromatique offre une résolution spatiale plus importante.

### **6.2 Image multispectrale**

Dans une image multispectrale ou couleur, à chaque pixel est associé un vecteur de trois ou quatre valeurs selon le nombre de bandes spectrales disponibles [4]. Ce vecteur est couramment représenté dans la base RVB (Rouge, Vert, Bleu) Une image est dite multispectrale lorsque le vecteur de valeurs associé à un pixel est au moins de dimension deux. Le satellite Ikonos permet de prendre des images dans les modalités multispectrales et panchromatiques.



Figure 1.5 Image satellite enregistrée en modalité multispectrale

### 6.3 La modalité Pan-Sharpning

Le Pan-Sharpning consiste à synthétiser une image couleur basse résolution avec une image panchromatique haute résolution pour obtenir une image couleur haute résolution. Cela consiste à fusionner une matrice de haute résolution spatiale d'une bande spectrale panchromatique généralement à large réponse réduite spectrale avec un ensemble de matrices de composition colorée à une résolution spectrale. L'atout de l'image résultante est une image de haute résolution avec les détails multispectraux [4]. Il va sans dire que toutes les images utilisées dans cette opération doivent provenir du même plan focal et être acquises quasi-simultanément et doivent être suffisamment recalées avec une performance de recalage généralement prise à un quart de pixel maximum comme distance entre les bandes panchromatique et multispectrales.

Les satellites d'observation actuellement en exploitation sont capables de fournir ce genre de jeux d'images. Le traitement automatique et la livraison de ce mode est exclusivement du ressort du segment sol du système satellitaire





Figure 1.6 Image satellite produite en modalité pan-Sharpener

## 7 Caractéristiques des images

### 7.1 Dynamique de l'image

Le signal analogique issu du capteur peut être codé sur 8, 10 ou 12 bits et peut présenter plus ou moins de détails radiométriques de la scène. Toutefois les concepteurs des missions d'observation de la Terre sont contraints par des compromis dus à la taille des images

et le temps de vidage sur les stations sol. En effet le concept de la mission qui utilise l'altitude entre autre paramètre implique des temps de passe et visibilité déterminés du satellite par rapport à la station sol. Un recours à la compression et décompression constitue souvent une solution pour supplier à ce goulot d'étranglement qu'est le téléchargement de grandes images en des temps assez courts (une dizaine de minutes généralement)[5]

### 7.2 Dynamique de l'image

Le rapport Signal sur Bruit (RSB ou SNR) représente le facteur qui conditionne le plus la qualité de l'image. Il exerce une influence sur le contraste et la résolution spatiale. Le rapport S/B peut être évalué sur une image et correspond au rapport du signal moyen sur la fluctuation du signal ou déviation standard.

Typiquement pour les camera embarquées sur satellite, ce rapport est supérieur à 100 pour la modalité panchromatique et 110 pour la modalité multispectrale.

### 7.3 GSD et Résolution

Le GSD pour Ground Sampling Distance représente le plus petit détail au sol qu'un système satellitaire peut distinguer. Dans le domaine de la technologie spatiale le GSD est une grandeur plus aisément manipulable par les ingénieurs comparée au concept un peu flou (ambigu) de résolution dont l'appréhension doit faire appel aux caractéristiques optiques de la caméra. Sans évoquer le fait que le concept de résolution est plus ou moins générique puisqu'il peut s'agir de résolution radiométrique (le codage du pixel), de résolution temporelle (temps de revisite du satellite) ou encore de résolution spatiale ou géométrique.

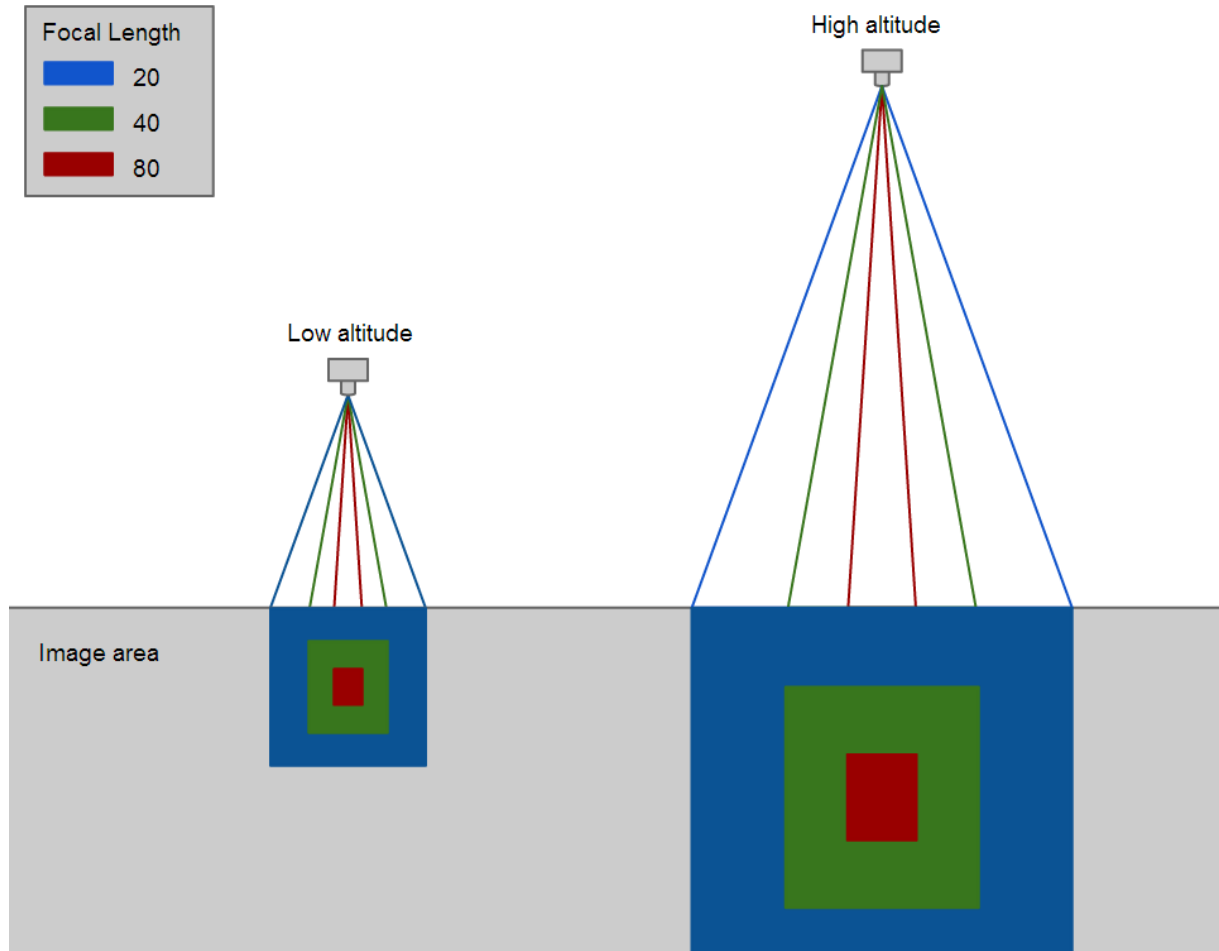


Figure 1.7 Notion de résolution et son interaction avec l'altitude du satellite et sa trace au sol

#### 7.4 Fonction de transfert de modulation

La fonction de transfert de modulation permet de quantifier la qualité d'un système imageur embarqué sur un satellite d'observation de la terre. Elle sert à évaluer l'aptitude de l'imageur à distinguer les détails contenus dans une scène. Sa connaissance détaillée est utile pour la refocalisation et la qualification d'instruments en vol et sert à construire et appliquer ultérieurement des méthodes de déconvolution [6].

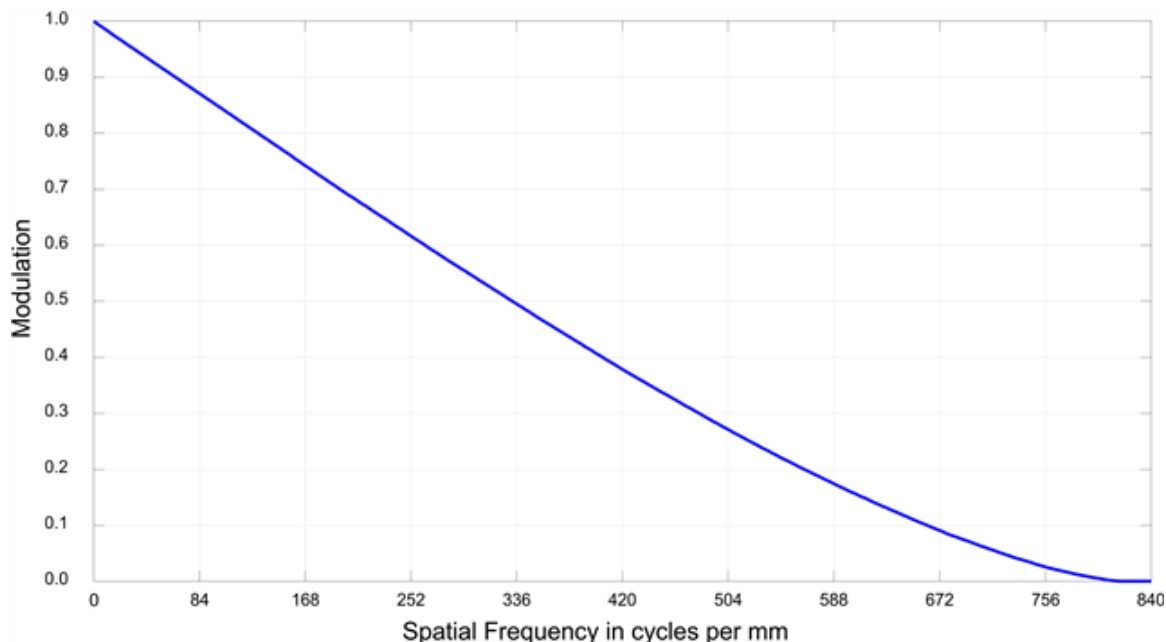


Figure 1.8 Effet de la camera sur le contenu fréquentiel de la scène enregistrée

## 8 Produit image

Une image satellitaire est indissociable du système qui la délivre. Cette notion gagne à être explicitée. Tout opérateur de satellite qui se respecte ne délivre pas une image mais un produit image. Une image n'est autre qu'une matrice de pixels.

Un produit image contient l'image, le plus souvent au format Geotiff, et un ensemble de fichiers qui contiennent les méta-datas de l'image. Ce sont les informations qui décrivent avec précision la position du satellite, de la camera et du temps de la prise d'image pendant l'opération d'enregistrement. La chaîne de production de l'image au sol associera l'image à ces données auxiliaires afin de corriger géométriquement l'image et la projeter dans un repère géographique adéquat. D'une matrice d'image, le produit acquiert ainsi une signification géométrique et géographique et on parlera de donnée géospatiale.

### 9 De la commande au Produit :

Avec l'apparition d'opérateurs de satellites spécialisés sur le marché, les images satellite ou plus génériquement appelées données géospatiales sont devenues un produit comme un autre. Un client privé ou institutionnel est confronté à une offre pléthorique de fournisseurs de solutions spatiales institutionnels ou privés en concurrence permanente.

A la réception d'une nouvelle commande d'images, l'opérateur de satellite enclenche une procédure dont la première phase est de vérifier s'il peut satisfaire le besoin du client en prospectant dans la base de données d'images déjà acquises. Dans le cas échéant, une programmation de prise d'image est indispensable. L'opérateur spécifiera dans la programmation les paramètres géographiques et radiométriques de l'image. Le système fournira toutes les opportunités d'acquisition pour la cible spécifiée. L'opérateur en choisira celles qui se rapprochent le mieux des spécifications du client.

L'image programmée est acquise puis téléchargée et traitée soit selon les standards préétablis par l'opérateur soit selon les traitements spécifiés par le client qui peut vouloir une image qui ne contient pas de corrections particulières afin de l'exploiter pour une application de recherche et développement spécifique.

La plupart des utilisateurs se contenteront des niveaux de traitements standards qui seront largement en adéquation avec leurs investigations et besoins.

Le processus d'acquisition et de traitement d'une image satellite est montrée sur les figures 1.1 et 1.9. Un satellite acquiert les images par balayage en défilant autour de la Terre. Les informations géométriques sur le satellite telles que son orbite, son altitude et sa direction de visée sont enregistrées au cours de l'acquisition. Elles permettront de localiser précisément la zone imagée au sol. De même, les informations radiométriques seront transmises au sol afin d'effectuer une première série de corrections sur l'image brute. Les images sont parfois

compressées à bord avant d'être transmises au sol lorsque le satellite est en visibilité directe avec une station de réception.

### 10 Chaîne d'acquisition d'image

C'est le cœur de la chaîne fonctionnelle d'une camera embarquée sur satellite. Elle est constituée d'un ensemble d'étages qui servent à recueillir, conditionner, quantifier, amplifier et prétraiter le signal qui représente la scène réelle acquise par le satellite.

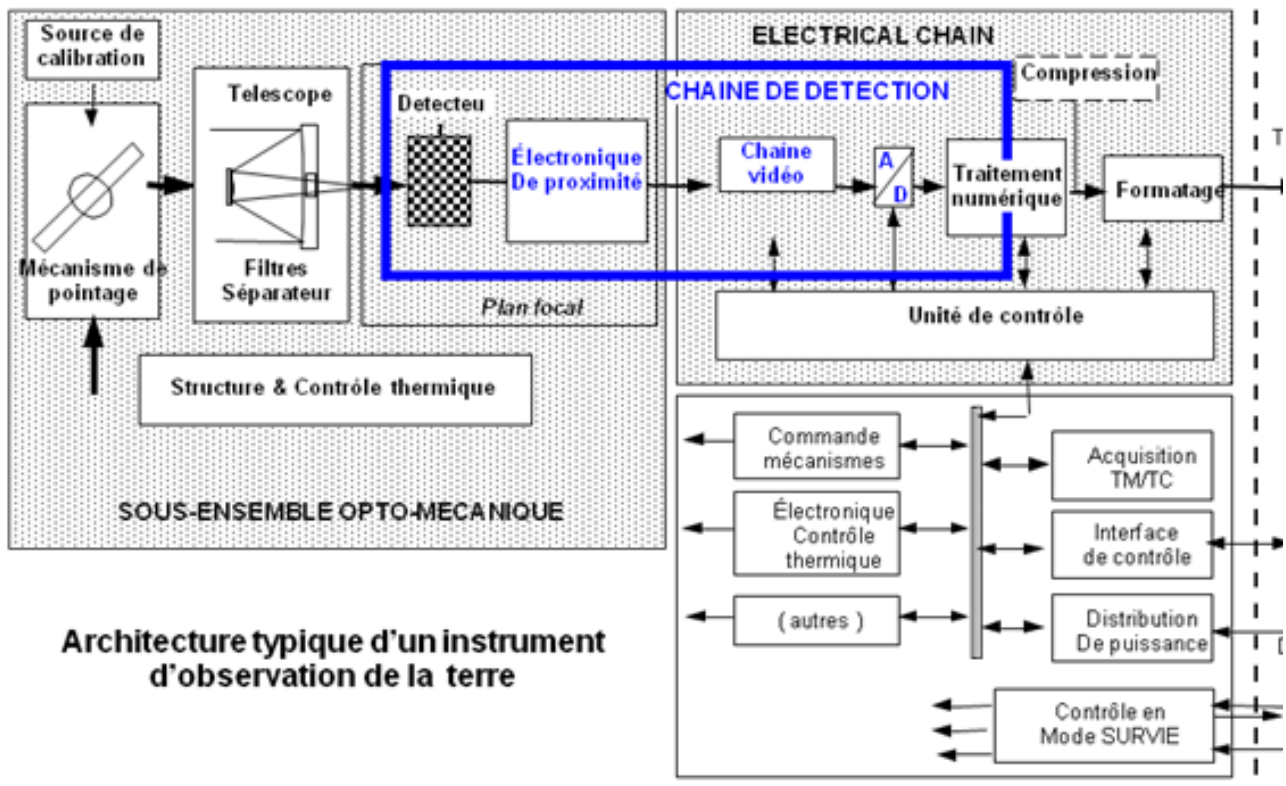


Figure 1.9 Architecture d'un système imageur satellitaire

### 10.1 Les capteurs

C'est le dispositif qui permet de transformer les photons qui atteignent le plan focal du satellite en un signal électrique. Le capteur met à profit l'effet photoélectrique qui permet aux photons incidents d'arracher des électrons à chaque élément actif (photosite) d'une matrice ou barrette de capteurs élémentaires constitués de photodiodes ou photomos [7].

Ils fournissent un signal électrique qui dépend du flux lumineux total reçu par la surface sensible. Ils mesurent donc un éclaircissement moyen. Les charges sont des électrons créés par effet photoélectrique qui sont stockés dans 'un puits de potentiel' créé par une électrode. Chaque élément constitue un 'pixel'. C'est ainsi que le nombre d'électrons collectés est proportionnel à la quantité de lumière reçue.

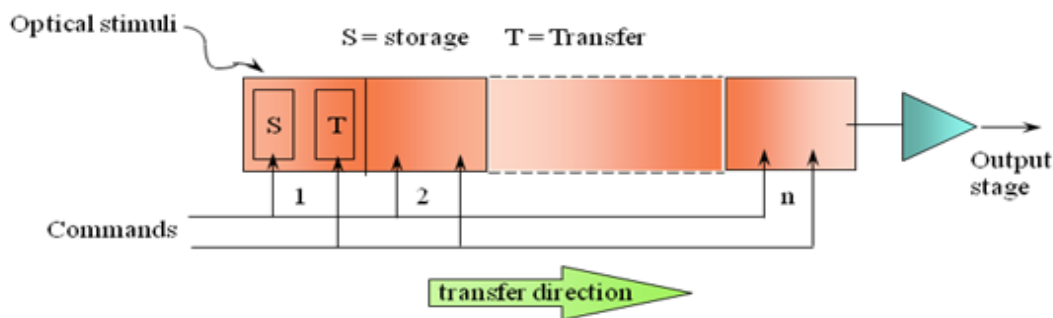


Figure 1.10 Principe de fonctionnement d'un substrat CCD

À la fin de l'exposition, les charges sont transférées de photosite en photosite par le jeu de variations de potentiel cycliques appliquées aux grilles. Les charges sont transformées en tension, proportionnelle au nombre d'électrons, dans la capacité d'une diode « flottante ». Le signal résultant sera, à l'extérieur du CCD, filtré par un circuit typiquement à « double échantillonnage corrélé » avant d'être amplifié et numérisé.

Le détecteur revêt une telle importance dans la chaîne d'acquisition d'image à tel point qu'il représente environ 50% en termes de performance géométrique et radiométrique des images enregistrées par cette chaîne.

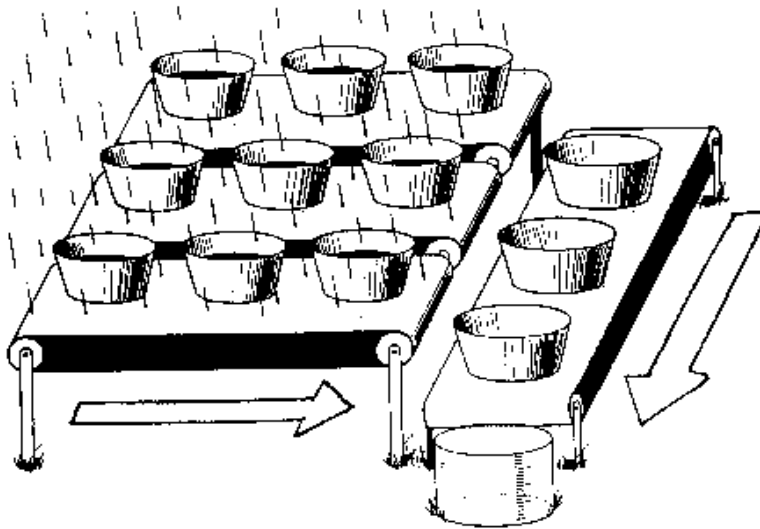


Figure 1.11 Principe de fonctionnement d'un capteur CCD

Les 50% restants de la performance globale de la caméra sont partagés par les contributeurs significatifs du système imageurs que sont ses constituants comme : les miroirs, les lentilles, les filtres optiques, le montage opto-mécanique, l'atmosphère, le traitement au sol, etc.



### 10.2 Le convertisseur analogique-numérique

C'est l'élément qui transforme le signal électrique qui provient du détecteur en un signal électrique quantifiable et discret.

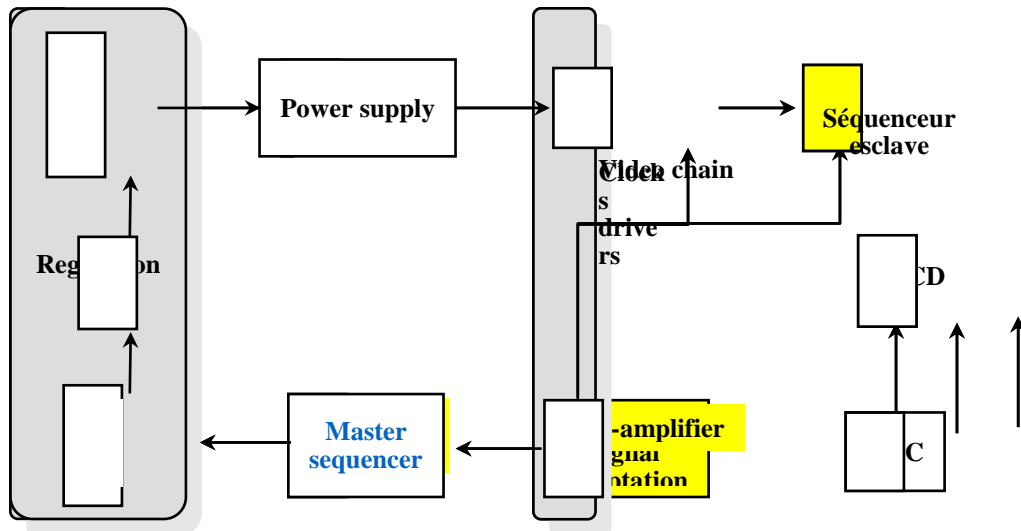


Figure 1.12 Le convertisseur analogique numérique dans la chaîne image

Le concepteur de la chaîne image sélectionne un CAN avec une fonction de transfert adéquate et capable de tenir les irradiations en orbite.

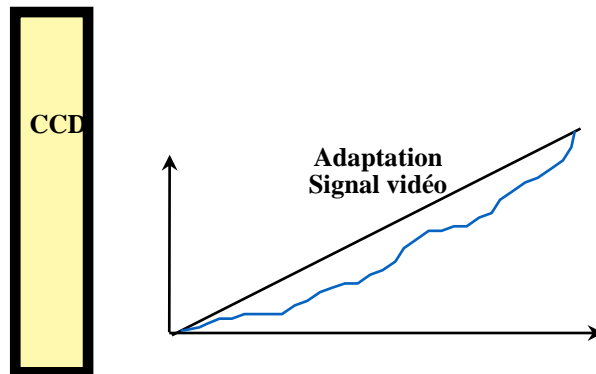


Figure 1.13 Fonction de transfert du convertisseur analogique-numérique

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons effectué une introduction aux chaînes d'acquisition d'images satellite. Nous avons cru nécessaire de rappeler certaines définitions et notions de base nécessaires à l'appréhension du processus d'acquisition d'images. Nous avons tenté de cadrer le contexte objet de notre intérêt par rapport aux types et définitions des images qui feront l'intérêt de notre étude. Parmi la source pléthorique d'images qui existent, nous avons restreint notre domaine d'intérêt premier aux images qui proviennent d'une chaîne d'acquisition satellite. Nous avons décrit brièvement le processus d'acquisition des images, celui de la commande par un client et enfin la satisfaction de sa commande par l'opérateur du satellite.



### Référence

- [1] Jalobeanu, A.Zerubia,J, Blanc-Féraud ,L.“Bayesian estimation of blur and noise in remote sensing imaging” in Blind image deconvolution: theory and applications (CRC), P. Campisi and K. Egiazarian ed., Taylor & Francis / CRC Press, 2007
- [2] A.K. Jain. Fundamentals of digital image processing, information and system sciences series.Prentice Hall, 1989.
- [3] Regeon, P. and Chapman, J. “CLEMENTINE: New Directions and Perspectives for One-of-a-Kind Spacecraft Missions.” Paper presented at the Small Satellite Conference, Utah State University, Aug. 29- Sept. 1, 1994
- [4] Thomas, Claire (2006) Fusion d'images de résolutions spatiales différentes. Doctorat Informatique et Temps Réel, Robotique, Automatique, ENSMP - CEP Centre Energétique et Procédés, Paristech > ENSMP.
- [5] Reyes, M. G., Zhao, X., Neuhoff, D. L. & Pappas, T. N. (2008). Structure-preserving Properties of Bilevel Image Compression, Human Vision and Electronics Imaging XIII, Proc. SPIE vol. 6806.
- [6] Thomas C., Blanc P., Ranchin T., Wald L. Geometric quality of images: estimation of the MTF In proceedings 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005
- [7] Estrieau M., Magnan P, Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted edge methodology Proceeding of Society of Phto-Optical Instrumentation Engineers - Volume 5251 - Detectors and Associated Signal Processing, 2004

## Chapitre 2

# Dégradations de la chaîne d'acquisition des images

### Introduction

A bord d'un satellite d'observation de la Terre, l'image enregistrée de la scène observée est le résultat d'un processus complexe. La lumière provenant de la scène observée traverse d'abord l'atmosphère où elle subit les effets de la turbulence, puis le système optique où agissent principalement la diffraction et les aberrations. L'image d'intensité qui se forme ainsi au niveau du capteur est floue. Elle subit alors un échantillonnage, par intégration sur les éléments photosensibles (pixels) du capteur. L'intégration n'étant pas instantanée, l'image subit les effets du mouvement de l'instrument. La lumière est ensuite convertie en courant électrique, qui est ensuite contaminé par du bruit de diverses origines. Ce courant subit une quantification avant de former une image, c'est l'étape de mesure, qui contribue encore à la dégradation.

Chacune des étapes telles qu'évoquées et qui président à la formation de l'image introduisent une dégradation ou un artefact caractéristique qui tout en contribuant à la formation de l'image contribue à la dégradation globale de la scène réelle pour aboutir à une représentation plus ou moins fidèle de la réalité. Ce chapitre est consacré à la présentation de ces artefacts et à leur formalisme qui participe à la compréhension de l'opération de formation des images satellite. Telle que décrit brièvement dans le chapitre 1, une image satellite est intrinsèquement différente des autres images acquises dans des circonstances et configurations différentes.

### 1 Modèle d'observation

Dans le cas spécifique d'une acquisition d'image par une camera embarquée sur un satellite, la scène observée se situe à une distance beaucoup plus grande que sa taille. Cette hypothèse qui est vérifiée dans le cas d'une plate-forme d'observation satellite ou aéroportée réduit et encadre la modélisation de la chaîne d'acquisition [1].

Les effets significatifs dans la construction du modèle d'observation seront les effets de flou, de bruit global et des défauts radiométriques.

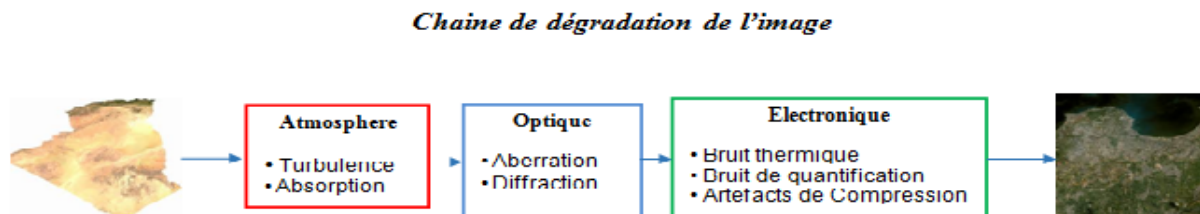


Figure 2.1 Principaux contributeurs de la dégradation d'une image satellitaire

Le modèle d'observation sera construit à partir du modèle radiométrique de la scène observée au sol. Le détecteur de la camera intégrera sur un laps de temps limité un spectre limité allant du visible jusqu'à l'infrarouge [8].

La scène réelle  $x$  est considérée comme une fonction bidimensionnelle. Lors de l'acquisition, essentiellement cette quantité réelle est soumise aux effets cumulés de l'atmosphère et du système optique.

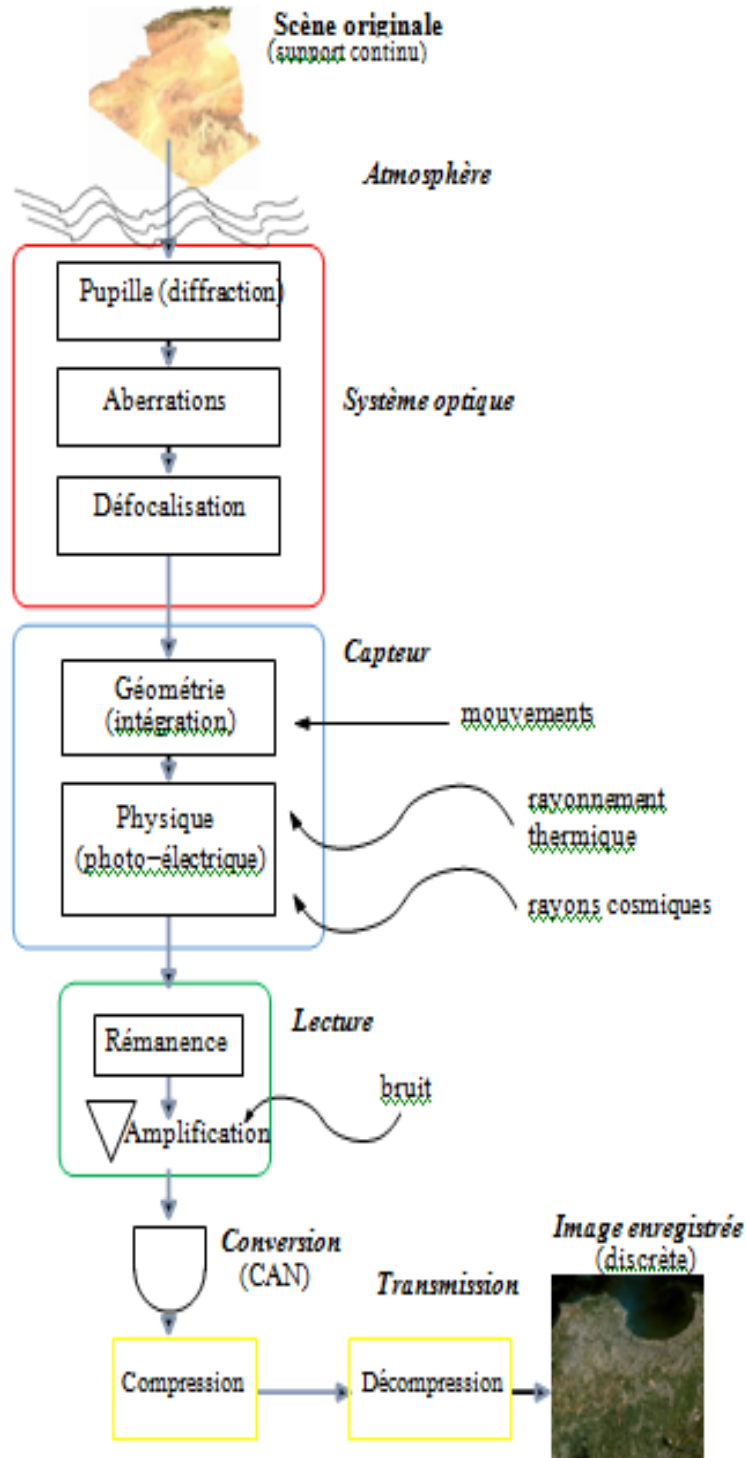


Figure 2.2 Chaîne de dégradation des images satellitaires



La chaîne de dégradation, que subit l'image, qui est résumée sur la figure 2.2 consiste en une dégradation due à la traversée par la lumière de l'atmosphère [9]. Les effets dégradants dominants sont la turbulence et l'absorption atmosphérique. La deuxième contribution de dégradation est le système optique. Les postes de dégradation sont principalement l'occultation liée à la taille finie de l'ouverture de la camera. La diffraction est la somme des aberrations due à la fabrication des éléments optiques comme les miroirs, les lentilles et les filtres. Enfin un contributeur significatif est représenté par les imperfections de montage et de réglage du système optique. La qualité et le contrôle de la focalisation lors du montage et une défocalisation en orbite sont responsables de ces éventuelles imperfections [1].

Après le système optique, l'étage de traitement électronique contribue à la dégradation globale de l'image par l'intermédiaire de l'opération de lecture et d'intégration des courants élémentaires provenant des photosites sensibles du détecteur [9].

Vient ensuite le processus d'échantillonnage de l'image. Dans le contexte de cette thèse la camera est embarquée sur un satellite en mouvement par rapport à la scène ce qui implique une durée finie d'intégration des pixels combinée à l'effet du mouvement qui introduisent une autre forme de dégradation des images enregistrées [10].

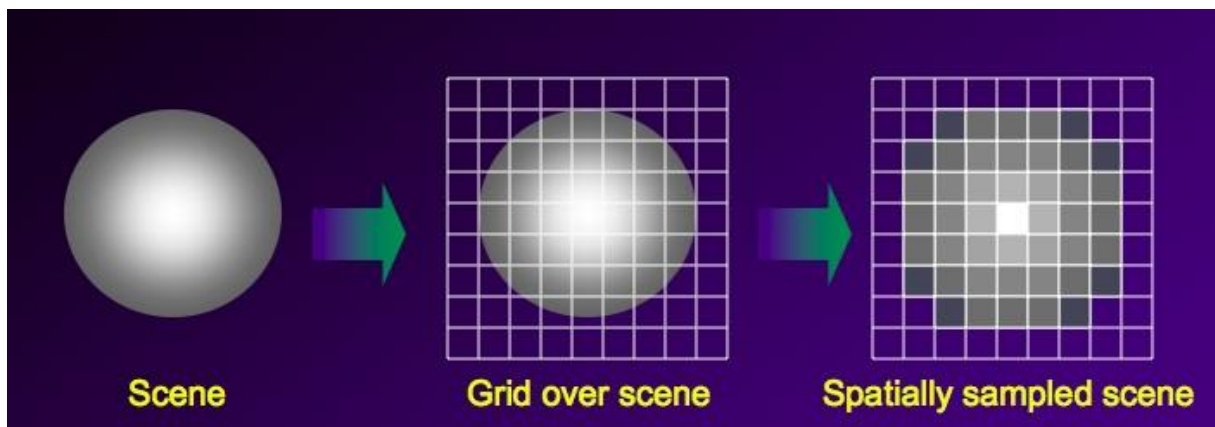


Figure 2.3 Echantillonnage des images

Par ailleurs la camera est en déplacement durant l`acquisition de l`image et subit corollairement des vibrations dues au mouvement du satellite.

Une autre source importante de dégradation de l`image est la qualité de fabrication du capteur CCD. Le nombre d`électrons générés est une fonction idéalement linéaire de l`intensité intégrée. Selon la qualité de fabrication, cette linéarité est plus ou moins effective et est impactée par les caractéristiques intrinsèques du détecteur comme la saturation et le blooming qui peuvent être le siège de contamination des pixels voisins [11].

Par ailleurs comme un détecteur comporte un certain nombre de photosites individuels qui varient habituellement d`une dizaine à plus d`une dizaine de milliers, la réponse et le rendement quantique ne sont pas uniformes que ce soit pour des raisons structurelles (le substrat de silicium) ou de qualité pendant la fabrication et le montage (contamination particulière). Cette variation de la réponse est généralement atténuée par la calibration radiométrique elle-même basée sur un modèle et donc est non exhaustive et limitée dans ses effets [11].

Une ultime dégradation provient de la phase de compression et décompression des images. Cette étape est parfois introduite dans la chaîne image afin de compenser les courts temps de visibilité du satellite par rapport aux stations sol lors du vidage des images.

La compression et décompression est génératrice de dégradation sur les images et est sujette à des validations et qualifications qui prennent en compte tous les types d`images susceptibles d`être enregistrées par le satellite en question : images urbaine, étendues de désert ou d`océan, etc.

### **2 Dégradation de la chaîne d`acquisition des images**

Quatre grands types de dégradation possibles et combinés sont applicables sur le processus d`acquisition allant de la scène réelle observée à l`image discrète enregistrée. La chaîne image peut se résumer ainsi : application d`un flou, discrétisation spatiale, transformation des valeurs obtenues, et enfin addition de bruit.

Aux quatre contributeurs majeurs de dégradation peuvent être associés des opérateurs canoniques de dégradation que sont respectivement : convolution, échantillonnage, transformation point à point et processus aléatoire

### 2.1 Types de dégradations

Dans un système d'observation de la Terre, les dégradations des images lors du processus d'acquisition sont issues des étapes successives de l'acquisition elle-même. Chaque phase contribue par une dégradation qui lui est propre. C'est ainsi que la dégradation globale est la somme des dégradations individuelles.

Les concepteurs des satellites optiques tentent d'appréhender ces dégradations et d'en modéliser celles qui obéissent à des biais systématiques et mesurables comme la différence de réponse inter-pixels ou l'effet de la température sur le signal vidéo. Le systématisme de certaines dégradations est délicat à quantifier ou à modéliser comme l'effet de la turbulence atmosphérique sur la qualité géométrique des images. Les ingénieurs tentent de compenser ces effets non prévisibles par l'allocation de budgets et de marges de dégradations lors de la conception du système. C'est ainsi que le paramètre qui décrit la netteté de l'image qui est la Fonction de Transfert de Modulation MTF, et qui fera l'objet de discussions et d'études approfondies, dans les prochains chapitres sera vu comme étant un descripteur du comportement du système en prenant en compte les effets combinés de l'atmosphère, du mouvement du satellite, du comportement thermo-élastique de la structure de la camera et enfin des performances intrinsèques du détecteur CCD.

Les tableaux 2.1 et 2.2 décrivent en détails les sources et les effets des différentes dégradations susceptibles d'être subies lors de l'acquisition d'une scène réelle par un satellite d'observation optique.

**Traversée de l`atmosphère :**

- Turbulence
- Absorption

**Système optique :**

- Diffraction : pupille d`entrée
- Aberrations : défauts systématiques
- Aberrations : défauts stochastiques
- Défocalisation

**Capteur (géométrie) :**

- Intégration sur les pixels
- Perte de sensibilité entre les pixels
- Bougé pendant la durée de l`intégration

**Capteur (physique) :**

- Non stationnarité (sensibilité des pixels)  
Photons d`origine thermique

- Rayons cosmiques
- Non linéarité (effet photoélectrique) Diffusion des charges
- Lecture : effet de rémanence

**Électronique de conversion :**

- Non linéarité (amplification)
- Bruit de mesure
- Quantification

**Transmission bord-sol :**

- Compression/Décompression
- Pertes en transmission

Tableau 2.1 Postes de dégradation des images satellitaires

Type de dégradation	Flou	Bruit	Bruit Défauts radiométriques
<i>Atmosphère</i>	Turbulence		Transmission
<i>Optique</i>	Diffraction Aberrations Défocalisation		
<i>Capteur (géométrie)</i>	Intégration  Bougé		Sensibilité
<i>Capteur (physique)</i>	Diffusion  Rémanence	Photons thermiques  Rayons cosmiques	Non linéarité du capteur  Non stationnarité
<i>Électronique de conversion</i>		Mesure Quantification	Non linéarité
<i>Transmission bord-sol</i>		Compression  Pertes	

Tableau 2.2 Classification des dégradations subie par les des images satellitaires

## 2.2 Dégradation due à l`acquisition

Lors de l`acquisition des images à partir d`une plate-forme satellitaire, des phénomènes intrinsèques peuvent impacter l`enregistrement des images comme l`effet de mouvement du satellite et la micro-vibration du satellite qui résultent de l`effet combinée de la rotation des roues du système de stabilisation et des éventuels dérives de son contrôle d`attitude SCAO . Ceci peut induire une variation d`illumination non attendue qui est difficile à modéliser et à compenser. Sans parler des difficultés qu`aura le système de traitement au sol pour géoréférencer des scènes impactées par des perturbations de stabilisation de la plate-forme satellitaire lors de l`opération d`acquisition.

## 2.3 Dégradation due au capteur.

Le capteur, à lui seul est responsable d`une grande partie du bruit global qui peut être dû à des imperfections radiométriques inter-pixels. La différence de sensibilité d`un

élément à l'autre de la barrette CCD contribue au bruit global et est dit bruit à motif déterminé (fixed-pattern noise)

Par ailleurs le bruit de grenaille est dû à l'incertitude sur la valeur réelle de la charge captée dans le puits de potentiel du photosite. L'équivalent en tension de cette charge peut varier d'une lecture à l'autre pour la même exposition, ce qui produit une incertitude de la valeur du pixel dans l'image et contribue au bruit global.

D'autres contributeurs au bruit global peuvent être dus à la déformation du plan focal sous l'effet de l'augmentation de la température sur le signal vidéo utile. Cet effet lié au capteur gagne à être modélisé et compensé dans la phase de la calibration puisque ces biais peuvent être souvent systématiques et reproductibles.

### **2.4 Dégradation due à l'échantillonnage.**

Une caméra est un système physique qui tente de transformer un signal à support continu en une représentation discrète. La grandeur physique manipulée est la luminance de la scène qui est en réalité une grandeur à trois dimensions. Le mieux que peut faire un tel système est en  $(n \times n)$  points. Selon la précision radiométrique du capteur, les capteurs actuels à  $n$  permettent d'atteindre sans problème  $n = 512$ . Etant donné qu'une scène quelconque susceptible d'être enregistrée peut contenir des occupations de sol ou des objets de tailles et de dimensions différentes et plus ou moins variables par rapport au GSD, les objets dont la taille est inférieure à l'unité de tessellation peuvent disparaître ou ne sont au mieux représentés que par un pixel [10].

### **2.5 Dégradation due au CAN**

Une autre source de dégradation vient enfin de la quantification du signal analogique utile en un signal numérique par l'intermédiaire d'un convertisseur CAN. En effet un pixel qui est codé sur 12 bits présentera une dynamique de signal plus intéressante qu'un autre système codé sur 8 ou 10 bits. Les images avec une grande profondeur de codage seront moins sombres et comporteront plus de détails radiométriques.

La valeur de chaque pixel de l'image subit une quantification : l'intensité mesurée par le photosite est une valeur arrondie à une valeur entière sur une échelle allant du noir au blanc. La valeur réelle n'est donc jamais accessible ce qui introduit une dégradation dite de quantification [11].

### 2.6 Dégradation due à la nature de la scène.

La nature de la scène peut introduire des dégradations radiométriques ou géométriques. La qualité de l'image peut être liée à ce qu'une scène soit noyée dans un tissu urbain ou bien dans une grande étendue désertique par exemple. Le comportement fréquentiel de la caméra peu sensiblement varier par rapport à la nature même de la scène indépendamment des caractéristiques physiques du capteur [12].

### 3 Modèle de Dégradation

D'après Jalobeanu et al.[1] le modèle général qui relie une image idéale  $f$  à son interprétation discrète  $g$  et mesuré en sortie d'une caméra peut être formulé comme :

$$g(x, y, t, \lambda) = \iiint \int f(u, v, \tau, \omega) \cdot h(x, y, t, \lambda, u, v, \tau, \omega) du dv d\tau d\omega + n(x, y, t, \lambda) \quad (2.1)$$

$h$  étant la fonction caractéristique du phénomène de dégradation et  $n$  un bruit additif. Les paramètres  $x$  et  $y$  sont les composantes spatiales,  $t$  est la composante temporelle, et  $\lambda$  la composante chromatique ;  $g$  est supposé être une fonction linéaire de  $f$ .

L'équation (2.1) devient alors :

$$g(x, y) = \iint f(u, v)h(x - u, y - v)dudv + n(x, y) \quad (2.2)$$

En cas d'un capteur parfait sans bruit,  $g$  devient :

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - u, y - v)f(u, v) du dv \quad (2.3)$$

où  $\delta$  est l'opérateur de Dirac.

En prenant comme hypothèse que le système d'observation délivre une trace ponctuelle du point image, on obtient :

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(u, v) \cdot h(x, y) \cdot \delta[P_1(x, y) - u, P_2(x, y) - v] du dv + n(x, y)$$

$$= h(x, y).f(P_1(x, y).P_2(x, y)) + n(x, y) \quad (2.4)$$

$P_1$  et  $P_2$ , sont les transformations géométriques des coordonnées et sont liées à  $x$  et  $y$  par le système d'équations :

$$\begin{cases} P_1(x, y) = x \\ P_2(x, y) = y \end{cases}$$

C'est ainsi que  $g$  s'écrira comme :

$$g(x, y) = h(x, y).f(x, y) + n(x, y) \quad (2.5)$$

Une prise en compte dans le modèle de la phase de l'échantillonnage est nécessaire [10]. C'est la phase qui permet une conversion du signal image d'un support continu en un support discret à deux dimensions ( $N*N$ ) pixels [1].

Rappelons que la première dimension est A cross track assurée par la longueur du CCD, la deuxième dimension dite Along track est assurée par le mouvement du satellite dans son orbite.

La scène (i.e. l'image idéale  $f$ ), est continue, mais l'image ( $g$ ) est échantillonnée à  $N^2$  points.

La fonction  $g$  s'écrira alors sous la forme discrète suivante :

$$g_i(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(u, v)h_i(u, v) + n_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N^2 \quad (2.6)$$



### **Conclusion :**

Ce deuxième chapitre a tenté d`aborder les dégradations que subit la scène originale lors du processus de formation d`une image. Ce processus comme explicité dans le premier chapitre comporte des étapes intermédiaires, chacune apportant sa propre dégradation. La dégradation globale est la somme des dégradations individuelles. De part les systématismes qui caractérisent ces dégradations, une modélisation de certaines d`entre elles est possible.

Les modèles d`observation et de dégradation des images tiennent compte de certaines dégradations en vue de les inclure dans les pré et post traitements qui tentent de rapprocher l`image discrète enregistrée en mémoire de la scène originale qui lui est associée.

### Références

- [8] C. Latry. Restauration des images optiques satellitaires. Séminaire Restauration d'images de télédétection, CCT TSI, CNES, Toulouse, Avril 2001.
- [9] B. Rougé. Théorie de la chaîne image et restauration d'image optique à bruit nul. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, France, 1997.
- [10] A.K. Jain. Fundamentals of digital image processing. information and system sciences series. Prentice Hall, 1989.
- [11] S. Tramini, M. Antonini, M. Barlaud et G. Aubert. Prise en compte de la chaîne complète d'acquisition-compression pour le décodage optimal d'images. In GRETSI, Vannes, France, Sept. 1999.
- [12] Ansari, R.A., Mohan B. K., Noise Filtering of Remotely Sensed Images Using Iterative Thresholding Of Wavelet And Curvelet Transforms, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, November 2014

## Chapitre 3

# Estimation de la réponse impulsionnelle d'un système imageur

### Introduction

Communément la réponse impulsionnelle est définie comme étant la sortie obtenue lorsque l'entrée est une impulsion, c'est-à-dire une variation soudaine et brève du signal [13]. La réponse impulsionnelle permet la représentation d'un système en fonction de son entrée et de sa sortie.

Dans un système optique la réponse impulsionnelle peut être plus spécifiquement appelée la fonction d'étalement du point PSF pour Point Spread Function [14]. Cette grandeur constitue un phénomène majeur de la formation d'une image. Elle correspond à la sortie d'un système optique soumis à une impulsion d'entrée.

Dans un système optique linéaire et invariant par translation, la formation d'une image est définie par la PSF, il est alors possible d'exprimer l'image comme la convolution entre l'objet étudié et la PSF [15]. Un système est dit invariant par translation s'il transforme de façon identique deux points sources situés à deux endroits différents du plan focal [16].

Les concepteurs des systèmes optiques mettent un grand soin dans la réduction de la taille de la PSF dans les caméras embarquées sur satellite et les télescopes spatiaux ou terrestres. Une bonne PSF est un paramètre critique pour l'atteinte des objectifs de performances de la mission spatiale.

### 1 Fonction d'étalement de point

La PSF d'un système optique parfait basé sur des éléments circulaires doit correspondre à ce qui est connu comme la tache ou disque d'Airy qui est un diagramme dérivé de la théorie de diffraction de Fraunhofer [16]

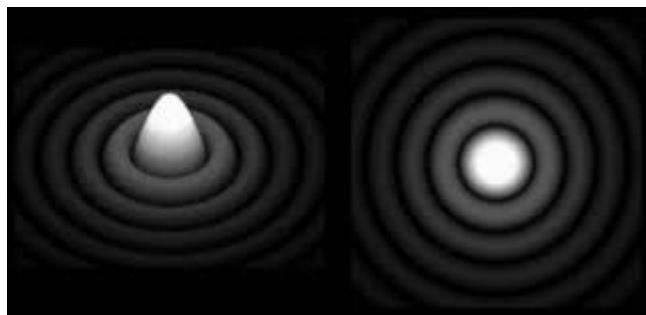


Figure 3.1 Illustration du disque d'Airy

La PSF décrira alors la réponse du système optique à une entrée ponctuelle, la réponse obtenue est représentée par un objet image qui dépasse le pixel singulier sur l'image réelle [1].

### 2 La réponse impulsionnelle d'un système imageur

Les systèmes imageurs embarqués sur satellite sont considérés linéaires et invariants[1]. C'est ainsi que la PSF associée à ces systèmes est dite isotropique en opposition à celle appelée anisotropique rencontrée dans d'autres domaines d'applications optiques comme les instruments optiques à usage médical [17]. Dans le cas isotropique le comportement de la PSF est régulier et parfaitement symétrique.

La transformée de Fourier de la PSF est appelée la fonction de transfert optique (OTF) et l'amplitude normalisée de la FTO (*Fonction de Transfert Optique*) est la MTF qui est une métrique importante de mesure de la performance d'un système optique. La MTF décrit les performances du système sur une seule dimension et est largement utilisée à cause de ses avantages pratiques. Pour les fonctions de transfert complexe, la MTF représente la partie réelle.

La PSF exprime donc les performances du système optique dans le domaine spatial pendant que la MTF le fait dans le domaine fréquentiel [13]. Les deux métriques sont liées par la transformée de Fourier telle que :

$$MTF = \mathfrak{F}(PSF) \quad (3.1)$$

$$PSF = \mathfrak{F}^{-1}(MTF) \quad (3.2)$$

## 2.1 Effet fréquentiel

Une illustration de l'effet d'une caméra satellitaire sur le contenu fréquentiel d'une scène réelle peut être faite en considérant la réponse en sortie donnée par une caméra à une entrée impulsionnelle comme le montre la figure 3.2 :

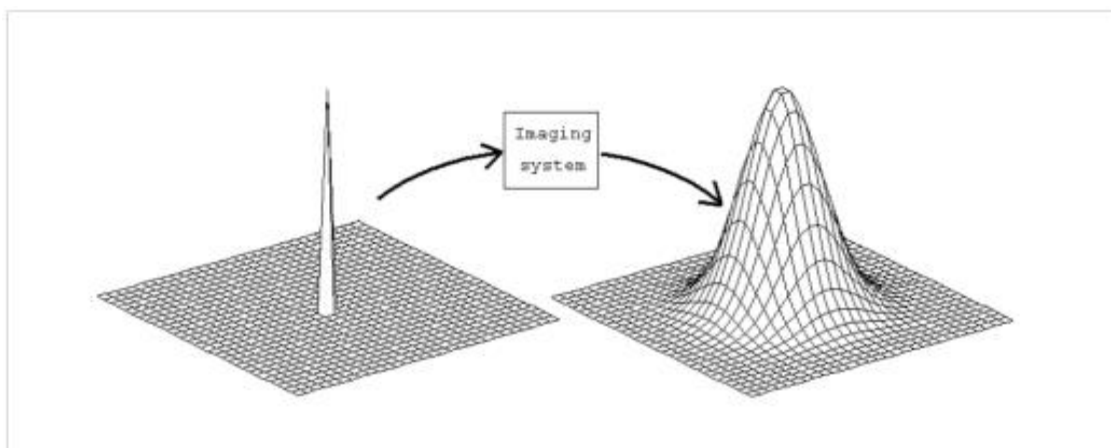


Figure 3.2 Effet d'une caméra sur une entrée impulsionnelle

La caméra a tendance à élargir le point impulsionnel lumineux qu'elle subit en entrée pour donner une tache étalée en réponse [18]. Un deuxième effet de la caméra sur la scène enregistrée est illustré par la figure 3.3.

Un signal sinusoïdal d'entrée d'amplitude constante et de fréquence croissante est appliqué au système imageur. En sortie du système, il est évident que l'amplitude de sortie diminue lorsque la fréquence augmente [13].

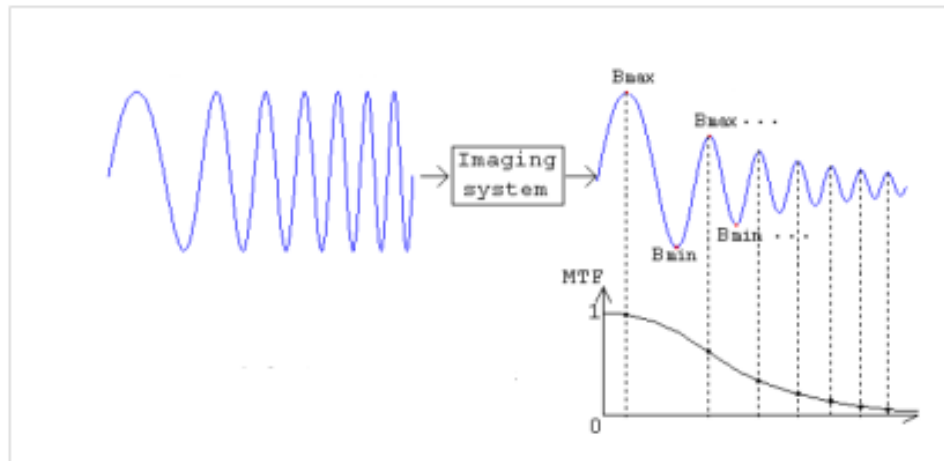


Figure 3.3 Effet d'une caméra sur entrée sinusoïdale

$$MTF = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} \quad (3.3)$$

$B_{max}$  et  $B_{min}$  sont le maximum et minimum de la sortie. L'effet de la camera est analogue à un filtre passe bas [13]. Plus la fréquence est élevée plus elle est atténuée. Etant donné que les détails fins dans une scène sont représentés par les fréquences les plus hautes, on explique aisément que sur une image, ces détails sont peu visibles par rapport aux surfaces à structures homogènes qui ne comportent pas de trame spécifique [19].

### 3 Méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle

Pendant et après le développement d'un système imageur, on peut être amené à mesurer et vérifier sa réponse impulsionnelle. Il est important de différencier une mesure de la réponse impulsionnelle du système au sol et en vol. En effet cette caractéristique est susceptible de changements dus aux différents facteurs décrits dans le chapitre 2. La nécessité de vérifier la réponse impulsionnelle en orbite s'impose afin de s'assurer que les images délivrées par le système ne s'écartent des spécifications originelles du produit et de prendre les actions correctives indispensables pour ramener cette caractéristique mesurée dans des marges acceptables en regards des applications auxquelles les images sont

destinées [19]. Par ailleurs les propriétaires des systèmes satellitaires sont constamment attentifs quant à la mesure de la réponse impulsionnelle d'un système fabriqué pour un maître d'œuvre externe d'autant plus que cette propriété est souvent contractuelle.

### 3.1 Estimation au sol

A l'issue de la fabrication de l'imageur, le constructeur effectue en laboratoire des mesures de réponse impulsionnelle en se servant de dispositifs adéquats. Pratiquement, mesurer la réponse impulsionnelle d'un système revient à mesurer sa fonction de transfert de modulation.

Pour ce faire, en laboratoire, il existe plusieurs méthodes qui peuvent être fréquentielles, discrètes ou continues [20]. Il existe des méthodes basées sur le scanning ou encore la mesure de fronts d'ondes. Les avancées récentes dans la mécanique de précision et les technologies électro-optiques ont permis l'émergence d'une grande variété de méthodes de mesure efficaces et présentant de grandes précisions.

Quatre catégories majeures de méthodes sont disponibles : la génération de fréquence, le scanning, les méthodes basées sur la vidéo et enfin les méthodes interférométriques.

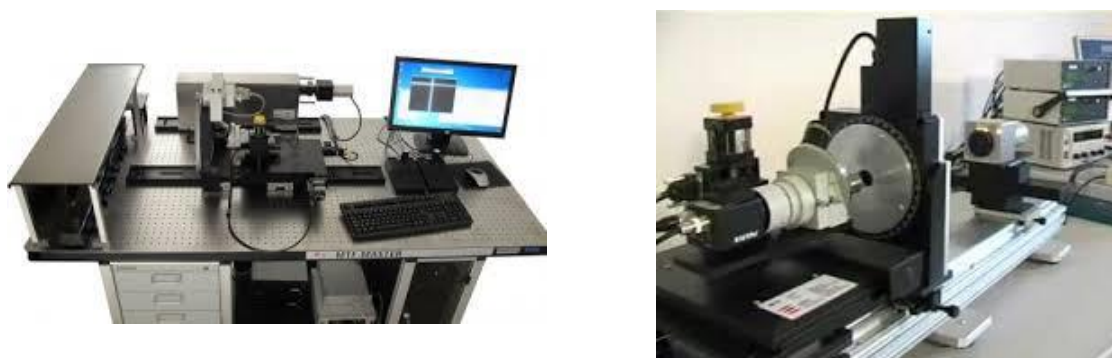


Figure 3.4 Dispositif d'estimation de la réponse impulsionnelle au sol



### 3.2 Méthode de génération de fréquence

Cette méthode consiste à utiliser un motif ou pattern qui permet de générer un ensemble de fréquences à l'entrée du système à caractériser. Ce motif est conçu de telle sorte à reproduire le champ fréquentiel d'intérêt représentatif des objets susceptibles d'être imagés par le système réel lors de son exploitation opérationnelle. L'opérateur mesure directement les contrastes de l'image. Dans cette méthode, on fait généralement appel à des mesures discrètes. Un motif sera utilisé pour générer en sortie du système des graphes de MTF.

Selon les applications et la procédure de traitement qui sera utilisée le motif peut prendre plusieurs formes qui peuvent être linéaires ou encore angulaires. Le pattern USAF1951, illustré par la figure 3.5, constitue une référence largement utilisée.

L'avantage évident de la méthode de génération de fréquences est que la sortie est mesurée directement. Son inconvénient majeur est que ce genre de méthodes nécessite la manipulation simultanée du motif et du détecteur appartenant au système mesuré, ce qui limite la flexibilité de la manipulation.

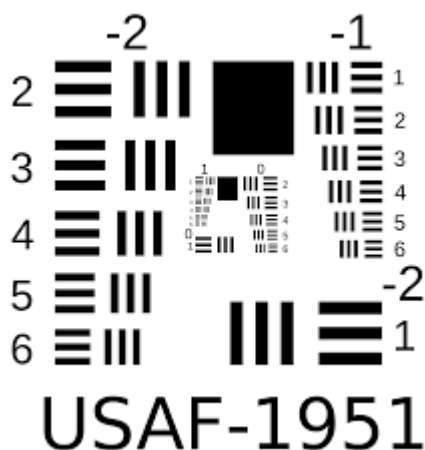


Figure 3.5 Le pattern USAF 1951 utilisé par la méthode génération de fréquence

### 3.3 Méthode Scan

Basée sur le principe de la théorie des systèmes linéaires, elle est la plus répandue dans les applications commerciales et consiste à calculer la MTF à partir de l'information obtenue en sortie du système suite à son excitation par une source connue et qui est du type trou de serrure 'pinhole'.

Étant donné que l'information en sortie n'est autre qu'un *blur*, ses caractéristiques permettent de calculer la MTF en tenant en compte que l'entrée est une source ponctuelle infinitésimale. Le profil spatial de l'image en sortie sera respectivement la 'Line Spread Function' LSF ou PSF si le scan est respectivement monodimensionnel ou bidimensionnel.

Les inconvénients de cette méthode peuvent être : une correction indispensable du biais systématique de la MTF à cause du fait que la source n'est pas réellement infinitésimale ; Une durée relativement notable du scan et enfin le réglage de l'échantillonnage des mesures en regard de la longueur du détecteur.

### 3.4 Méthode Vidéo

Étant adossée aux mêmes bases théoriques que la méthode Scan, la méthode Vidéo consiste à placer une barre solide dans le plan focal du système à mesurer. Dans le cas d'une source pinhole, la PSF peut être directement obtenue à partir de la forme numérique du signal Vidéo à la sortie.

L'avantage des mesures de la réponse impulsionnelle utilisant la méthode Vidéo réside dans le temps relativement court durant lequel ces mesures peuvent être réalisées. La MTF peut être mise à jour rapidement après de nouvelles manipulations de la barre dans le plan focale. Cette méthode est particulièrement adéquate lors d'un réglage et d'un ajustement précis de la composante optique d'un système imageur. Un opérateur peut en effet modifier l'assemblage du système et découvrir de suite les perturbations induites sur la MTF du système.

L'inconvénient de la méthode est lié à l'obligation de maîtrise de la précision des dimensions de la barre solide utilisée dans la mesure, combinée au fait que les dimensions

des photosites des détecteurs sont finies. Enfin cette méthode est contrainte par un intervalle pratique de fréquences détectables limité entre 30 et 80  $lp/mm$ .

### 3.5 Méthode interférométrique

Cette méthode comporte deux versions pour mesurer la MTF d'un système. Une auto-corrélation de la fonction pupille du système à mesurer ou bien une analyse de la PSF obtenue par la transformée de Fourier du front d'onde de la pupille. Cette méthode est particulièrement adéquate pour les systèmes qui se prêtent à un test sous interféromètre et qui sont exempts d'aberrations chromatiques et enfin dont le front d'onde ne présente pas de variations significatives sur les fréquences objets de la mesure.

### 4 Cas d'une caméra satellitaire :

La procédure de mesure généralement admise consiste à déplacer, à une vitesse constante, un motif cible dans le plan de focalisation d'un collimateur mis devant la caméra. La camera acquière une image du motif. Une mesure de contraste est ensuite effectuée sur les pixels d'intérêt. Généralement pour un détecteur de 10000 pixels, des échantillons de mesure sont effectués tous les 500 pixels.

Les valeurs de la MTF à la fréquence de Nycquist sont ensuite calculées à partir des contrastes mesurés par le dispositif. Le formalisme suivant est utilisé :

$$MTF = \frac{\pi}{4} xFTC \quad (3.4)$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de régler le plan focal des instruments optiques satellitaires.

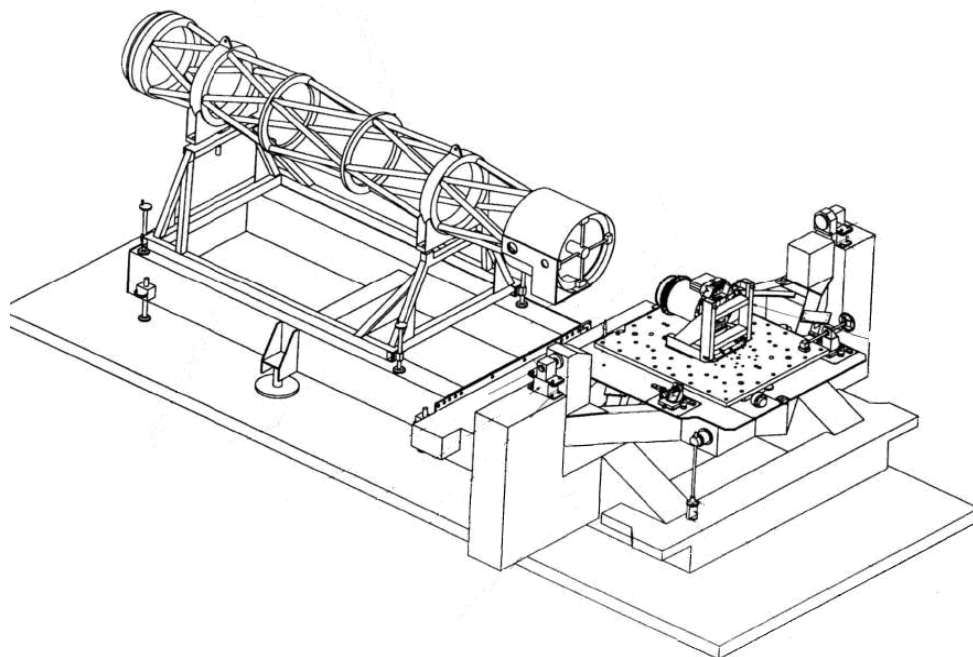


Figure 3.6 Dispositif de mesure de la réponse impulsionnelle d'une caméra satellite

## 5 Estimation en vol

Théoriquement la PSF peut être estimée par l'acquisition de l'image d'un point lumineux infiniment localisé ayant une amplitude infinie. L'image satellitaire obtenue à partir de ce point sera une estimation directe de la réponse impulsionnelle du système satellitaire [13]. Néanmoins en prenant en compte que le détecteur objet de l'étude appartient à une charge utile ou camera embarquées sur un satellite orbitant à plusieurs centaines de kilomètres de la surface de la Terre avec une vitesse typique de 7 km/s, cette solution devient plus complexe à implémenter.

Plusieurs approches ont été utilisées par plusieurs auteurs en vue d'estimer la réponse impulsion des satellites optiques. Léger et al [21] utilisèrent des lampes à xénon comme sources ponctuelles disposées uniformément sur un champ herbeux afin de reproduire l'échantillonnage adéquat qui permet de retrouver les fréquences d'intérêt pour mesurer les réponses impulsionnelles des caméras des satellites SPOT.

Helder et al. [14] placèrent des miroirs convexes et équidistants formant des lignes inclinées de 10° par rapport à la direction Nord-Sud afin de réaliser une bonne estimation de la réponse impulsionnelle du satellite Quickbird-2.

Par ailleurs, Storey [18] a exploité le pont de Lake Pontchartrain Causeway (Louisiane, USA) comme une entrée rectangulaire (Pulse Method) pour estimer la MTF du détecteur du satellite Landsat 7 ETM+.

### 5.1 Méthode de l'Impulsion

La réponse impulsionnelle d'un système imageur peut être évaluée par la méthode d'impulsion. Un algorithme dédié a été utilisé respectivement en 2002 et 2004 pour une estimation de la MTF des satellites Ikonos et Quickbird [14-22]

Cette méthode consiste à utiliser une impulsion d'entrée pour obtenir une réponse du système imageur. Une entrée rectangulaire peut être utilisée. Cette méthode présente quelques contraintes et requière des précautions comme l'impact de la largeur de l'impulsion d'entrée qui peut aller de celle des lignes d'un terrain d'aéroport aux dimensions d'une structure artificielle comme une bâche [13].

Relativement à ces impulsions larges, un effet de zéro crossing doit être pris en compte dans les calculs. En effet, la MTF du système sera calculée en divisant la sortie sur l'entrée du système imageur.

$$MTF = \frac{Output}{Input} \quad (3.5)$$

La transformée de Fourier est appliquée à l'entrée et à la sortie. La MTF peut être calculée en divisant la sortie par l'entrée.

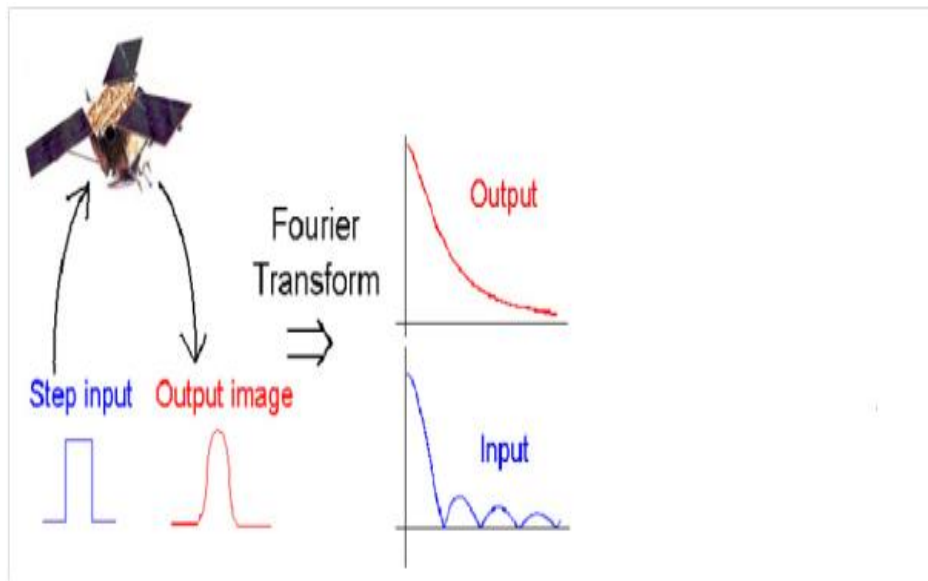


Figure 3.7 Principe de la méthode de l'impulsion

Cette méthode a été aussi utilisée dans la mesure de la MTF du satellite Landsat TM (Thematic Mapper) [18]. La cible était un pont sur la baie de San Francisco. Il est évident que la méthode peut être utilisée pour des satellites de résolutions différentes. Les contraintes de son exploitation résident d'une part dans l'ajustement et l'adéquation entre les dimensions de la cible faisant office d'entrée impulsionnelle et le GSD du satellite et d'autre part dans l'orientation de la cible impulsionnelle par rapport à la trace au sol du satellite. En effet, une orientation adéquate permet de reconstituer à partir de l'image enregistrée toutes les fréquences capturées par le système à un niveau sub-pixellique. D'autant plus qu'une contrainte supplémentaire est introduite par la différence entre les GSD dans les modalités panchromatique et multispectrale du même satellite. Un compromis en terme d'orientation doit être trouvé afin d'exploiter la même acquisition pour les deux types de modalité [13].

## 5.2 Procédure opérationnelle

Une bâche est disposée sur un fond neutre comme du gazon et alignée par rapport à la direction Nord-Sud avec un angle adéquat. Les dimensions de la bâche et l'angle d'alignement sont déterminés à partir des dimensions du GSD du satellite et de sa trace au

sol. Choi et al [13] ont utilisé une bâche de taille 9m x 60m pour estimer la réponse impulsionnelle de la modalité panchromatique du satellite Ikonos.

Afin d'obtenir une reconstitution optimale des fréquences en sortie de la camera, la cible utilisée, la bâche dans ce cas de figure, doit être orientée par rapport au nord géographique. Ce qui permet aussi une répartition uniforme de tous les pixels de l'image enregistrée. Ryan et al [15] ont démontré l'importance de l'orientation de la cible par rapport au Nord en la mettant en corrélation avec les valeurs de la fonction d'étalement de bord ou Edge Spread Function ESF. Enfin, des caractérisations de réflectivité et de contraste de la cible doivent être effectuées et doivent refléter fidèlement les caractéristiques spectrales de la cible utilisée. La cible devant être considérée dans son environnement immédiat : asphalté, herbe ou autre [13].



Figure 3.8 Exemple de cible artificielle au sol utilisée par la méthode d'impulsion

Comme le montre la figure 3.9, si on considère une cible rectangulaire, les lignes pointillées correspondent aux comptes numériques DN des pixels qui participent à la construction de la ESF. Plus il y a de pixels plus la ESF est correctement estimée. On parle d'une estimation à un niveau sub-pixellique. Ceci démontre l'importance de l'orientation oblique de la bâche tel qu'exploitée par Choi et al et par Ryan et al [15].

Ces auteurs ont déterminé que pour une cible de 8mx60, l'angle d'orientation optimal doit suivre la relation :

$$\tan^{-1}\left(\frac{\text{deux-pixel-largeur}}{\text{longueur de la bâche}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{8}{60}\right) = 7.59 \quad (3.6)$$

Cette relation est aisément généralisable pour les cibles rectangulaires.

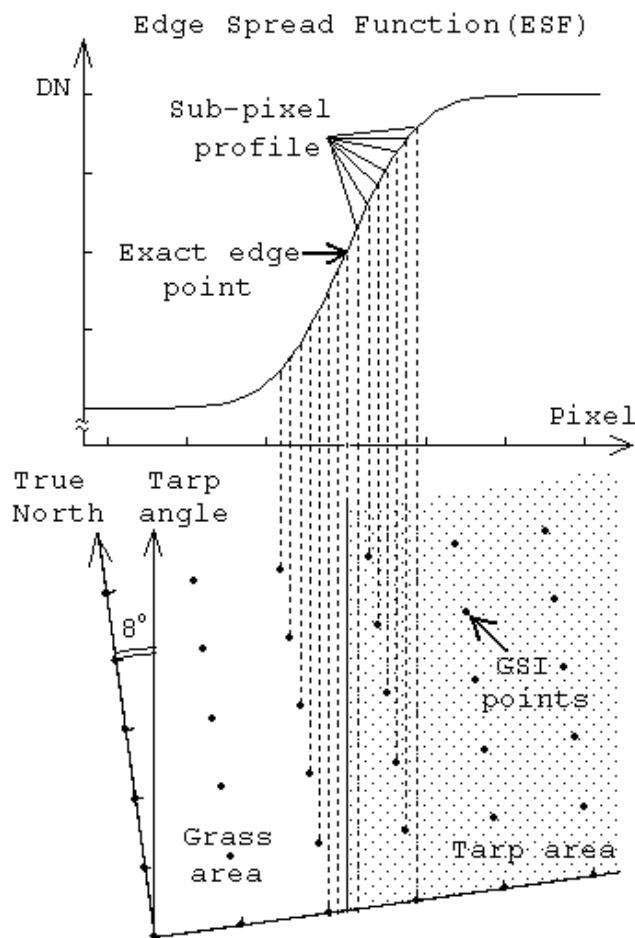


Figure 3.9 Principe de reconstitution de la réponse impulsionnelle à n niveaux sub-pixelliques

Choi et al. [13] ont démontré pour la méthode d'impulsion que la largeur de la cible impacte la reconstitution de la MTF à cause du phénomène de zéro crossing, passage des points zéro dans la fonction sinus cardinal. La figure 3.10 montre la fréquence des valeurs significatives de la MTF à Nycquist en fonction des dimensions de la cible au sol.



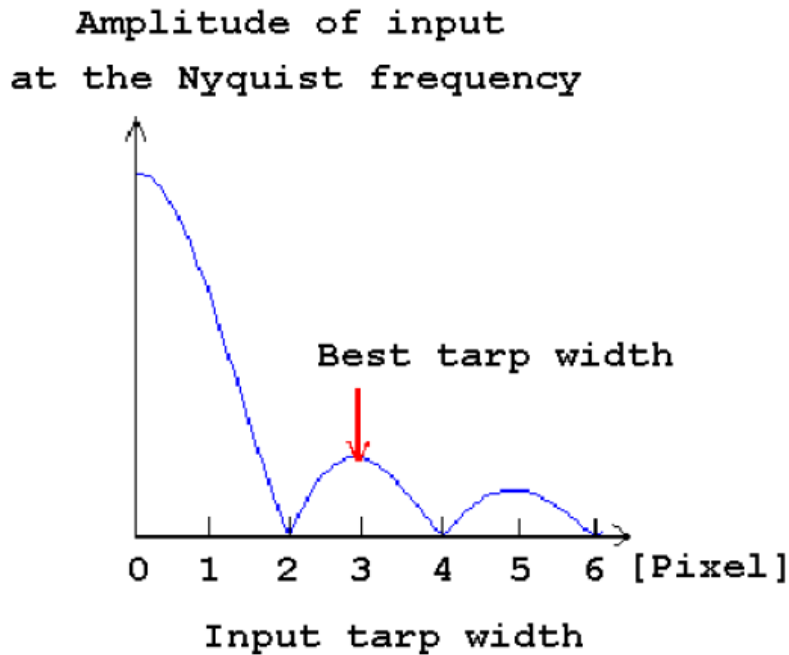


Figure 3.10 Effet de la taille de la cible sur les valeurs de la MTF

C'est ainsi qu'il devient indispensable de réaliser un compromis entre une petite cible qui n'induit pas de zéro crossing mais engendre un faible signal et donc une sous estimation de la MTF, Le cas échéant étant une cible assez étendue avec un bon signal d'entrée mais avec une fréquence de Nyquist qui se confond avec des points de zéro crossing [13]. Comme le principe de la méthode consiste à diviser la sortie sur l'entrée du système, la MTF à la fréquence de Nyquist risque de ne pas être observée.

Pour observer les valeurs de la MTF en particulier à la fréquence de Nyquist, une bache d'une étendue de trois pixels est la plus adéquate. Même si une entrée de bache de trois pixels de large contient un passage de point zéro à la position des deux tiers entre le zéro et la fréquence de Nyquist, la largeur est assez grande pour que la cible soit bien définie dans l'image, et le signal de sortie est assez fort pour que les effets du bruit soient réduits au minimum.

### 5.3 Méthode de bord de plage

Pour un satellite en orbite, l'application d'une entrée onde sinusoïdale est impossible. Pour contourner cette limitation, *des entrées bord de couteau* et entrées d'impulsion ont été utilisées [17]. Un bord couteau excite un système imageur à toutes les fréquences spatiales. Le profil d'un bord dans une image est appelée la fonction de propagation du contour ESF (Edge Spread Function).

L'algorithme de cette méthode commence par déterminer les endroits du bord à une précision sous pixelique [15]. Il procède à un alignement des valeurs DN et procède à la projection des DN sur le profil du bord. Ensuite, les données sont interpolées et moyennées pour obtenir une fonction de diffusion de bord (ESF), la ESF est ensuite différenciée pour obtenir la PSF et ensuite la MTF qui est sa partie réelle [13].

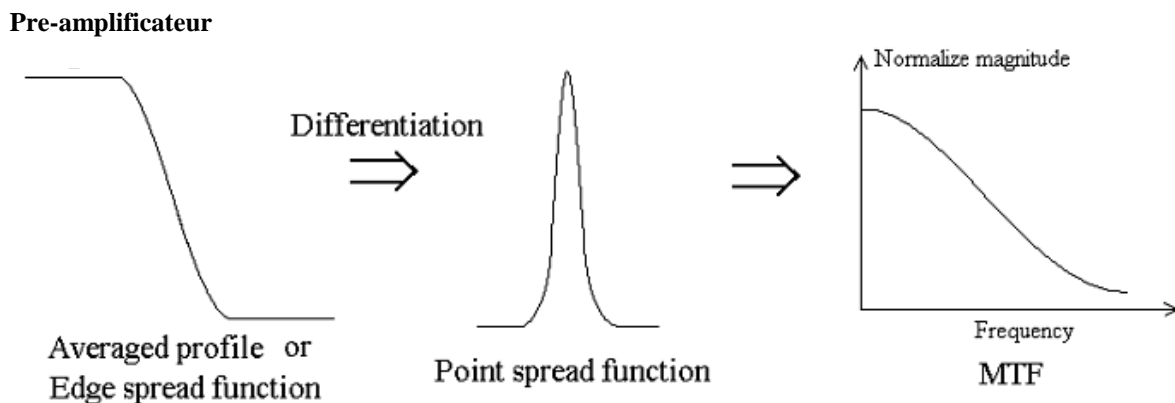


Figure 3.11 Principe de la méthode des bords de plage

### 5.4 Cibles utilisées :

En plus d'utiliser des cibles comme des bâches, d'autres zones uniformes adjacentes séparées par une ligne droite avec des différences de niveaux de gris DN adéquates ont été exploitées. Des parkings ont été sélectionnés après analyse de l'image de sortie [13]. Ces parkings ont une zone claire uniforme en béton avec une zone gazonnée uniforme sombre comme le montre la figure 3.13.



Figure 3.12 Exemples de parkings utilisés comme cible par la méthode bord de pages

Un autre type de cibles utilisées pour mesurer la MTF par la même méthode consiste en des axes blancs sur des pistes d'asphalte noir appartenant à des pistes d'aéroports. Ces structures sont alignées de quelques degrés par rapport au Nord [23].



Figure 3.13 Exemples de piste d'aéroports utilisés comme cibles par la méthode bord de pages

### 5.5 Cibles artificielles dédiées

En parallèle aux cibles *opportunistes* discutées ci-dessus, d'autres cibles artificielles aménagées dans le but de mesurer la réponse impulsionnelle peuvent être exploitées par les opérateurs des satellites optiques [15]. En effet, des structures artificielles sous forme de carrés noirs et blancs ont été peintes sur une piste de béton de l'aéroport de Big Spring au Texas, comme le montre la figure 3.14. Le motif est élaboré pour obtenir un maximum de zones uniformes claires et sombres. Sur la base de cette géométrie, la MTF a été mesurée dans les deux directions A-cross track et A-long track.

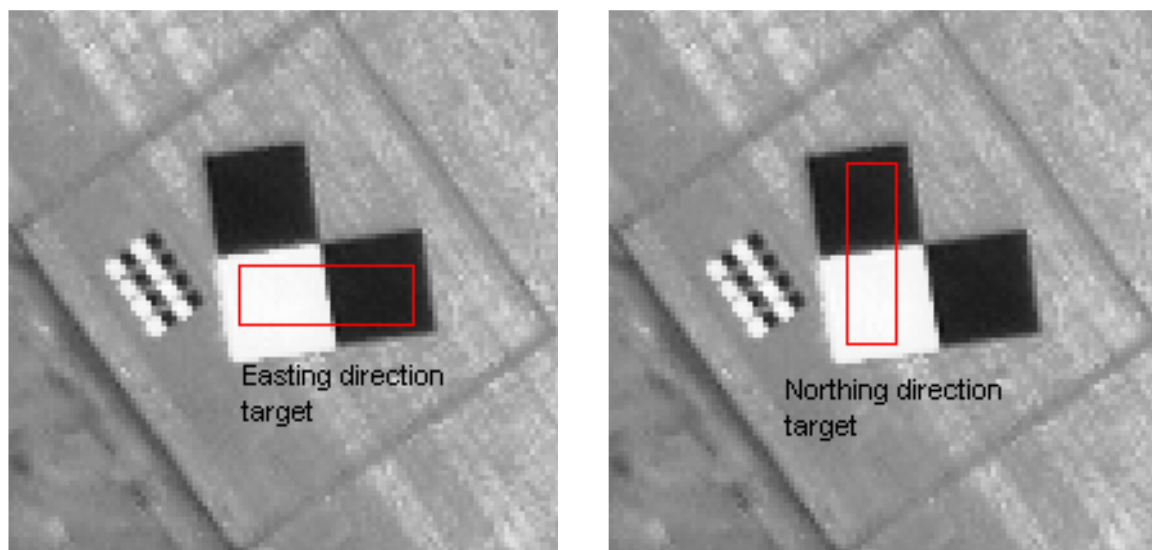


Figure 3.14 Exemples de cibles artificielles au sol dédiées aux mesures de la MTF

### Conclusion

Fondamentalement la méthode d'impulsion est presque la même que la méthode des bords de plages, sauf que l'entrée du système d'imagerie est une impulsion. Ces deux méthodes constituent néanmoins deux méthodes d'implémentation qui gardent chacune des utilités opérationnelles spécifiques indéniables.

Si la largeur de l'impulsion est petite, la réponse pourrait être considérée comme une réponse d'impulsion, ce qui est le cas des lignes centrales des pistes des aéroports. Si la largeur de l'impulsion est assez grande, la méthode du bord pourrait être appliquée afin d'éviter de traiter les points zéro crossing entre l'origine et la fréquence de Nyquist.

### Référence

- [13] Choi, T., D.L.Helder, Choice Generi sensor modelling for modulation transfert function (MTF) estimation; Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing", Sioux Falls, South Dakota, 2005
- [14] Helder, D., Choi, J. On-orbit Modulation Transfer Function (MTF) measurements on QuickBird. In Proceedings of the 2003 High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop, NASA/NIMA/USGS Joint Agency Commercial Imagery Evaluation Team: Reston, VA, USA, 2003.
- [15] Ryan, R. Braxton Baldrige, Robert A. Schowengerdt, Taeyoung Choid, Dennis L. Helder, Slawomir Blonskia. IKONOS spatial resolution and image interpretability characterization, Elsevier, Remote Sensing of Environment 2003
- [16] Luxen, M, Förstner, W. Characterizing image quality: blind estimation of the point spread function from a single image", In Proceedings of the PCV'02 Symposium. 2002.
- [17] Chawla, A. Roehrig, H. Rodriguez, J. Fan, J. Determining the MTF of Medical Imaging Displays Using Edge Techniques, J Digit Imaging. Dec 2005; 18(4): 296–310
- [18] Storey, J.C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation, Proceedings- SPIE the international society for optical engineering; 0277-786X, 2001
- [19] Choi, T., D.L.Helder, Choice Generi sensor modelling for modulation transfert function (MTF) estimation; Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing", Sioux Falls, South Dakota, 2005
- [20] Estriebeau M., Magnan P, Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted edge methodology Proceeding of Society of Phto-Optical Instrumentation Engineers - Volume 5251 - Detectors and Associated Signal Processing, 2004
- [21] Leger, D., Duffaut, J., Robinet, F.,. MTF measurement using spotlight. IGARSS '94, Pasadena, California, USA. 1994
- [22] Bowen HS, Dial G, IKONOS calculation of MTF using stellar images, in Proceedings of the High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop [power point slides], Reston, VA, 25-27 Mar 2002
- [23] Thomas C., Blanc P., Ranchin T., Wald L. Geometric quality of images: estimation of the MTF In proceedings 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005

## Chapitre 4

# Approche neuronale pour l'estimation de la réponse impulsionnelle

### Introduction

Le cadre général de notre approche impose la recherche de solutions univariantes pour l'estimation de la réponse impulsionnelle sans le recours à des images de référence. Les réseaux de neurones peuvent être calibrés ou entraînés à l'aide d'exemples représentatifs des dégradations typiques (fonction de flou ou PSF).

L'approche neuronale dans l'estimation de la réponse impulsionnelle peut constituer une piste d'investigation sérieuse [24]. En effet les caractéristiques intrinsèques de la méthode permettent d'une part de dissocier l'image du flou sans contraintes ni sur l'image ni sur le flou [24]. D'autre part, de fournir une estimation très précise du profil de la MTF par l'exploitation de la description potentiellement disponible de la PSF du système et des images issues du même système et ceci dans le cadre général d'une déconvolution classique [1].

L'avantage de cette méthode est non seulement d'être en mesure d'apprendre au réseau de neurones artificiel RNA plusieurs comportements différents, sans modèle explicite de vision, mais aussi d'apporter un gain en temps de calcul une fois la phase d'apprentissage réalisée [25].



### 1 Description de l'approche RNA

La faisabilité de l'approche a été démontrée par Jung et al. [24]. Selon les résultats de recherches disponibles dans la littérature, nous soulignons les propriétés suivantes de la méthode basée sur les RNA: L'approche neuronale pour l'estimation de la MTF ou de la PSF a été introduite et lancée au début des années 2000. La littérature autour de cette approche n'est pas très dense. L'approche reste encore vierge et comporte plusieurs aspects non encore explorés.

Jung & Léger [24] ont développé une détection d'artefacts sur les images de SPOT-5 en utilisant un réseau de neurones obtenu à partir d'une base de données d'images SPOT-5 contenant des artefacts (défauts) représentatifs de cette chaîne d'acquisition.

Le nombre d'images nécessaires à l'apprentissage dépend du nombre de paramètres d'artefacts à modéliser. Une étape préalable de caractérisation est réalisée par l'exploitation des défauts divers qui existe dans l'image. Un nombre élevé de paramètres est à proscrire du fait qu'il conduit à un RNA de grande taille [24].

Un compromis est donc fait pour représenter le plus grand nombre de défauts significatifs avec une composition minimale en termes de neurones et des couches dans la conception du RNA [25].

En pratique, les réseaux de neurones opèrent et traitent par injection d'un vecteur caractéristique à l'entrée composée de paramètres qui reflètent mieux le système et ses défauts potentiels.

L'extraction des paramètres nécessite une phase préalable de prétraitement sur l'image. Certains outils mathématiques tels que la transformée de Fourier discrète, les moments et les statistiques de l'image sont exploités pour décrire les paramètres choisis afin de représenter les phénomènes ou artefacts objet d'une mise en valeur ou une restauration.

Jung & Léger [24] ont utilisé une vingtaine de paramètres représentatifs comme par exemple la corrélation de différentes distances entre un pixel et son voisinage.

Cependant, Delvit et al [25] ont utilisé dans la construction de leur vecteur caractéristique d'entrée du RNA les moments de l'image, et un paramètre  $V$ , tiré de la FFT, qui décrit les fréquences de l'image et qui a une grande sensibilité aux variations des valeurs de la MTF en supposant que  $V(f)$  est une information en fréquence directement liée à l'image telle que :

$$V(f) = \left| \sum_v |S(f, v)|; \sum_u |S(f, u)| \right| \quad (4.1)$$

Afin de généraliser l'apprentissage du réseau de neurones, nous utilisons un vecteur caractéristique spécifique à notre problématique en tenant compte à la fois des informations liées à la structure du paysage de l'image et des informations relatives à la MTF de l'image. Nous cherchons à séparer au mieux ces deux types d'informations. Il y'a lieu de rappeler qu'il y'a de forts liens entre la structure du paysage et de la MTF qui lui est associée [26].

Notre objectif de terme de contribution dans cette démarche est de tenter d'améliorer la performance de l'estimation qui est actuellement de 10% d'erreur par rapport à la valeur mesurée dans la MTF [25].

L'objectif principal peut être réduit à se focaliser sur l'amélioration du vecteur caractéristique injecté à l'entrée du RNA. Les paramètres suivants sont pris en compte: amélioration du paramètre de variogramme dans la modélisation du paysage (structure) des images ; amélioration de la technique de réduction des données d'une manière globale qui renvoie à affiner le vecteur caractéristique en investiguant la possibilité d'appliquer les paramètres à partir d'un prétraitement, utilisation de la technique d'Analyse de la composante principale PCA par exemple sur l'image ; prise en compte du paramètre qui décrit le flou de l'image, le Blur ou la netteté étant directement lié avec la MTF à l'image ; amélioration de la modélisation du vecteur de la MTF. Utilisation d'images optiques réelles en lieu et place des images synthétiques utilisées par plusieurs auteurs, Jung et al [24] ayant travaillé avec des données SPOT-5 simulées ou des images non satellitaires ;

Réalisation de plusieurs essais en modifiant l'architecture du réseau neuronal ainsi que sa composition: le nombre de couches et les neurones cachés ; aller au-delà de l'estimation de la MTF pour réaliser une déconvolution en confrontant les résultats obtenus à des évaluations métriques et non visuelles.

### 2 Implémentation de la méthode RNA

Afin de passer sous les 10% de précision dans l'estimation de la MTF nous avons essayé de travailler sur l'amélioration de la représentation du modèle de l'image dans ses deux aspects significatifs que sont le paysage et la MTF, ceci afin de rendre le modèle le plus représentatif possible de la réalité, en paire avec l'utilisation d'un vecteur caractéristique représentatif amélioré de plusieurs paramètres tel que le flou.

Le but recherché dans la réduction des caractéristiques significatives de l'image et les paramètres mathématiques qui leur sont associés est de permettre au RNA de différencier les informations relatives à la structure de l'image de celles liées au noyau de convolution ou MTF de l'image pour aboutir à un problème classique de déconvolution

Par souci de réalisme nous avons opté pour une estimation de la MTF sur des images bruitées. Cela signifie que les différents niveaux de bruit considérés doivent être présents à l'entrée du RNA pour apprentissage. Pour cette estimation, nous utilisons des images de haute résolution optique en modalité panchromatique qui inclue un panel représentatif des différentes dégradations.

Dans ce travail, nous avons utilisé une base de données image pour l'apprentissage, constituée d'un certain nombre d'images assez représentatives de l'ensemble des caractéristiques générales de l'image optique haute résolution objet de notre étude.

Les images de la base de données contiennent différents niveaux de dégradations et sont caractérisées par différents niveaux de SNR.

Il va sans dire que les images destinées à l'apprentissage du RNA doivent présenter les dégradations caractéristiques qui peuvent être utilisées pour évaluer la qualité de l'image.

Une hypothèse de travail importante constitue une autre contrainte et consiste à ce que les caractéristiques pertinentes des images destinées à l'apprentissage du RNA doivent être stables afin de permettre l'élaboration d'un modèle de dégradation valable pour le système imageur et qui servira à l'élaboration de solutions fiables de restauration applicables à des images quelconques issues du même système imageur.

Etant donné le nombre relativement conséquent de ces images et par soucis de reproductibilité des traitements, nous avons opté pour une extraction automatique des caractéristiques pertinentes décrivant les dégradations liées au noyau de la réponse impulsionnelle. Ce sont ces grandeurs qui alimenteront le vecteur caractéristique.

Ce type de modèle non-linéaire, permet l'apprentissage d'une fonction très complexe en raison de plusieurs paramétrages intrinsèques, pour une mise en œuvre simple.

Le calibrage des paramètres du RNA se fait sur un grand nombre d'exemples connus, plusieurs images dont la qualité était préalablement évaluée dans le cas de notre étude. Les différents cas de dégradation constituent la base de l'apprentissage du RNA [25]. Ils sont choisis de telle manière à obtenir un échantillonnage représentatif de tous les types d'images potentiellement rencontrées : structurées ou uniformes, de paysages ou de villes.

Enfin, le RNA est utilisé d'une façon autonome pour extrapoler la qualité d'une image inconnue en se basant sur l'apprentissage réalisé

### **3 Validation des résultats**

Aux fins de validation des résultats nous avons opté pour une méthode de détection de bord qui mesure directement sur une image la MTF en choisissant avec soin un bord ayant certaines caractéristiques. Cette méthode est traitée en détails dans le chapitre 5. L'objectif est de comparer et valider de manière indépendante les résultats obtenus par cette méthode sur les mêmes images avec les résultats obtenus par l'approche basée sur le RNA décrite ci-dessus. Cette méthode est applicable à des images satellite haute résolution et permet de ne pas se limiter à un type particulier d'image [27].

Pour l'étape de validation nous consoliderons également les résultats par la comparaison avec la performance (MTF) publiées dans la littérature et aussi les informations fournies par les opérateurs de satellites. (Spot Image, etc.)

### 3.1 Construction du Vecteur Caractéristique

Dans la construction du vecteur caractéristique, nous avons choisi les paramètres les plus significatifs représentant les caractéristiques de la netteté de l'image et de la qualité géométrique en général. Le concept de la netteté de l'image représente la manière dont les fréquences sont transmises par le système imageur et englobe ainsi le profil de la fonction de transfert de modulation. Afin de calculer les paramètres constitutifs du vecteur caractéristique, une étape de prétraitement est appliquée sur les images de la base de données. A l'aide de routines dédiées, les images sont découpées en imagerie de (800x800) pixels qui alimentent la base de données d'apprentissage.

### 3.2 Statistiques d'ordre 1 des images

Ainsi, nous avons exploité la moyenne de l'image comme un élément du vecteur caractéristique. Comme montré par dans la figure 4.1, la moyenne varie selon les images considérées.

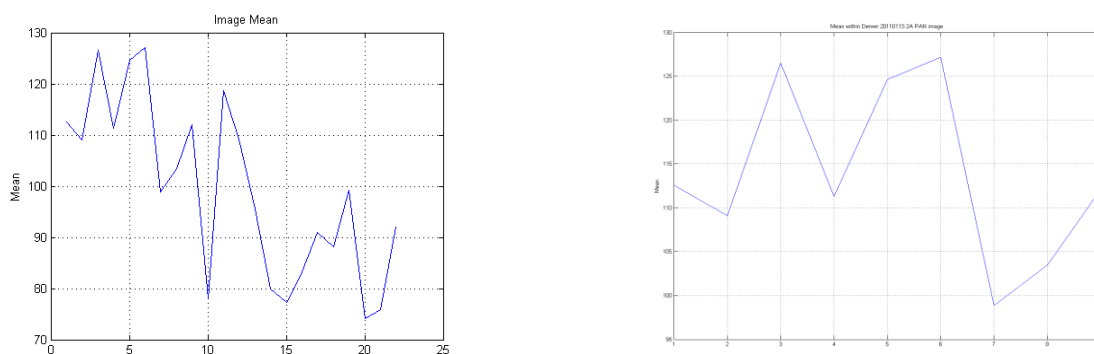


Figure 4.1 Paramètre de la moyenne des images utilisées dans le vecteur caractéristique

Aussi, la variance de l'image a été également utilisée comme élément du vecteur caractéristique comme illustré dans la figure 4.2 représentant la variance d'un ensemble d'images

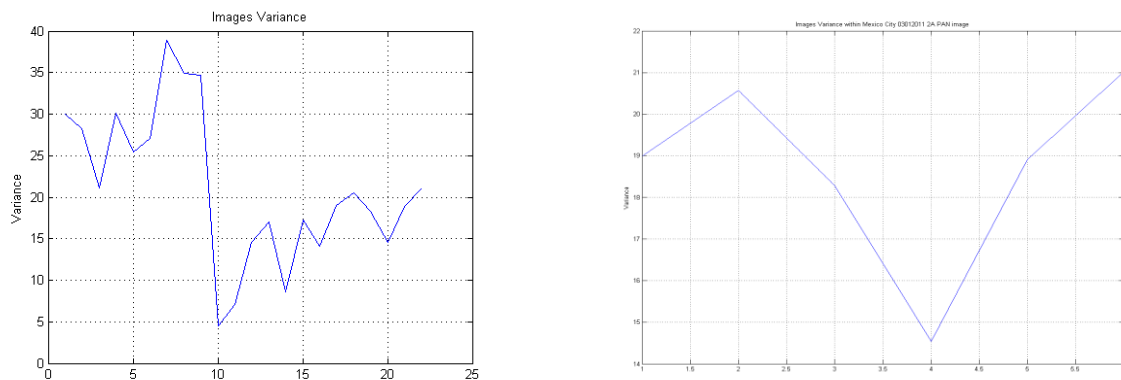


Figure 4.2 Paramètre de la variance des images utilisées dans le vecteur caractéristique

Les paramètres Skewness et Kurtosis représentant respectivement l'asymétrie et l'aplatissement de l'image ont été également utilisés pour alimenter le vecteur caractéristique

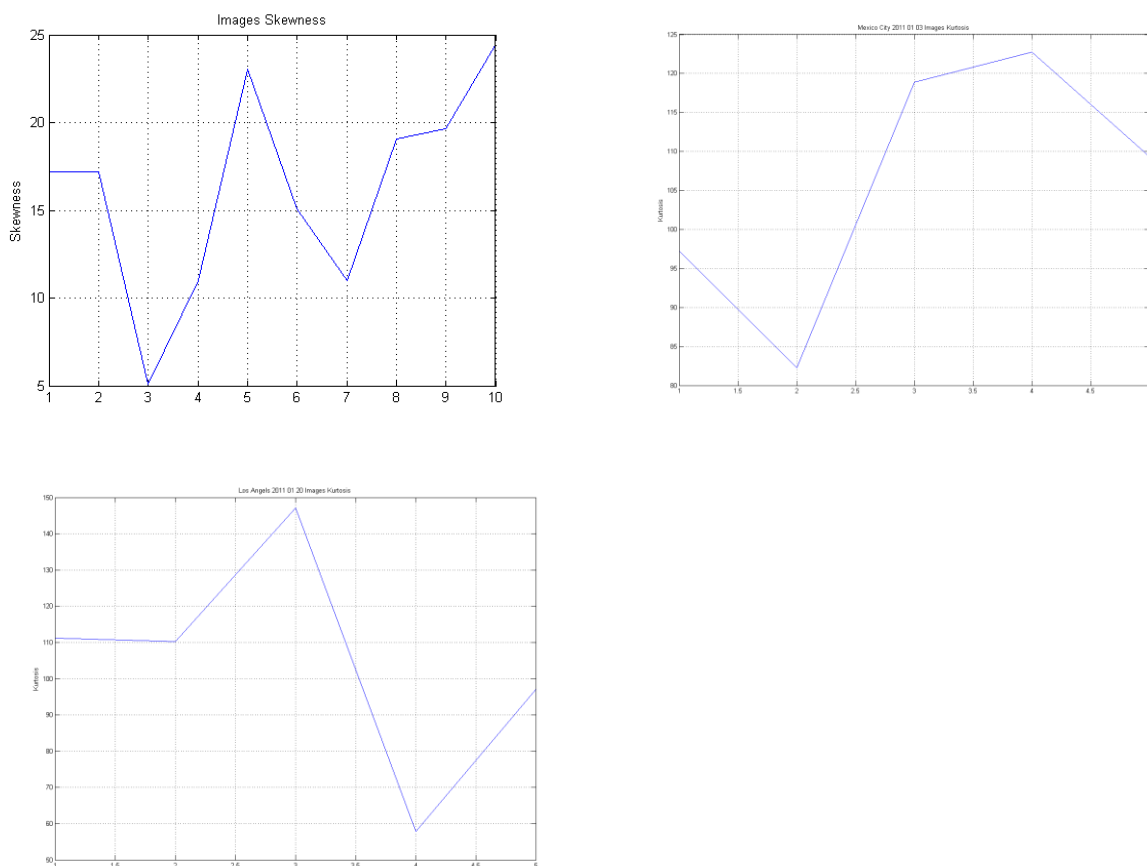


Figure 4.3 Paramètres asymétrie et aplatissement des images utilisées dans le vecteur caractéristique

Nous avons jugé utile d'exploiter la netteté de l'image comme un élément du vecteur caractéristique. La netteté varie selon les images acquises y compris avec le même détecteur pendant une acquisition unique. La figure 4.4 montre la variation de la netteté d'un ensemble d'images.



Figure 4.4 Paramètres de netteté des images utilisées dans le vecteur caractéristique

### 3.3 Netteté des images

Afin d'obtenir une description de la netteté des images de la base de données, nous nous sommes inspirés du travail de Crête et al. [28]. L'idée clef de l'estimation du flou consiste à introduire un fort flou sur une image à l'aide d'un puissant filtre passe bas et d'analyser ensuite le comportement du voisinage d'un pixel. La différence entre l'image originale et l'image fortement floutée est ensuite mesurée. Ainsi, une forte variation entre l'originale et l'image floue signifie que l'image originale était nette alors qu'une variation légère entre l'originale et l'image floue signifie que l'image originale était déjà floue. Ainsi nous obtenons indirectement par déduction une estimation quantifiable de la netteté de l'image originale.

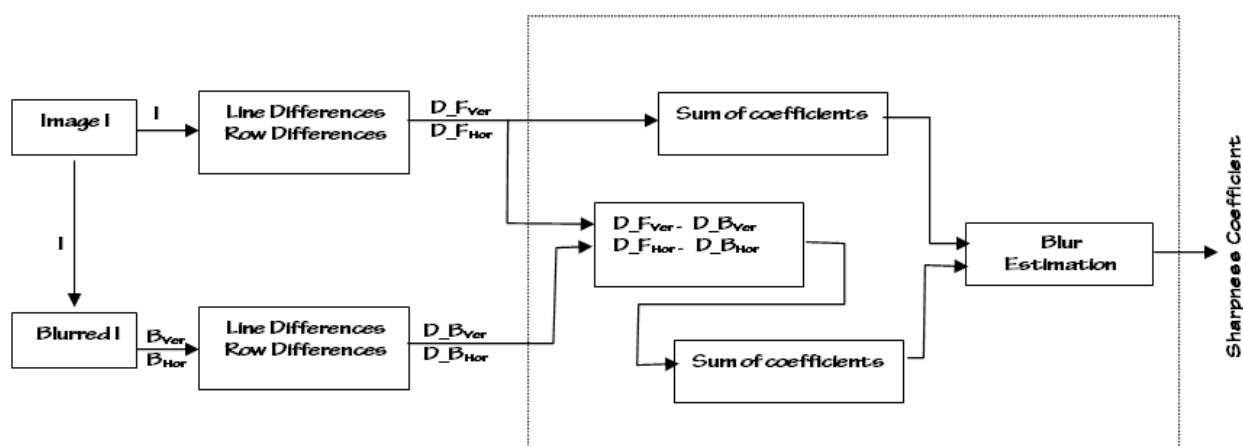


Figure 4.5 Principe de la méthode d'estimation de la netteté des images

Les série de doublet images illustrées par les figures de 4.6 à 4.8 montrent les résultats d'estimation du coefficient de netteté (sharpness) sur un sous ensemble d'images de la base de données d'apprentissage.

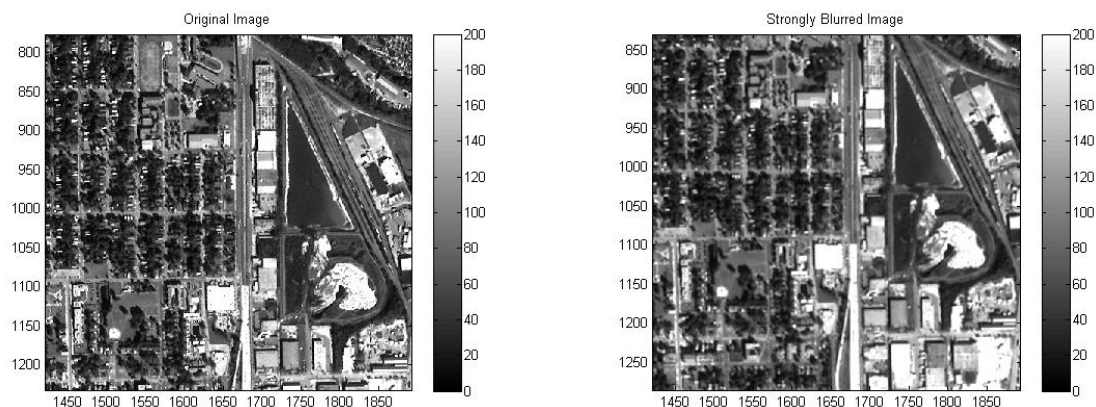


Figure 4.6 Image acquise le 13 janvier 2012 avec coefficient de netteté 0.4639



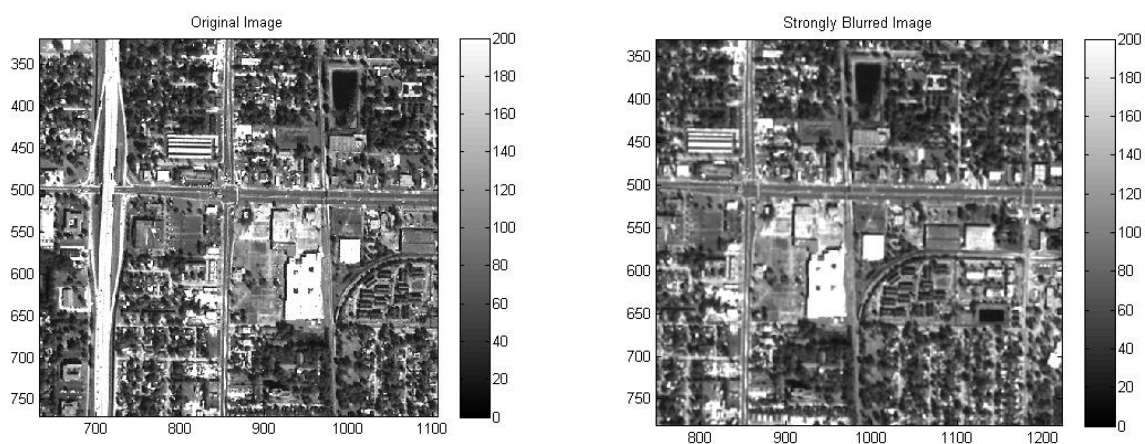


Figure 4.7 Image acquise le 10 juin 2012 avec coefficient de netteté de 0.4663

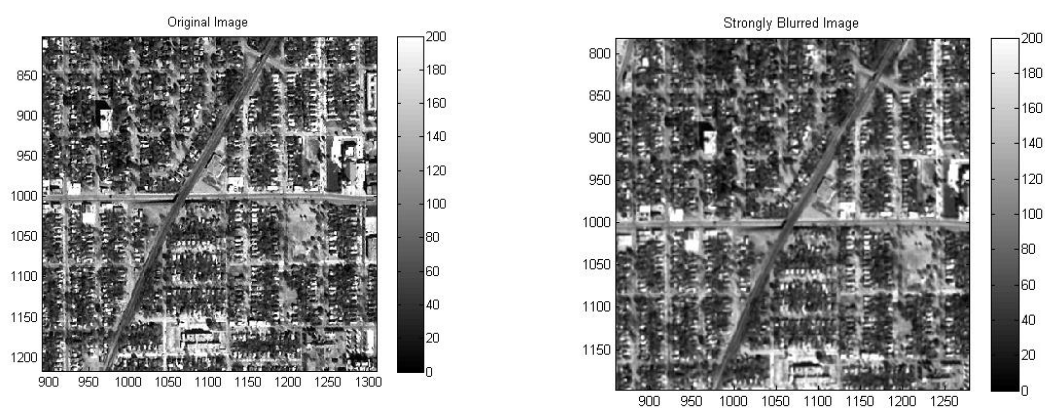


Figure 4.8 Image acquise le 20 février 2013 avec coefficient de netteté de 0.4336

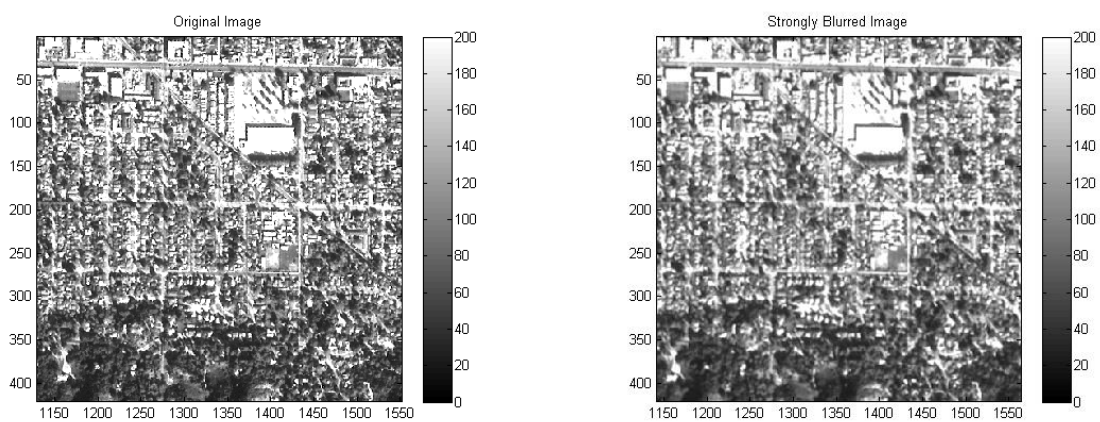


Figure 4.9 Image acquise le 25 avril 2013 avec coefficient de netteté de 0.4046

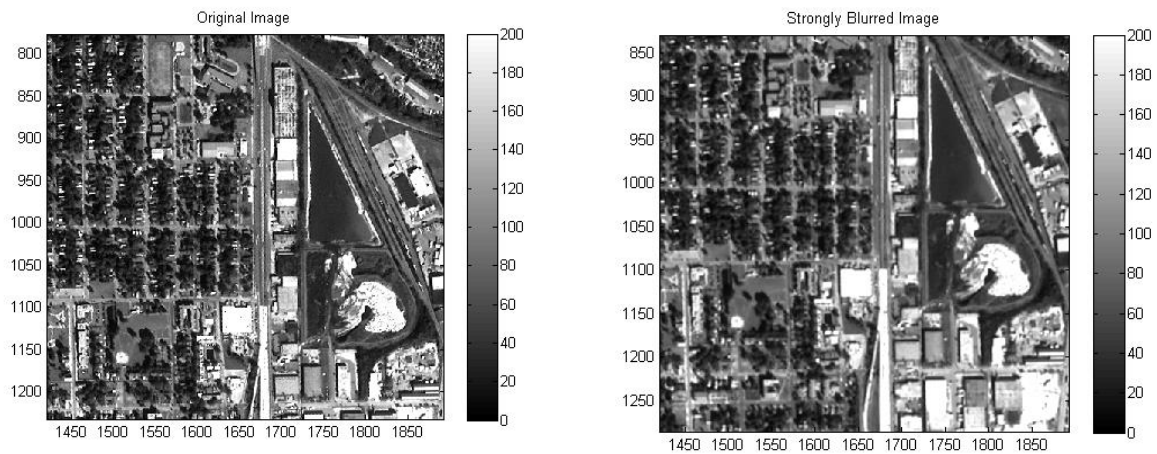


Figure 4.10 Image acquise le 17 février 2013 avec coefficient de netteté de 0.4639

### 3.4 Défocalisation des images

Lors de la constitution du vecteur caractéristique nous considérons qu'il est important d'introduire un paramètre qui représente la focalisation (défocalisation) ou la mise au point du système imageur. Ce paramètre est étroitement lié à la MTF et à la netteté de l'image. Par ailleurs, nous avons constaté que Kristan et al [29] ont introduit une approche robuste et pragmatique pour évaluer la défocalisation des images. Leur approche consiste à diviser l'image en un sous ensemble constitué de 8 par 8 sous-images qui se recouvrent et de calculer ensuite le focus de chaque sous-image en se basant sur une DCT à coefficients normalisés. Le cœur de l'approche est basé sur le constat que le spectre normalisé d'une image défocalisée montre un mode prononcé en basses fréquences. Plus l'image est focalisée ou s'approche de sa focale optimum, plus les composantes spectrales de haute fréquence apparaissent et le mode prononcé tend à s'estomper. C'est ainsi que l'entropie de Bayes de la DCT normalisée de l'image est alors calculée. La moyenne des sous entropies résultantes est finalement considérée comme le coefficient de focalisation globale de l'image.

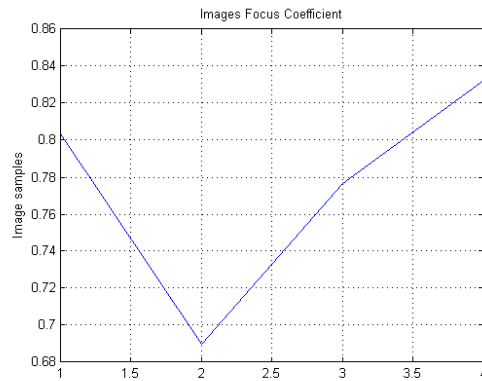


Figure 4.11 Paramètre de défocalisation des images

### 3.5 Energie et contraste des images

Deux autres éléments du vecteur caractéristique comme l'énergie et le contraste de l'image ont été introduits à partir du calcul des caractéristiques de Haralick sur les images de la base de données. Ces coefficients exploitent la matrice de co-occurrence afin d'obtenir une représentation de la texture de l'image et ainsi déduire les paramètres d'énergie et de contraste de l'image [30].

Comme le vecteur caractérisant est une représentation mathématique de la distribution des niveaux de gris (pixels) de l'image, en ce qui concerne l'aspect fréquentiel de la représentation de l'image, la transformée de Fourier est utilisée comme contributeur au développement d'une fonction représentative de ce contenu fréquentiel.

### 3.6 Contribution du Variogramme

L'exploitation du vecteur caractéristique est rendue possible grâce à l'utilisation du modèle de paysage de l'image et du modèle de la MTF. Ces modèles, formulés soit en continu soit en discret dans l'espace image, peuvent contraindre les solutions en terme de représentation d'image.

Afin de séparer les caractéristiques de l'image des caractéristiques du paysage et de généraliser l'apprentissage du RNA des caractéristiques pertinents de l'image, nous avons utilisé le concept de variogramme comme un élément pertinent de caractérisation [25].

Le variogramme est un moyen de généraliser l'apprentissage du réseau de neurones à tout type de paysages [25]. Une Modélisation du paysage est nécessaire pour rendre l'estimation univariante.

Le variogramme a prouvé son efficacité en tant qu'outil pratique pour établir un lien entre les caractéristiques spatiales de l'image et celles de la scène [31]. Nous avons utilisé le variogramme pour caractériser la structure spatiale des images optiques de haute résolution. La réponse des détecteurs est considérée comme une variable régionalisée.

Ainsi, le semi-variogramme empirique de l'image se compose de la moyenne des variations carrées en terme de niveaux de gris entre deux points de l'image séparés par  $h$  pixels et s'écrit tel que:

$$s \tag{4.2}$$

Le variogramme est caractérisé par trois paramètres: la pépite  $n$  qui est la hauteur du saut du semi-variogramme à la discontinuité à l'origine [31]. Le seuil  $s$ , qui est la limite du variogramme tendant vers un  $lag$  infini et enfin la distance  $r$  à laquelle l'amplitude du variogramme en partant du seuil devient négligeable. Nous avons effectué une série de tests sur des images optiques de haute résolution dans le but d'explorer leurs variations spatiales et aussi pour définir le modèle le plus approprié à ce type d'images. Chaque satellite de par sa conception et sa construction délivre des images de structures spécifiques dont le modèle ne peut être généralisé à un autre satellite. Comme on le voit dans la figure 4.12 nous avons essayé de modéliser les semi-variogrammes obtenus par plusieurs modèles comme les modèles gaussiens, gaussien-cosinus, le modèle exponentiel et celui de Bessel.

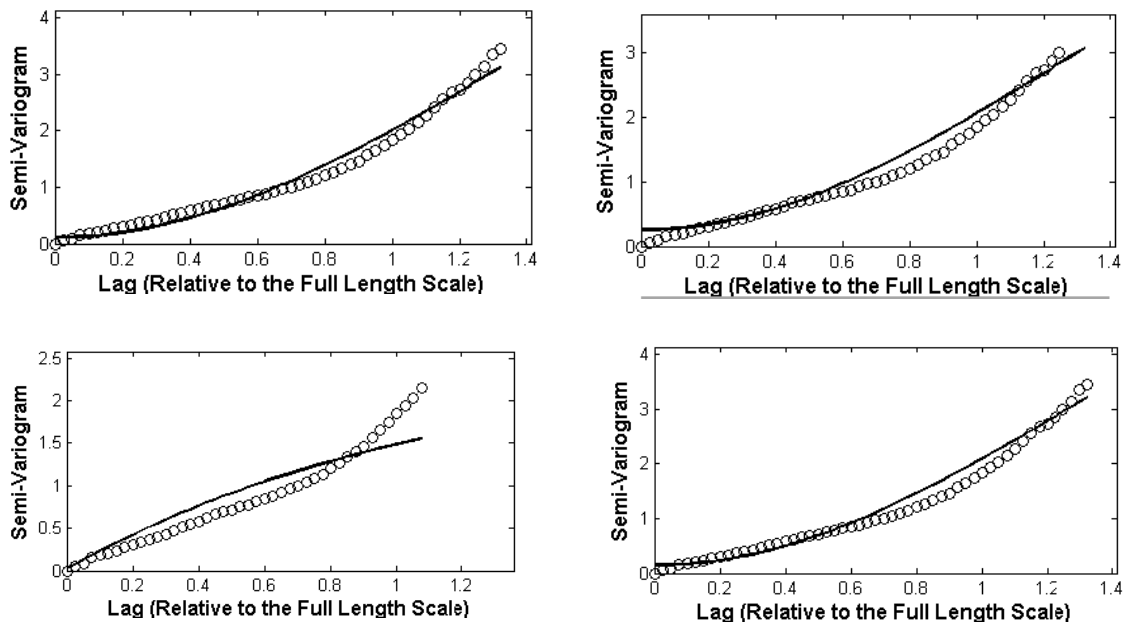


Figure 4.12 Investigation de plusieurs modèles de variogrammes

La figure 4.12 montre le semi-variogramme d'une image optique en modalité panchromatique acquise en décembre 2013 et les modèles de variogrammes investigués comme : le modèle gaussien droite, le modèle gaussien-cosinus, le modèle exponentiel et le modèle Bessel. Il est clair qu'aucun des modèles parmi ceux étudiés ne peut approcher convenablement le comportement du détecteur ayant enregistré ces images.

Enfin, après une étude exhaustive de plusieurs model de variogramme, nous sommes parvenus à la conclusion que le modèle linéaire généralisé GLM est le plus adéquat pour décrire ces images. Le modèle GLM est formalisé par l'équation :

$$\gamma(h) = ph^\lambda \quad (4.3)$$

où  $p$  est la pente de la ligne et  $\lambda$  est un exposant déterminant la forme du modèle linéaire généralisé.

Comme illustré dans la figure 4.13, ce modèle se rapproche étroitement de la hauteur du variogramme des images étudiées.

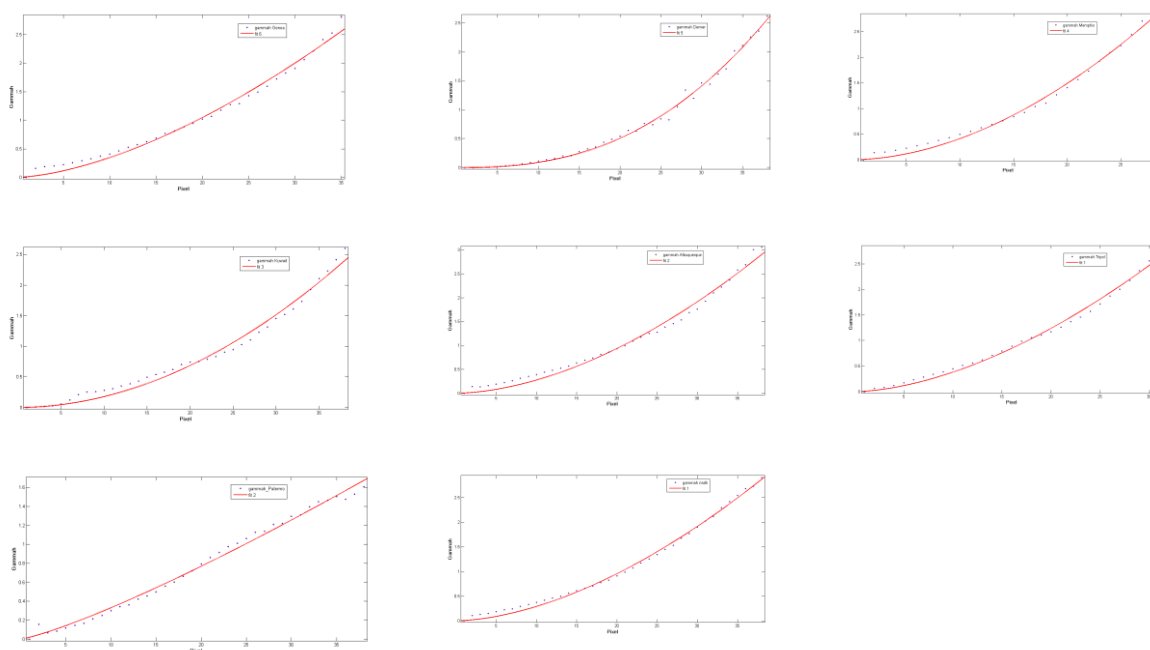


Figure 4.13 Investigation du variogramme à modèles linéaire généralisé

La figure 4.13 organisée en une matrice 3x 3 montre des images de variogrammes et le fitting GLM de plusieurs images optiques.

<b>Image Variogram</b>	<b><math>\rho</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>R-square</b>	<b>RMSE</b>
<i>Im1</i>	0.008772	1.597	0.9871	0.08852
<i>Im2</i>	0.0002645	2.523	0.9948	0.05706
<i>Im3</i>	0.005886	1.847	0.9912	0.0803
<i>Im4</i>	0.001984	1.951	0.9843	0.09232
<i>Im5</i>	0.004763	1.763	0.9867	0.1017
<i>Im6</i>	0.007593	1.7	0.991	0.07698
<i>Im7</i>	0.02042	1.211	0.9917	0.04739

Tableau 4.1 Optimisation des paramètres du model GLM du Variogramme

Le tableau ci-dessus montre des exemples d'investigation effectuées sur des variogrammes d'images optiques. Ainsi, après un grand nombre de tests, nous venons à la conclusion que nous pouvons raisonnablement paramétrer le variogramme GLM de ces images optiques avec les coefficients tels que:

$$\gamma(h) = ph^\lambda \quad (4.4)$$

$P = 0.0060$  and  $\lambda = 1.7550$ ;

### 3.7 Spectre des images

Les propriétés fréquentielles de l'image sont prises en considération par l'intermédiaire de la transformée de Fourier. C'est ainsi que le sous-vecteur dédié construit à partir des images de la base de données a une forte sensibilité à la MTF de l'image et constitue une composante majeure du vecteur caractéristique. Plusieurs étapes ont été empruntées pour générer ce sous vecteur. Après conversion du domaine spatial au domaine fréquentiel, une fréquence d'échantillonnage (échantillon par mm) est obtenue en considérant un espacement des pixels représentatif des dimensions des photosites du détecteur. En outre, un paramètre de sous-division de l'espace fréquentiel est introduit dans les calculs et paramétré dans notre étude conformément aux recommandations de SAMEI et al [32] qui suggèrent la valeur de 0,10 comme un bon compromis entre l'uniformité de l'échantillonnage et le bruit.

Après le calcul de la FFT de l'image, nous pouvons obtenir un sous-vecteur composé de la moyenne de chaque colonne de la matrice de la FFT. Enfin une opération de division (shunkitization) appliquée au vecteur peut nous donner un ensemble d'intervalles quasi égaux (mis en place à 20). Le sous-vecteur fréquentiel final est obtenu en prenant la moyenne de chaque intervalle. Le tableau ci-dessous représente un exemple de la représentation fréquentielle de quatre images optiques de la base de données. Le sous vecteur fréquentiel contient 20 éléments significatifs indépendants.

<b><i>Im8 02012011</i></b>	<b><i>Im9 12012011</i></b>	<b><i>Im10 23052012</i></b>	<b><i>Im11 22082011</i></b>
0.7672	0.6978	0.7041	0.8319
0.7188	0.6556	0.8025	0.8588
0.7193	0.6955	0.8120	0.8469
0.7415	0.7187	0.8822	0.8308
0.7644	0.6616	0.8514	0.8793
0.7755	0.6667	0.8054	0.8803
0.8274	0.7024	0.6477	0.8603
0.8333	0.7222	0.6749	0.8721
0.8311	0.7583	0.5465	0.8802
0.7715	0.6973	0.5957	0.8436
0.7612	0.5870	0.7166	0.7955
0.7625	0.6169	0.6676	0.8822
0.7574	0.6742	0.6877	0.8431
0.7753	0.6086	0.6755	0.8376
0.7724	0.6269	0.5988	0.8512
0.7814	0.8482	0.5392	0.9179
0.7557	0.8175	0.5709	0.8622
0.7206	0.6267	0.5904	0.9026
0.7527	0.7868	0.6090	0.8803
0.7670	0.7877	0.6475	0.8551

Tableau 4.2 Sous-vecteur fréquentiel de quelques images de la base de données

Afin de vérifier la sensibilité et la représentativité du sous vecteur fréquentiel, nous l'avons soumis à des dégradations différentes provenant de différentes sources. C'est ainsi que la figure 4.14 représente la sensibilité du sous vecteur fréquentiel à des types de



dégradations pouvant affecter la netteté des images. Les statistiques du sous-vecteur varient selon le type de dégradations et son amplitude :

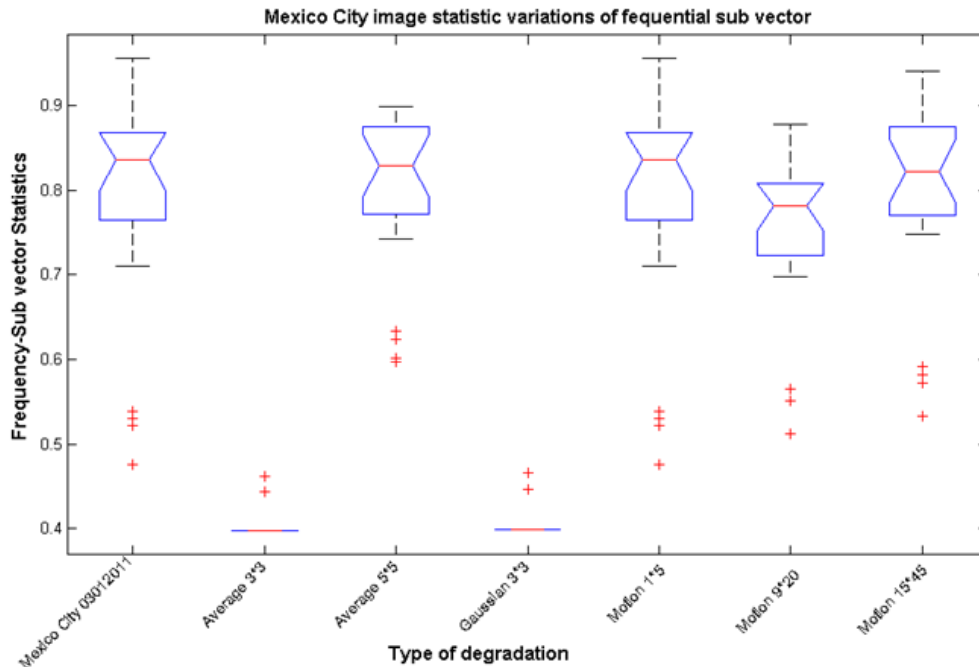


Figure 4.14 Vérification de la sensibilité du sous-vecteur fréquentiel à diverses dégradations

Le sous-vecteur fréquentiel de l'image *Im12* acquise en mode panchromatique le 30 Janvier 2012 varie selon le cas où la dégradation est moyenne  $3 \times 3$ , moyenne  $5 \times 5$ , gaussien  $3 \times 3$ , Mouvement flou  $1 \times 8$ , Mouvement flou  $9 \times 20$  ou Mouvement flou  $15 \times 45$ .

Finalement, l'étape de prétraitement précédente nous a permis de générer tous les éléments appartenant au vecteur caractéristique décrits précédemment. Le vecteur caractéristique prendra la forme suivante :

$$\mathbf{V} = [\text{Mean}, \text{Variance}, \text{Skewness}, \text{Kurtosis}, a, b, \text{sharpnes}, \text{entropiy}, \text{Spectrum-based sub vector}, \text{energy}, \text{contrast}]; \quad (4.5)$$

Sachant que  $a$  et  $b$  sont les coefficients de modèle puissance de variogramme

### Conclusion

Ce chapitre avait comme principale objectif de rendre compte du travail effectué dans l'investigation de l'approche basée sur les réseaux de neurones en vue d'estimer la réponse impulsionnelle d'un système imageur. La construction du réseau de neurones en elle-même ne présente pas de difficultés particulières en raison de la providence des outils capables d'apporter une aide appréciable dans la simulation des différentes configurations de RNA. Par contre la compréhension des phénomènes qui président à la création des dégradations des images en terme de netteté et de défocalisation et de leur descripteurs pertinents constitue le déficit majeur de cette méthode. Nous sommes parvenus à établir un vecteur caractéristique assez sensible aux dégradations qui peuvent altérer la qualité géométrique des images satellitaires de haute résolution. Nous avons introduit des légions de paramètres indépendants les un des autres et qui trahissent la présence d'une défocalisation ou d'une perte de netteté (sharpness) de l'image même à un niveau non accessible à visions humaines simple

Ayant investigué une assez grande panoplie de méthodes univariantes pour l'estimation de la réponse impulsionnelle des images, nous avons cru pertinent de rendre compte de cette approche dans notre thèse en vue de partager les progrès que nous pensons avoir accomplis.

Nous pensons désormais que le terrain est déjà balisé en vue de la poursuite et la finalisation de cette approche qui constitue d'ailleurs un élément porteur des perspectives ouvertes et valides de cette thèse.

### Références

- [24] M. Jung, D. Léger, Modelling the visual detection of defects on image with a neural network, 11th Portuguese Conference on Pattern Recognition Porto (Portugal), May 11-12, 2000
- [25] J-M. DELVIT 1, D. LEGER, Estimation de la Fonction de Transfert de Modulation l'aide d'un Réseau de Neurons, GRETSI 2003
- [26] Chris Ding et Jieping Ye. « Décomposition 2D (2DSVD) pour cartes et images », Proc. SIAM Int'l Conf. Data Mining (SDM'05), pp:32-43, April 2005
- [27] A.Benbouzid, N Taleb A No a priori Knowledge Estimation of the Impulse Response for Satellite Image, JASR12098,28-FEB-2015,Advances in Space Research 55 (2015), pp. 1885-1900,DOI information: 10.1016/j.asr.2015.01.009
- [28] F. Crete-Roffet, T. Dolmiere, P. Ladret, M. Nicolas. The Blur Effect: Perception and Estimation with a New No-Reference Perceptual Blur Metric. SPIE Electronic Imaging Symposium Conf Human Vision and Electronic Imaging, Jan 2007, San Jose, United States. XII, pp.EI 6492-16.
- [29] M. Kristan, J. Pers, M. Perse, S. Kovacic, A Bayes-Spectral-Entropy-Based Measure of Camera Focus Using a Discrete Cosine Transform, Pattern Recognition Letters (Impact Factor: 1.55). 10/2006; DOI: 10.1016/j.patrec.2006.01.016
- [30] F. Albrechtsen, Statistical Texture Measures Computed from Gray Level Co-occurrence Matrices, Image Processing Laboratory, Department of Informatics, University of Oslo, November 5, 2008
- [31] Kourgli A, Belhadj Aissa A (2003) Segmentation texturale des images urbaines par le biais de l'analyse variographique. Teledetection 3: 337-348.
- [32] E. Samei, N. Ranger, J. Dobbins, Y. Chen, Intercomparison of methods for image quality characterization. I.Modulation transfer function, Medical Physics, Vol. 33, No. 5, May 2006

## Chapitre 5

# Estimation univariante de la réponse impulsionnelle basée sur l'approche de bord

## Introduction

L'étude de l'état de l'art des méthodes d'estimation de la réponse impulsionnelle qui existent, révèle une multitude de méthodes qui peuvent être classées selon le temps de leurs convergences et la complexité d'implémentation, leurs performances et leur adéquation avec les spécificités des images satellites.

Quelques méthodes, qui existent, échouent dans l'estimation de la réponse impulsionnelle des images satellitaires [1] du moment que l'image originale est inconnue et l'on cherche à l'estimer en même temps que la dégradation. Ceci peut être dû à l'inadéquation qui peut exister entre le modèle d'observation et les scènes observées. En effet la définition du modèle d'observation à utiliser pour un satellite donné revêt un caractère primordial dans le processus d'estimation de la réponse impulsionnelle. Le problème peut être réduit à une distinction très délicate entre l'image et l'effet de flou tel qu'introduit dans [1].

Les approches basées sur les concepts de régularisation classiques comme le support réduit et la positivité ne peuvent fournir des améliorations significatives dans la déconvolution des images satellitaires [1]. En effet, les images satellite comportent des particularités caractéristiques et intrinsèques : la scène continue a existé bien au-delà des limites de l'image carrée ou rectangulaire fournie par le système de traitement des données au sol et l'absence d'un arrière fond uniforme justifiant l'usage des contraintes de bord. L'approche purement spatiale adoptée dans la plupart des modèles d'image est ainsi inappropriée lorsque les scènes naturelles enregistrées présentent des détails à des échelles différentes [1]. En effet les caractéristiques spectrales ne sont pas prises en considération dans leur totalité. Un modèle de spectre insuffisant peut engendrer des estimations insuffisantes et erronées de la MTF et donc de la réponse impulsionnelle du système.

Les solutions les plus simples consistent à exploiter des cibles au sol connues. Ceci ne représente pas de la déconvolution aveugle au sens propre, mais ces méthodes sont exploitées dans l'industrie spatiale en faisant l'hypothèse que l'estimation de la réponse

impulsionnelle à partir d'une scène connue peut ensuite être exploitée pour déconvoluer l'ensemble des observations réalisées par le même système mais sur des scènes inconnues.

Parfois, il est suffisant d'observer les étoiles du moment qu'elles peuvent être considérées comme des sources ponctuelles distantes de la plate-forme satellite en orbite. C'est ainsi que les images acquises des étoiles fournissent une estimation directe de la RI du système qui peut être utilisée pour déconvoluer et restaurer les images prises sur les autres scènes quelconques [33]. Cette évaluation de la RI faisant appel à des cibles connues ou à des étoiles est dite méthode de référence. Ces solutions peuvent présenter certaines contraintes. Les cibles artificielles doivent subir des maintenances et des campagnes de mesure et de caractérisation. Par ailleurs pour le cas de cible stellaires, le satellite doit être conçu pour prendre des images dans de l'espace ce qui augmenterait la complexité de sa conception et par corollaire son prix [34-35].

Afin de s'affranchir de ces limitations, l'utilisation des méthodes sans référence apporte des solutions appropriées et est vitale dans l'évaluation de la RI des systèmes imageurs embarqués. Ces méthodes tendent à mesurer directement la MTF du système qui est représentative de sa fonction de transfert optique qui traduit elle-même sa réponse impulsionnelle.

Ce travail présente une contribution originale pour l'évaluation de la réponse impulsionnelle et par corollaire de la qualité géométrique des images optiques de haute résolution [27]. La méthode utilisée est basée sur une approche univariante, sans référence et sans connaissance a priori de la dégradation et des paramètres du système imageur. La méthode exploite uniquement l'information contenue dans l'image enregistrée qui est la seule disponible [27].

Le cadre de cette approche a été déjà utilisé par quelques auteurs pour des applications et des contextes variés. En effet, Thomas et al. [36] exploitèrent l'estimation univariante de la MTF dans le but d'évaluer la qualité géométrique et les métriques des images de fusion Pan-

Sharpening. Pendant que Viallefont-Robinet et al. [37] l'utilisèrent pour l'estimation de la MTF et la défocalisation des satellites Pléiades.

Notre intérêt est plus particulièrement porté sur la détermination de la réponse impulsionnelle des satellites optique en présence de bruit quand le modèle de dégradation où la fonction de transfert optique de la charge utile (PSF, OTF, MTF) est inconnue.

où PSF et OTF sont respectivement la 'Point Spread Function' et 'l'Optical Transfer Function'.

Un simple formalisme mathématique du phénomène peut être exprimé sous la forme :

$$Y = RI * X \tag{5.1}$$

Comme seule la donnée est connue, le problème est de calculer une approximation  $X^*$  de l'image discrète  $X$  quand  $RI$  est inconnue. La réponse impulsionnelle d'un système imageur peut être représentée fidèlement par la MTF qui est la partie réelle de l'OTF. Cette grandeur est considéré plus pratique et est utilisée particulièrement pour la caractérisation des systèmes d'imagerie et plus spécifiquement des caméras et instruments satellitaires.

### 1 Estimation de la réponse impulsionnelle

Habituellement, les satellites d'observation de la terre contiennent à la fois les modalités panchromatique et multispectrale. En général, il ya un facteur (1: 4) entre la distance d'échantillonnage au sol GSD des modes panchromatique et multispectrale. Le GSD de la modalité panchromatique est typiquement quatre fois supérieure à celui de la modalité multispectrale. Ainsi, plusieurs auteurs ont exploité l'image panchromatique pour l'estimation de MTF plutôt que celle issue du multispectral. En outre, les images panchromatiques offrent la possibilité de trouver et sélectionner des détails tels que les bords de terrain, les bâtiments et autres objets spatiaux reconnaissables.

Théoriquement, on peut estimer la PSF d'un détecteur en faisant l'acquisition d'un point très lumineux infiniment localisé ayant une amplitude infinie. L'image obtenue de ce point sera une estimation directe de la réponse impulsionnelle du détecteur. Mais, comme le détecteur

considéré appartient à une charge utile embarquée sur un satellite en orbite, cette solution devient nettement plus délicate à mettre en œuvre pratiquement.

De nombreuses approches ont été utilisées par plusieurs auteurs afin d'estimer la réponse impulsionnelle des satellites. Leger et al [21] ont utilisé des lampes en xénon comme des sources ponctuelles disposées sur une zone herbeuse uniforme se trouvant à l'intérieur de la trace au sol du satellite afin de produire une réponse impulsionnelle quasi-idéale à la sortie des satellites SPOT.

En outre, Helder et al. [14] ont placé deux colonnes de miroirs convexes disposés à des distances uniformes les uns des autres et inclinées avec un angle de  $10^\circ$  du nord au Sud afin d'évaluer la réponse impulsionnelle du satellite Quickbird-2. Ils ont noté que les caractéristiques physiques de la structure des miroirs convexes est essentielle dans les mesures des PSF et que des erreurs de placement des miroirs et dans l'uniformité de la surface de fond (herbe) affectent la précision de l'estimation de réponse impulsionnelle des satellites.

Choi [38] a utilisé une bache bleue étendue du Nord au Sud et alignée de  $8^\circ$  au Nord-est et aussi une cible en noir et blanc peinte pour mesurer la MTF des images panchromatiques du satellite Ikonos.

Storey [39] a utilisé un pont sur le lac Pontchartrain Causeway (Louisiane, Etats-Unis) comme une impulsion rectangulaire pour estimer la MTF de Landsat 7 ETM+. Il a construit un profil cible échantillonné pour chaque direction de balayage ETM+ et a utilisé des modèles analytiques du pont pour arriver à la meilleure adéquation entre les profils de bord simulés et les images enregistrées du pont.

Pendant ce temps, Bensbaa et al [40, 41] ont réalisé une estimation de la PSF de CBERS-1 et CBERS-2 en utilisant des modélisations des ponts du lac Pontchartrain Causeway (Louisiane) et Rio-Niteroi, utilisés comme des cibles d'impulsion. Ils ont modélisé la fonction d'étalement de point PSF du système d'imagerie en fonction de gaussiennes séparables. La principale



contrainte était de trouver le meilleur ajustement entre les mesures d'image et les données simulées. Le procédé utilisé implique également une étape de modélisation de la structure du pont en question. Cependant, en dépit des résultats satisfaisants, Bensbaaa et al [40] ont noté une non-conformité entre les résultats de la direction a-cross track obtenus et les mesures de MTF effectuées préalablement en laboratoire.

Plusieurs contraintes caractérisent les méthodes qui exploitent des cibles artificielles au sol [38]. L'orientation des cibles (bâche ou bord de plage), les caractéristiques physiques des sources ponctuelles et l'entretien du site rendent difficile l'obtention de points de données à un niveau sous-pixellique adéquats et régulièrement espacés [38]. Une orientation inadéquate où le placement de la cible par rapport à la trace au sol du satellite est susceptible d'entraîner une mauvaise reconstruction du profil de bord ou de l'impulsion est donc une sous estimation de la réponse impulsionnelle du système imageur.

Helder et al [14] ont fourni un bon cadre général de l'approche basée sur la méthode d'impulsion. Comme représenté sur la figure 5.1, le procédé commence par le choix d'un bord adéquat, en conformité avec des règles de sélection spécifiques tels que l'angle, la longueur, la dynamique, etc.

Dans la deuxième phase de l'algorithme de Helder et al [14], le bord sélectionné est exactement déterminé avec une précision sous-pixellique par une étape qui combine un gradient et un square fitting. La troisième étape consiste à calculer la ESF, en utilisant les pixels appartenant à l'ensemble de lignes perpendiculaires au profil de bord déjà déterminé.

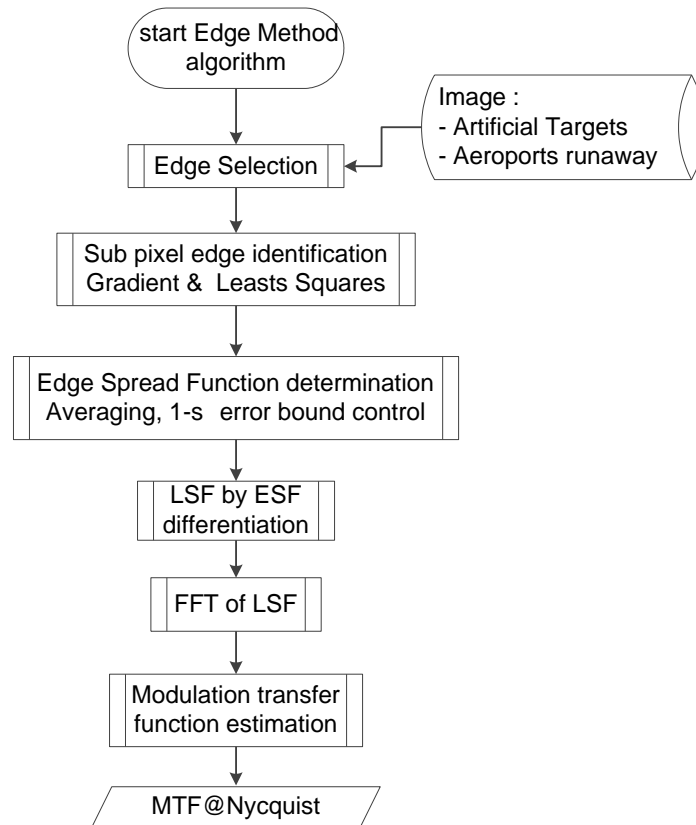


Figure 5.1 Organigramme général de la méthode de Choi pour l'estimation de la réponse impulsionnelle

## 2 Description de la Méthode

Une alternative à l'utilisation des cibles artificielles pour l'estimation de la réponse impulsionnelle consiste en l'exploitation des informations déjà contenues dans l'image. L'idée est de simuler la réponse impulsionnelle d'une région spécifique de l'image en tenant compte des exigences et des critères déjà utilisés par les méthodes à cibles artificielles pour lesquelles Helder et al [14] donnèrent un bon cadre général que nous allons suivre dans ce travail et sur lequel nous allons apporter des adaptations inspirées d'autres auteurs et des modifications originales que nous avons introduites.

Néanmoins, nous choisissons l'exploitation des structures artificielles contenues dans l'image, considérés comme des cibles pour évaluer la réponse impulsionnelle. En fait, il y a des procédures qui peuvent présenter différentes versions que l'on peut appeler méthode de bord ou de bord de couteau [38]. La méthode de bord utilise les informations intrinsèques

appartenant à une seule image. L'idée clef de la méthode est basée sur le principe que les transitions brusques de luminance (compte numérique du pixel) constituent une cible importante qui peut être utilisée pour évaluer la réponse impulsionnelle du système de la charge utile à la quasi-totalité des fréquences spatiales applicables.

L'algorithme proposé pour cette méthode apparenté aux méthodes de bords représenté sur la figure 5.2 utilise un bord adapté et permet ensuite la détermination et la localisation du bord à une précision sous-pixellique [27]. Cela nécessite l'alignement et la projection de toutes les lignes de pixels à partir de l'emplacement du cadre de fenêtre considérée. Ensuite, les données sont interpolées et moyennées pour obtenir une fonction de distribution. La ESF est ensuite différenciée pour obtenir la LSF. Ensuite, l'application d'une transformation de Fourier et une étape de normalisation de la LSF donnent le profil de la MTF et sa valeur à la fréquence de Nyquist. Le choix approprié du bord est capital. Il doit obéir à certains critères qui seront examinés plus en détails un peu plus loin.

## **2.1 Implémentation la méthode proposée**

La mise en œuvre de notre version proposée de la méthode de bord modifiée se compose de plusieurs étapes. La première étant manuelle et les autres sont automatiques. La procédure mise au point et mise en œuvre comme représentée sur la figure 5.2 a été appliquée avec succès à des images fournies par des satellites optiques de haute résolution.

Nous avons introduit quelques modifications inspirées à partir de différentes approches. Cependant, au cours des étapes successives de l'implémentation, nous avons apporté quelques modifications originales. Nous avons amélioré le fitting de la ESF en introduisant une extraction automatique des paramètres de la fonction de Fermi. Nous avons également mis en place un algorithme robuste capable de traiter des régions d'intérêt ROI bruitées et irrégulières de l'image centrée sur le bord sélectionné.

## **2.2 Algorithme de la méthode proposée**

Les résultats décrits dans la présente thèse font partie d'un cadre plus global, qui consiste à investiguer deux approches dans l'estimation de la réponse impulsionnelle sans une

information à priori sur le système imageur ayant acquis l'image. Le diagramme illustré dans la figure 5.2 décrit la démarche mise en œuvre sur la base de la méthode de bord qui représente la préoccupation majeure de ce travail. Pour les fins de clarification du diagramme, les différentes étapes sont identifiées par des cercles numérotés de 1 à 16.

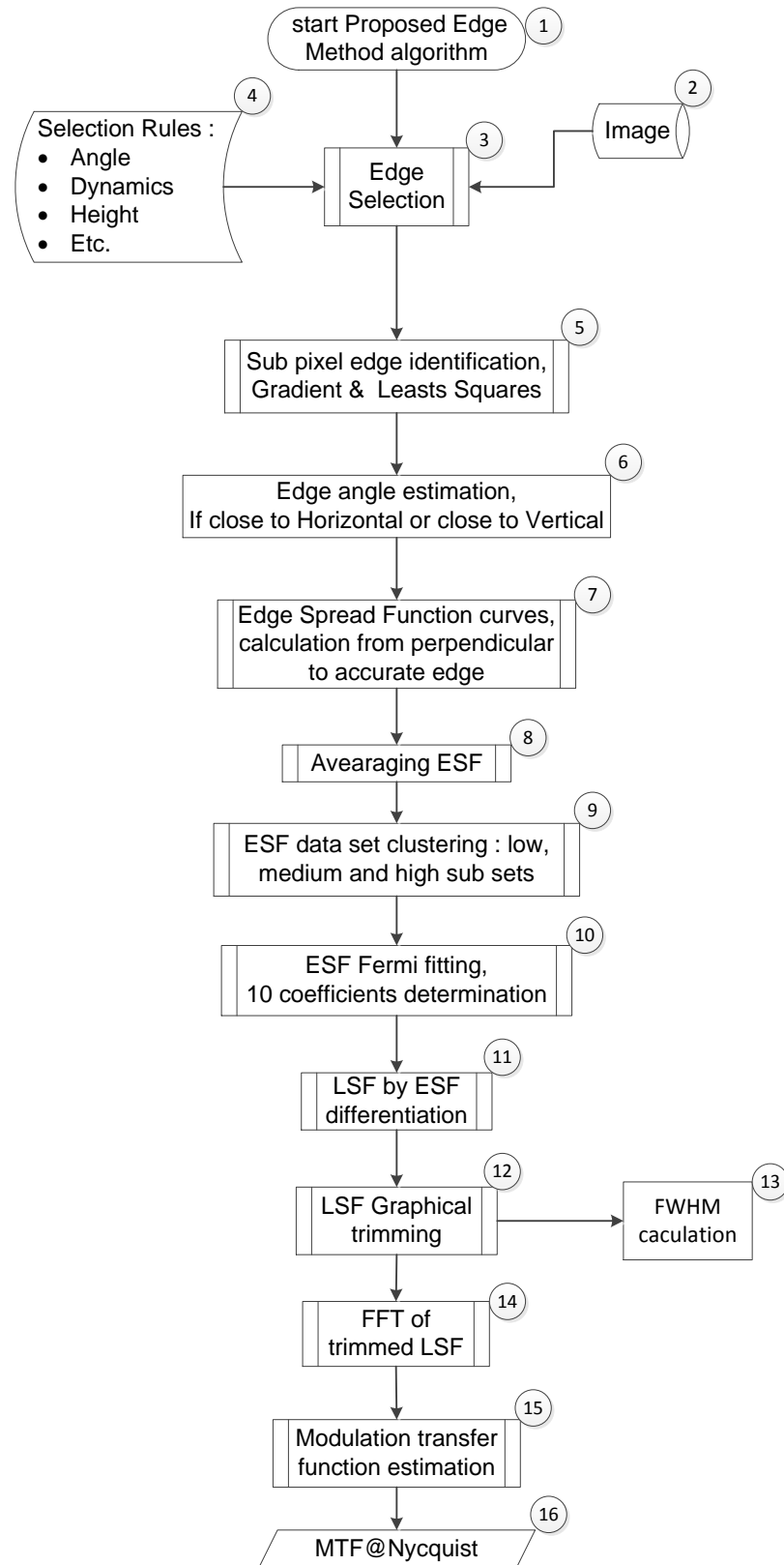


Figure 5.2 Organigramme général de la méthode proposée

Comme le montre la figure 5.2, le procédé que nous proposons commence par la sélection de la région d'intérêt (ROI) qui entoure le bord sélectionné (cercles # 2,3,4). Dans la deuxième étape, le profil de bord est déterminé avec une précision sous-pixellique via une méthode de gradient pour chaque ligne, puis un square fitting de la pente maximale donne le profil de bord des sous-pixels (cercle de # 5). Ensuite, une sous routine spécifique de l'algorithme permet l'estimation de l'angle de bord (cercle de # 6). Dans la cinquième étape, les courbes de la ESF sont calculées automatiquement en utilisant les comptes numériques des pixels DN appartenant aux lignes perpendiculaires au bord déterminé (cercle 7 #).

L'ensemble des courbes des ESF ainsi déterminées est ensuite moyenné (cercle # 8). Les éléments de la ESF globale obtenue sont ensuite automatiquement distribués en trois classes : classe supérieure, classe intermédiaire et classe inférieure (cercle n ° 9). Cette étape est une préparation à un fitting de FERMI de la ESF. En effet, les 10 coefficients associés au fitting de FERMI sont calculés automatiquement (cercle n ° 10). La prochaine étape est la différenciation numérique de la ESF fittée par FERMI pour obtenir une LSF (cercle n ° 11). Ensuite une opération de réduction permet d'obtenir la fonction Full Width Half Maximum FWHM dans les deux directions A-long track et A-cross track (cercle n ° 12). Cependant une application de la transformée de Fourier à la ESF réduite permet d'obtenir la MTF à la fréquence de Nycquist (cercles # 14,15,16). Les différentes étapes constitutives de l'algorithme proposé seront détaillées et les résultats intermédiaires respectifs discutés dans les sections suivantes.

### 2.3 Sélection du bord de plage

Les images utilisées permettent de distinguer des détails intéressants sur le terrain comme les bâtiments, les ponts, les périmètres de stade, les pistes d'aéroport, les champs et les routes. Cette caractéristique des images nous permet de tirer profit de quelques bords que nous allons utiliser pour estimer la réponse impulsionnelle du système d'imagerie (charge utile satellite dans notre travail) en utilisant ainsi uniquement l'information contenue dans

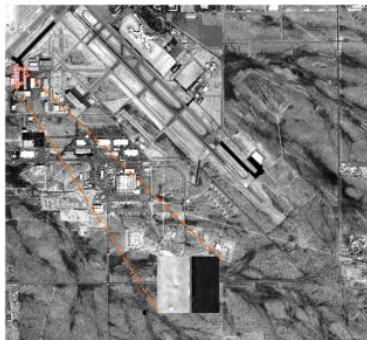
l'image. Le bord est le lieu où se produit une transition rapide entre deux zones d'intensités différentes, il nous permet de simuler la MTF s'il est bien choisi. En effet, si le choix du bord satisfait certains critères, il sera possible de reconstruire la réponse impulsionnelle de la charge utile avec une précision sous-pixellique, tout en minimisant les effets combinés du bruit et repliement ou aliasing.

### 2.3.1 Règles de sélection du bord

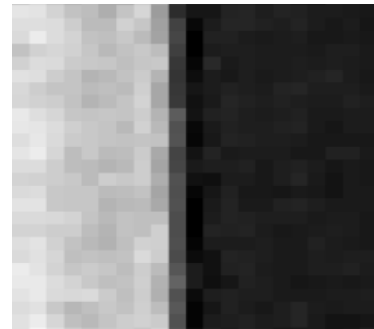
Nous synthétisons l'ensemble des critères définis pour le choix des bords adéquats et appropriés afin d'atténuer les divers problèmes rencontrés par les différentes méthodes existantes appliquées par de nombreux auteurs comme Estriebeau et al [42], Servoss et al [43] et Thomas [36]. En effet, afin de permettre une évaluation fidèle de la réponse impulsionnelle, le bord doit être :

- 1- Assez long pour permettre de moyennner le bruit de plusieurs lignes de pixels constitutives de la région d'intérêt ROI.
- 2- Oblique pour permettre un sur-échantillonnage avec un angle de quelques degrés par rapport à la direction Nord-Sud.
- 3- l'écart maximum entre ses transitions doit être représentatif de la dynamique globale de l'image étudiée
- 4- Assez étendu pour augmenter la précision de l'évaluation de la réponse impulsionnelle en permettant de moyennner plusieurs lignes de la ROI sélectionnée.
- 5- Orienté le plus possible selon les principaux axes des traces A-long track et A-cross track du satellite
- 6- Sélectionné dans des endroits pas très près des bords de l'image pour éviter une dégradation possible due aux aberrations d'origine optique.

La satisfaction de l'ensemble de ces critères implique que les bords valides deviennent peu nombreux dans l'image. Néanmoins, la haute résolution des images satellites utilisées dans la modalité panchromatique offrent la possibilité de sélectionner des bords appropriés et valides. Nous avons exploité les détails visibles comme les bâtiments, les ponts, et les périmètres de stade, les délimitations de routes, les pistes d'aéroports et les champs agricoles. Ces structures offrent des arêtes ou des transitions visibles entre les zones radiométriques basses et hautes. La figure 5.3 (a) montre un exemple d'un bord sélectionné près d'une piste de l'aéroport de Tucson (UAS) sur une image acquise en Janvier 2012. Un autre exemple de zone cultivée contenant un bord intéressant est représenté dans la figure 5.3 (b).



(a) Image panchromatique de Tucson



(b) ROI englobant le profil de bord

Figure 5.3 Echantillon d'une image utilisée et l'agrandissement de la ROI associée

### 2.3.2 Sélection de la région d'intérêts

En plus des critères décrits ci-dessus, les dimensions effectives (pris en compte dans le traitement) de la région rectangulaire d'intérêt sélectionné ROI influence directement la reconstruction des MTF. La région d'intérêt (ROI) est définie par sa longueur et sa largeur en pixels, les deux dimensions influencent la précision de reconstruction de la MTF. La dimension du bord doit être choisie suffisamment longue pour fiabiliser l'estimation de la MTF mais par trop afin d'éviter l'éventualité d'introduire des effets du bruit.

La largeur de la fenêtre est également importante. Helder et al. [14] et Ryan et al [15] ont utilisé  $(2n + 1)$  pixels comme largeur de fenêtre pris de part et d'autre de la position de la



penne. Bu et al [44] ont montré qu'une MTF plus précise est obtenue avec l'utilisation d'une longueur de bord supérieure à 15 pixels et une obliquité de bord variant entre 5 ° et 10°.

#### 2.4 Détermination sous-pixellique du bord

La détermination de niveau sous-pixellique du bord est abordée dans l'algorithme proposé tel que montré dans la figure 5.2 dans l'étape désignée par le cercle n ° 5. Certains auteurs comme Thomas et al [36] ont utilisé un filtrage passe-bas et une dérivation suivie d'une étape de transformation de Hough pour récupérer l'équation de la ligne du profil de bord. Dans notre travail, une fois que la sélection de la ROI rectangulaire entourant le bord approprié est effectuée, une différenciation numérique ( $x[n] - x[n-1]$ ) est appliquée à l'ensemble de lignes représentant le profil de bord. L'étape de différenciation permet la détermination de la pente maximum de chaque ligne composant le profil de bord.

Pour chaque ligne de la ROI, un point qui représente une position grossière (coarse) du bord est obtenu. Afin d'obtenir une détermination du profil de bord avec une précision sous-pixellique, l'on utilise pour chaque ligne, un nombre  $n$  de valeurs DN autour du point de la pente pour appliquer un fitting polynomiale cubique :

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (5.2)$$

Helder et al [14] et Ryan et al [15] ont suggéré de prendre seulement quatre valeurs autour du point de la pente maximum pour déterminer le profil de bord. Cela est suffisant du moment que ces auteurs exploitaient une cible artificielle qui est moins bruitée. Il est nécessaire de noter que compte tenu de l'ensemble des pixels de chaque ligne de profile, les coefficients de fitting obtenus sont déformés en raison du bruit qui existe au-delà du bord. Une hypothèse sous-jacente est que l'arête considérée suit une ligne droite. Tout écart par rapport un bord représente des erreurs dans la géométrie de l'image [15].

Dans notre travail, étant donné que nous utilisons des cibles naturelles, afin d'avoir un bon conditionnement du fitting polynomiale et après le paramétrage de la valeur de  $n$  en accord

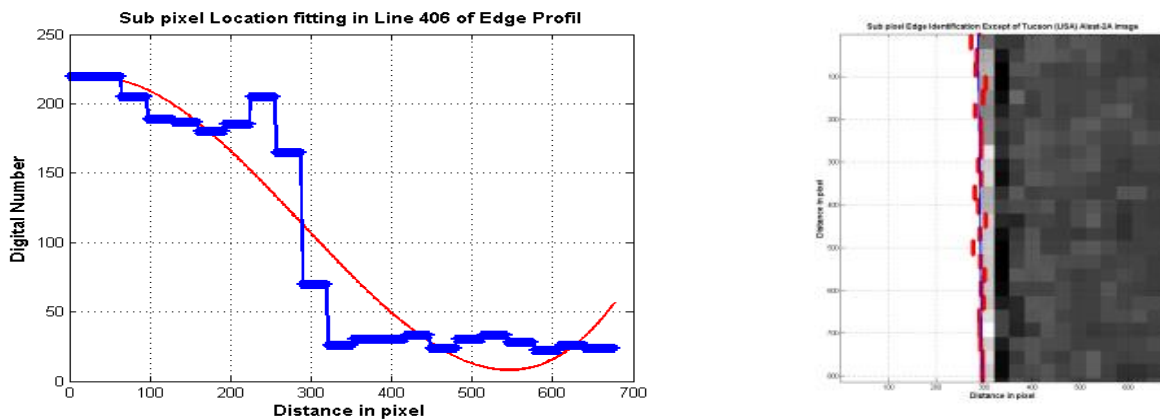
avec la précision de l'angle de bord par rapport à l'angle de bord réel, nous avons choisi  $n=8$ , comme un compromis réaliste. Le nombre  $n$  étant pour rappel le nombre de pixel DN autour de la pente maximale discutée dans les premières étapes de notre algorithme montré dans la figure 5.2.

Pour chaque ligne du profil de bord, la position du passage à zéro de la dérivée seconde indique le point d'inflexion de la courbe, qui est alors supposé être la position sous-pixellique du bord:

$$\frac{\partial y''}{\partial x^2} = 0 \quad (5.3)$$

Pour chaque ligne de la ROI la position locale sous-pixellique du bord est déterminée par l'équation (5.4):

$$in\_pt = \frac{-b}{3 \cdot a} \quad (5.4)$$



(a) Exemple d'identification précise de chaque ligne (b) Fitting de la localisation de la ligne de bord

Figure 5.4 Détermination Sub-pixellique du profil de bord

La figure 5.4 montre la région d'intérêt extraite contenant l'arête sélectionnée à partir de l'image en modalité Panchromatique de Tucson. La figure 5-4 (a) montre un exemple de profil de la ESF calculée à une ligne parmi le profil total de bord incliné. À cette étape, la ESF est représentée par un ensemble de valeurs discrètes de comptes numériques DN.

Ensuite, l'ensemble déterminé de points sous-pixelliques est utilisé pour générer, par un fitting par moindres carrés, une ligne droite qui est assumée comme le profil de bord et décrite par l'équation (5.5):

$$x = a \cdot y + b \quad (5.5)$$

La figure 5.4 (b) montre le bord déterminé avec une précision sous-pixellique en rouge pour chaque ligne de la ROI. Les marques rouges indiquent les points de pente maximale dans chaque ligne. La figure 5.4 (b) illustre également en bleu la position exacte du profil de bord suivant les marques rouges. Ceci est calculé dans l'étape désignée par le cercle n° 5 sur la figure 5.2 qui illustre notre algorithme.

## 2.5 Extraction de la ESF

Une fois le bord déterminé, l'étape suivante consiste à déterminer la ESF comme mentionné dans la figure 5.2 (cercle 7 #). Les deux précautions que nous avons prises dans le choix des bords appropriés: le moyennage de plusieurs lignes DN pour lisser le bruit et la sélection d'un bord oblique pour réduire l'effet de l'aliasing, implique que les lignes effectives du profil de bord sont celles qui sont perpendiculaires au profil de bord oblique.

Afin d'extraire la ESF du bord ainsi déterminée, Ryan et al (2003) ont proposé d'effectuer un balayage orthogonal par rapport à l'axe du bord. Estribeau [42] a effectué une projection des valeurs DN des pixels de chaque ligne le long de la direction de bord et a accumulé dans des classes (bins) ceux qui ont une largeur inférieure à la largeur du pixel.

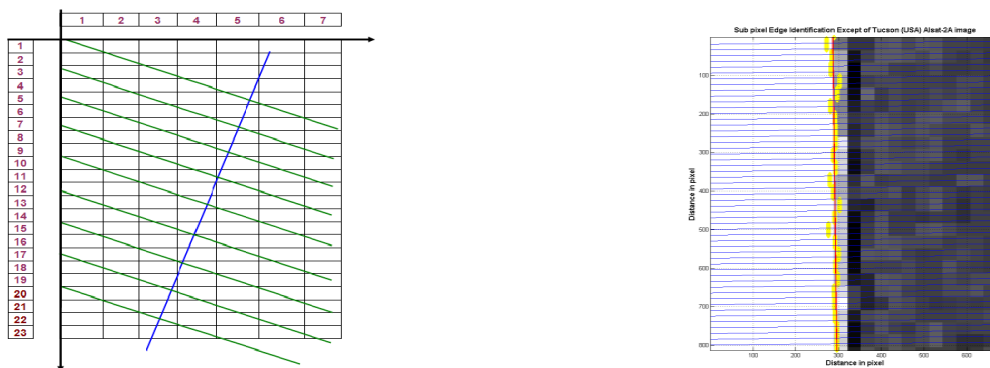
Comme représenté sur la figure 5.2 (cercles # 5,7), et après la détermination de la position exacte du profil de bord, la ESF est ensuite calculée. Elle est obtenue en considérant les comptes numériques des pixels appartenant aux lignes perpendiculaires au profil de bord. Une fois déterminées, ces lignes sont ensuite moyennées pour obtenir une ESF comme illustrée par la figure 5.5. Cette étape est effectuée pour supprimer le bruit et les effets d'aliasing. Dans le cas échéant, les résultats de la MTF seraient sous-estimés [15].

En outre, afin d'augmenter le taux d'échantillonnage en formant une ESF sur-échantillonnée, nous avons construit pour chaque position sous-pixellique du profil un ensemble de lignes droites perpendiculaires au profil de bord. En supposant que toutes les lignes perpendiculaires qui traversent la position de bord sont déterminées par  $x_r$  et  $y_r$ , les lignes ont les mêmes valeurs absolues des pentes et de signes opposés. Ces lignes peuvent être exprimées par :

$$d_r = x_r + \frac{1}{a} \cdot y_r \quad (5.6)$$

Où  $-a$  et  $a \cdot d_r$  sont respectivement la pente et l'ordonnée des lignes perpendiculaires (lignes vertes),

tandis que l'indice  $r$  dans l'équation est supposé être le numéro de ligne composant le profil de bord. Considérant deux axes  $x$  et  $y$  situés aux limites de la ROI sélectionnée, l'ensemble des lignes perpendiculaires sont utilisés pour extraire la ESF en considérant les DN des pixels appartenant à chaque ligne perpendiculaire.



(a) Description des lignes normale au bord

(b) Calcul des lignes normales au profil

Figure 5.5 Extraction des valeurs de la ESF à partir des lignes perpendiculaires au profile de bord

La figure 5.5 montre le résultat de l'implémentation de l'algorithme de l'extraction de la ESF sur l'image de Tucson. L'ensemble des lignes (bleues) perpendiculaires traverse la ligne (rouge) du bord déterminé. Les valeurs DN de pixels appartenant à chaque ligne perpendiculaire sont utilisées pour construire la version de la ESF.

La représentation obtenue de la ESF est bruitée et reste inadaptée dans sa version actuelle pour le calcul de la LSF. En effet, une étape de prétraitement de la ESF discrète s'avère nécessaire. L'objectif est de supprimer le bruit et de produire la capacité pratique de calculer la dérivée de la ESF et aussi de maîtriser le paramétrage du nombre de valeurs DN des pixels qui peut constituer une contrainte dans l'étape suivante d'application de la FFT qui requiert la règle de puissance de deux. Enfin ce prétraitement permet de calculer analytiquement le point d'inflexion de la fonction. La solution est de transformer la représentation de la ESF en un ensemble de pseudos courbes continus.

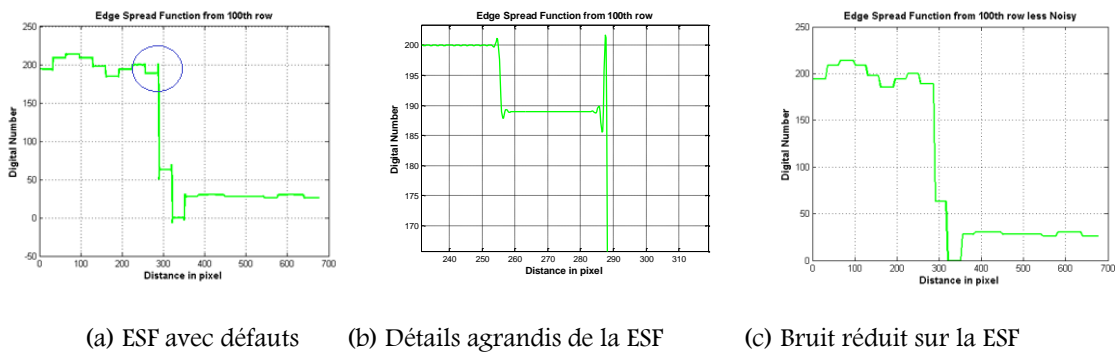
Crespi et al [45] ont utilisé le filtre de lissage de Savitzky-Golay pour effectuer le fitting de la ESF. En vue de lisser les valeurs de la ESF, nous adoptons l'approche de SG. L'ensemble des valeurs de la ESF est considéré composé de sous-ensembles constitués chacun par des DN de pixels contigus. Une interpolation splines cubique est appliquée à chaque sous-ensemble. Etant donné que nous utilisons des bords naturels comme effectué par Crespi et al [45], pour les fins de lissage de la ESF, nous avons adopté la même approche qui exploite la solution Savitzky-Golay. Nous avons implémenté cette étape par l'interpolation de chaque sous-pièce représentée par des DN de pixels contigus et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de (N-1) courbes splines pour chaque ligne. Les fonctions splines cubiques sont de la forme:

$$S_k(x) = a_k \cdot x_k^3 + b_k \cdot x_k^2 + c_k \cdot x + d_k \quad (5.7)$$

Après avoir supposé que les fonctions splines locales et leurs dérivées secondes sont continues au niveau des extrémités de leurs intervalles respectifs et en paramétrant adéquatement la résolution d'interpolation, nous pouvons construire la fonction *spline* globale pour chaque ligne appartenant à l'ensemble des lignes perpendiculaires au profil de bord objet de notre étude. La fonction *spline* globale décrivant la ligne pseudo continue et représentant le ESF lissée prendra alors la forme générale suivante:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) \\ S_1(x) \\ \dots \\ S_{N-1}(x) \end{cases} \quad (5.8)$$

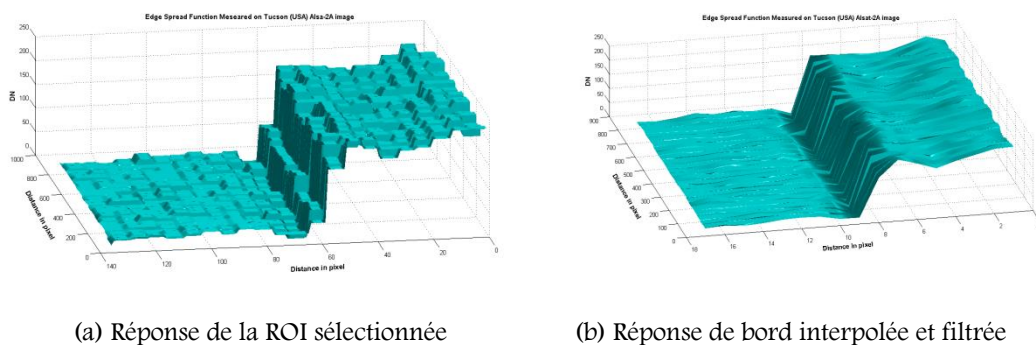
Nous devons souligner que le choix de la résolution de l'interpolation *spline* cubique a une influence sur le processus de filtrage de la ESF. La figure 5.6 montre un exemple de profil de la ESF déterminée à partir d'un bord sélectionné sur l'image de Tucson avec une résolution d'interpolation de 0,025. La ESF reste affectée par le bruit en raison principalement de l'utilisation de bords naturels qui sont généralement plus bruités comme illustré par le zoom sur la figure 6 (b).



(a) ESF avec défauts      (b) Détails agrandis de la ESF      (c) Bruit réduit sur la ESF

Figure 5.6 Débruitage de la fonction ESF Edge Spread Function

En effet, la figure 6 (b) montre des détails plus élargis au sein de la zone encadrée bleue de la figure 5.6 (a). Ce bruit peut être réduit en paramétrant la résolution de l'interpolation. Un exemple de ESF ré-échantillonnée moins affectée par le bruit réalisée avec une résolution



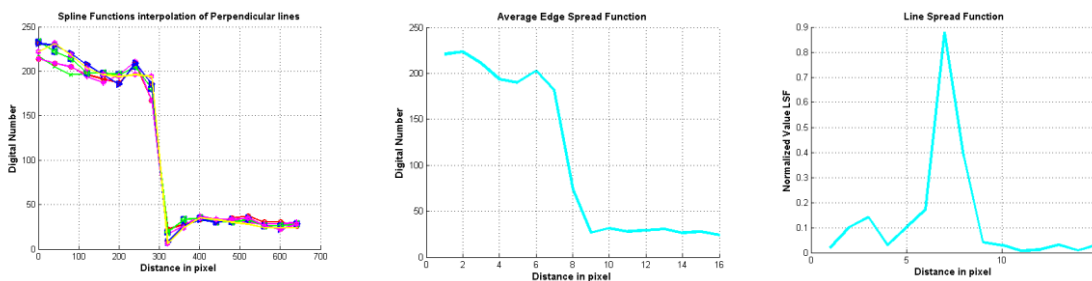
(a) Réponse de la ROI sélectionnée      (b) Réponse de bord interpolée et filtrée

Figure 5.7 L'effet du filtrage cubique sur la réponse de bord

d'interpolation de 5 peut être obtenu comme le montre la figure 5.6 (c) où l'ondulation rapide autour du sous-ensemble considéré a disparue.

L'effet de l'étape de filtrage est plus visible sur la figure 5.7 (a), qui représente l'ensemble du profil du bord sélectionné sur l'image Tucson. La réponse de bord du profil sélectionné est interpolée avec une résolution de 5 pendant que la figure 5.7 (b) montre la même ESF avec une résolution d'interpolation dix fois plus grande. Le bord est moins bruité quand la résolution de l'interpolation *spline* cubique est choisie convenablement. Ces deux chiffres constituent une représentation de la ESF du bord sélectionné. En fait, le côté sombre du profil du bord devrait être sur la droite, comme le montre la figure 5.3 (b).

Le filtrage du bruit de la ESF grossière est ensuite répété pour chaque ligne perpendiculaire au profil. Par conséquent, comme indiqué par l'algorithme représenté dans la figure 5.2 (cercle N ° 8), toutes les splines cubiques estimées sont ensuite utilisées pour obtenir une fonction moyenne qui représente la fonction ESF expérimentale du bord sélectionné, comme illustré sur la figure 5.8 (b). La forme de la ESF est généralement composée de deux cotés uniformes l'un lumineux et l'autre sombre et une zone de transition avec un profil descendant ou montant caractérisé par un point milieu.



(a) Ensemble de profils ESF

(b) ESF moyennée

(c) Fonction LSF

Figure 5.8 Exemple du moyennage de la ESF et du calcul de la LSF par différentiation

## 2.6 ESF et LSF

Comme le montre la figure 5.2 (cercle n ° 11), la LSF est déterminée par une différenciation discrète simple de la ESF comme suit:

$$LSF(n) = ESF(n) - ESF(n-1) \quad (5.9)$$

Ainsi, une différenciation numérique pourrait être appliquée sur la spline moyenne représentée sur la figure 5.8 (b). La LSF obtenue est représentée sur la figure 5.8 (c) où l'on peut remarquer que du bruit ou des irrégularités sur les deux côtés de la courbe de LSF subsistent et peuvent conduire à une sous-estimation des valeurs de la MTF.

En outre, la présence de bruit peut affecter de manière significative les résultats de la caractérisation spatiale et la résolution peut être inadéquate pour la détermination de la pente de l'arête sélectionnée [15]. Toutefois, il convient de souligner ici que l'étape de différenciation discrète renforce le bruit en hautes fréquences sur les courbes de la ESF [46]

Afin de réduire le bruit présent dans chaque côté du bord, Helder et al. (2003) ont proposé de réduire la LSF en sélectionnant soigneusement des points de terminaison appropriés pour réduire les fuites de fréquence représentée par les lobes secondaires dans les courbes de la ESF. Ainsi, seul l'intervalle minimale qui délimite la transition DN utile de radiométrie est considéré pour la différenciation Helder et al [14]. Ces auteurs ont utilisé des cibles artificielles qui contiennent des bords durs. La généralisation de cette technique de réduction ne serait pas appropriée lorsque l'on travaille sur des bords naturels comme c'est le cas dans notre travail.

Par ailleurs afin de résoudre ce problème, même s'ils ont utilisé des bords artificiels, Ryan et al [15] ont effectué une interpolation analytique de la LSF. Cette opération permet la modélisation de la ESF et la suppression des effets indésirables des lobes secondaires. La ESF sera moyennée et interpolée selon une fonction analytique appropriée.

Plusieurs fonctions analytiques d'interpolation pourraient être utilisées : la fonction hyperbolique, la fonction de Cauchy, la fonction de Laplace, la fonction de Gauss et celle de FERMI ou Fonction logistique. Une bonne synthèse effectuée par Bonne [47] et Tzannes [48] donne un aperçu intéressant sur le sujet.



Étant donné que nous avons utilisé des bords naturels et quelques peu bruités, nous avons emprunté l'approche de Ryan et al [15] et Crespi et al [45] en privilégiant une interpolation par fonction de FERMI. Sa version analytique générale est de la forme:

$$F(x) = d + \sum_{i=1}^3 f_i(x) \quad (5.10)$$

En raison du fait qu'en général les courbes de la ESF sont mal conditionnées et non symétriques par rapport au milieu du bord montant ou descendant, Tzannes [48] a proposé d'effectuer une sommation des fonctions ESF individuelles pour réaliser une interpolation appropriée. Ryan et al [15] ont choisi 3 comme le nombre de fonctions sigmoïdes à superposer. L'utilisation d'un plus grand nombre de fonctions pourrait induire la fonction analytique globale à reproduire le bruit et les artefacts ou erreurs plutôt que l'information effective liée aux valeurs DN effectives des pixels. Dans notre travail, la fonction  $f_i(x)$  est supposée être une fonction FERMI de la forme:

$$f_i(x) = \frac{a_i}{\exp[(x-b_i)/c_i] + 1} \quad (5.11)$$

En supposant que la distance  $x$  est mesurée le long de la ligne perpendiculaire par rapport au profil de bord précis, la fonction d'interpolation de FERMI utilise l'équation (5.11) dans la réalisation de l'interpolation par moindres carrés non linéaires simultanément pour tous les dix coefficients qui définissent les caractéristiques de profil de bord tels que :

$$\begin{cases} a_1, a_2, a_3 \\ b_1, b_2, b_3 \\ c_1, c_2, c_3 \\ d \end{cases} \quad (5.12)$$

Selon Tzannes et al [48] les caractéristiques de l'orientation de bord sont déterminées par les coefficients  $a_k, c_k$  et la position du bord par les coefficients  $b_1, b_2$ . Étant donné que tous les bords sont positionnés sur une ligne droite, Ryan et al [15] ont utilisé l'expression:

$$b_1 \cdot \Delta \cdot i + b_2 \quad (5.13)$$

pour spécifier l'emplacement du bord où  $i$  est dit l'indice de réponse de bord et  $\Delta$  est supposé être le GDS au sol du satellite qui est fixée à 5 m dans le satellite objet de notre étude.

Dans notre travail nous avons initialisé tous les paramètres de la fonction de Fermi en démarrant d'un compromis construit sur une combinaison des résultats de Tzannes et al [48] et de Tiecheng Li et al [49] tels que :

$$\left\{ \begin{array}{l} d = A \\ a_1 = 0,75(B - A) \\ a_2 = 0,125(B - A) \\ a_3 = 0,125(B - A) \\ c_1 = 0,15; c_2 = 0,14; c_3 = 0,14 \\ b_1 = R; b_2 = R + 0,5; b_3 = R - 0,5 \end{array} \right. \quad (5.14)$$

Où  $A$  est supposée être la valeur DN de la partie supérieure de la ESF, et  $B$  est la moyenne des valeurs DN de la partie inférieure de la ESF. Les coefficients  $c_k$  représentent la pente des trois fonctions de FERMI quand leurs signes respectifs correspondent à des bords montants ou descendants.

Nous avons suivi le paramétrage utilisé par Tiecheng Li et al [50] lors du choix des paramètres  $c_k$

Cependant, nous avons utilisé une méthode non linéaire lors de la détermination du paramètre  $R$ , qui est supposé être la position de la fonction de Fermi.

Il faut noter que la détermination de ces paramètres nécessite plus d'explications. En effet, ces paramètres représentent la position des points d'inflexion des différentes réponses de bord LSF. D'après le travail du Helder et al [14], la minimisation des paramètres de la fonction de Fermi de la réponse de bord LSF peut être effectuée à l'aide d'une détermination non linéaire. Ainsi, nous utilisons la fonction de Matlab *fminsearch* afin de déterminer à la fois la position du paramètre de point d'inflexion  $b_i$  en déterminant  $R$  et le paramètre de croissance  $r$  de la fonction logistique

Afin de déterminer les paramètres du fitting de FERMI de chaque réponse de bord nous avons développé une procédure automatique à trois phases qui consistent d'abord à extraire un couple de paramètres minimum  $(b_i, r)$  après minimisation grossière par fonction logistique des données de réponse de bord. Deuxièmement, le couple minimum ainsi estimé est passé comme argument dans la fonction Matlab *fminsearch* pour obtenir le meilleur couple. Troisièmement, une interpolation complète par FERMI est construite suivant le paramétrage décrit par l'équation (5.14)

Cette étape de calcul, désignée dans la figure 5.2 par (cercle n ° 10), mérite quelques explications. En fait, afin d'automatiser la technique d'interpolation de FERMI sur nos données, nous avons fait en mesure que l'algorithme puisse détecter automatiquement le haut  $A$  de chaque ESF et de l'affecter au paramètre  $d$ , et d'autre part de détecter le haut de chaque ESF et de l'affecter aux paramètres  $a_1, a_2$  et  $a_3$  tel que décrit dans la figure 5.2 par le (cercle n ° 9).

En effet pour obtenir ce résultat, nous considérons les valeurs de DN constitutifs de la ESF comme un ensemble de points et nous lui appliquons une classification *kmeans* pour l'éclater en séparer en 3 sous-ensembles (Haut, Moyen, Bas) distincts de DN de pixels, comme le montre la figure 5.9 par les trois ensembles de points de nuages en rouge, bleu et vert.

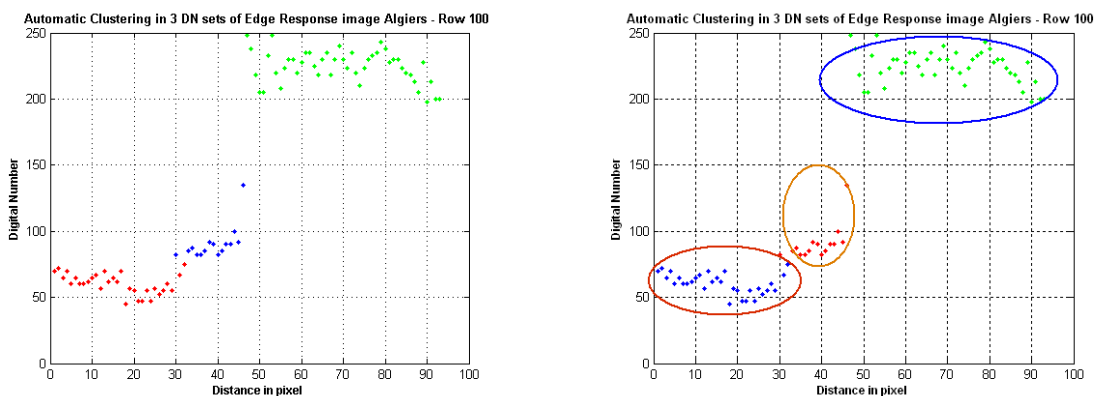
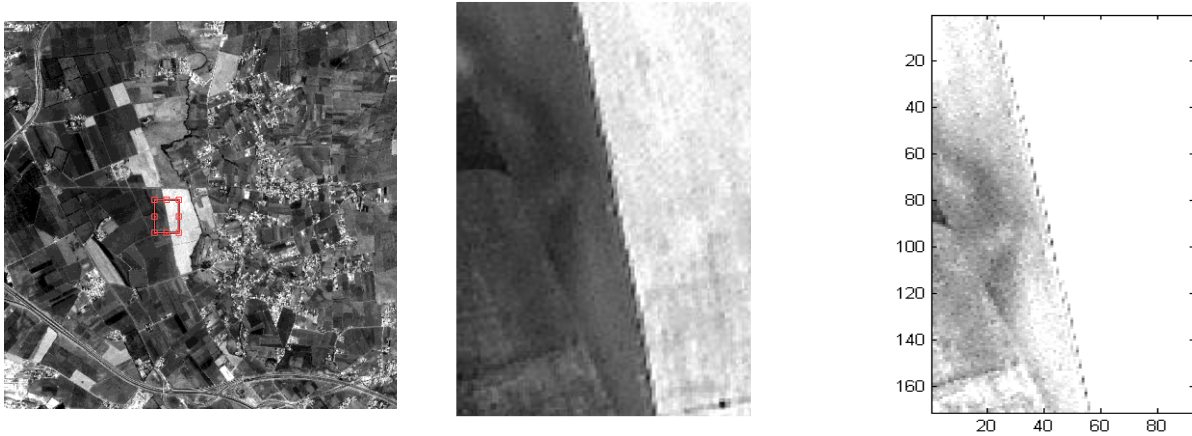


Figure 5.9 Classification automatique en trois groupe de DN de la ESF

La figure 5.10 (a) montre une image satellite en modalité panchromatique acquise le 30 juin 2011 et le rectangle rouge représente la ROI utilisée pour la sélection du bord. La figure 5.10 (c) représente la ROI contenant le bord sélectionnée telle qu'interprétée et traitée par l'algorithme proposé et implémenté.



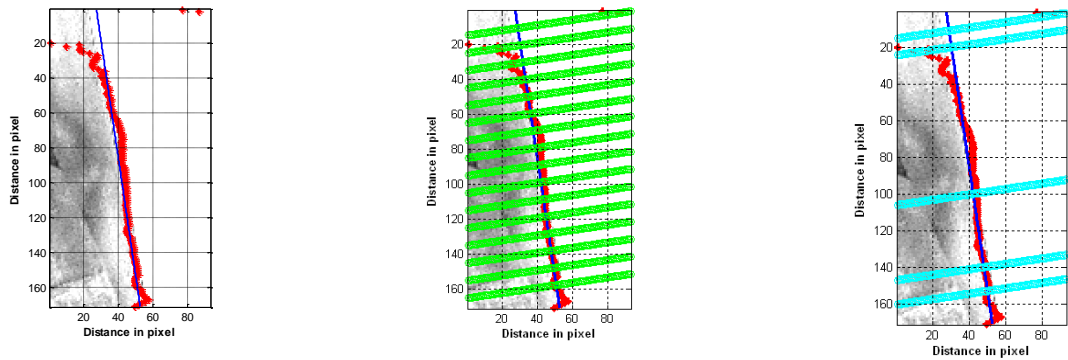
(a) Image d'Alger

(b) ROI sélectionnée à la main

(c) La ROI telle interprétée par l'algorithme proposé

Figure 5.10 Exemple de l'image d'Alger avec la ROI utilisée pour la sélection du bord

L'algorithme proposé appliqué sur la ROI d'une image d'Alger et représenté sur la figure 5.10 permet de déterminer le profil de bord sub-pixellique. La ROI sélectionnée se trouve entre deux champs contigus avec une grande variation moyenne de DN. Un ensemble de lignes orthogonales par rapport au profil de bord est alors déterminé. Comme sur l'image de Tucson, les groupes de DN appartenant aux lignes orthogonales sont utilisés pour construire les courbes de la ESF. Comme illustré par la Figure 5.11, en dépit d'un bord intentionnellement sélectionné bruité et irrégulier (ligne rouge), l'algorithme préserve la direction globale du bord qui n'est pas influencé par le bruit et les irrégularités de l'image d'origine comme représenté sur la figure 10 (b)



(a) profile de bord (b) Les lignes normales au bord (c) Exemple de lignes de DN de pixels

Figure 5.11 Le profile déterminé et les lignes perpendiculaires pour le calcul de la ESF

a ESF fittée obtenue automatiquement à partir de la ROI de l'image d'Alger confirme la robustesse relative de l'algorithme. En effet, quelle que soit la position individuelle de la ESF par rapport au bord de profile utilisé tel que représenté par la figure 5.11 (c), l'interpolation de FERMI est préservée comme montré par la figure 5.12 pour des exemples de ligne ESF perpendiculaires au bord à des positions respectives 10, 100 et 140. Les cercles points bleus représentent les données de valeur DN des pixels et la courbe rouge représente la ESF obtenue par fitting automatique de FERMI.

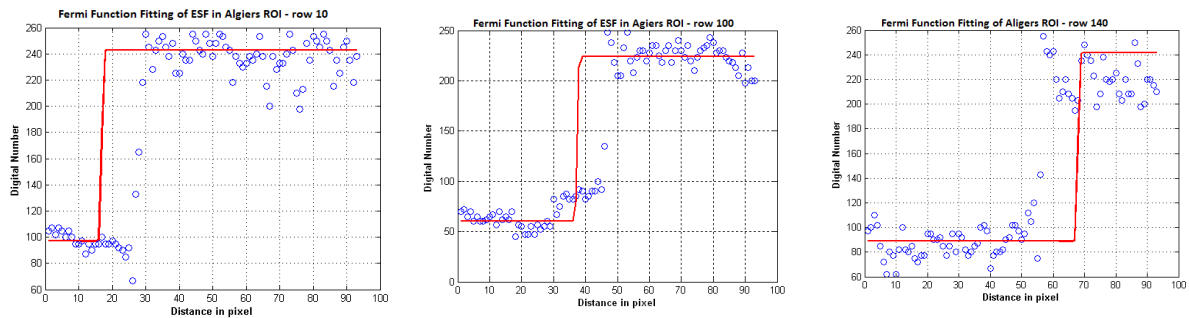


figure 5.12 Profil déterminé à trois positions par interpolation de FERMI de la ESF

## 2.7 Réduction de la LSF

Lors de l'utilisation de bords plus bruités nous avons observé la présence d'irrégularités (lobes) sur les côtés de la LSF comme représenté sur la figure 5.8 (c). Comme le confirment les résultats préliminaires de la MTF obtenus et comme aussi rapporté par Choi [38], ces effets secondaires conduisent à une sous-estimation de la MTF. Afin de réduire ces effets,

une étape de filtrage doit nécessairement être insérée entre les étapes de calcul de la MTF et la LSF dans l'algorithme.

En plus de la LSF réduite utilisée par Choi [38], certains auteurs comme Estriebeau et al [42] ont utilisé un fenêtrage de Hamming appliqué à la LSF pour réduire les effets du phénomène de Gibbs.

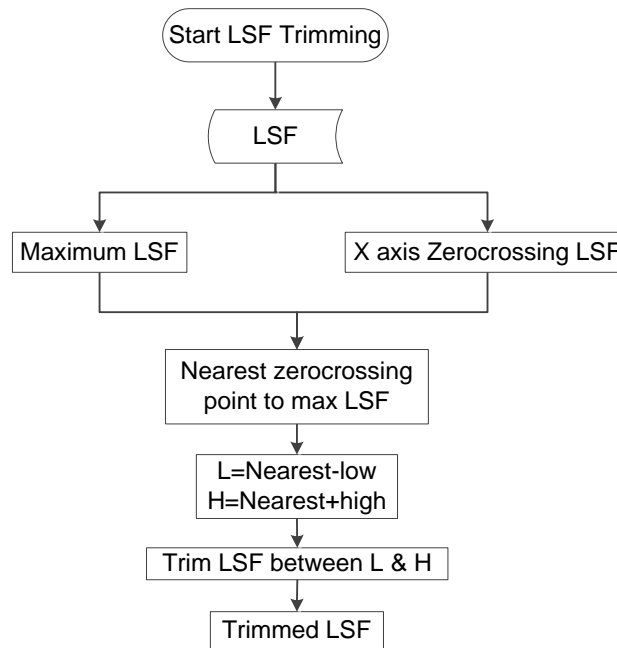


Figure 5.13 Technique de réduction automatique de la LSF

Dans notre travail afin d'atténuer ce genre de bruit et de supprimer les mauvais effets des lobes latéraux de la LSF dérivée, nous avons utilisé selon le cas soit une fonction analytique de filtrage soit une réduction graphique de la LSF. Cette étape est représentée sur la figure 5.2 (cercle n ° 12). Nous avons alterné entre le filtrage de FERMI et la réduction graphique en fonction du bruit du bord. Nous avons utilisé la réduction graphique pour les bords artificiels (piste d'aéroports, cibles artificielles) et le filtrage analytique pour les bords naturelles plus bruités par essence. Dans la technique de réduction automatique, que nous avons développée, comme le montre la figure 5.13, nous recherchons d'abord dans les données de la LSF le point maximum et l'ensemble des points de passage par zéro, ensuite le point de passage par zéro le plus proche de la LSF maximale. Après la détermination des points de passage par zéro maximum et minimum les plus proches au maximum de la LSF,

la LSF réduite est prise dans l'intervalle délimité par ces deux points. La figure 5.14 montre des exemples de résultats de la réduction de la LSF obtenue par la technique proposée.

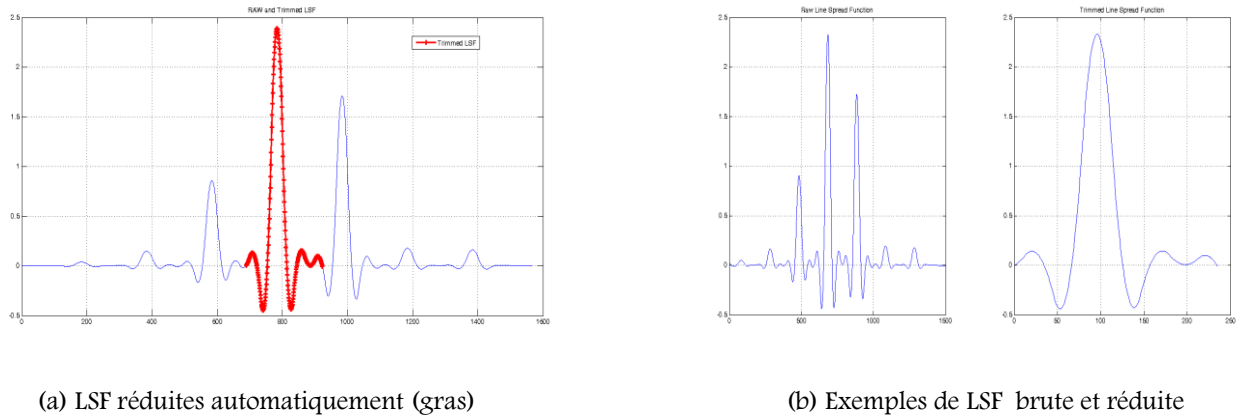


Figure 5.14 Exemple de LSF brute avant et après sa réduction par la méthode proposée

## 2.8 Calcul de la MTF

La valeur absolue de la transformée de Fourier de la LSF obtenue donne les valeurs de la fonction de transfert de modulation, le long de l'axe des fréquences. La MTF estimée à la fréquence de Nycquist obtenue par la FFT de la LSF est illustrée dans la figure 5.2 (cercle # 14,15,16). Il est indispensable de convertir les distances spatiales exprimées en pixels selon l'axe X de l'image en équivalents fréquentiels exprimés par millimètres. En outre, il est plus commode d'opérer une translation des valeurs de la MTF par rapport aux axes afin d'être en mesure de voir la MTF à la fréquence de Nycquist lors de l'affichage des courbes de MTF.

La détermination de la position de la fréquence de Nycquist est basée sur la taille de l'ensemble des données ainsi que sur la résolution de l'interpolation de la fonction spline utilisée dans les étapes précédentes du traitement [38]. Ainsi, nous l'avons calculée en utilisant le même formalisme introduit par Choi [38] et Ryan [15]:

$$Nyqwist\_Freq = \frac{datasize \times resolution}{2} + 1 \quad (5.15)$$

En utilisant une fonction spline avec une résolution d'interpolation de 0,25, nous avons obtenu un profil de la MTF comme représenté dans la figure 5.15:

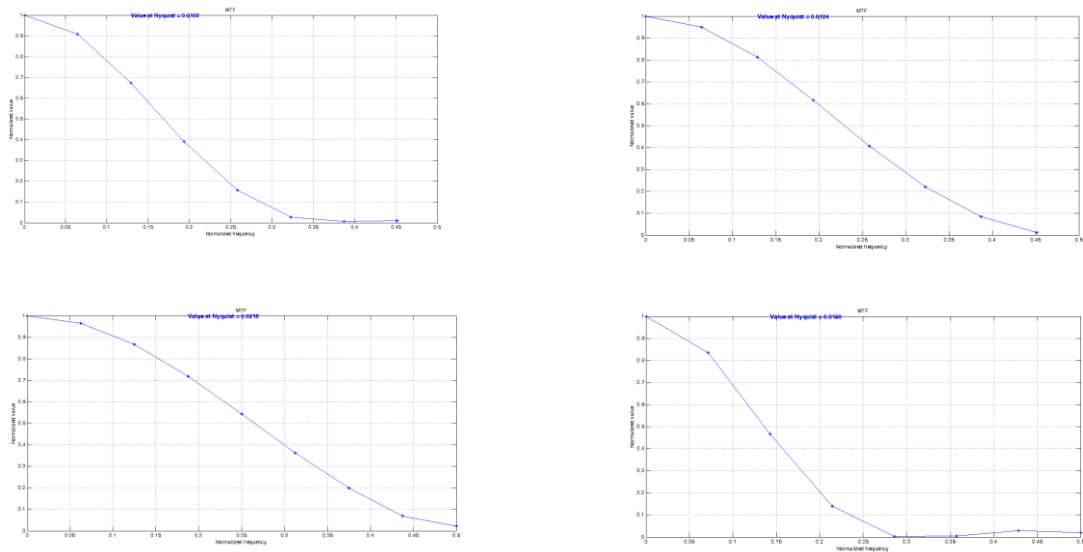


Figure 5.15 Profile A-cross track et A-long track de la MTF donnés par la méthode

## 2.9 MTF et bruit

Dans cette section, une évaluation de la performance de la méthode proposée par rapport au bruit contenu dans l'image est effectuée. Tout d'abord, lorsqu'on aborde la description du bruit de l'image et sa quantification, on rencontre plusieurs approches utilisées dans la littérature pour évaluer et mesurer le bruit dans les images de télédétection. Plusieurs métriques de mesure de bruit exploités dans la littérature sont basées sur des notions comme SNR, PSNR, MSE [51]. Certains auteurs comme Crespi et al [45] ont utilisé de petites fenêtres carrées glissantes pour calculer les comptes numériques et l'écart-type dans les zones homogènes ou hétérogènes de l'image et ont obtenu ensuite l'ensemble du bruit de l'image [45]

Par contre, comme notre méthode traite de l'estimation de la réponse d'impulsion via l'évaluation de la MTF et en utilisant les bords de l'image, nous avons choisi une approche spécifique pour évaluer le comportement de notre méthode en fonction du bruit contenu dans les ROI englobant les bords utilisés. Nous avons en effet choisi l'approche utilisée par Choi et al [38] qui ont proposé une formulation spécifique qui est d'ailleurs conforme à la définition communément admise du bruit. Ces auteurs ont défini le bruit du signal comme la différence entre les valeurs moyennes des DN de chaque région latérale se trouvant de



part et d'autre du profil de bord. Tandis que la déviation standard a été calculée comme la moyenne des écarts-types de chaque région. Ceci étant considéré particulièrement approprié dans notre étude puisque nous utilisons des bords pour estimer la MTF.

En effet, le SNR du bord est calculé en utilisant l'écart-type des deux régions claires et sombres ainsi que de la différence en DN entre les deux régions conformément à l'équation (5.16):

$$SNR = \frac{DN\_Difference}{(STD\_Bright + STD\_Dark)/2} \quad (5.16)$$

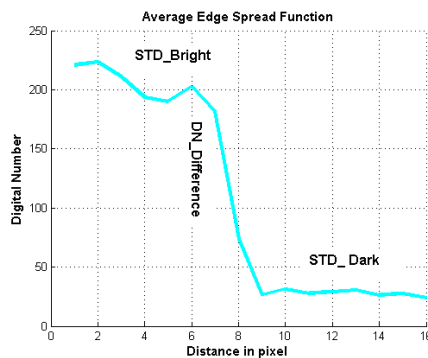


Figure 5.16 Principe de calcul du rapport signal à bruit

Compte tenu de la méthode décrite dans la section 2.9, le SNR comme métrique de bruit est calculé le long des bords des images utilisées pour évaluer la MTF. La figure 5.16 montre comment est calculée le SNR.

Dans l'objectif de mettre l'accent sur les caractéristiques de bruit, un ensemble représentatif d'images satellites a été utilisé. La figure 5.17 montre un zoom de la méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle proposée où cette étape d'estimation de l'effet du bruit a été insérée. Ces calculs de SNR ont été introduits dans la méthode proposée présentée dans la figure 5.2 avant l'étape de la moyenne et celle de l'interpolation de FERMI afin de permettre une estimation réelle du bruit le long du bord puisque les valeurs de la ESF à cette étape sont encore brutes et demeurent encore représentatives de bruit réel.

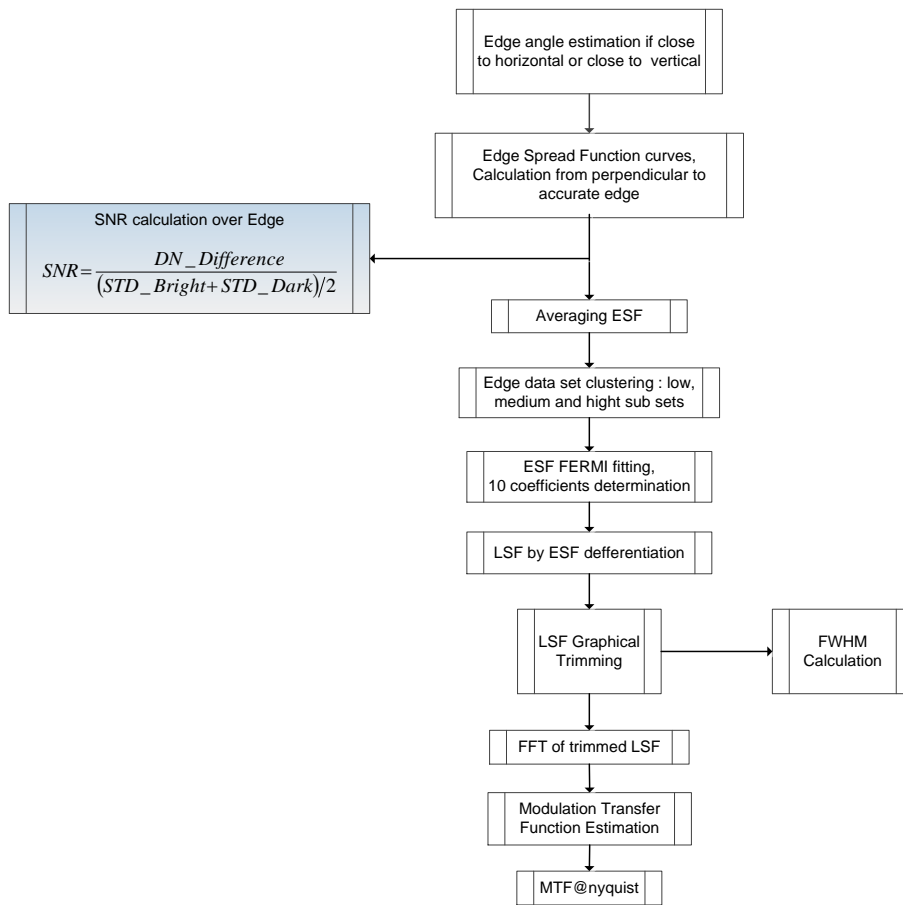
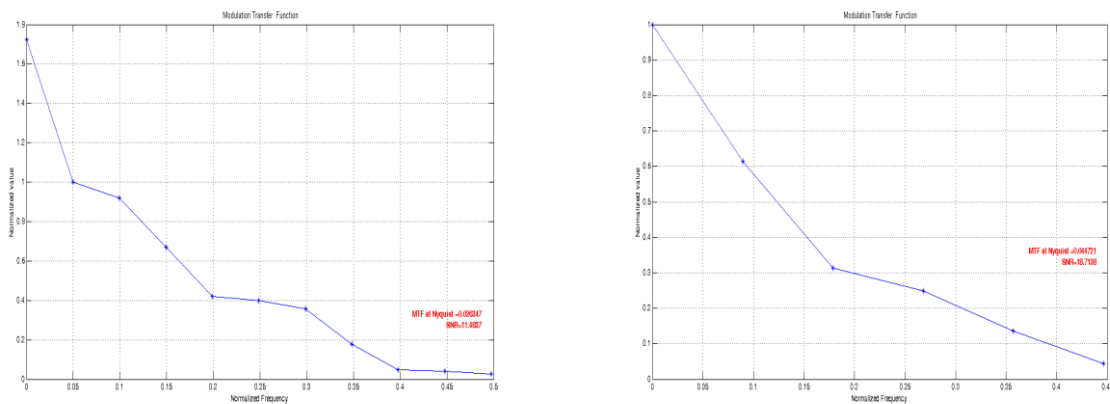


Figure 5.17 Une mise en relief de l'étape de calcul du SNR telle qu'intégrée dans la méthode

La figure 5.18 regroupe quelques exemples de profils et de valeurs de la MTF à la fréquence de Nyquist avec une mesure simultanée du bruit naturel exprimé par le SNR le long des bords utilisés.



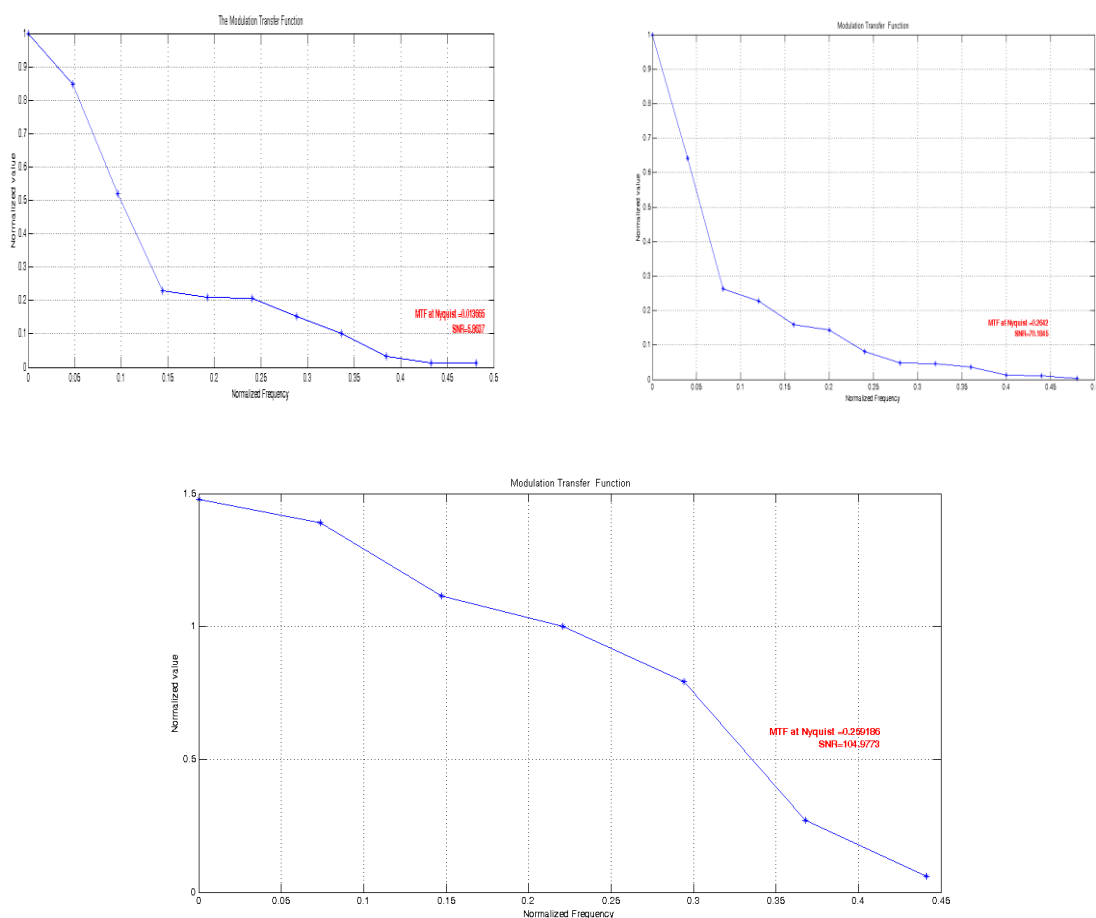


Figure 5.18 Exemples de MTF estimées avec les SNR associés calculés

Comme synthétisé dans la figure 5.19, nous avons remarqué une sous-estimation de la MTF pour les images avec un SNR en deçà de 57%. Un SNR plus élevé permet des estimations correctes de la MTF.

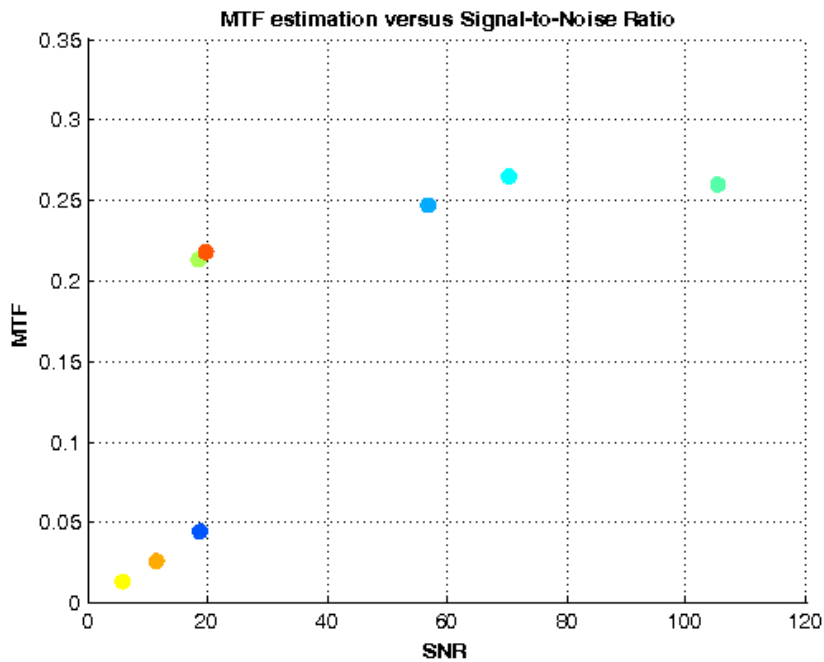


Figure 5. 19 Valeurs de MTF estimées avec correspondances SNR

Cependant, le bruit dans les images de télédétection ne peut pas être isolé de la structure intrinsèque de l'image [45]. Dans notre étude, afin de parvenir à une évaluation du bruit indépendante des variations de la texture de l'image, nous avons utilisé une image satellite référence réelle d'un site au sol largement connu pour son utilisation pour l'évaluation de la MTF des satellites optiques. Le site au sol utilisé est un damier peint en noir et blanc situé à 'Salon de Provence' dans le sud de la France. L'image a été acquise en Décembre 2012. Il convient de mentionner que l'image du site et de l'ensemble de données d'image utilisés proviennent du même détecteur embarqué. La MTF évaluée à la fréquence de Nyquist avec une image originale du site en damier est de  $0.26 + \sigma$  dans la direction across track. Les résultats ont été obtenus après une série de mesures afin d'atténuer plusieurs types d'erreurs tels que le bruit naturel et les erreurs de manipulation humaines du moment que le choix du bord reste manuel. Un bruit blanc gaussien WGN est ajouté à l'image du site comme le montre la figure 5.20 avec des incréments de 2 dB, et à chaque itération la MTF est estimée le long du bord par les routines développées. La figure 5.21 montre un exemple d'un zoom sur un bord bruité pour l'estimation dans la direction A-cross track de la MTF, obtenus après addition du bruit blanc gaussien WGN à l'image du site en damier

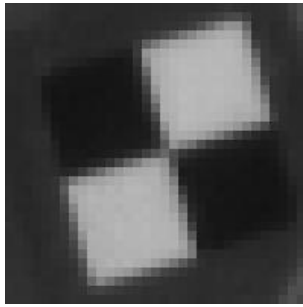


Figure 5.20 Image test de 'Salon de Provence'

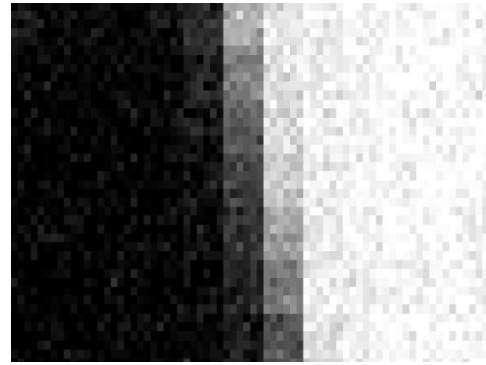


Figure 5.21 Zoom sur une mire bruitée

La figure 5.22 montre comment nous avons intégré l'image du site de sol et le bruit blanc gaussien à notre approche générale. Le bruit gaussien est ajouté et l'image bruitée obtenue est passée comme argument en entrée à la méthode générale proposée d'estimation de la réponse impulsionnelle et qui donne en sortie les valeurs de la MTF à Nyquist.

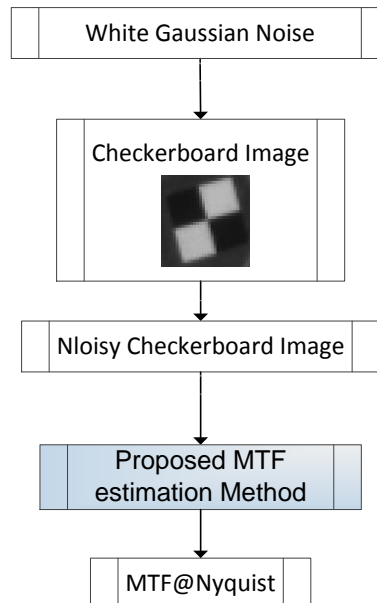


Figure 5.22 Processus d'addition du bruit blanc gaussien à la mire de Salon de Provence, France

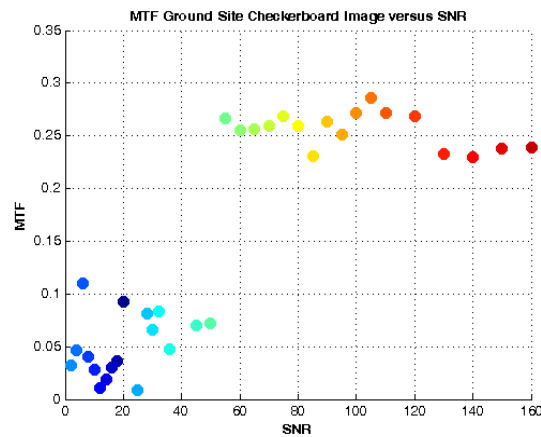


Figure 5.23 Valeurs de MTF estimées avec correspondances WGN avec mire en damier de Salon

La figure 5.22 illustre le comportement de la méthode d'estimation de la MTF pour les images avec le bruit blanc progressivement ajouté. Nous avons obtenu des résultats tout à fait acceptables lorsque le SNR était supérieur à 56%. Comme illustré par les cercles dans cette figure, les valeurs de la MTF sont sous-estimées et non précises lorsque le SNR est peu élevé. La différence entre ces résultats et ceux obtenus lors de l'utilisation des images avec bruit naturel (bonne précision > 56%) peut être expliquée par la différence entre les deux séries d'images du moment que les images des cibles au sol sont beaucoup plus nettes par rapport aux scènes naturelles quelconques. De plus, les cibles sont régulièrement maintenues et prédestinées à une utilisation pour l'estimation de la réponse impulsionnelle des satellites optiques. Par ailleurs, Choi et al. [38] ont commencé à obtenir des valeurs précises de MTF à partir de 70% de SNR en utilisant des cibles de sites artificiels. Cette différence est encore en cours de vérification, et est due soit à la différence entre les ensembles de données utilisés soit à la différence entre les deux détecteurs et de leurs caractéristiques intrinsèques respectives de bruit.

Dans cette étude, nous avons effectué une estimation de la réponse impulsionnelle d'un système imageur et d'autre part une estimation du SNR de l'image est effectuée. Ces deux étapes vont nous permettre d'aborder la déconvolution de l'image. En effet, comme illustré dans la figure 5.2, le calcul de la FWHM désigné par le cercle numéroté 13, et donc l'estimation de SNR via le procédé illustré par la figure 5 ;17, nous permet l'utilisation de la

déconvolution de Wiener pour une restauration de l'image. Dans la phase avancée de la déconvolution nous allons suivre l'approche introduite par Oh et al. [52] dans la déconvolution des images de l'instrument satellitaire GOCI. Cette approche peut être formulée par l'équation 5.17:

$$W(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \cdot \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + \frac{1}{SNR}} \quad (5.17)$$

Où  $W(u, v)$  représente les valeurs du filtre de Wiener et  $H(u, v)$  le modèle de dégradation qui n'est autre que la FWHM de la PSF estimée dans notre méthode. Afin d'effectuer une exploitation adéquate du filtre de Wiener adéquat, les valeurs du SNR doivent être calculées sur la région homogène la plus proche de chaque image. Oh et al.[52] et aussi Blanc et al. [53] ont démontré que les valeurs du filtre de Wiener dépendent fortement du profil du SNR.

## Conclusion

La méthode objet de ce chapitre consiste à sélectionner dans l'image un contour ou edge qui obéit à certains critères comme : il doit être décalé de quelques degrés par rapport à la verticale, sa dynamique doit couvrir la dynamique générale de l'image, il doit être orienté selon les directions principales de cross track et de in track du satellite d'observation, non orienté selon les bords de l'image, d'une hauteur supérieure à une dizaine de pixels, assez large pour permettre l'élimination du bruit. Ensuite une procédure implémentée permet de traiter ce contour de telle manière à ce que l'on parvienne à estimer la fonction de transfert de modulation de la camera satellitaire ayant acquis l'image.

Nous avons appliqué cette méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un système imageur sans 'à priori' et sans connaissance préalable ni du système ni de sa dégradation. Nous avons opté pour la méthode qui utilise les informations déjà contenues dans l'image. Nous avons exploité des structures particulières naturelles ou urbaines qui, choisies avec soin trahissent les noyaux de convolution ou kernel du système imageur. Nous avons établi un cadre de travail qui s'inspire d'une multitude de méthodes et avons apporté des contributions originales en vue de résoudre certaines problématiques liées entre autre à l'amélioration de l'efficacité de la méthode et à l'automatisation de certaines étapes qui suppriment les biais humains et contribuent ainsi à la performance de la méthode.



## References

- [33] Bowen HS, Dial G, IKONOS calculation of MTF using stellar images, in Proceedings of the High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop [power point slides], Reston, VA, 25-27 Mar 2002
- Leger, D., Duffaut, J., Robinet, F., MTF measurement using spotlight. IGARSS '94, Pasadena, California, USA. 1994
- [34] Blanc P., Wald L, A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors, 2009
- [35] Faran S., Eshet I., Yehezkel N., Molcho J. Estimation of the MTF of a satellite imaging system from celestial scenes, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, IGARSS, 2009
- [36] Thomas C., Blanc P., Ranchin T., Wald L. Geometric quality of images: estimation of the MTF *In proceedings* 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005
- [37] Viallefont-Robinet F. Edge method for on-orbit defocus assessment, *Opt Express*. 2010 Sep 27;18(20):20845-51, 2010
- [38] Choi, T. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method, Thesis Master of Science, South Dakota State University, 2002
- [39] Storey, J.C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation, Proceedings- SPIE the international society for optical engineering; 0277-786X, 2001
- [40] Bensebaa, K., Banon, G. J. F. Fonseca, L. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-1 CCD imaging system from bridge images INPE ePrint: sid.inpe.br/yolanda/2004/08.12.09.18 v2, 2006
- [41] Bensebaa, K., Banon, G. J. F., Fonseca, L.M.G., Erthal G.J. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-2 CCD imaging system using ideal step edge target, INPE ePrint: sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.01.16.17 v1, 2007
- [42] Estriebeau M., Magnan P, Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted edge methodology Proceeding of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - Volume 5251 - Detectors and [43] Associated Signal Processing, 2004
- Servoss, T., Vogler, S. On-Orbit System MTF Measurement, 2004
- [44] Bu F. QIU Y. YAN X. Improvement of MTF Measurement and Analysis Using Knife-Edge Method, *Journal of Computational Information Systems* 9: 3 (2013) 987-994, 2013
- [45] Crespi, M. 1, De Vendictis, L; A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment, *Sensors* 2009,
- [46] Chawla, A. Roehrig, H. Rodriguez, J. Fan, J. Determining the MTF of Medical Imaging Displays Using Edge Techniques, *J Digit Imaging*. Dec 2005; 18(4): 296-310
- [47] Boone JM, Seibert JA. An analytical edge spread function model for computer fitting and subsequent calculation of the LSF and MTF. *Med Phys*. 1994;21:1541-1545. doi: 10.1118/1.597264
- [48] Tzannes, A.P., Mooney, JM. "Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras", *Opt. Eng.* 34(6), 1808-1817 (Jun 01, 1995). ; <http://dx.doi.org/10.1117/12.203133>
- [49] Tiecheng Li ; Huajun Feng ; Zhihai Xu ; Xiaotong Li ; Zhaofeng Cen ; Qi Li , Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting Proc. SPIE 7498, Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications, 74981H, 2009
- [50] Tiecheng Li, Huajun Feng, and Zhihai Xu, A new analytical edge spread function fitting model for modulation transfer function measurement, *Chinese Optics Letters*, Vol. 9, Issue 3, pp. 031101- (2011)
- [51] Ansari, R.A., Mohan B. K., Noise Filtering Of Remotely Sensed Images Using Iterative Thresholding Of Wavelet And Curvelet Transforms, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, November 2014
- [52] E., Oh, J.K. Choi, GOCI image enhancement using an MTF compensation technique for coastal water applications, *Remote sensing and sensors*; (100.2980) Image enhancement, Optical Society of America, 2014
- [53] Blanc P., Wald L, A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors, 2009

## Conclusion Générale

Nous avons implémenté deux méthodes. La première est basée sur les RNA et consiste à séparer les informations dues à l'image de celles relatives à la structure du paysage, de réaliser un apprentissage du RNA pour pouvoir reconnaître les profils de la MTF d'une manière aveugle sur des images quelconques issues du même satellite d'observation. La deuxième méthode, appelée méthode de bord de plage, est basée sur l'exploitation de certaines informations contenues dans l'image. En effet, les routines développées permettent après un choix manuel d'un contour adéquat de traiter le profil du contour et d'en extraire la fonction d'étalement du contour qui est ensuite soumise à une différentiation numérique et à une FFT qui nous donnera la valeur de la fonction de transfert de modulation à la fréquence de Nyquist qui est une description précise de la réponse impulsionnelle du système imageur.

C'est ainsi que dans ce travail, nous avons estimé d'une manière univariante la réponse impulsionnelle d'un instrument optique d'observation de la Terre à travers l'estimation de sa fonction de transfert de modulation. Nous avons effectué une synthèse des différentes méthodes existantes. Etant donné que l'utilisation de cibles terrestres artificielles est particulièrement contraignante, nous avons alors opté pour l'utilisation de l'information contenue dans l'image elle-même. Cette méthode nous permet d'exploiter les informations contenues dans l'image, sans connaissance préalable de l'instrument ou du satellite qui a enregistré l'image.

Nous avons appliqué cette méthode pour estimer la MTF d'un satellite optique de haute résolution. Dans cette méthode, le profil de la MTF provient de la transformée de Fourier de la LSF, qui est elle-même dérivée de la ESF. La qualité de la ESF estimée impacte grandement la reconstruction de la MTF. Nous avons mis en œuvre un algorithme articulé en plusieurs étapes de calculs pour estimer la MTF d'une image tout en étant reproductible et robuste au bruit. Nous avons tenté de résoudre deux problèmes majeurs rencontrés au cours de cette estimation: le bruit et l'aliasing.

Nous avons obtenu des estimations correctes de la MTF sur les profils particulièrement bruités. Les méthodes d'estimation de la réponse impulsionnelle disponibles comprennent des étapes manuelles pour le choix visuel du bord approprié ou le calcul de certains paramètres. Cela ralentit le traitement et le rend fastidieux.

Nous avons introduit un facteur de qualité pour les valeurs DN de pixels devant être utilisées dans la reconstruction de ESF afin d'assurer son lissage et d'exclure les valeurs aberrantes et le bruit. De plus, cette étape a permis de s'affranchir des étapes impliquant des interventions et des calculs manuels. Ce qui a fourni un gain significatif en termes de robustesse, de temps et de précision dans l'estimation de la ESF.

A travers l'approche que nous avons considérée, nous avons tenté dans cette étude de surmonter certaines limites comme les règles de sélection des cibles et l'automatisation de plusieurs étapes de calcul comme la détermination sous-pixellique du bord. C'est ainsi que nous avons introduit une classification par *K-means* des données de la ESF dans des sous-ensembles pour préparer les données à une interpolation de FERMI automatique. Ceux-ci nous ont permis d'appliquer le processus d'estimation de la réponse impulsionnelle même à des images bruitées et irrégulières.

Par ailleurs, afin de passiver l'effet des lobes secondaires lors du calcul de la LSF à partir de la ESF, nous avons considéré les deux cas éventuels des bords naturels et des cibles artificielles. Dans les deux situations nous sommes parvenus à un calcul adéquat avec suppression de l'effet des lobes collatéraux de la ESF, que nous avons soumis à une transformation numérique de Fourier pour avoir une estimation de la MTF à la fréquence de Nyquist. Ceci a été réalisé par la mise au point d'une technique originale de réduction de la ESF basée sur des points de passage par zéro considérés dans le jeu de données de la ESF.

En outre, l'effet du bruit des bords utilisés est formellement vérifié dans notre étude en considérant soit un ensemble de bords naturels avec différents niveaux de bruit mesurés soit par l'intermédiaire d'une cible damier réelle acquise avec le même détecteur que celui

utilisé pour l'enregistrement des scènes naturelles. Un bruit gaussien blanc progressif est ajouté à la cible damier pour étudier le comportement de notre méthode vis-à-vis du bruit.

Par contre, notre approche peut rencontrer deux limites: d'abord, les règles qui régissent le choix du bord adéquat utilisé pour démarrer l'estimation de la réponse impulsionnelle. Ces règles peuvent entraîner une exclusion des images dont les bords ne sont pas conformes. Bien que, dans notre base de données beaucoup d'images sont en accord avec les règles spécifiées.

La seconde limitation peut résider dans le fait que les bords utilisés ne doivent pas avoir un SNR inférieur à 56%. Dans le cas échéant la méthode donne des valeurs sous estimées de la MTF, ce qui n'est pas en contradiction avec les standards universellement utilisés dans la quantification du bruit acceptable des images de télédétection en modalité panchromatique qui considère qu'à partir d'un SNR de 100 %, l'image est injectée dans les circuits de diffusion et vente des propriétaires de satellites d'observation de la Terre.

Cependant, on peut affirmer que certains compromis obligatoires doivent être envisagés et réalisés entre la précision d'estimation de la MTF et le niveau minimum du bruit de l'image naturelle en deçà desquels l'estimation de MTF peut éventuellement échouer.

Par conséquent, l'estimation de la MTF ne peut être effectuée sans l'estimation de bruit qui agit comme un critère de confiance des valeurs de MTF évaluées en particulier quand il n'y a aucune estimation alternative de référence.

Comme perspective, nous prévoyons d'introduire deux améliorations que nous jugeons utiles à l'approche objet de cette thèse : d'abord, nous gagnerons à automatiser la première étape de sélection du bord approprié qui est actuellement une investigation manuelle (visuelle) de l'ensemble de l'image. La deuxième amélioration est d'utiliser une approche génétique pour améliorer l'extraction et la qualité de lissage de la courbe de la ESF, ce qui permettra ensuite de comparer les résultats avec ceux obtenus dans notre travail et qui sont basés sur un fitting de FERMI.

## Référence

- [1] Jalobeanu, A., Zerubia, J., Blanc-Féraud, L. "Bayesian estimation of blur and noise in remote sensing imaging" in *Blind image deconvolution: theory and applications* (CRC), P. Campisi and K. Egiazarian ed., Taylor & Francis / CRC Press, 2007
- [2] A.K. Jain. *Fundamentals of digital image processing*, information and system sciences series. Prentice Hall, 1989.
- [3] Regeon, P. and Chapman, J. "CLEMENTINE: New Directions and Perspectives for One-of-a-Kind Spacecraft Missions." Paper presented at the Small Satellite Conference, Utah State University, Aug. 29- Sept. 1, 1994
- [4] Thomas, Claire (2006) *Fusion d'images de résolutions spatiales différentes*. Doctorat Informatique et Temps Réel, Robotique, Automatique, ENSMP - CEP Centre Energétique et Procédés, Paristech > ENSMP.
- [5] Reyes, M. G., Zhao, X., Neuhoff, D. L. & Pappas, T. N. (2008). Structure-preserving Properties of Bilevel Image Compression, *Human Vision and Electronics Imaging XIII*, Proc. SPIE vol. 6806.
- [6] Thomas C., Blanc P., Ranchin T., Wald L. Geometric quality of images: estimation of the MTF In proceedings 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005
- [7] Estribeau M., Magnan P, Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted edge methodology Proceeding of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - Volume 5251 - Detectors and Associated Signal Processing, 2004
- [8] C. Latty. *Restauration des images optiques satellitaires*. Séminaire Restauration d'images de télédétection, CCT TSI, CNES, Toulouse, Avril 2001.
- [9] B. Rougé. *Théorie de la chaîne image et restauration d'image optique à bruit nul*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, France, 1997.
- [10] A.K. Jain. *Fundamentals of digital image processing*. information and system sciences series. Prentice Hall, 1989.
- [11] S. Tramini, M. Antonini, M. Barlaud et G. Aubert. *Prise en compte de la chaîne complète d'acquisition-compression pour le décodage optimal d'images*. In GRETSI, Vannes, France, Sept. 1999.
- [12] Ansari, R.A., Mohan B. K., *Noise Filtering of Remotely Sensed Images Using Iterative Thresholding Of Wavelet And Curvelet Transforms*, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, November 2014
- [13] Choi, T., D.L. Helder, *Choice Generic sensor modelling for modulation transfer function (MTF) estimation*; Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing", Sioux Falls, South Dakota, 2005
- [14] Helder, D., Choi, J. *On-orbit Modulation Transfer Function (MTF) measurements on QuickBird*. In Proceedings of the 2003 High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop, NASA/NIMA/USGS Joint Agency Commercial Imagery Evaluation Team: Reston, VA, USA, 2003.
- [15] Ryan, R. Braxton Baldrige, Robert A. Schowengerdt, Taeyoung Choid, Dennis L. Helder, Slawomir Blonski. *IKONOS spatial resolution and image interpretability characterization*, Elsevier, Remote Sensing of Environment 2003
- [16] Luxen, M., Förstner, W. *Characterizing image quality: blind estimation of the point spread function from a single image*, In Proceedings of the PCV'02 Symposium. 2002.
- [17] Chawla, A., Roehrig, H., Rodriguez, J., Fan, J. *Determining the MTF of Medical Imaging Displays Using Edge Techniques*, J Digit Imaging. Dec 2005; 18(4): 296-310
- [18] Storey, J.C. *Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation*, Proceedings- SPIE the international society for optical engineering; 0277-786X, 2001
- [19] Choi, T., D.L. Helder, *Choice Generic sensor modelling for modulation transfer function (MTF) estimation*; Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing", Sioux Falls, South Dakota, 2005
- [20] Estribeau M., Magnan P, *Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted edge methodology* Proceeding of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - Volume 5251 - Detectors and Associated Signal Processing, 2004
- [21] Leger, D., Duffaut, J., Robinet, F., *MTF measurement using spotlight*. IGARSS '94, Pasadena, California, USA. 1994
- [22] Bowen HS, Dial G, *IKONOS calculation of MTF using stellar images*, in Proceedings of the High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop [power point slides], Reston, VA, 25-27 Mar 2002
- [23] Thomas C., Blanc P., Ranchin T., Wald L. *Geometric quality of images: estimation of the MTF* In proceedings 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005
- [24] M. Jung, D. Léger, *Modelling the visual detection of defects on image with a neural network*, 11th Portuguese Conference on Pattern Recognition Porto (Portugal), May 11-12, 2000
- [25] J.-M. DELVIT 1, D. LEGER, *Estimation de la Fonction de Transfert de Modulation l'aide d'un Réseau de Neurones*, GRETSI 2003
- [26] Chris Ding et Jieping Ye. « Décomposition 2D (2DSVD) pour cartes et images », Proc. SIAM Int'l Conf. Data Mining (SDM'05), pp:32-43, April 2005

- [27] A. Benbouzid, N. Taleb. A No a priori Knowledge Estimation of the Impulse Response for Satellite Image, JASR 12098, 28-FEB-2015, Advances in Space Research 55 (2015), pp. 1885-1900, DOI information: 10.1016/j.asr.2015.01.009
- [28] F. Crete-Roffet, T. Dolmiere, P. Ladret, M. Nicolas. The Blur Effect: Perception and Estimation with a New No-Reference Perceptual Blur Metric. SPIE Electronic Imaging Symposium Conf Human Vision and Electronic Imaging, Jan 2007, San Jose, United States. XII, pp. EI 6492-16.
- [29] M. Kristan, J. Pers, M. Perse, S. Kovacic, A Bayes-Spectral-Entropy-Based Measure of Camera Focus Using a Discrete Cosine Transform, Pattern Recognition Letters (Impact Factor: 1.55). 10/2006; DOI: 10.1016/j.patrec.2006.01.016
- [30] F. Albrechtsen, Statistical Texture Measures Computed from Gray Level Co-occurrence Matrices, Image Processing Laboratory, Department of Informatics, University of Oslo, November 5, 2008
- [31] Kourgli A, Belhadj Aissa A (2003) Segmentation texturale des images urbaines par le biais de l'analyse variographique. Teledetection 3: 337-348.
- [32] E. Samei, N. Ranger, J. Dobbins, Y. Chen, Intercomparison of methods for image quality characterization. I. Modulation transfer function, Medical Physics, Vol. 33, No. 5, May 2006
- [33] Bowen HS, Dial G, IKONOS calculation of MTF using stellar images, in Proceedings of the High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop [power point slides], Reston, VA, 25-27 Mar 2002
- Leger, D., Duffaut, J., Robinet, F., MTF measurement using spotlight. IGARSS '94, Pasadena, California, USA. 1994
- [34] Blanc P., Wald L, A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors, 2009
- [35] Faran S., Eshet I., Yehezkel N., Molcho J. Estimation of the MTF of a satellite imaging system from celestial scenes, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, IGARSS, 2009
- [36] Thomas C., Blanc P., Ranchin T., Wald L. Geometric quality of images: estimation of the MTF *In proceedings* 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005
- [37] Viallefont-Robinet F. Edge method for on-orbit defocus assessment, Opt Express. 2010 Sep 27;18(20):20845-51, 2010
- [38] Choi, T. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method, Thesis Master of Science, South Dakota State University, 2002
- [39] Storey, J.C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation, Proceedings- SPIE the international society for optical engineering; 0277-786X, 2001
- [40] Bensebaa, K., Banon, G. J. F., Fonseca, L. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-1 CCD imaging system from bridge images INPE ePrint: sid.inpe.br/yolanda/2004/08.12.09.18 v2, 2006
- [41] Bensebaa, K., Banon, G. J. F., Fonseca, L.M.G., Erthal G.J. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-2 CCD imaging system using ideal step edge target, INPE ePrint: sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.01.16.17 v1, 2007
- [42] Estriebeau M., Magnan P, Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted edge methodology Proceeding of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - Volume 5251 - Detectors and [43] Associated Signal Processing, 2004
- Servoss, T., Vogler, S. On-Orbit System MTF Measurement, 2004
- [44] Bu F. QIU Y. YAN X. Improvement of MTF Measurement and Analysis Using Knife-Edge Method, Journal of Computational Information Systems 9: 3 (2013) 987-994, 2013
- [45] Crespi, M. I, De Vendictis, L; A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment, Sensors 2009,
- [46] Chawla, A. Roehrig, H. Rodriguez, J. Fan, J. Determining the MTF of Medical Imaging Displays Using Edge Techniques, J Digit Imaging. Dec 2005; 18(4): 296-310
- [47] Boone JM, Seibert JA. An analytical edge spread function model for computer fitting and subsequent calculation of the LSF and MTF. Med Phys. 1994;21:1541-1545. doi: 10.1118/1.597264
- [48] Tzannes, A.P., Mooney, J.M. "Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras", Opt. Eng. 34(6), 1808-1817 (Jun 01, 1995). ; <http://dx.doi.org/10.1117/12.203133>
- [49] Tiecheng Li ; Huajun Feng ; Zhihai Xu ; Xiaotong Li ; Zhaofeng Cen ; Qi Li , Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting Proc. SPIE 7498, Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications, 74981H, 2009
- [50] Tiecheng Li, Huajun Feng, and Zhihai Xu, A new analytical edge spread function fitting model for modulation transfer function measurement, Chinese Optics Letters, Vol. 9, Issue 3, pp. 031101- (2011)
- [51] Ansari, R.A., Mohan B. K., Noise Filtering Of Remotely Sensed Images Using Iterative Thresholding Of Wavelet And Curvelet Transforms, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, November 2014
- [52] E., Oh, J.K. Choi, GOCI image enhancement using an MTF compensation technique for coastal water applications, Remote sensing and sensors; (100.2980) Image enhancement, Optical Society of America, 2014

[53] Blanc P., Wald L, A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors, 2009