

*République Algérienne démocratique et populaire*

*Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique*

*Université des Sciences et Technologies d'Oran*

N° de série :.....

N° d'ordre :.....

*Mohammed Boudiaf*

**Faculté de Génie Electrique** Département de l'Electronique  
*Ecole Doctorale des Techniques et Applications Spatiales*

**Mémoire**

Pour l'obtention du diplôme de **Magister** en électronique

Option : **Instrumentation Spatiale**

L'Ecole Doctorale des Techniques et Applications Spatiales

Par : **Mr.NEMIR FARID**

**Etude de l'Estimation en Vol de la Qualité Image d'un Instrument  
d'Observation de la Terre**

**Devant le jury :**

Président :	Mr.BELGHORAF Abderrahmane	Professeur	Univ. USTO
Rapporteurs:	Mr.ALI Pacha Adda	Professeur	Univ. USTO
	Mr.BENBOUZID Ayhane	Attaché de recherche	CTS
Examineurs:	Mr.BOUGHANMI Nabil	Professeur	Univ. USTO
	Mr.BEKTI Mohamed	Maitre de recherche	CTS

Soutenu le: .. / .. / 2011

## **Remerciement**

*Je présente, en signe de reconnaissance et en toute humilité mes remerciements fervents à celui qui a honoré par la raison et m'a préféré de toute la création seul digne de louange et d'éloge, ALLAH qu'il soit loué.*

*Cette thèse de magistère s'est déroulée au sein de l'École Doctorale des Techniques et Applications Spatiales à l'Université des Sciences et Technologies d'Oran en collaboration avec le Centre des Techniques Spatiales ; qui m'ont offert tous les moyens nécessaires pour aboutir aux objectifs de cette thèse.*

*Je tiens tout particulièrement à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur ALI PACHA Adda, professeur à l'Université de l'USTO ainsi que Monsieur BENBOUZID Ayhane attaché de recherche au CTS, qui m'ont accueilli, dirigé et soutenu dans cette étude. Leur disponibilité et leurs conseils ont été indispensables à la concrétisation de cette thèse.*

*À Monsieur BOUGHANMI Nabil, chef d'option et professeur à l'Université de l'USTO, j'adresse ma plus respectueuse reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à l'École Doctorale des Techniques et Applications Spatiales.*

*Je tiens aussi à présenter mes remerciements à Monsieur BELGHORAF Abderrahmane, professeur à l'Université de l'USTO, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.*

*Je remercie sincèrement Monsieur BEKTI Mohamed, Maître de Recherche au CTS, d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*NEMIR Farid*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes chers parents*

*À mes frères et ma sœur*

*À tous ma famille*

*À tous mes collègues et mes amis partout*

*À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science*

*À tous ceux qui utilisent la science pour le bien*

*et la prospérité de l'humanité.*

*NEMIR Farid*

## Résumé

Des images haute résolution spatiale prises par satellite sont souvent utilisées dans de nombreux domaines de recherche. Ce travail est une tentative pour mesurer la Fonction de Transfert de Modulation en orbite (MTF « Modulation Transfer Function ») pour des satellites d'imagerie à haute résolution spatiale en exploitant une méthode dite bord de plage (Edge Method). Les estimations de la MTF déterminées par cette méthode sont compatibles avec les spécifications d'approvisionnement des capteurs considérés.

Les résultats proprement obtenus par cette méthode démontrent le potentiel d'applicabilité de cette méthode pour estimer les MTF pour les autres capteurs à haute résolution spatiale.

## Abstract

High spatial resolution images taken by satellites are often used in many research areas. This work is an attempt to measure the Modulation Transfer Function in orbit (MTF "Modulation Transfer Function) for imagery satellites at high spatial resolution by exploiting a method named Edge method. The estimates of the MTF determined by this method are consistent with the procurement specifications of the considered sensors.

The neatly results obtained by this method demonstrate the potential applicability of this method to estimate the MTF for other sensors at high spatial resolution.

## Table des matières

Page de garde.....	i
Remerciements .....	ii
Dédicace .....	iii
Résumé .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	xi
Liste des figures.....	xii
Introduction .....	1
Chapitres	
Chapitre 1 : Introduction aux chaînes d'acquisition d'image satellite	
1.1 Objectifs .....	3
1.2 Domaines abordés .....	3
1.3 Vers une définition du traitement d'images .....	6
1.4 Caractéristiques des images satellite .....	7
1.5 La chaîne de traitement d'image bord-sol.....	12
1.5.1 Les capteurs.....	14
1.5.2 Principe de fonctionnement des capteurs CCD.....	15

1.5.2.1 Transfert de charge élémentaire .....	15
1.5.2.2 Schéma d'ensemble d'un capteur CCD .....	16
1.5.3 Performances et caractéristiques du CCD.....	17
1.6. Un peu de théorie .....	19
1.6.1 L'échantillonnage .....	20
1.6.2 La quantification .....	21
1.7 Conclusion.....	22
Chapitre 2 : Chaîne de Dégradation d'Image	
2.1 Formation d'image .....	23
2.2 Hypothèses .....	24
2.2.1 Géométrie .....	24
2.2.2 Rayonnement.....	25
2.3 La chaîne des dégradations .....	25
2.4 Les opérateurs mathématiques de dégradation des images satellites.....	30
2.4.1 Flou : réponse impulsionnelle et fonction de transfert.....	30
2.5 Les sources de dégradations.....	32
2.5.1 Bruit lié au contexte de l'acquisition .....	32
2.5.2 Bruits liés au capteur .....	32
2.5.3 Bruit lié à l'échantillonnage.....	33
2.5.4 Bruit lié à la nature de la scène .....	33

2.6	Dégradations dues à l'électronique du CCD.....	34
2.6.1	Aliassage et Théorème de Nyquist.....	35
2.6.2	Bruit de la caméra CCD .....	36
2.6.3	Le blooming .....	37
2.6.4	Le flou .....	38
2.7	Modélisation.....	39
2.8	Restauration.....	40
2.9	Conclusion.....	40
Chapitre 3 : Fonction de Transfert de Modulation (MTF)		
3.1	Méthodes d'estimation de la Qualité Image d'un instrument d'observation de la Terre.....	41
3.1.1	Méthode Entrée Impulsionnelle .....	43
3.1.2	Méthode Entrée Sinusoïdale .....	44
3.1.3	Méthode d'Entrée Bord de Couteau.....	45
3.1.4	Méthode Entrée Pulsionnelle .....	46
3.2	Reconstitution du profil de la FTM.....	47
3.2.1	Mesure de réflectance de la cible .....	48
3.2.2	Implémentation de la méthode de Bord de plage.....	48
3.3	Description des méthodes de Caractérisation de la FTM .....	49
3.3.1	Méthode bord de plage.....	49
3.3.1.1	Détection de bord .....	49
3.3.1.2	Lignes de raccord des points du contour (Méthode des moindres carrés) .....	51

3.3.1.3	Technique de la moyenne.....	53
3.3.1.4	Fonction d'étalement des lignes (LSF).....	54
3.3.1.5	Équilibrage du LSF.....	55
3.3.1.6	Calcul de la MTF.....	56
3.3.2	Méthode d'impulsion.....	57
3.3.2.1	Calcul de la MTF.....	58
3.4	Calcul de l'équation de la droite du contour.....	60
3.5	Méthode d'estimation de la FTM.....	64
3.5.1	Limite des méthodes existantes.....	64
3.5.2	Principe de l'estimation de la FTM.....	65
Chapitre 4 : Analyse des résultats		
4.1	Détection du contour.....	68
4.2	Ajustement du contour.....	69
4.3	Validation de l'algorithme.....	72
4.3.1	Détection de bord.....	72
4.3.2	Fonction d'étalement des lignes (LSF).....	77
4.3.3	Équilibrage du LSF.....	78
4.3.4	Calcul de la MTF.....	79
4.3.5	SPOT5 Panchromatique.....	81
4.4	Comparaison des résultats avec le logiciel phETA.....	84

4.5 Analyse des erreurs .....	87
4.5.1 Définition Rapport signal / bruit (SNR) .....	87
4.5.2 Principe de génération de bruit .....	88
4.5.3 Principe de simulation du bruit au sol .....	90
4.5.4 Simulation de bruit du système .....	93
4.6 Conclusion sur la méthode d'estimation et perspectives d'amélioration .....	97
Conclusion générale .....	98
Perspectives .....	99
Référence .....	100
Appendis A .....	102
Appendis B .....	110

## Liste des tableaux

Tableau	Page
2.1 : Classification des différentes dégradations subies par la scène originale dans le processus de formation d'image .....	31
3.1 : Vérification des valeurs des coefficients de la droite pour le contour considéré – a) valeurs calculées par l'algorithme, b) valeurs obtenues à la main .....	63
4.1 : Résultats obtenus pour quatre autres contours.....	70
4.2 : Résultats de la routine d'estimation de la FTM pour la modalité Pan du satellite SPOT5.....	83
4.3 : Les niveaux de transition du contour pour la simulation de bruit du sol.....	90

## Liste des figures

Figure	page
1.1 Synoptique de la chaîne d'acquisition d'images .....	4
1 .2.a Spectre électromagnétique.....	5
1 .2.b Spectre électromagnétique .....	5
1.3 Image de Toulouse de taille 945×450 pixels acquise par le mode panchromatique de SPOT 5 à la résolution spatiale de 5m.....	7
1.4 Image couleurs simulée PLEIADES à la résolution de 70 cm de taille 945 × 450.....	9
1.5 Représentation d'une image hyperspectrale sous forme d'un cube.....	10
1.6 Chaîne de traitement bord/sol des images.....	13
1.7 Transfert de charge élémentaire .....	15
1.8 Schéma d'ensemble d'un capteur CCD linéaire .....	16
1.9 Linéarité du CCD .....	18
1.10 Formation de l'image.....	19
1.11 Numérisation d'un signal.....	20
2.1 Diagramme résumant la chaîne de formation de l'image discrète à partir de la scène originale .....	28
2.2 Trois méthodes pour capter des images couleurs avec une caméra CCD.....	34

2.3 À gauche, scène continue superposée à la grille de senseurs. À droite, l'image résultante après échantillonnage et quantification .....	35
2.4 Le moiré, un exemple d'aliassage .....	36
2.5 Exemple de blooming.....	37
2.6 Image originale (à gauche) et image comportant un bruit gaussien blanc d'écart-type $\sigma = 25$ .....	38
3.1 Un exemple de l'impulsion et le résultant PSF .....	43
3.2 Méthode d'entrée sinusoïdale .....	45
3.3 L'angle de la Cible au sol.....	47
3.4 Images satellite d'une cible .....	48
3.5 Brief explication de la Méthode bord de plage .....	49
3.6 Exemple d'un contour flou.....	50
3.7 Résultat de différentiation .....	50
3.8 Ligne de raccord des points du contour (Méthode des moindres carrés) .....	52
3.9 Un exemple d'interpolation des points cubiques.....	53
3.10 Un exemple de toutes les lignes des contours.....	53
3.11 La ligne pointée moyenne finale .....	54
3.12 Exemple de LSF (Line Spread Function) .....	54
3.13 LSF équilibré (Fonction d'étalement des lignes) .....	55
3.14 Exemple de la MTF .....	56
3.15 Brève explication de la méthode d'impulsion .....	57

3.16 Exemple d'une image de sortie .....	57
3.17 FT d'entrée et de sortie équilibrées.....	58
3.18 Fonction d'impulsions d'entrée .....	59
3.19 Exemple du résultat de la MTF.....	60
3.20 Image Ikonos – arête d'un bâtiment.....	61
3.21 Principe de la transformée de Hough, a) du domaine de l'image, vers b) et c) celui de Hough .....	62
3.22 a) contour reconstruit après le seuillage dans l'espace de Hough, b) contour reconstruit après seuillage de l'image a.....	63
3.23 Profil d'une transition.....	65
3.24 a) contour parfait, b) contour perçu à travers un système d'acquisition.....	66
3.25 Principe de l'approche basée contour .....	66
4.1 Contour réel .....	68
4.2 Contour aligné .....	69
4.3 Profil du premier contour .....	72
4.4 Profil aligné du premier contour .....	73
4.5 Résultat de différentiation .....	74
4.6 Un exemple de toutes les lignes du contour.....	75
4.7 Profil de la ligne moyenne avec tous les contours .....	76
4.8.a Alignement de la ligne moyenne.....	76
4.8.b La ligne moyenne alignée .....	77

4.9 Un exemple de LSF (Line Spread Function) .....	78
4.10 LSF équilibrée (Fonction d'étalement des lignes) .....	79
4.11 Exemple de la MTF .....	80
4.12 Image SPOT5 de modalité pan de Barcelone .....	82
4.13 Image du contour utilisée par le Logiciel phETA .....	85
4.14 Contour extrait de l'image de la figure 4.13 utilisé par notre méthode .....	85
4.15 La MTF obtenue grâce au Logiciel phETA .....	85
4.16 La MTF obtenue grâce à notre méthode .....	85
4.17 Définitions du SNR pour les profils contour (bord) et impulsion .....	87
4.18 Exemple sur l'image du bruit au sol .....	89
4.19 Principe de simulation du bruit au sol .....	91
4.20 Tracé du SNR et les valeurs de la MTF à la fréquence de Nyquist de la simulation du bruit au sol du contour cible .....	92
4.21 Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction randn.m .....	95
4.22 Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction imnoise.m .....	95

## **1. Introduction**

Les caractéristiques géométriques d'un système d'imagerie spatial 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.

La qualité d'une image est très souvent caractérisée par des critères radiométriques usuels tels que la moyenne, le contraste, la luminosité, la variance du bruit, ou la résolution radiométrique. Seuls quelques outils rendent compte de la performance géométrique des capteurs. Les plus fréquents sont ceux qui s'appuient sur la réponse d'un système optique à une impulsion lumineuse, le gradient ou d'autres filtres passe-haut (Zhou 1998), le Ground Sampled Distance GSD, la FWHM. Utilisés indépendamment les uns des autres, ces outils sont incomplets car ils n'extraient qu'une partie de la performance, et négligent ainsi les informations relatives aux autres fréquences spatiales transmises par le capteur. La FTM permet la caractérisation de la qualité géométrique globale des capteurs, en offrant une mesure précise effectuée dans le domaine des fréquences.

Dans ce document nous allons étudier quelques méthodes qui ont été utilisées pour caractériser les images de satellites connus de haute résolution.

Notre mémoire s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre est une introduction aux chaînes d'acquisition d'image satellite. Dans la première section, nous commençons par les définitions des notions nécessaires à la compréhension de ce qu'est l'acquisition d'images. Les caractéristiques des images satellites seront abordées dans la deuxième section. Enfin nous décrivons le principe de fonctionnement d'un capteur CCD.

Le deuxième chapitre présente dans la première section les étapes de formation d'une image; la seconde partie est consacrée quant à elle aux différents facteurs de dégradations subies par la scène originale dans le processus de formation d'image.

Le troisième chapitre porte sur l'approche de détection des contours ; quatre méthodes ont été examinées et sont brièvement décrites pour le calcul de la MTF. Les méthodes bord de plage et Entrée Pulsionnelle ont été choisies et présentées en détails en raison de la difficulté d'appréhension et d'implémentation que représentent les autres méthodes.

Le dernier chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus à partir de l'algorithme qui décrit la méthode bord de plage et toutes les étapes de cette procédure.

En conclusion générale, nous résumons notre contribution et tirons les conclusions sur l'approche développée.

## **1.1 Objectifs :**

Ce chapitre a deux objectifs, le premier est de fournir les notions nécessaires à la compréhension de ce qu'est l'acquisition d'images. Le second celui d'expliciter suffisamment les concepts et les technologies mises en œuvre dans l'acquisition d'images.

L'organisation de ce chapitre reflète la méthodologie appliquée pour l'acquisition d'une image satellite ; du monde réel vers l'image en mémoire, en passant par l'objectif, le capteur, le chemin du signal, la carte d'acquisition et la mémoire.

## **1.2 Domaines abordés :**

Dans ce chapitre; il s'agit d'aborder les processus d'acquisition des images, d'évoquer les transformations subies par les images brutes avant d'arriver à des images élaborées pour en saisir le contenu.

L'acquisition d'images représente le module qui relie l'image du monde réel, et celle stockée en mémoire. On peut le décomposer en plusieurs sections : l'optique, le capteur, le transport des données images (format et support), (figure 1.1).

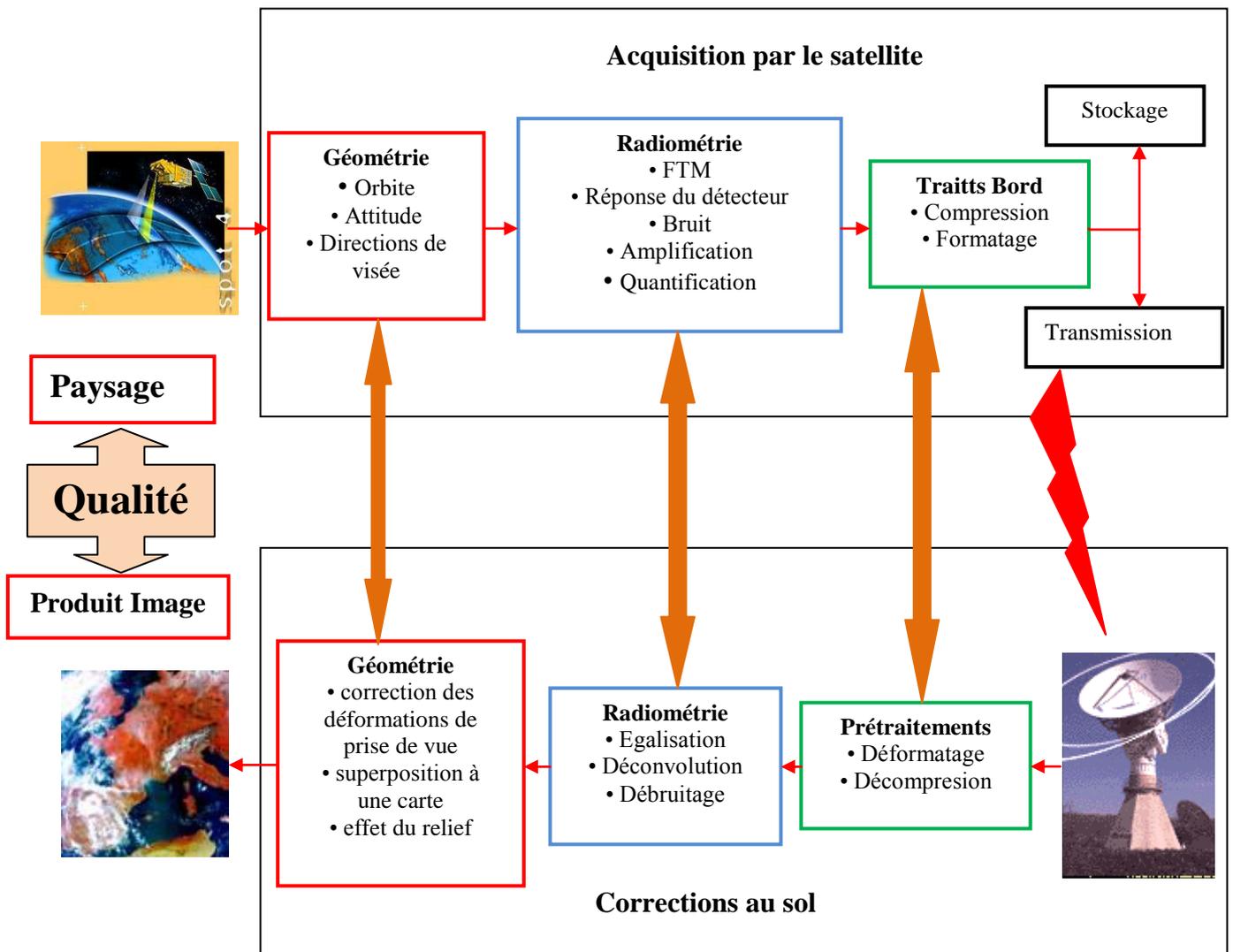


Figure. 1.1 Synoptique de la chaîne d'acquisition d'images

Du point de vue physique, la figure 1.2 (a et b) nous donne une information sur la partie visible du spectre électromagnétique.



### 1.3 Vers une définition du traitement d'images :

Une image peut-être définie comme une fonction en deux dimensions  $f(x,y)$  où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées spatiales, et la valeur prise par  $f$  (son amplitude) est appelée l'intensité ou niveau de gris. Quand  $x$ ,  $y$  et les valeurs prises par la fonction sont des quantités discrètes, finies, alors on a une image digitale. Le traitement d'images digitales sous-entend que le traitement est effectué par informatique.

Cependant, traiter une image uniquement comme étant un ensemble de pixels et appliquer des opérations dessus est très facile, mais il n'y a pas moyens de s'assurer d'avoir le résultat voulu.

On préfère considérer l'image sous forme de signal : alors on sait quel traitement appliquer au signal, et on conçoit le filtre adéquat. Le passage d'une image spatiale à un signal est assuré par les séries de Fourier (si on veut traiter toute l'image), ou les wavelets (pour un traitement local) ; en théorie on utilise la DFT (Discrete Fourier Transform), mais on se contente généralement de la FFT (Fast Fourier Transform) [1].

## 1.4 Caractéristiques des images satellite :

**Des images panchromatiques** Une image numérique est une matrice de pixels. 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. Dans le cas d'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 [2].



*Figure. 1.3 : – Image de Toulouse de taille 945×450 pixels acquise par le mode panchromatique de SPOT 5 à la résolution spatiale de 5m.*

En imagerie satellite, on parle d'image panchromatique lorsque l'acquisition est effectuée sur une bande spectrale large. Par exemple, dans le

mode panchromatique de SPOT 5, l'acquisition est effectuée sur une bande spectrale allant d'une longueur d'onde électromagnétique de 480nm à 710 nm. On rappelle que le spectre électromagnétique de la lumière visible s'étend de 380nm pour le violet à 780nm pour le rouge. Le mode panchromatique de SPOT 5 acquiert donc une grande partie de la lumière visible. La figure 1.3 est une image panchromatique de SPOT 5 à la résolution spatiale de 5m [2].

**Des images couleurs, multispectrales et hyperspectrales** Pour une image en couleurs, ce n'est pas une valeur qui est associée à chaque pixel mais un vecteur de trois valeurs. Ce vecteur est couramment représenté dans la base RVB (Rouge, Vert, Bleu) mais il existe aussi d'autres bases très utilisées telles que les bases YCbCr (Luminance, Chrominance bleue, Chrominance rouge) ou HSV (Hue/Teinte, Saturation, Valeur). On parle d'images multispectrales lorsque le vecteur de valeurs associées à un pixel est au moins de dimension deux. Par exemple, les satellites d'observation de la Terre PLEIADES permettront l'acquisition d'images multispectrales avec les 4 bandes spectrales B0 à B3 dans le bleu, le vert, le rouge et le proche infrarouge. L'image en couleurs représentée sur la figure 1.4 a été créée à partir des bandes B0, B1 et B2. La multiplication du nombre de bandes spectrales permet de différencier la nature des objets observés. Par exemple, la bande verte et la bande proche infrarouge sont sensibles à la chlorophylle alors que la bande moyen infrarouge est sensible à l'amidon, à la lignine, un composé du bois, et permet de séparer les nuages de la neige et de la glace [2].



*Figure. 1.4 – Image couleurs simulée PLEIADES à la résolution de 70 cm de taille  $945 \times 450$  (image extraite de [9] – c CNES 2006).*

On parle généralement d'images hyperspectrales lorsque le nombre de bandes spectrales est supérieur à la centaine ou lorsque l'ensemble des bandes spectrales acquises est continu. Hyperion est le premier capteur hyperspectral lancé à bord du satellite EO-1 (Earth Observing-1) de la NASA en 2000. Il est capable d'acquérir 220 bandes spectrales entre 400nm et 2500nm. Une image hyperspectrale est représentée sous la forme d'un cube hyperspectral sur la figure 1.5. La troisième dimension correspond à l'axe du spectre électromagnétique [2].

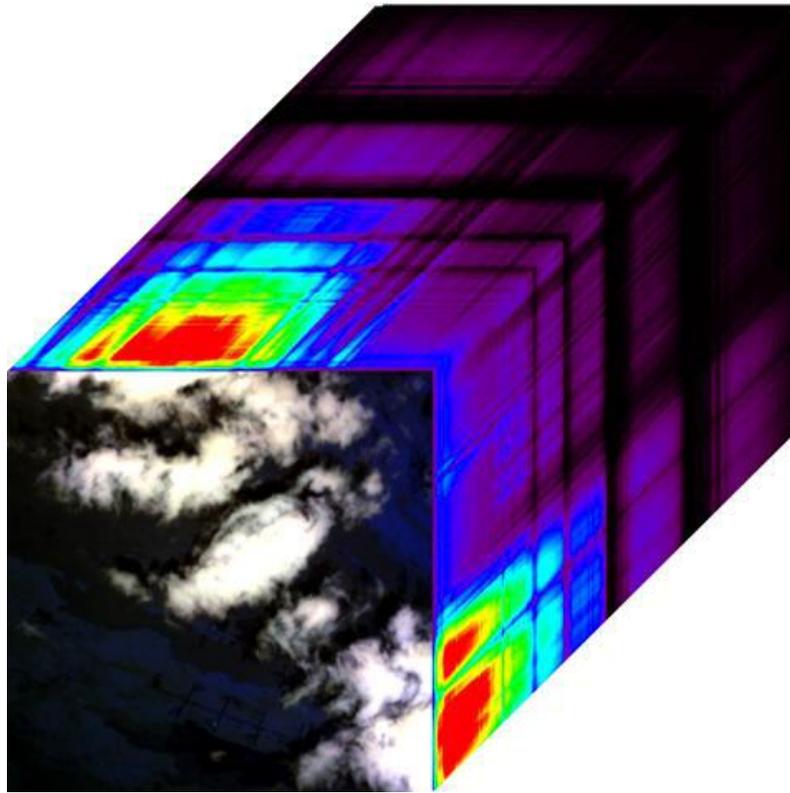


Figure. 1.5 – Représentation d'une image hyperspectrale sous forme d'un cube.

**La résolution numérique** La résolution numérique est le nombre de bits nécessaire au codage binaire d'un vecteur de valeurs associé à un pixel. En général, la résolution des images monochromatiques est de 8 bits par pixel. Les valeurs d'intensité des pixels sont comprises entre 0 pour le noir et 255 pour le blanc. Les images couleurs ont en général une résolution de 24 bits par pixel : 8 bits sur chacune des trois composantes de couleurs. Les images panchromatiques PLEIADES, elles, sont codées sur 12 bits et ont donc des valeurs comprises entre 0 et 4095 [2].

**Les différents modes d'acquisition** On distingue aujourd'hui trois modes d'acquisition d'images par satellite : 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 Clementine, 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. Les barrettes CCD sont plus utilisées pour l'acquisition des images d'observation de la Terre par balayage [2].

L'image est construite ligne par ligne au cours du défilement du satellite sur son orbite.

*Ce principe, appelé push-broom, est utilisé sur les satellites SPOT et PLEIADES.* L'image formée par balayage est de largeur fixe et de longueur virtuellement infinie. Sur les satellites Landsat de la NASA, l'acquisition des images est effectuée par un scanner. Pour ce type d'acquisition, un seul détecteur est utilisé pour la création de l'image. Les lignes de l'image sont produites par rotation d'un miroir qui reflète l'image du sol dans la direction perpendiculaire au sens de déplacement du satellite. Les colonnes de l'image sont produites au cours du déplacement du satellite comme pour l'acquisition par balayage [2].

### 1.5 La chaîne de traitement d'image bord-sol :

La chaîne de traitement des images satellite est représentée sur la figure 1.6. 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 compressées à bord puis, soit directement transmises au sol lorsque le satellite est en visibilité directe avec une station de réception, comme sur SPOT 5, soit stockées à bord. Le débit vidéo en sortie de l'instrument optique est très supérieur au débit de la liaison télémétrie. Par exemple, sur PLEIADES, le débit vidéo est de 4,5 Gb/s alors que le débit de liaison télémétrie nominale n'est que de 465 Mb/s lorsque le satellite est en visibilité avec une station de réception au sol ce qui n'est pas toujours le cas. Il y a un facteur 10 entre ces débits. On comprend alors la nécessité de la compression à bord et de la mémoire de masse. Sur PLEIADES, le taux de compression standard est de 5 et peut atteindre 7 et la capacité de stockage à bord est de 600 Gb.

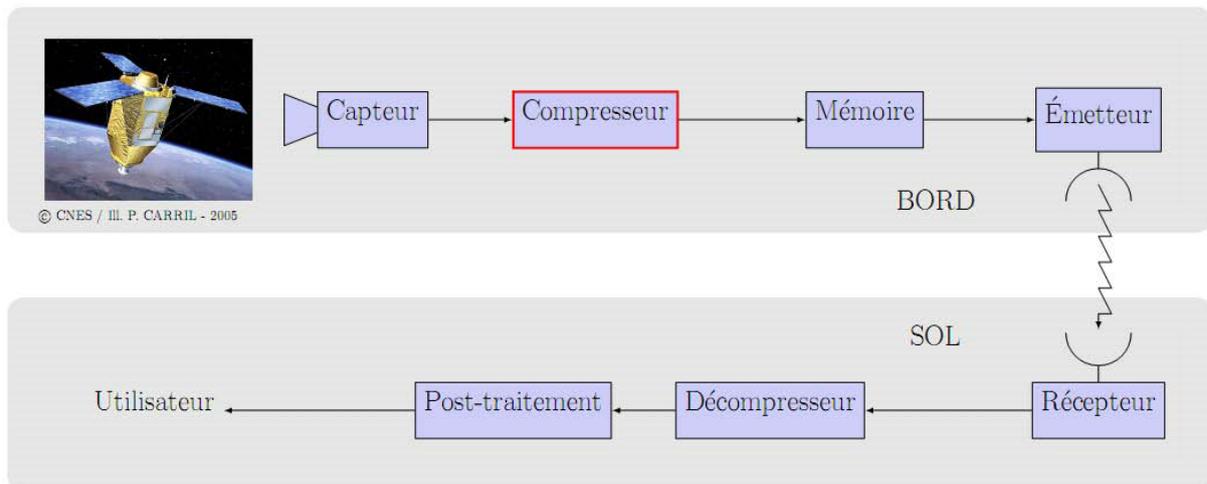


Figure. 1.6 – Chaîne de traitement bord/sol des images.

Au sol, plusieurs séries de traitements sont effectuées. La première consiste à décoder et décompresser l'image. On obtient alors une image brute dite de *niveau 0*.

Ensuite des corrections radiométriques sont appliquées à l'image pour obtenir une image de *niveau 1* utilisable pour des applications de défense pour le cas des PLEIADES. Après des traitements géométriques on obtient une image au niveau 2 ou niveau dit *capteur parfait*. Cette image peut déjà être commercialisée. Enfin, au niveau *ortho-image*, l'image est projetée au sol avec des corrections sur le relief et est localisée dans un système de coordonnées géographiques ou cartographiques. Ce produit final est destiné aux systèmes d'informations géographiques [2].

### 1.5.1 Les capteurs :

La plupart des détecteurs fournissent un signal électrique qui dépend du flux lumineux total reçu par la surface sensible. Ils mesurent donc un éclairement moyen. Il est souvent important de déterminer la répartition spatiale de l'éclairement  $E(x, y)$  dans le plan du détecteur, et de pouvoir ainsi analyser une image. Le premier détecteur d'image a été la plaque photographique, et les progrès techniques ont fait du film argentique un détecteur dont la résolution spatiale est inégalée. Cependant, pour le traitement et la transmission des images, il est plus commode de restituer l'information optique  $E(x, y)$  sous la forme d'un signal électrique dépendant du temps.

Les capteurs CCD se présentent comme des circuits intégrés; ce sont des détecteurs photosensibles à transfert de charges appelés CCD d'après la dénomination anglaise 'Charge Coupled Devices'. 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' de l'anglais 'picture element' d'environ  $5 \mu\text{m}$ , pour donner un ordre d'échelle. Un capteur CCD peut en contenir plusieurs millions.

## 1.5.2 Principe de fonctionnement des capteurs CCD :

### 1.5.2.1 Transfert de charge élémentaire :

Le processus élémentaire à la base de la technologie des capteurs CCD est le transfert de charges. Le dispositif est réalisé sur une plaquette de silicium, par exemple de type P. Celle-ci est recouverte d'une couche d'oxyde isolant, puis d'une série d'électrodes métalliques  $E_i$  dont on peut imposer le potentiel électrique  $V_i$  par rapport au substrat silicium.

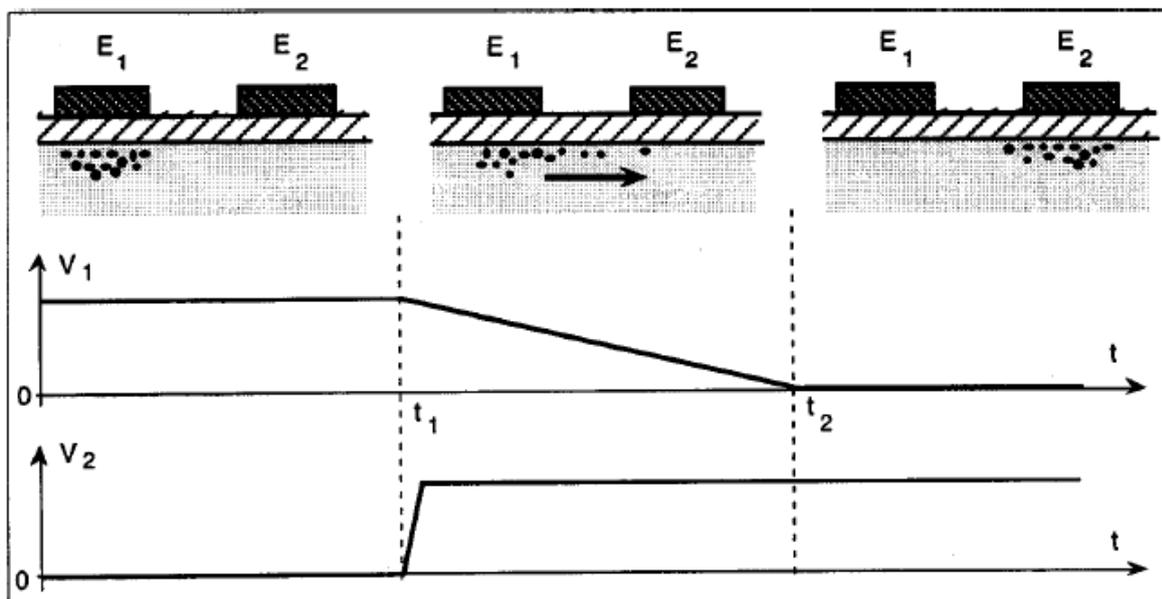


Figure 1.7 Transfert de charge élémentaire

Chaque ensemble électrode-isolant-silicium forme ainsi un petit condensateur MOS (métal-oxyde-semi-conducteur).

À l'instant initial,  $V_1$  est positif tandis que les potentiels des électrodes voisines sont nuls. Les électrons sont localisés par influence sous l'électrode  $E_1$ . À l'instant  $t_1$ ,  $V_2$  augmente rapidement,  $V_1$  diminue lentement: les charges

localisées sous  $E_1$  sont progressivement transférées sous  $E_2$ . À l'instant  $t_2$ , les potentiels sont inversés par rapport à la situation initiale et toutes les charges sont sous  $E_2$ . On a réalisé un transfert de charge. Cette opération élémentaire peut être répétée de proche en proche en agissant sur les potentiels des électrodes successives afin d'amener le paquet de charges à l'électrode de sortie du circuit intégré [2].

### 1.5.2.2 Schéma d'ensemble d'un capteur CCD :

L'ensemble du capteur est réalisé sur une plaquette de silicium recouverte d'une couche isolante. Une barrette CCD comprend tout d'abord une série d'électrodes transparentes (notées F sur la figure 1.8) reliées électriquement entre elles. Pendant le temps d'exposition, elles sont portées à un potentiel  $V_f$  positif, tandis que les électrodes T voisines le sont à un potentiel  $V_t$  nul. Les électrons créés par effet photoélectrique dans le matériau restent donc localisés sous les électrodes F.

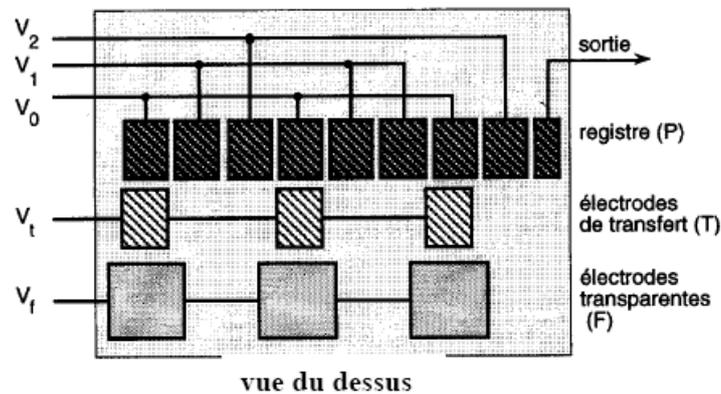


Figure 1.8 Schéma d'ensemble d'un capteur CCD linéaire

Sur la plaquette est également implanté un registre constitué par une ligne d'électrodes P, qui sont commandées par trois tensions  $V_0$ ,  $V_1$  et  $V_2$ . Il est en effet nécessaire de disposer de trois tensions de commandes pour pouvoir déplacer des paquets de charges dans un sens défini le long du registre P. À la fin de l'exposition, les charges Q accumulées sous F sont transférées sous les électrodes de transfert T en permutant les valeurs  $V_f$  et  $V_t$  comme expliqué précédemment. En modifiant ensuite  $V_t$  et  $V_0$ , les charges sont alors transférées sous les électrodes P qui sont en regard des électrodes T. La dernière opération consiste à transférer de proche en proche les charges le long du registre, en jouant sur les tensions de commande  $V_0$ ,  $V_1$  et  $V_2$ . À l'extrémité du registre, un dispositif ad hoc recueille ainsi un signal dont la variation temporelle reflète la variation spatiale des charges à la fin de l'exposition.

### 1.5. 3 Performances et caractéristiques du CCD :

- Robustesse :

La rétine photosensible du CCD devrait être soumise à des forts éclairagements sans subir le moindre dommage.

- Rendement quantique :

$$\gamma = \frac{\text{nombre de photoélectrons/pixel/s}}{\text{nombre de photons incidents/pixel/s}} \quad (1.1)$$

Il est généralement inférieur à 50% (et dépend de la longueur d'onde du rayonnement reçu).

- Linéarité :

Les CCD sont généralement linéaires:  $S=kE$  avec  $S$  le signal de sortie et  $E$  l'éclairement sauf aux faibles et forts éclairagements.

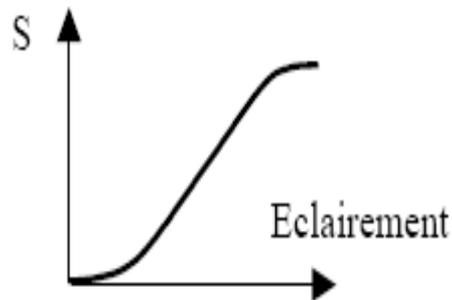


Figure 1.9-linéarité du CCD

- Signal d'obscurité :

Ce signal est dû aux charges engendrées dans le silicium suite à l'agitation thermique du réseau cristallin. Pour des expositions de plusieurs secondes, correspondant à des éclairagements faibles, les CCD sont refroidis à l'aide de cellules Peltier.

- Niveau de gris

La sortie du CCD est numérisée. Elle est délivrée à l'utilisateur en niveaux de gris (dans le cas des images 'noir et blanc'). Ces niveaux s'étendent de 0 (noir) à 255 (blanc), soit  $2^8$  niveaux différents.

## - Formation de l'image

Comme tout dispositif de capture de l'image, appareil photographique, œil, ... le capteur CCD est munie d'une lentille qui forme une image dans le plan des cellules photosensibles.

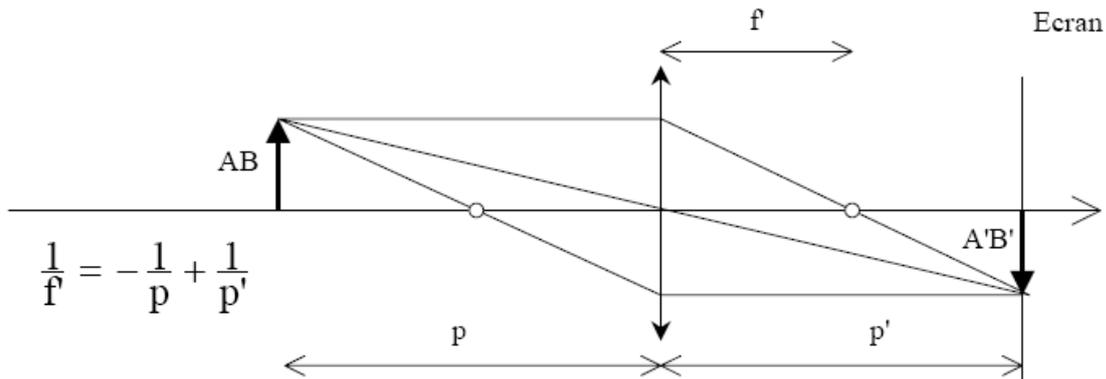


Figure 1.10 Formation de l'image

### 1.6. Un peu de théorie :

Le but de l'acquisition d'images est de convertir une vue du monde réel en une image numérique.

Une image numérique est un ensemble de points  $(x,y,v)$ , appelés aussi pixels pour lesquels,  $x$  (entier) correspond à l'abscisse du pixel,  $y$  (entier) l'ordonnée du pixel et  $v$  (entier) l'intensité lumineuse du pixel.

Une image peut être aussi vue comme un signal monodimensionnel, cela est concrétisé dans les capteurs actuels qui délivrent leur image pixel par pixel.

Les lois classiques du traitement du signal peuvent donc être appliquées, notamment en ce qui concerne la numérisation du signal. La figure 1.11 permet

de mettre en évidence les deux concepts clefs du passage d'un signal continu à un signal discret : la quantification et l'échantillonnage.

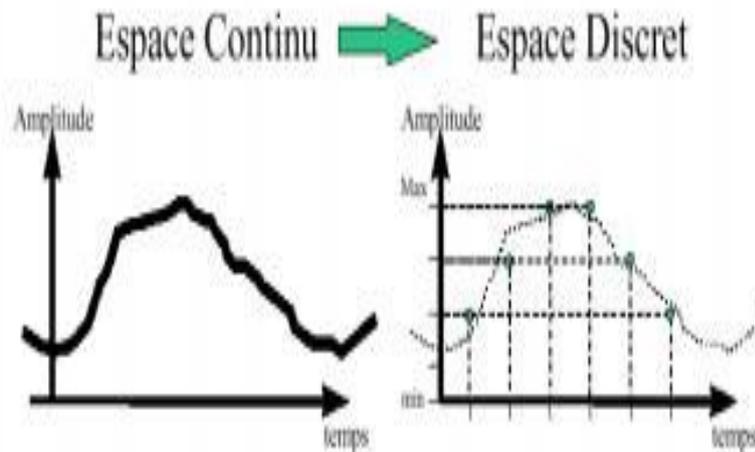


Figure. 1.11 - Numérisation d'un signal

### 1.6.1 L'échantillonnage :

Ce traitement concerne l'axe du temps (Figure 1.11).

L'échantillonnage spatial optimal (Théorème de Shannon) impose une fréquence de discrétisation (ou échantillonnage) au moins double de la fréquence maximale du signal d'entrée pour pouvoir reconstruire celui-ci.

Dans notre cas, il est impossible de connaître la fréquence maximale du signal d'entrée (vue du monde réel), de plus les capteurs utilisés ont tous une bande passante imposée. C'est par exemple le nombre de pixels d'un capteur CCD.

On peut donc dire qu'un filtre passe-bas est appliqué à l'image réelle. Cette étape d'échantillonnage donne aussi la bande passante du signal numérique.

### 1.6.2 La quantification :

Ce traitement concerne l'axe des amplitudes (Figure 1.11).

Pour compléter la numérisation de l'image, l'échantillonnage spatial doit être suivi par une quantification de l'intensité des échantillons.

Le principe de la quantification est de diviser la dynamique du signal analogique par un certain nombre d'intervalles et d'affecter la même valeur à chaque valeur de l'intensité contenue dans un intervalle donné.

Le problème consiste à déterminer le nombre d'intervalles et la variation de leur largeur en fonction de l'intensité.

Généralement, la grille de quantification est linéaire, c'est à dire que la largeur des intervalles est constante, et le nombre d'intervalles est codé sur  $k$  bits. La largeur de l'intervalle correspond à la plus petite variation du signal perçue, c'est le quantum.

Aujourd'hui, la plupart des numérisations se fait sur 8 bits ( $k=8$ ), les raisons sont les suivantes :

- La dynamique de réponse des capteurs CCD (les plus répandus) est située entre 8 et 10 bits ;
- Le rapport signal sur bruit du signal analogique ne permet pas de dépasser 8 bits; CCIR (Comité consultatif international des Radiocommunications);
- L'octet (8 bits) est l'élément de base des ordinateurs.

Pourtant, cela commence à changer, en effet :

- les nouveaux capteurs CCD sont de plus en plus performants, notamment du point de vue de la dynamique ;

- les capteurs CMOS ont une dynamique d'environ 10 bits ;
- la transmission numérique, contrairement à la transmission analogique du type CCIR, n'est plus un frein au nombre de bits par pixel.

Tout cela ouvre la voie à des données sur 10, 12 ou 16 bits, en attendant mieux [2].

### **1.7. Conclusion :**

Les diverses applications liées à l'observation de la Terre, telles que la défense, la sécurité civile, la prévention des catastrophes naturelles et d'autres, ont besoin de données toujours plus précises. Les avancements technologiques et méthodologiques dans le domaine de l'acquisition des images satellites améliorent la qualité d'image pour donner plus de précision et d'information.

Dans ce chapitre nous avons abordé une introduction aux chaînes d'acquisition d'image satellite. Ensuite nous avons donné les définitions des notions nécessaires à la compréhension de ce qu'est l'acquisition d'images. Et par la suite nous avons évoqué Les caractéristiques des images satellite. Enfin nous avons décrit le principe de fonctionnement d'un capteur CCD.

## 2.1 Formation d'image :

Comment une image se forme-t-elle, à bord d'un avion ou d'un satellite, à partir de la scène que l'on observe ? 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.

Le traitement, souvent appelé prétraitement, regroupe toutes les techniques visant à améliorer la qualité d'une image. De ce fait, la donnée de départ est l'image initiale et le résultat est également une image.

La notion de qualité est une notion très subjective, assujettie à la réalisation d'un objectif. La qualité d'une image n'est pas forcément la même pour un ordinateur ou pour un opérateur humain. C'est la raison pour laquelle les techniques ne sont pas les mêmes.

La restauration a pour but d'inverser l'effet du phénomène dégradant. Il s'agit donc de produire une image la plus proche de la réalité physique de la scène observée. Le plus souvent, cette étape est la première dans la chaîne de traitements constituant un système de vision.

L'amélioration a pour but de satisfaire l'œil de l'observateur humain. C'est pourquoi l'image produite peut être différente de la réalité. Dans les deux cas, la qualité (i.e. capacité à interpréter facilement une image) a été accrue. Par extension, on classe dans le domaine du traitement les techniques de compression. Il s'agit là de faciliter le traitement et surtout le stockage des images par une réduction adéquate de leur volume d'information.

Voilà, en résumé, la chaîne de formation des images, que nous allons modéliser dans ce chapitre. C'est une étape indispensable de compenser ces dégradations par un traitement numérique.

## **2.2 Hypothèses**

Nous ne décrivons ici que les dispositifs de prise de vue numériques satellitaires, qui sont au cœur de notre sujet.

### **2.2.1 GÉOMÉTRIE**

La scène observée est supposée se trouver à l'infini, car elle est observée à une distance qui est suffisamment grande devant sa taille. D'autre part, on suppose que toutes les corrections géométriques ont été effectuées, de manière à ce que les distorsions géométriques puissent être considérées comme négligeables.

Cette première hypothèse est vérifiée dans le cas des images satellitaires ou aériennes que nous considérons. Elle est nécessaire pour simplifier la modélisation de la chaîne d'acquisition, afin de ne prendre en compte que les effets de flou, de bruit et les défauts radiométriques [3].

### 2.2.2 RAYONNEMENT

Les techniques d'imagerie considérées sont fondées sur la propagation des ondes électromagnétiques ; le rayonnement est incohérent. Pour plus de simplicité, nous considérons que les observations s'effectuent dans une bande spectrale étroite, de largeur  $\Delta\lambda$ , autour de la longueur d'onde moyenne  $\lambda_0$  (visible, infrarouge, etc.).

La luminance de la scène dans la bande spectrale considérée, et sous l'angle d'observation choisi, constitue alors l'information à laquelle nous essayons d'accéder lorsque nous observons un paysage. C'est ce que nous appelons vérité terrain, ou scène originale [3].

### 2.3 La chaîne des dégradations :

Nous décrivons ici brièvement la chaîne bord-sol [Letry, 2001], résumant la chaîne de formation de l'image discrète à partir de la scène observée.

Les lois de l'optique statistique nous permettent de modéliser la dégradation de la scène  $x$  lorsque la lumière traverse d'abord l'atmosphère (où interviennent essentiellement les effets de la turbulence et de l'absorption), puis le système optique, la lumière subit généralement une occultation liée à la taille finie de la pupille d'entrée et à la présence d'un miroir secondaire. C'est le phénomène de diffraction qui provoque la dégradation à ce stade. Lors de la traversée de l'optique, l'on note aussi un certain nombre d'altérations qui peuvent être regroupées sous le nom d'aberrations, liées à certaines imperfections du système (aberrations systématiques ou erreurs diverses comme par exemple les défauts de polissage).

Viennent aussi s'ajouter les aberrations liées à une mauvaise focalisation.

Cette image est dite *floue* : plus la taille de l'instrument diminue, et plus la turbulence ou les aberrations sont importantes, alors moins on observe de détails sur l'image autrement dit moins l'image contient d'information.

De plus, nous n'avons pas accès à cette image, mais à une version dégradée, cette fois-ci par le processus d'observation, ou acquisition. Tout d'abord, l'intensité est intégrée au niveau des pixels (éléments sensibles du détecteur, qui est généralement un CCD linéaire ou matriciel).

C'est le processus d'échantillonnage : passée cette étape, nous n'avons plus accès qu'à un ensemble discret de valeurs d'intensité intégrée.

Cette étape contribue également au flou, non seulement à cause de l'extension spatiale des pixels, mais également par la durée de l'intégration, pendant laquelle le capteur se déplace et subit d'éventuelles vibrations.

Ensuite, cette intensité donne lieu à un déplacement d'électrons (effet photoélectrique). Le nombre d'électrons venant s'accumuler dans un puit de potentiel, dans un dispositif de type CCD, est une fonction idéalement linéaire de l'intensité intégrée. En pratique, la linéarité n'est pas parfaite, et le capteur est limité par l'effet de saturation.

La sensibilité varie légèrement d'un pixel à l'autre, ce qui constitue également une forme de dégradation. Sans oublier les pertes importantes intervenant à ce stade, le rendement quantique des détecteurs dépassant rarement 40%, la majorité des photons ne sont jamais détectés.

D'autre part, l'intensité intégrée utile n'est pas la seule à provoquer un déplacement d'électrons, viennent s'ajouter notamment des électrons d'origine thermique. D'autre part, l'isolement n'étant jamais parfait, ces électrons ont tendance à diffuser pour contaminer les pixels voisins.

La phase de lecture du capteur consiste à récupérer les électrons accumulés pour les convertir en courant mesurable ; intervient donc une phase de transfert d'un pixel à l'autre (c'est le cas par exemple des CCD, mais pas des nouveaux capteurs CMOS) qui peut avoir pour effet de mélanger un peu les charges accumulées, par un effet de rémanence.

Le courant produit est amplifié, et donc sujet à une nouvelle non linéarité ainsi qu'à une contamination par du bruit d'origine électronique.

Finalement, le signal produit, par exemple une tension à valeurs réelles entre  $V_{min}$  et  $V_{max}$ , est numérisée, autrement dit quantifiée sur un certain nombre de bits (de 8 à 16 en général), ce qui introduit une incertitude supplémentaire. Enfin, une nouvelle dégradation est appliquée, le cas échéant, par une chaîne de compression/décompression.

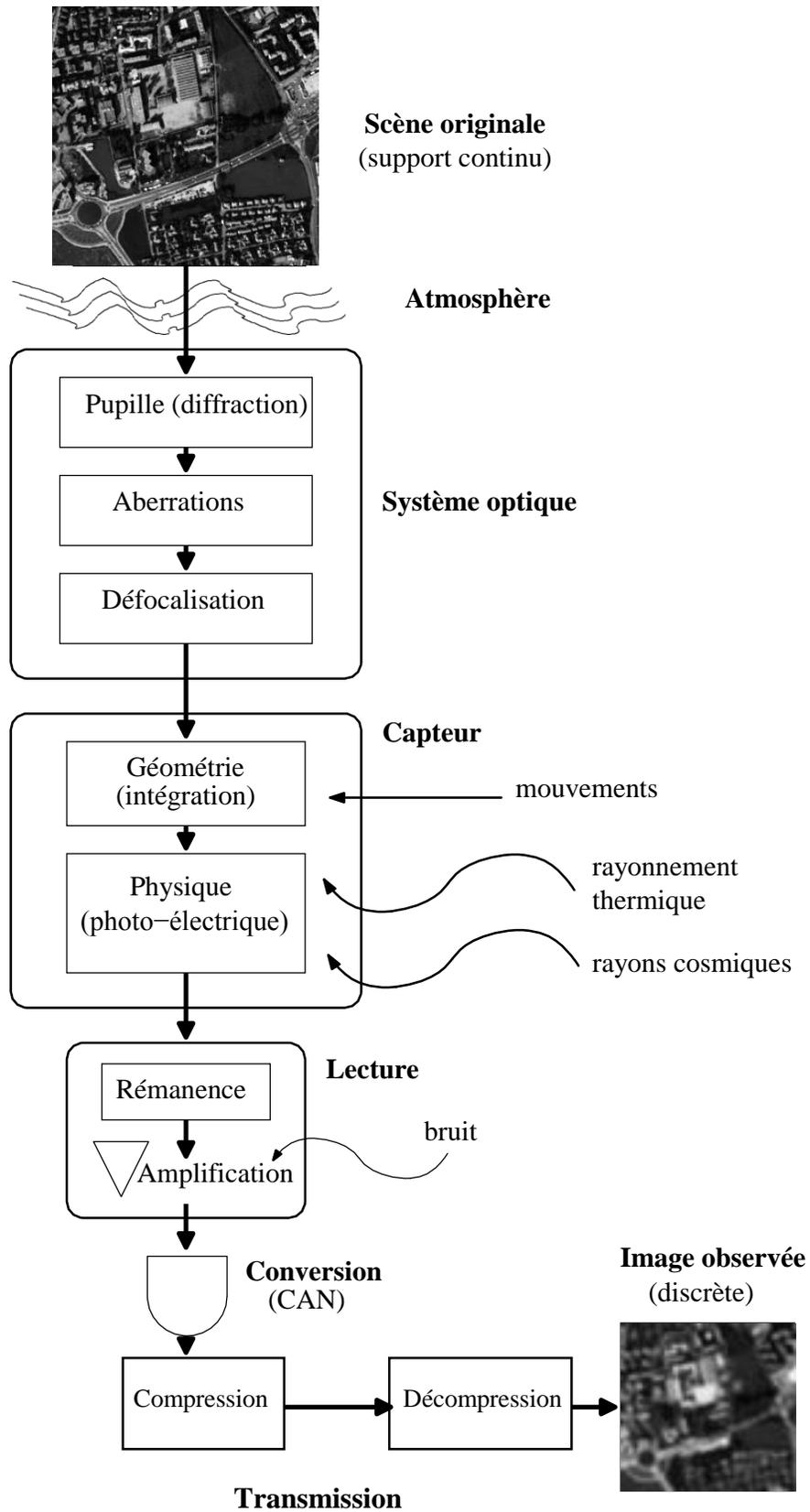


Figure 2.1: Diagramme résumant la chaîne de formation de l'image discrète à partir de la scène originale.

Tout ce qui vient d'être énoncé ci-dessus peut être résumé par le diagramme de la figure 2.1 et par la liste et le tableau de la figure 2.2. On pourrait encore citer d'autres phénomènes intervenant dans la chaîne de fabrication d'une image (par exemple l'écoulement des charges dans le capteur lors de la lecture, etc.), nous n'avons retenu ici que les facteurs essentiels.

Après avoir passé en revue toutes ces formes de dégradation, nous allons les étudier plus en détail. Pour ce faire, il paraît utile de classer d'abord les principaux types de dégradation non pas par ordre d'intervention comme vu précédemment, mais selon leur mode de modélisation. En effet, nous distinguons quatre grands groupes d'opérateurs permettant de résumer le passage de la scène à l'image discrète observée. La chaîne image peut se résumer ainsi : application d'un flou, discrétisation spatiale, transformation des valeurs obtenues, puis addition de bruit. Ainsi, dans le tableau 2.2 nous avons précisé à quel opérateur correspond chaque dégradation.

## 2.4 Les opérateurs mathématiques de dégradation des images satellites

Malgré la complexité de la chaîne de formation de l'image, il est possible de définir une chaîne équivalente plus simple, constituée d'opérateurs que nous exprimons sous forme canonique (convolution, échantillonnage, transformation point à point et processus aléatoire) [Jain, 1989]. Cette chaîne simplifiée est illustrée par la figure 2.4.

### 2.4.1 Flou : réponse impulsionnelle et fonction de transfert

Il est nécessaire de définir au préalable la notion de résolution, au sens de la télédétection (pour des images numériques) ainsi qu'au sens optique.

#### **DÉFINITION 1 (RÉSOLUTION)**

Nous appelons résolution l'inverse de la taille du plus petit détail visible sur une image observée à support discret. Sur une image satellitaire ou aérienne, il s'agit de la taille, projetée au sol, correspondant à un pixel. La résolution optique se rapporte, quant à elle, à une image à support continu.

Le terme "haute résolution" signifie alors que la taille des objets détectables est petite, généralement inférieure au mètre.

Tout d'abord, il est possible de regrouper, dans le terme de flou, tous les facteurs provoquant la dispersion spatiale de l'information, qu'ils s'appliquent à la lumière traversant l'atmosphère et le système, ou aux électrons dans le capteur [3].

- 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

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. 2.1: Classification des différentes dégradations subies par la scène originale dans le processus de formation d'image.

## 2.5 Les sources de dégradations :

Il en existe quatre possibles :

Bruit lié au contexte de l'acquisition.

Bruit lié au capteur.

Bruit lié à l'échantillonnage.

Bruit lié à la nature de la scène.

### 2.5.1 Bruit lié au contexte de l'acquisition :

Dans cette première catégorie, on retrouve tous les événements inattendus, modifiant les conditions de l'acquisition du signal. L'exemple le plus simple est le bougé. On peut aussi imaginer une modification ponctuelle des conditions d'éclairage, conduisant à une sous (sur) illumination de l'objet observé. Le caractère inattendu de ces événements fait qu'il est pratiquement impossible d'en corriger les effets sans l'intervention d'un opérateur humain pour activer le bon processus de restauration (correction de flou, de bougé, de dérive lumineuse, ...).

### 2.5.2 Bruits liés au capteur :

Le capteur, s'il est de mauvaise qualité ou s'il est mal utilisé, peut introduire toute sorte de bruits. On peut ainsi obtenir une distorsion de la gamme des niveaux de gris, provoquant une saturation ou bien une distorsion géométrique de l'image.

Bien entendu, la meilleure restauration possible consiste à agir directement au niveau du capteur. Cependant, si cela n'est pas possible, la connaissance de l'appareil, permet le plus souvent, de construire un modèle a priori du phénomène de dégradation; [4].

### 2.5.3 Bruit lié à l'échantillonnage :

Une image est une forme discrète. Il est donc nécessaire de passer du domaine continu au domaine discret, au niveau de la scène et au niveau de l'intensité lumineuse émanant de celle-ci.

De manière générale, le spectre des intensités lumineuses noir-blanc est quantifié sur 256 niveaux de gris différents nécessitant 8 bits pour le stockage en chaque point. Si le capteur est bien calibré, cette quantification ne provoque pas de bruit important. Il faut savoir que cette précision est de loin supérieure à ce que l'œil humain utilise dans ses tâches quotidiennes.

De plus, tout objet dont la taille est inférieure à l'unité de tessellation du plan disparaît ou bien n'est représenté que par un pixel. Cet effet est connu sous le nom d'effet "poivre et sel". Un exemple classique provient des images satellitaires lorsqu'un nuage est trop petit pour impressionner plus d'un pixel.

### 2.5.4 Bruit lié à la nature de la scène :

L'environnement dans lequel se situe l'acquisition n'est pas toujours maîtrisable. En télédétection, la couverture nuageuse dégrade la qualité des images satellites. Cependant, la connaissance a priori du phénomène perturbateur permet d'envisager une modélisation et donc une correction systématique [4].

## 2.6 Dégradations dues à l'électronique du CCD :

La scène projetée sur la grille CCD par l'appareil optique est continue. Or la grille est composée d'éléments discrets et l'image acquise est destinée à être digitale, c'est-à-dire qu'elle est emmagasinée en tant que structure de données comportant un nombre fini d'éléments. Cet état de fait implique deux choses.

Dans un premier lieu, l'image de la scène, projetée sur la grille d'éléments du capteur, subit un échantillonnage : le signal continu est échantillonné à intervalles réguliers, selon une fréquence imposée par les dimensions de la grille du photosenseur, et ce sont ces échantillons qui forment l'image.

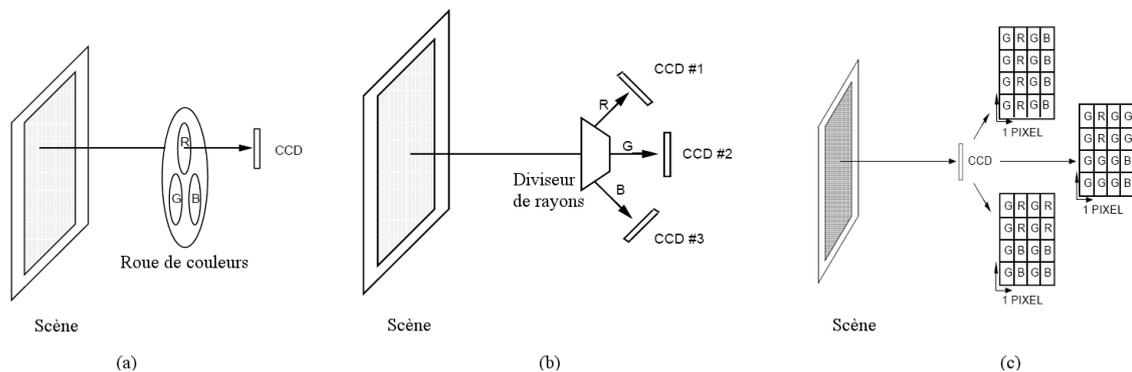


Figure 2.2 – Trois méthodes pour capturer des images couleurs avec une caméra CCD

Dans un second temps, la valeur de chaque pixel de l'image subit une quantification : l'intensité mesurée par l'élément est arrondie à une valeur entière sur une échelle allant du noir au blanc. Dans le cas d'images digitales monochromes stockées par un système informatique moderne, ces valeurs d'intensité vont de 0 pour le noir jusqu'à 255 pour le blanc. La figure 2.3 illustre l'opération [5].

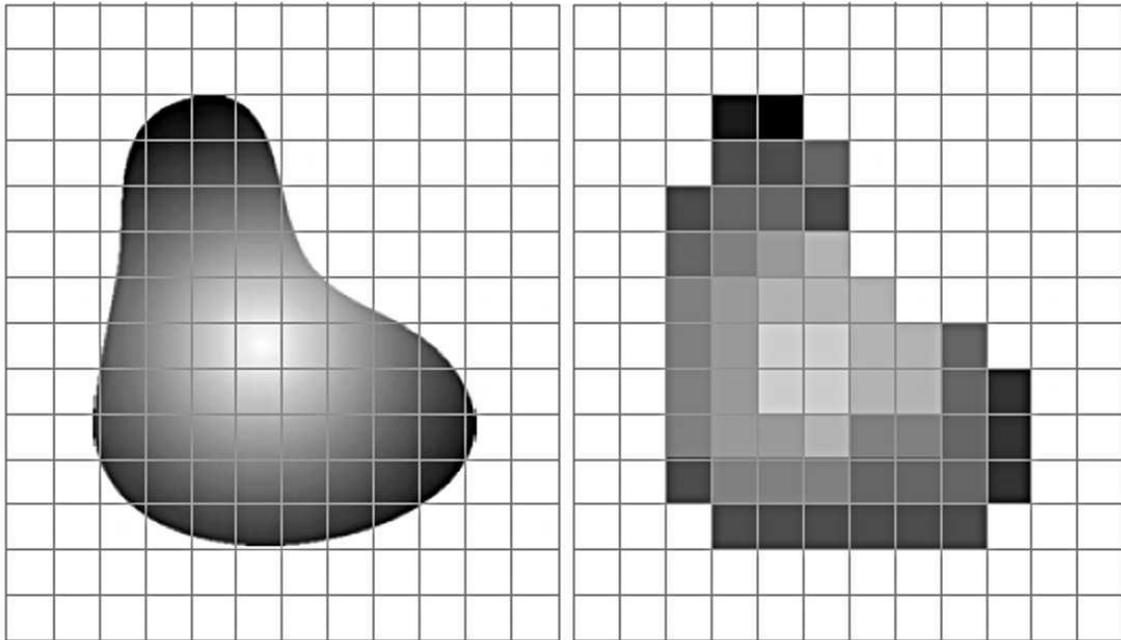


Figure 2.3 – À gauche, scène continue superposée à la grille de senseurs. À droite, l'image résultante après échantillonnage et quantification.

### 2.6.1 Aliassage et Théorème de Nyquist :

Le théorème de Nyquist stipule que l'échantillonnage d'un signal doit être effectué à une fréquence deux fois supérieure à la plus haute fréquence de celui-ci pour qu'une reconstruction fidèle soit possible. Si la fréquence d'échantillonnage est insuffisante, les composantes hautes fréquences du signal original seront perdues et leur reconstruction se fera sous la forme de composantes plus basse fréquence absentes du signal original. Ce signal basse fréquence "fantôme" sera appelé un alias du signal haute fréquence, et on réfère au phénomène sous le terme d'aliassage.

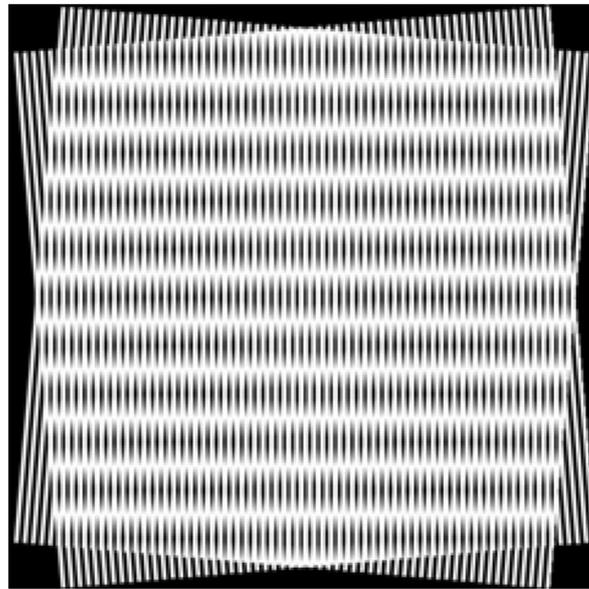


Figure 2.4 – Le moiré, un exemple d'aliassage.

Une solution à ce problème est l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage, le moyen le plus direct étant l'augmentation de la densité des éléments dans la grille CCD, mais il est impossible dans les faits d'enrayer le problème : la résolution des systèmes d'acquisition présente des limitations physiques d'une part, et d'autre part il existe des signaux de fréquence très haute [5].

### 2.6.2 Bruit de la caméra CCD :

Outre les effets dus à l'échantillonnage et à la quantification, un autre facteur contribuant à la dégradation de l'image digitale est le bruit, causé dans le cas d'une caméra CCD par trois sources principales. Tout d'abord, la différence de sensibilité d'un élément à l'autre de la grille CCD constitue un premier élément de bruit, dit bruit à motif fixé (fixed-pattern noise) parce qu'il ne varie pas d'image en image. Ensuite vient le bruit grenaille (shot noise), causé par l'incertitude entourant la charge réelle emprisonnée dans le puits de potentiel du

photosenseur. Parce que la mesure de l'intensité reçue par l'élément peut varier d'une évaluation à l'autre pour la même exposition, la valeur du pixel dans l'image présentera également une incertitude, et donc un élément de bruit. Finalement, la nature de la grille CCD ajoute un élément de bruit relié à la manipulation des charges électriques requise par le processus d'acquisition [5].

### 2.6.3 Le blooming :

Le blooming est une autre source de dégradation de l'image qui peut survenir durant l'acquisition. Ce phénomène se manifeste quand un élément CCD est surexposé, entraînant la formation d'une charge électrique supérieure à ce que le puits de potentiel de l'élément peut contenir. Dans ce cas, les électrons surnuméraires débordent vers les éléments voisins, causant une mesure faussement élevée de l'intensité. Ce problème peut être corrigé en utilisant une caméra dotée d'une fonction "anti-blooming", qui permet le drainage du surplus d'électrons sans qu'il y ait contamination du voisinage [5].



Figure 2.5 – Exemple de blooming

### 2.6.4 Le flou :

Le module CCD participe à l'effet de flou de la caméra initié dans un premier temps par l'appareil optique. Les électrons générés dans un élément CCD sous l'effet de la lumière ne sont pas nécessairement tous canalisés vers le puits de potentiel de cet élément après l'exposition : le champ électrique qui collecte les électrons ne pénètre pas uniformément la totalité de l'élément, et certains électrons peuvent demeurer dans ces régions dénuées de champ durant la phase de canalisation.



*Figure 2.6 – Image originale (à gauche) et image comportant un bruit gaussien blanc d'écart-type  $\sigma = 25$ .*

Ces électrons “libres” peuvent diffuser vers les puits voisins aléatoirement, provoquant une contamination de la valeur d'un pixel par ses voisins, et donc un effet de flou. Comme le flou dû à l'appareil optique, ce fait est intégré au modèle de formation d'image au sein de la fonction de réponse impulsionnelle (PSF) de la caméra [5].

## 2.7 Modélisation

On peut regrouper les différentes dégradations subies par une image (en termes d'effets et non plus de sources) de la manière suivante :

- 1 - Dégradation ponctuelle (effet localisé en 1 pixel)
- 2 - Dégradation spatiale (effet sur 1 pixel et son voisinage)
- 3 - Dégradation temporelle
- 4 - Dégradation chromatique
- 5 - Toutes combinaisons des 4 précédentes

Pour traiter ces dégradations rigoureusement, on utilise un modèle général, reliant une image idéale  $f$  à sa forme observée (et donc dégradée)  $g$  :

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

Où  $h$  est la fonction caractéristique du phénomène de dégradation et  $n$  un bruit additif. Les paramètres  $x$  et  $y$  sont les composantes spatiales,  $t$  la composante temporelle, et  $\lambda$  la composante chromatique. Dans cette approche, on suppose que  $g$  est une fonction linéaire de  $f$ . Cette hypothèse est approximativement vérifiée pour les systèmes usuels, du moins pour une gamme réduite de niveaux de gris (validité locale).

Par la suite nous n'examinerons que les dégradations spatiales ; de ce fait, (2.1) devient

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

En l'absence de bruit, et si le capteur est parfait, on obtient :

$$g(x, y) = h(x, y) \cdot f(x, y) + n(x, y) \quad (2.3)$$

Cette dernière équation représente le modèle générale d'une image produite par un système d'acquisition où  $h$  est la réponse impulsionnel et  $n$  représente un bruit additif [4].

## 2.8 Restauration

La restauration d'images a pour objet la réduction, voire l'élimination des distorsions introduites (bruits) par le système ayant servi à acquérir l'image. Son but est d'obtenir une image qui soit la plus proche possible de l'image idéale qui aurait été obtenue si le système d'acquisition était parfait [4].

## 2.9 Conclusion :

Le premier chapitre était une introduction aux chaînes d'acquisition des images satellite et leurs caractéristiques. Le deuxième chapitre est une continuité qui enrichie le premier chapitre en expliquant les étapes de formation d'une image en première partie, la seconde partie était consacrée aux différents facteurs de dégradations subies par la scène originale dans le processus de formation d'image.

## **Introduction**

Ce chapitre porte sur l'approche de détection des contours et de la caractérisation de la fonction de transfert de modulation(MTF); quatre méthodes de calcul de la MTF sont brièvement décrites. Les méthodes bord de plage et Entrée Pulsionnelle sont présentées en détails en raison de la difficulté d'appréhension et d'implémentation que représentent les autres méthodes.

### **3.1 Méthodes d'estimation de la Qualité Image d'un instrument d'observation de la Terre**

La qualité d'une image est très souvent caractérisée par des critères radiométriques usuels tels que la moyenne, le contraste, la luminosité, la variance du bruit, ou la résolution radiométrique. Seuls quelques outils rendent compte de la performance géométrique des capteurs.

Les plus fréquents sont ceux qui s'appuient sur la réponse d'un système optique à une impulsion lumineuse (Point Spread Function) (Li 2000, Lei et Tiziani 1989), le gradient ou d'autres filtres passe-haut (Zhou 1998), le Ground Sampled Distance (GSD, ou plutôt Equivalent GSD) (Vrabel 2000), la FWHM (Full Width at Half Maximum), grâce à des analyses visuelles (IRARS 1996) ou encore par le rapport signal sur bruit (SNR, Dial et al. 2003).

Utilisés indépendamment les uns des autres, ces outils sont incomplets car ils n'extraient qu'une partie de la performance, et négligent ainsi les informations relatives aux autres fréquences spatiales transmises par le capteur. La FTM permet la caractérisation de la qualité géométrique globale des capteurs, en offrant une mesure précise effectuée dans le domaine des fréquences.

Par définition, la FTM d'un système est la Transformée de Fourier (TF) de sa réponse impulsionnelle ou PSF. Cette réponse consiste en une tache très

lumineuse en son centre et devenant de plus en plus sombre en s'écartant du centre :

La FTM traduit comment le capteur atténue le contraste de l'image en fonction des fréquences spatiales. L'atténuation est causée par la taille finie des détecteurs, les mouvements du capteur, la diffraction, les aberrations optiques, la dispersion de l'atmosphère turbulente et les parasites liés à l'électronique (Holst 1995). Seule la moyenne de l'image est parfaitement préservée, et la FTM tend à réunir tous les comptes numériques autour de cette moyenne. De plus, plus le bruit B de la chaîne d'acquisition est important, plus la FTM aura tendance à présenter un écart-type faible. Si la fréquence spatiale d'un objet est supérieure à la fréquence de coupure du capteur, alors son image sera représentée par un éclaircissement uniforme.

Dans le domaine de l'observation de la Terre, la FTM est une information très difficile à obtenir avec précision. Les constructeurs et fournisseurs d'images sont réticents pour fournir la forme de la courbe et les fréquences caractéristiques associées. La raison est que la FTM est directement liée à la qualité intrinsèque des produits vendus. Par exemple, la documentation fournie par SPOT Image (Anonymous 1986) reste très vague au sujet de la FTM. Elle donne des spécifications pour la fréquence de coupure du canal Pan à 10 m de résolution sans pour autant donner d'information sur la façon dont elle a été calculée

C'est ainsi que la FTM n'est jamais décrite avec précision par les constructeurs. De plus, l'usage de nombreux termes tels que pouvoir de résolution, fréquence de coupure, valeur de la FTM minimale autorisée à la fréquence de Nyquist, ou encore pourcentage d'atténuation du contraste initial à cette même fréquence (Dial et al. 2003), crée une confusion parmi les lecteurs et les utilisateurs.

### 3.1.1 Méthode Entrée Impulsionnelle

La MTF est la réponse fréquentielle spatiale normalisée d'un système d'imagerie. Cette réponse en fréquence peut être évaluée par l'application d'une entrée impulsion. La réponse impulsionnelle résultante est appelée la PSF (*Point Spread Function*). Un exemple de réponse impulsionnelle est montré dans la figure 3.1.

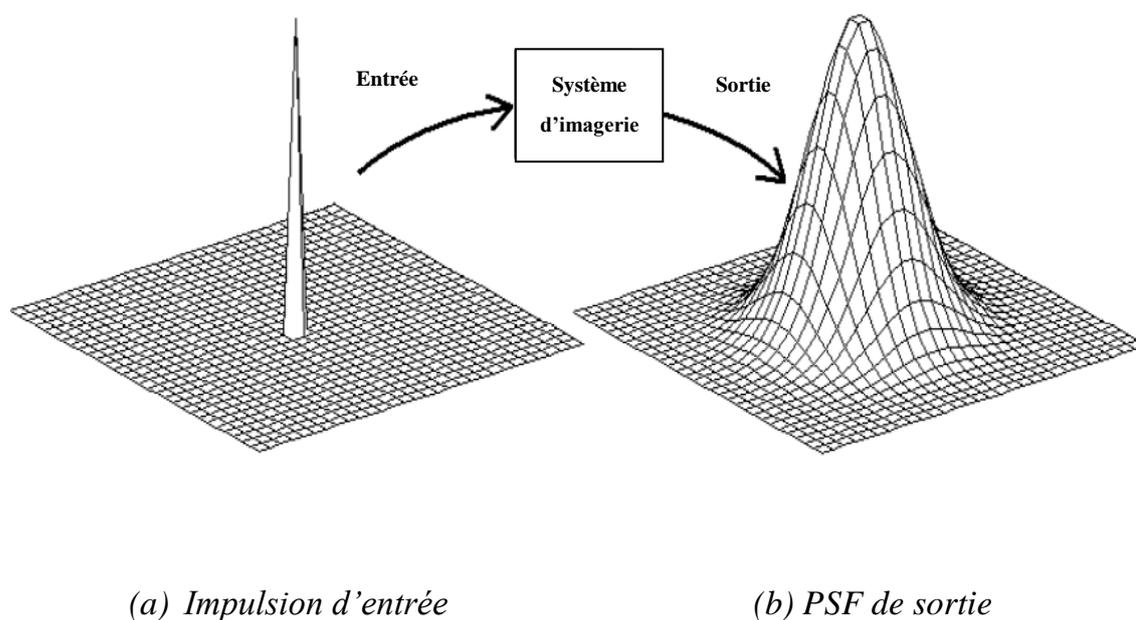


Figure 3.1 : Un exemple de l'impulsion et le résultant PSF

Une hypothèse sous-jacente est que le système d'imagerie est linéaire et à déplacement indépendant. Il est très difficile de réaliser une telle approche en pratique, mais ça n'exclut pas de la considérer comme un premier point de départ pour mieux comprendre ce qu'est la MTF [6].

La PSF à la figure 3.1 (b) décrit la réponse spatiale du système d'imagerie essentiellement pour un seul point brillant de lumière. La transformée de Fourier de la PSF est appelée la fonction de transfert optique (FTO) et l'amplitude normalisée de la FTO (*Fonction de Transfert Optique*) est la MTF.

### 3.1.2 Méthode Entrée Sinusoïdale :

Différentes techniques ont été utilisées pour obtenir la MTF, mais une approche classique consiste à utiliser une onde d'entrée sinusoïdale à un système :

$$e = 0.5 [1 + \cos(s)] \quad (3.1)$$

Où  $s$  est un paramètre spatiale et  $e$  est l'onde d'entrée sinusoïdale qui sera changée en amplitude et en phase par la fonction de transfert pour obtenir une sortie sinusoïdale comme résultat. La MTF peut être calculée par la relation de la sortie à l'entrée:

$$MTF = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} \quad (3.2)$$

Où  $B_{max}$  et  $B_{min}$  sont le maximum et minimum des voisins de la sortie. Dans la Figure 3.2 ; une sinusoïde d'entrée d'amplitude constante et de fréquence croissante est appliquée au système d'imagerie. L'amplitude de sortie diminue quand la fréquence augmente [6].

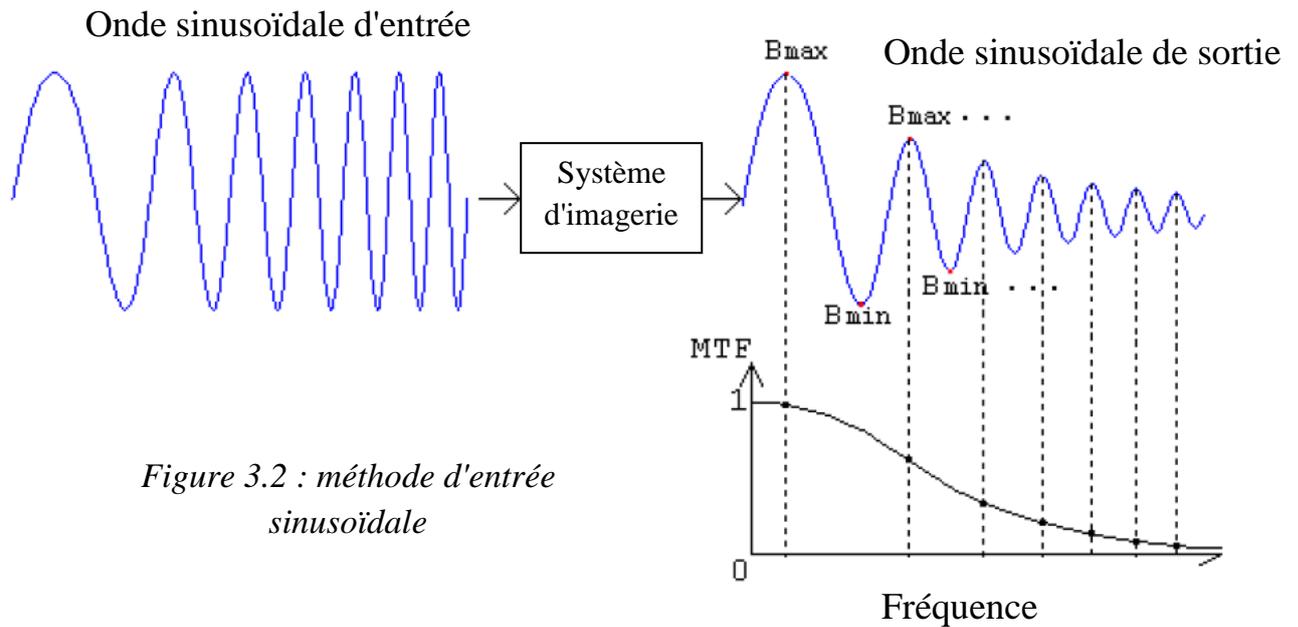


Figure 3.2 : méthode d'entrée sinusoidale

### 3.1.3 Méthode d'Entrée Bord de Couteau :

Pour un satellite en orbite, l'application à l'entrée d'une onde sinusoidale est impossible. Pour contourner cette limitation, des entrées dite bord de couteau et d'impulsion sont utilisées. Un bord de couteau excite un système d'imagerie à toutes les fréquences spatiales. Le profil d'un bord dans une image est appelée la fonction de propagation du contour ESF (**E**dge **S**pread **F**unction).

De la différenciation des résultats de l'ESF dans le plan unidimensionnel résulte la PSF. Enfin, la MTF peut être calculée en faisant la transformée de Fourier de la PSF [6].

Chaque image contient du bruit dans une certaine mesure. Pour éviter les effets du bruit, la plupart des méthodes d'estimation de la MTF utilise différents modèles numériques parmi lesquels le modèle gaussien pour réduire le bruit aléatoire dans les profils des contours de sortie. Toutefois, de par leur nature même, ces approches sont limitées par rapport aux types de systèmes qu'ils peuvent simuler.

### 3.1.4 Méthode Entrée Pulsionnelle :

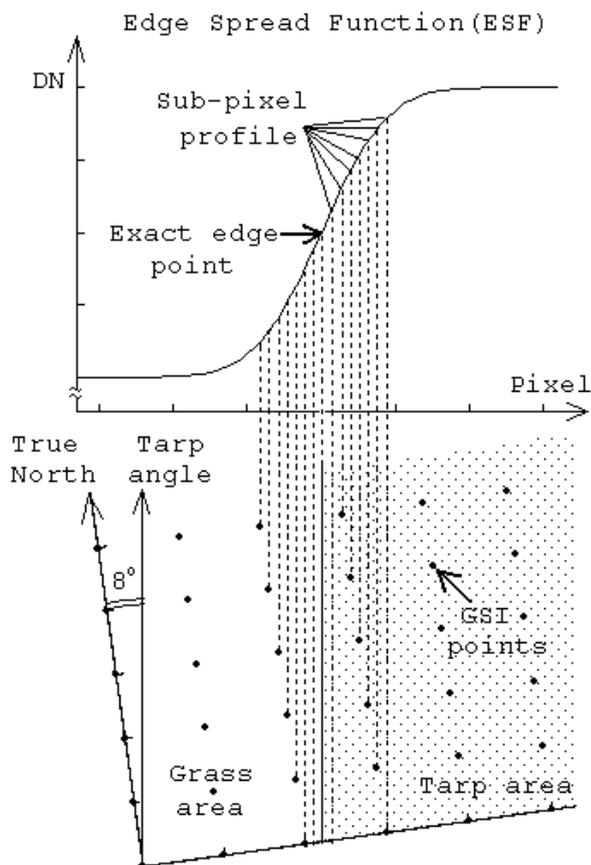
La méthode entrée pulsionnelle a été utilisée pour mesurer la MTF du satellite Landsat TM (*Thematic Mapper*). La source de la pulsion utilisée était un pont sur la baie de San Francisco. La largeur du pont est de 18,3 mètres et la résolution du Landsat (TM) était de 30 mètres. La transformée de Fourier d'un créneau d'impulsions est une fonction Sinus cardinal.

Pour les deux méthodes du bord de plage et d'impulsion, l'orientation du bord et des cibles est essentiel pour obtenir des points sous-pixel régulièrement espacés de manière uniforme. Si l'orientation des cibles est incorrecte, la reconstruction des profils des bords de plage ou d'impulsions aboutit à des profils MTF pauvres. Ce problème est aggravé par le fait que les bandes panchromatiques et multispectrales sont de résolutions différentes. Ainsi, compromis dans l'orientation des cibles doit être trouvé pour une prise en compte de toutes les bandes spectrales [6].

Pour les méthodes bords de plage et Entrée pulsionnelle ; La cible est une entrée impulsion et peut se composer d'un ensemble de bâches bleus par exemple sur un fond uniforme herbeux (gazon).

### 3.2 Reconstitution du profil de la FTM

Pour mieux comprendre l'importance de l'angle de la cible, un exemple de la fonction de propagation d'un bord (ESF) est montré dans Figure 3.3 (a). Dans la Figure 3.3 (a) et (b), le côté droit est la bâche et le côté gauche est l'herbe. Tous les centres de pixel sont indiqués en pointillés sur les grilles à angles droits. Les lignes pointillées est une projection sur le graphe de l'ESF qui indique la valeur de niveau de grille du pixel correspondant du capteur CCD.



(a) Fonction d'étalement de bord (ESF) - projection à partir des points d'Intervalle d'échantillonnage au sol (GSI).



(B) Chaque point de participation a été aligné par un transit pour obtenir une ligne aussi droite que possible.

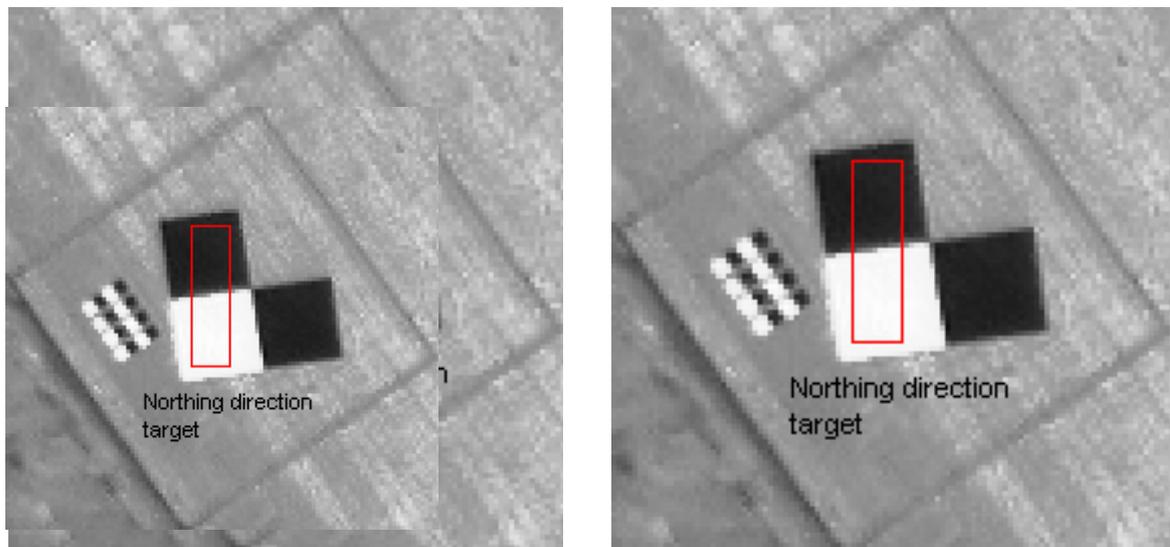
Figure 3.3 : L'angle de la Cible au sol

### 3.2.1 Mesure de réflectance de la cible:

Une mesure indépendante du contraste de chaque côté du bord est déterminée pour chaque bande spectrale du satellite considéré en utilisant un spectroradiomètre portable de terrain.

### 3.2.2 Implémentation de la méthode de Bord de plage:

Habituellement par exemple des carrés Noirs et blancs sont peints sur une piste de béton d'un aéroport, comme le montre la figure 3.4. L'objectif a été peint pour obtenir au maximum des zones uniformes claires et sombres. De cette géométrie, la MTF est mesurée dans les deux directions d'abscisse et d'ordonnée. Mais l'analyse de la taille de la cible était limitée dans bande panchromatique.



(a) Direction abscisse de la cible

(b) Direction ordonnée de la cible

Figure 3.4. Images satellite d'une cible

### 3.3 Description des méthodes de Caractérisation de la FTM

#### 3.3.1 Méthode bord de plage

L'algorithme détermine en premier les endroits du bord allant du côté brillant vers le côté sombre de tous les lignes de l'image. Ensuite, les données sont interpolées et moyennées pour obtenir une fonction d'étalement de bord (ESF), comme illustré à la figure 3.5.A. L'ESF est ensuite différenciée pour obtenir la PSF représentée dans la seconde partie de la figure 3.5.B. Ensuite, l'application de la transformée de Fourier et la normalisation de la PSF nous donne la MTF correspondante de la figure 3.5.C [6].

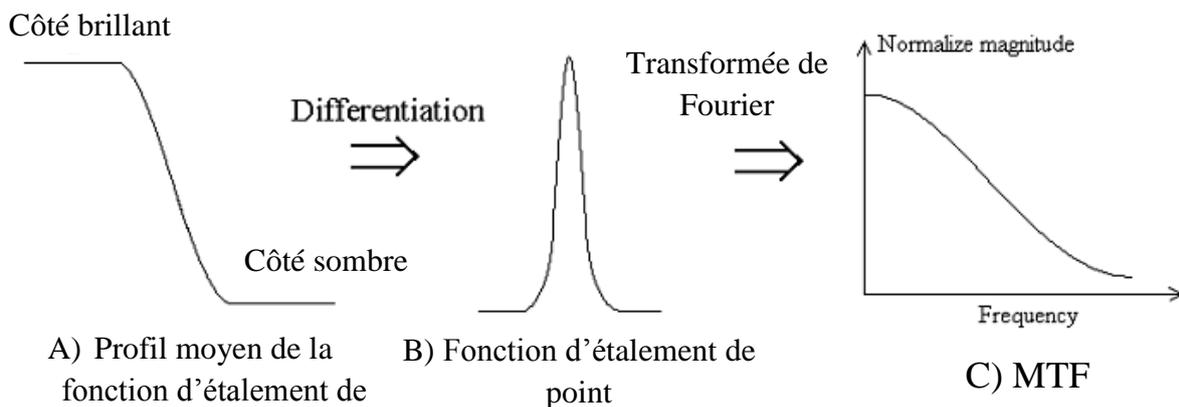


Figure 3.5 : brief explication de la Méthode bord de plage

##### 3.3.1.1 Détection de bord

La première étape consiste à déterminer la limite exacte du contour. Les positions du contour sont déterminées ligne par ligne en utilisant les informations de pixels. Par exemple, si nous avons les valeurs DN pour une ligne telle qu'elle apparaît dans les données ci-dessous,

0.00 0.01 0.04 0.11 0.26 0.50 0.73 0.88 0.95 0.98 1.00 1.00

Le profil résultant de ce contour flou est indiqué dans Figure 3.6. Une simple différenciation numérique ( $x[n] - x[n-1]$ ) est ensuite appliquée pour détecter la pente maximale comme illustré dans la figure 3.7. Les points du sous-pixel du contour sont déterminés en appliquant une équation du troisième degré à la donnée du contour à l'aide de quatre valeurs autour du point de pente maximale [6].

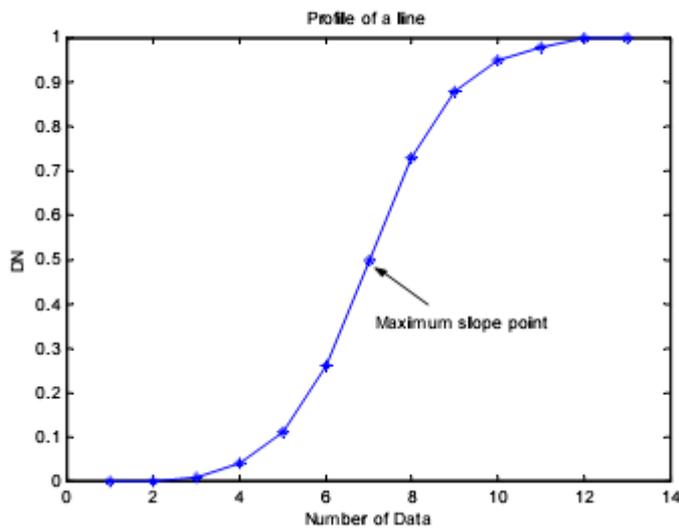


Figure 3.6 : exemple d'un contour flou

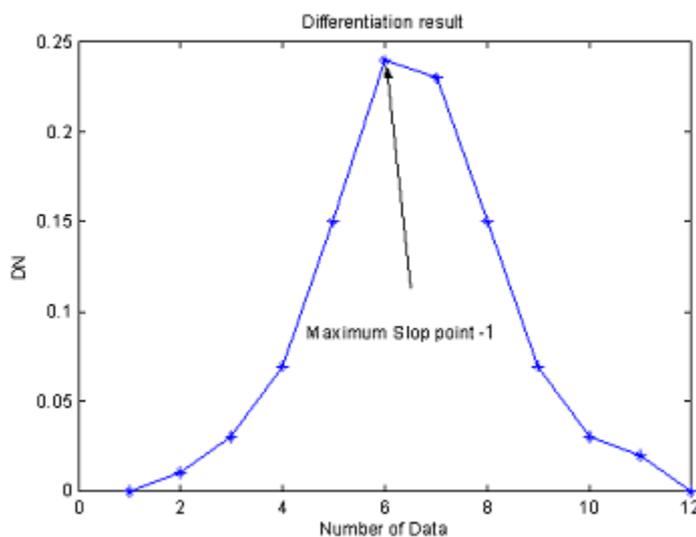


Figure 3.7 : Résultat de différenciation

L'emplacement du passage par zéro de la dérivée seconde des coefficients polynomiaux indique le point d'inflexion de la courbe, qui est censé être le lieu bord du sous-pixel.

### 3.3.1.2 Ligne de raccord des points du contour (Méthode des moindres carrés)

Une hypothèse sous-jacente est que le vrai bord de la cible réside dans une ligne droite. Tout écart par rapport à cette ligne droite du bord, représente des erreurs dans la géométrie de l'image et une contribution potentielle à la MTF globale du système. De cette façon, tous les bords des sections ont été forcés à être sur le long de la même ligne droite. Cette ligne droite est obtenu avec la méthode des moindres carrés qui sera développées en détailles au chapitre suivant.

L'approche des moindres carrés pour trouver une ligne droite implique de déterminer la meilleure ligne approximative quand l'erreur carrée de la somme des carrés des différences entre le point du bord de plage sur la ligne approximative et les valeurs indiquées de point de bord est réduites au minimum. L'équation de la ligne droite approximative est :

$$y = ax + b \quad (3.3)$$

Alors :

$$a = \frac{m(\sum_{i=1}^m x_i y_i) - (\sum_{i=1}^m x_i)(\sum_{i=1}^m y_i)}{m(\sum_{i=1}^m x_i^2) - (\sum_{i=1}^m x_i)} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{m(\sum_{i=1}^m x_i^2)(\sum_{i=1}^m y_i) - (\sum_{i=1}^m x_i y_i)(\sum_{i=1}^m x_i)}{m(\sum_{i=1}^m x_i^2) - (\sum_{i=1}^m x_i)} \quad (3.5)$$

$m$  : Nombre de données

$x_i$  : Nombre de ligne

$y_i$  : Position du contour du sous pixel

Les données d'entrée ont été déterminées par la méthode précédente de détection du bord. Dans la figure 3.8, les cercles sur les contours montrent la position du contour d'entrée. La ligne est la ligne des moindres carrés ajustée par les cercles [6].

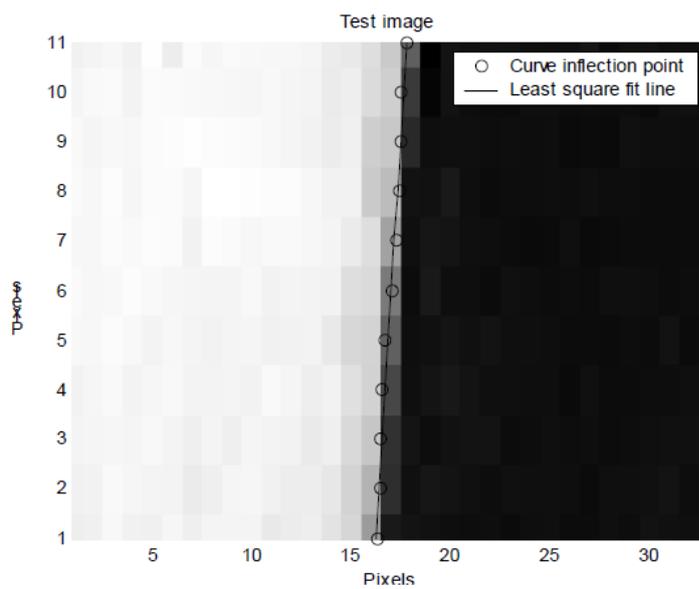


Figure 3.8 Ligne de raccord des points du contour (Méthode des moindres carrés)

### 3.3.1.3 Technique de la moyenne

Les lignes pointées cubiques ont été utilisés pour interpoler les données d'un contour aligné. Dans cet exemple une vingtaine de valeurs ont été interpolées entre deux points réels pour construire une ligne pseudo-continue comme le montre la Figure 3.9.

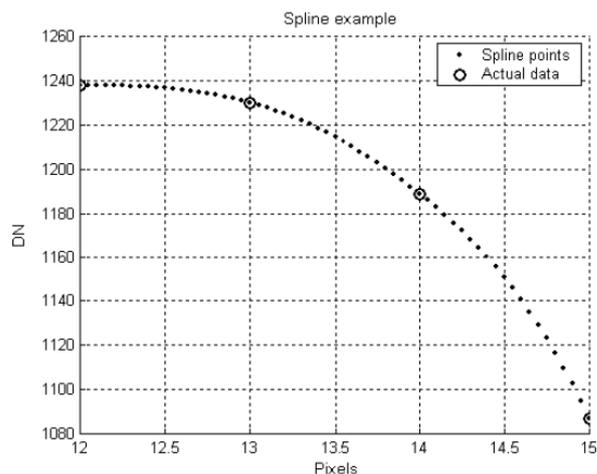


Figure 3.9 : Un exemple d'interpolation des points cubiques

Un exemple de toutes les lignes des contours pour le profil abscisse en direction de l'est ; est illustré à la figure 3.10. Dans la figure précédente, onze lignes ont été utilisées pour obtenir une ligne pointée moyenne. La ligne pointée finale moyenne est indiquée dans la Figure 3.11 [6].

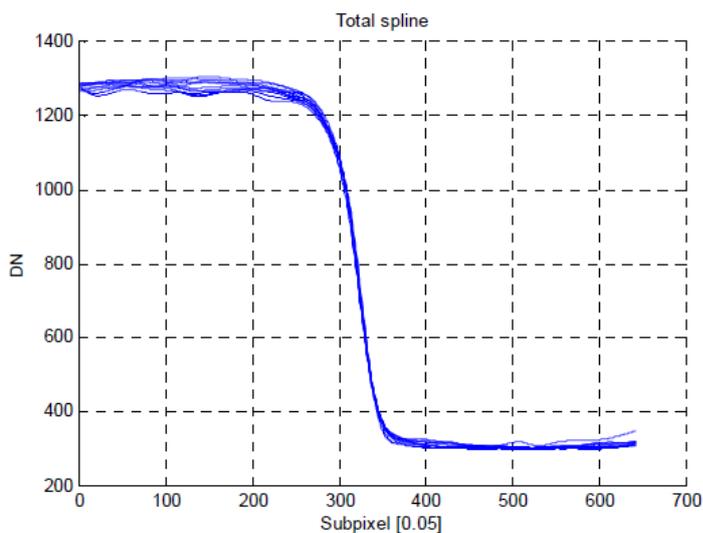


Figure 3.10 : Un exemple de toutes les lignes des contours

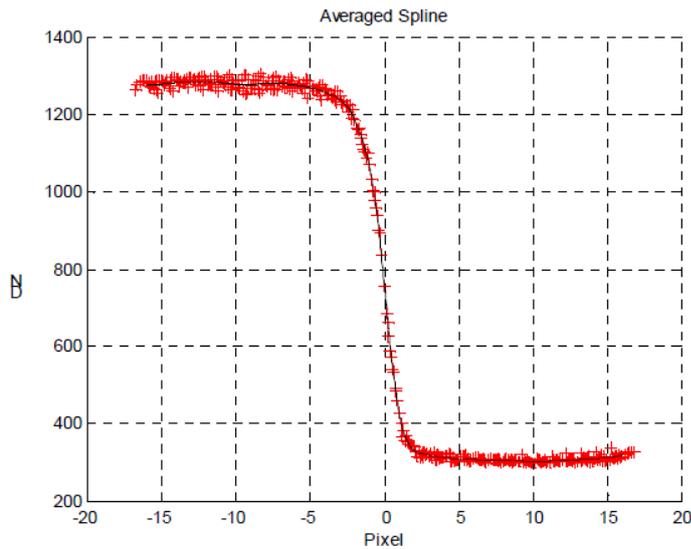


Figure 3.11 : La ligne pointée moyenne finale

### 3.3.1.4 Fonction d'étalement des lignes (LSF)

Le calcul de la fonction d'étalement des lignes (LSF) est effectué par simple différenciation de la fonction de propagation du contour (ESF). Les résultats présentés dans la Figure 3.12 [6].

L'équation de différenciation est :

$$LSF(n) = ESF(n) - ESF(n - 1). \quad (3.6)$$

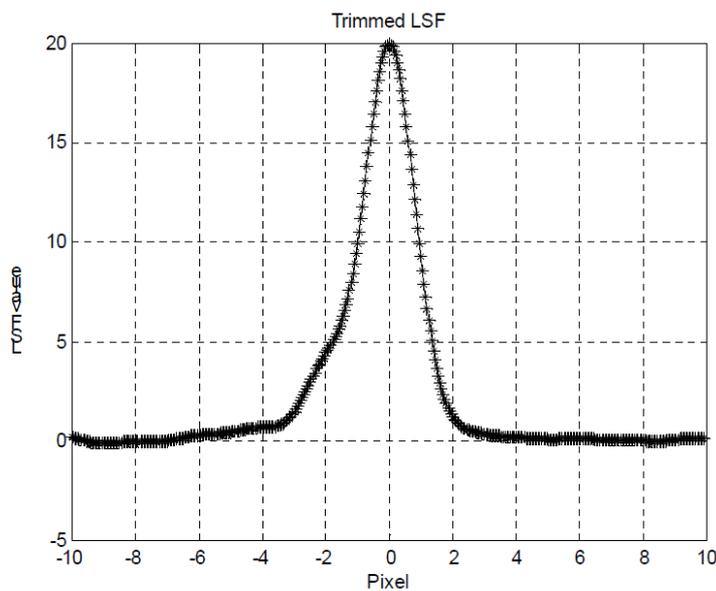


Figure 3.12 : Un exemple de LSF (Line Spread Function)

### 3.3.1.5 Équilibrage du LSF

Le profil LSF est équilibré pour réduire le bruit présents dans les zones uniformes de chaque côté des bords. La LSF équilibrée est montrée sur la Figure 3.13 de l'échantillon 120 à 519 de la Figure 3.10. Ces deux points ont été soigneusement choisis pour minimiser les pertes de fréquence qui ont été causés par les différences DN entre ces deux points [6].

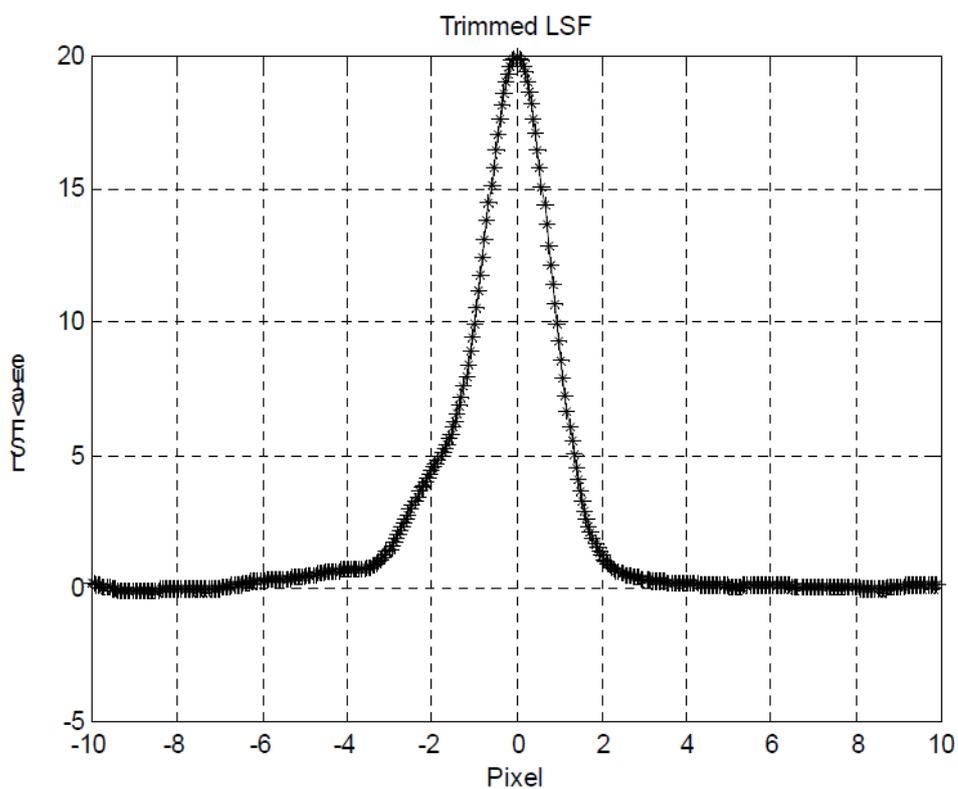


Figure 3.13 : LSF équilibré (Fonction d'étalement des lignes)

### 3.3.1.6 Calcul de la MTF

Une transformée de Fourier discrète est appliquée à la fonction d'étalement des lignes LSF. La MTF normalisée a été calculée en divisant les valeurs absolues de la fonction transformée par la première valeur absolue.

L'emplacement de la fréquence de Nyquist a été calculé en utilisant la résolution de la taille de l'ensemble des données et ligne pointée, qui était de 0,05 pixels :

$$\text{Fréquence de Nyquist} = \frac{\text{la taille de l'ensemble des données} \times \text{résolution}}{2} + 1 \quad (3.7.1)$$

$$= \frac{\text{nombre des pixels équilibrées}}{2} + 1 \quad (3.7.2)$$

Le tracé de la MTF qui en résulte est illustré à la figure 3.14 [6].

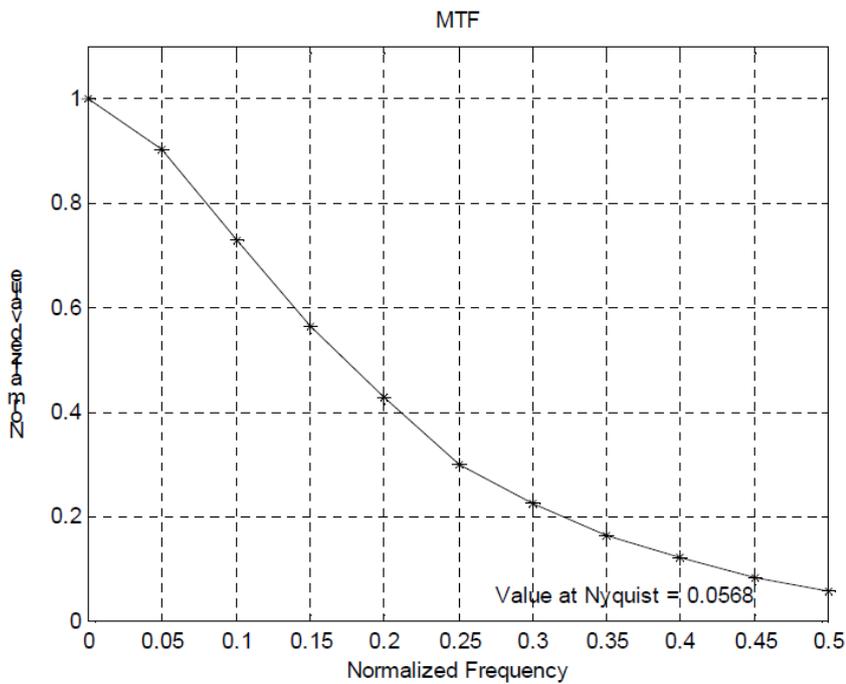


Figure 3.14 : Exemple de la MTF

### 3.3.2 Méthode d'impulsion

La méthode d'impulsion est assez semblable que la méthode des bords de plages, sauf que l'entrée du système d'imagerie est une impulsion. Comme la montre la Figure 3.15, une impulsion peut être appliquée au système d'imagerie et la sortie peut être acquise à titre d'image ; un exemple d'une image de sortie est illustré à la figure 3.16. La transformée de Fourier est appliquée à l'entrée et la sortie. La MTF peut être calculé en divisant sortie par entrée. Si la largeur de l'impulsion est petite, alors la réponse pourrait être prise comme une

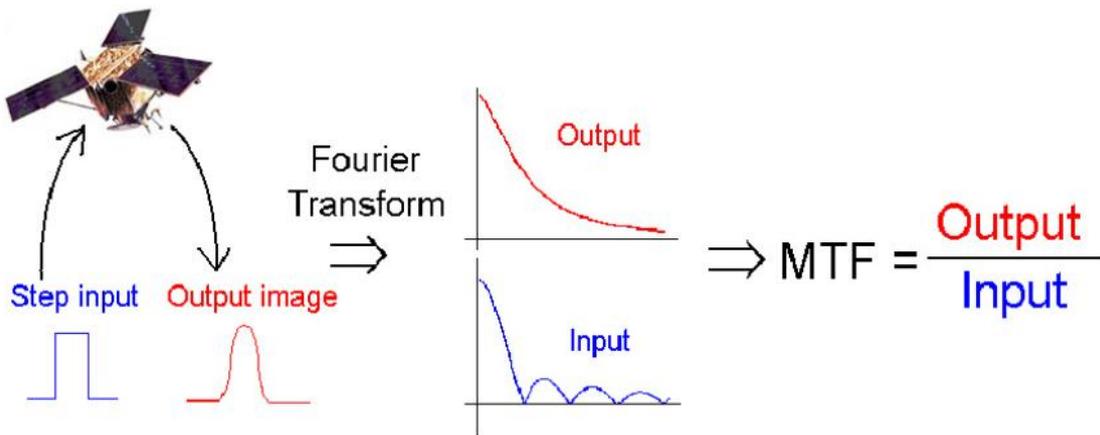


Figure 3.15. Brève explication de la méthode d'impulsion

réponse d'impulsion, ce qui est le cas des lignes centrales d'une image contenant un aéroport [6].

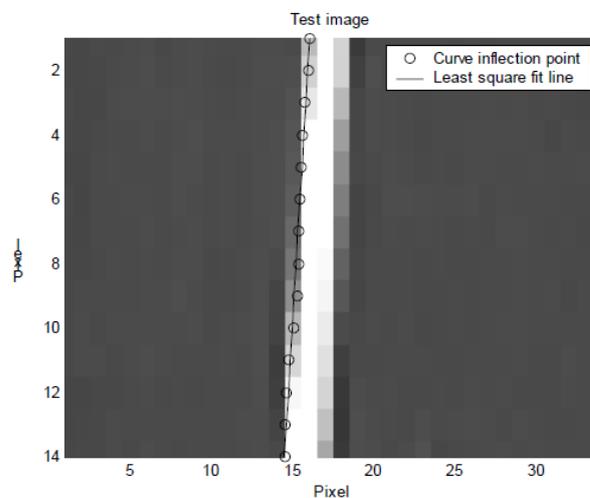


Figure 3.16 : Exemple d'une image de sortie

### 3.3.2.1 Calcul de la MTF

La transformation de Fourier est appliquée aux signaux d'entrée et de sortie. Le résultat de la transformée de Fourier (FT) est illustré à la figure 3.17. La courbe notée avec des étoiles sur la figure 3.17 est la transformée de Fourier discrète (DFT) de la sortie et la ligne avec des cercles est la DFT de l'impulsion d'entrée. Comme prévu, la ligne avec des cercles à la forme d'une fonction Sinus cardinal échantillonné.

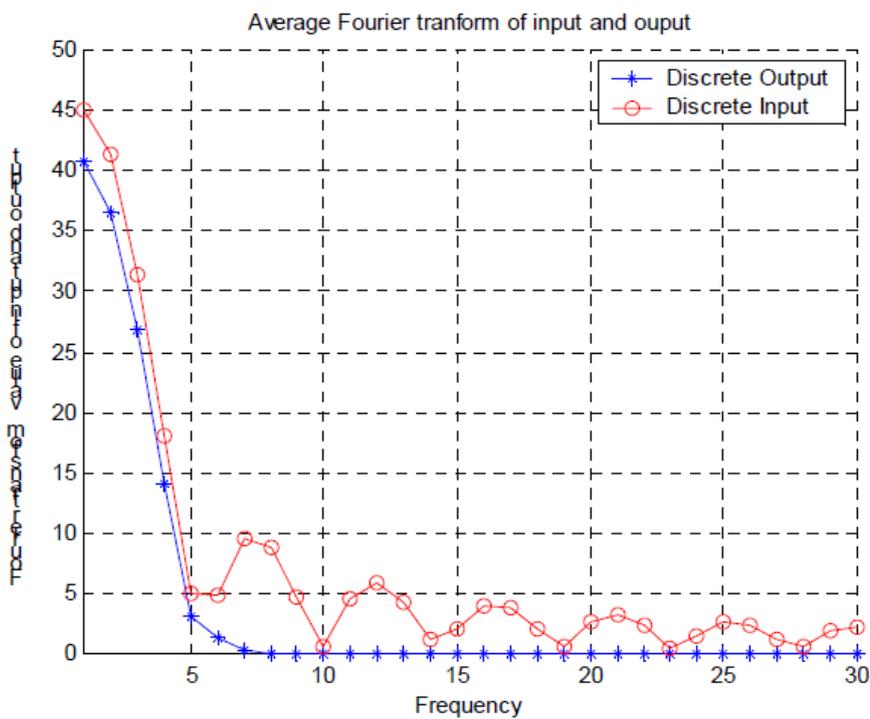


Figure 3.17 : FT d'entrée et de sortie équilibrées.

$$x(s) = \begin{cases} 1 & |s| \leq tw \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.8)$$

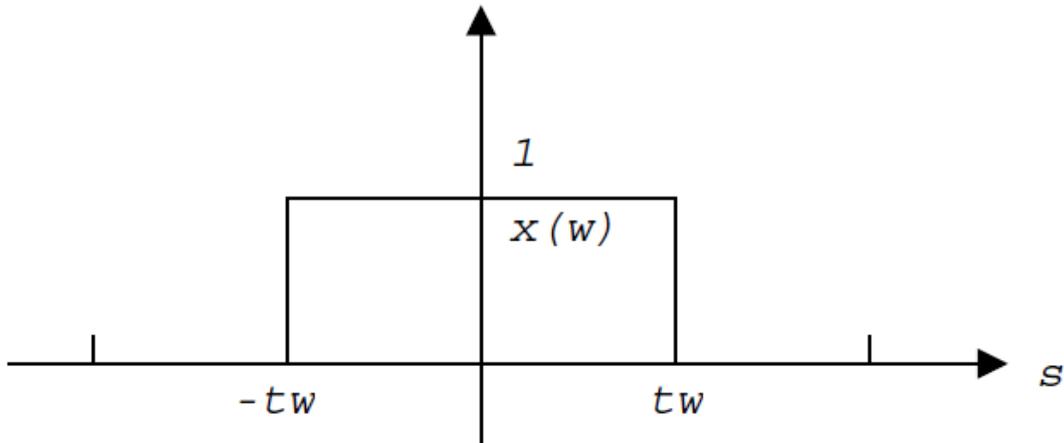


Figure 3.18 : Fonction d'impulsions d'entrée.

Application de la transformée de Fourier aux rendements d'impulsion d'entrée,

$$X(n) = \frac{2 \sin(tw n)}{n} \quad (3.9)$$

$X(n)$  est la transformée de Fourier de l'entrée et le  $n$  de l'équation 3.9 est une variable de propriété fréquentielle. La MTF est calculée en divisant chaque valeur de la sortie par chaque valeur d'entrée correspondante, puis normalisant le résultat par la première valeur. La fréquence de Nyquist est exactement la même que celle de la méthode bord de plage [6].

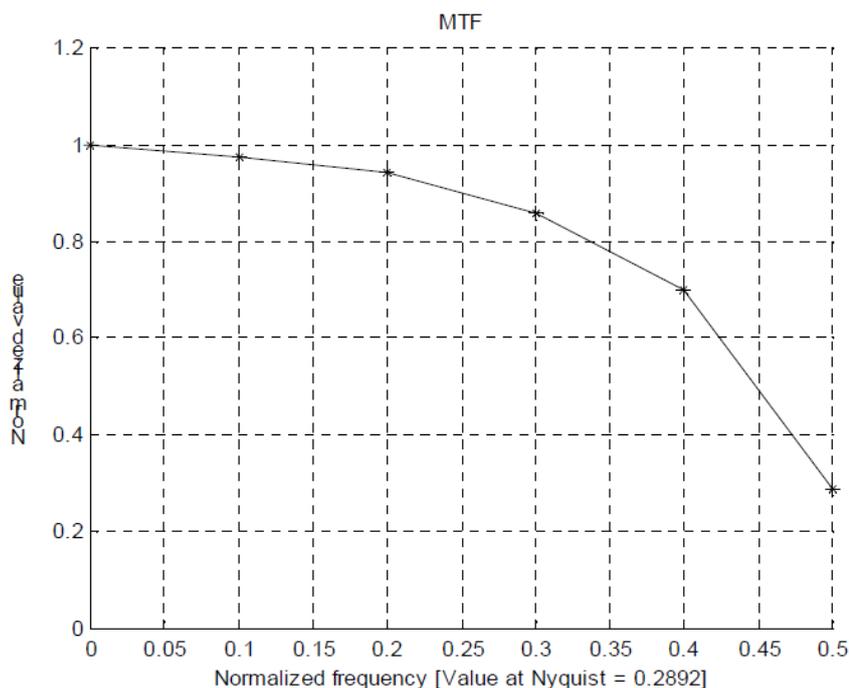


Figure 3.19 : Un exemple du résultat de la MTF

### 3.4 Calcul de l'équation de la droite du contour

Cette méthode débute par une sélection manuelle de l'utilisateur d'un contour d'intérêt. Le contour doit être long et rectiligne et posséder une faible inclinaison par rapport à la verticale, de l'ordre d'une dizaine de degrés. La transition doit être de telle sorte que son minimum et son maximum englobe la dynamique de l'image.

Ces contraintes restreignent considérablement le jeu d'images utilisables pour un capteur donné. Plus l'image est bruitée, plus il est conseillé de favoriser des contours allongés. Ces contours pourront être des arêtes de hangars, des ponts, les contours d'un stade, les bords d'une route ou encore d'une piste d'atterrissage d'avions. Les objets sélectionnés dépendent fortement de la résolution spatiale de l'image puisqu'il est nécessaire d'avoir un contour d'au moins quelques pixels de large.

Généralement, les ombres des bâtiments procurent de bonnes différences d'amplitude et une homogénéité satisfaisante. Ainsi des longueurs de contours de quelques mètres sont susceptibles d'occuper plusieurs pixels de l'image et s'ils présentent aussi une orientation satisfaisante, ces objets peuvent constituer de bons contours potentiels pour l'estimation de la FTM [7].

La figure 3.20a représente un exemple d'un contour, pour obtenir l'équation de la droite représentant le contour, on doit dériver le contour, par exemple par un filtre de Sobel. Néanmoins, comme la dérivation revient à une convolution par un filtre passe-haut, il faut se prémunir du bruit pour s'affranchir des structures parasites en appliquant un filtrage passe-bas horizontal préalable (figure 3.20b). Le résultat obtenu est placé en figure 3.20c. Si on ne prend pas garde à diminuer le bruit, on obtient les artefacts de la figure 3.20d.

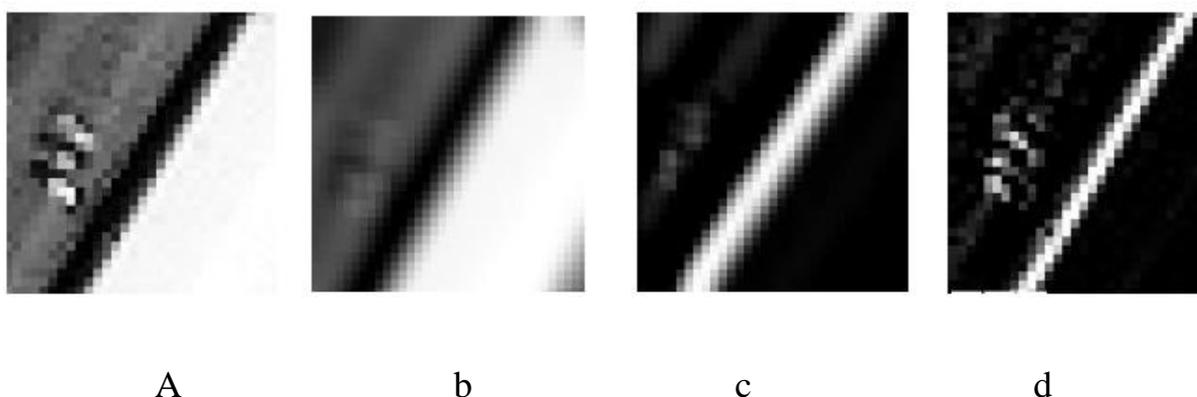


Figure 3.20 : Image Ikonos – arête d'un bâtiment. A) contour extrait manuellement, b) moyennage du contour par un filtre passe-bas, c) dérivation numérique par un opérateur de Sobel à une dimension, d) résultat de la dérivation sans filtrage passe-bas préalable. Copyright Space Imaging 2002.

Ensuite, on utilise la transformée de Hough pour passer du domaine spatial à celui des paramètres de la fonction de la droite que l'on cherche à identifier dans l'image. Pour ce type d'objets, à chaque couple  $(x, y)$  de l'image (figure 3.21a) correspond une sinusoïde dans l'espace de Hough (figure 3.21b). En effet, cette transformée utilise une représentation paramétrique en coordonnées polaires des courbes et objets à détecter [7].

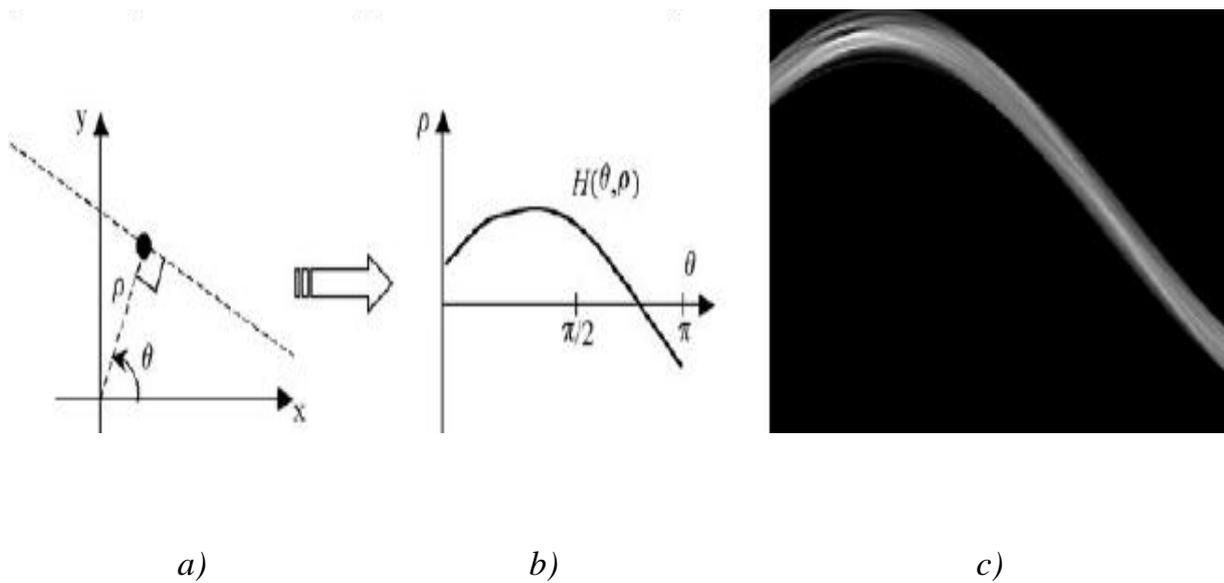


Figure 3.21 : Principe de la transformée de Hough, a) du domaine de l'image, vers b) et c) celui de Hough.

L'équation d'une droite s'écrit  $y = ax + b$  dans le domaine spatial et devient  $y = \rho \sin\theta$  et  $x = \rho \cos\theta$  en coordonnées polaires. On applique donc cette transformée à l'image de la figure 3.20c. Ensuite, on applique un seuil aux coefficients de Hough pour sélectionner les plus élevés, c'est-à-dire aux endroits où le plus de sinusoïdes s'intersectent (figure 3.21c) ; un critère de sélection possible des coefficients de Hough est de choisir ceux qui ont une valeur supérieure au percentile 85 % de cette image [7].

La prochaine étape consiste donc à appliquer la transformée inverse pour revenir dans l'espace de l'image (figure 3.22a).



Figure 3.22 : a) contour reconstruit après le seuillage dans l'espace de Hough, b) contour reconstruit après seuillage de l'image a.

Une validation de cette première étape se fait en comparant les valeurs des paramètres de la droite obtenues par cet algorithme avec ceux calculés à la main. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.1 pour le contour de la figure 3.39a.

a = -0.5892 b = 200.265	a = -0.6 b = 200
a)	b)

Tableau 3.1 : vérification des valeurs des coefficients de la droite pour le contour considéré – a) valeurs calculées par l'algorithme, b) valeurs obtenues à la main.

Il est très clair du tableau 3.1 que le calcul des paramètres de la droite obtenues par l'algorithme et ceux calculés à la main sont presque identique avec une légère différence inférieure 2%.

## 3.5 Méthode d'estimation de la FTM

### 3.5.1 Limite des méthodes existantes

L'estimation de la PSF consiste à dessiner un point infiniment localisé et d'amplitude infinie et de voir comment ce point est transmis par le système d'acquisition. En pratique, on peut envisager de dessiner un point noir sur fond blanc pour un scanner ou un appareil photo numérique. Le problème devient nettement plus complexe pour un capteur satellite. L'idéal est d'avoir la possibilité de positionner des spots lumineux dans des scènes à radiométrie à peu près homogène telles que des champs, comme l'ont entrepris Léger et al. (2002). Mais l'utilisation de cibles artificielles limite le champ d'application. De plus, le spot lumineux servant à l'estimation de la PSF peut être noyé dans le bruit d'acquisition et sa réponse dépend totalement de la localisation du pic lumineux sur la grille d'échantillonnage.

Les deux problèmes fondamentaux dans l'estimation de la FTM sont le bruit et l'aliasing. Le bruit a pour effet d'atténuer la PSF ce qui sous-évalue la FTM. Au contraire, le repliement spectral engendre une surévaluation des fréquences, plus particulièrement aux environs de la fréquence de Nyquist.

Pour lutter contre ces deux problèmes, Ryan et al. (2003) ont eu recours à un modèle paramétrique de PSF. D'autres possibilités ont été proposées pour augmenter le nombre de valeurs pour décrire la PSF ; soit en disposant de plusieurs images du même spot lumineux légèrement décalées par rapport à la grille d'échantillonnage, soit d'une unique image mais avec plusieurs spots aléatoirement disposés dans la scène. Ainsi, on pourrait obtenir une version suréchantillonnée et moyennée de la PSF à partir de laquelle la FTM pourrait être reconstruite sans effet indésirable d'aliasing et ainsi limiter le bruit.

Cependant, encore une fois cette démarche est difficilement concevable avec l'imagerie satellite [7].

### 3.5.2 Principe de l'estimation de la FTM

Une manière de caractériser l'estimation de la PSF est de la simuler à partir des informations déjà disponibles dans l'image. La méthode habituelle est de calculer la PSF en utilisant une approche basée contours. En effet, si on extrait une ligne d'une image de contour, on obtient un profil qui correspond à La figure 3.23 ; la différentiation de ce profil donne la PSF.

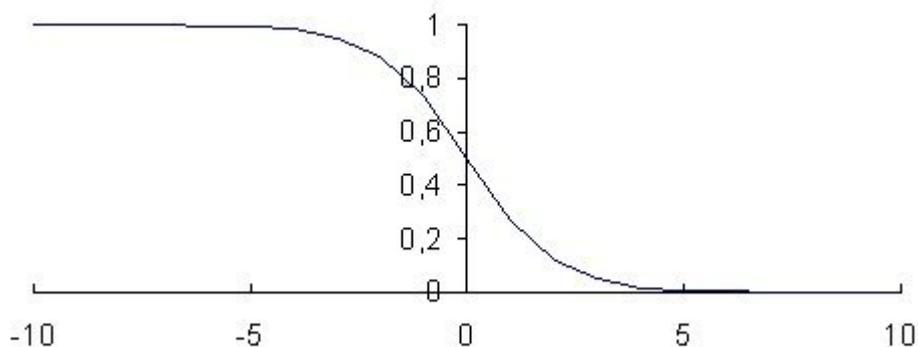


Figure3.23 : profil d'une transition.

En théorie, ce contour doit correspondre à une transition idéale, c'est-à-dire pouvoir couvrir la dynamique de l'image (Ryan et al. 2003, Anuta et al. 1984) ; mais en réalité, l'image d'un contour parfait prise par un système d'acquisition est une transition qui n'est pas parfaite. Elle apparaît beaucoup plus progressive et sa progression donne des informations sur la manière dont le système traite les contours. Ceci est illustré par la figure 3.24. A gauche (a), un contour parfait. A droite, le même contour vu par le système d'acquisition. Le contour très net est transformé en un dégradé.

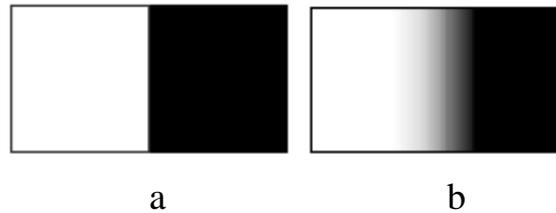


Figure 3.24 : a) contour parfait, b) contour perçu à travers un système d'acquisition.

La différentiation de l'allure d'une ligne perpendiculaire à ce contour donne la PSF. Enfin, la Transformée de Fourier de la PSF permet d'obtenir la FTM dans une direction donnée.

Cette approche basée contour permet efficacement de lutter contre le problème du bruit puisqu'elle a l'avantage de pouvoir fournir une version du profil par ligne de l'image du contour ; les profils seront ensuite moyennés afin de s'affranchir du bruit. Cependant, le problème de l'aliasing demeure ; une version légèrement inclinée du contour par rapport à la grille d'échantillonnage permet efficacement de lutter contre le problème comme le montre la figure 3.25.

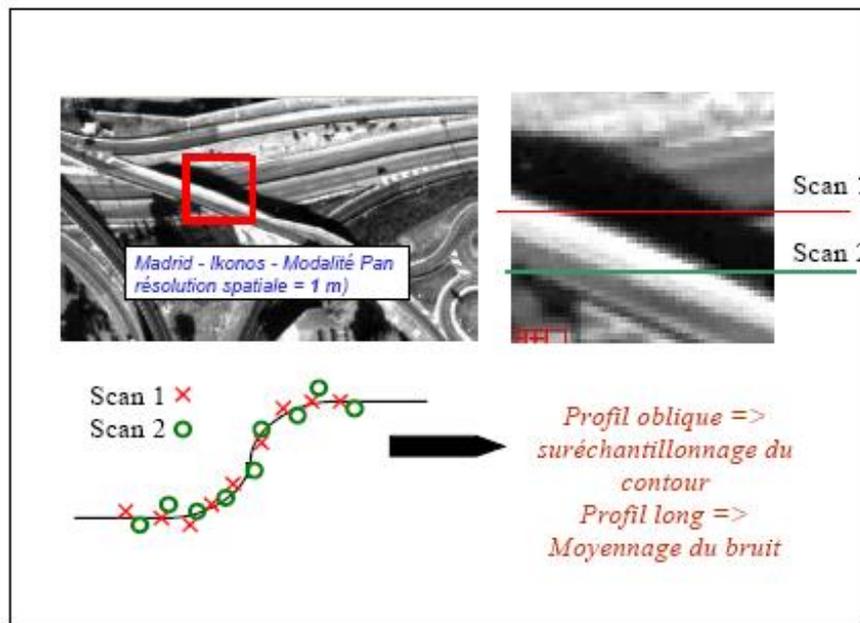


Figure 3.25 : principe de l'approche basée contour.

Cette figure illustre comment un contour qui présente une transition inclinée rectiligne et avec un bon gradient de radiométrie permet de créer un suréchantillonnage du profil. La transition d'intérêt est formée d'une route de radiométrie élevée et de son ombre de radiométrie plus faible et relativement homogène. Chaque ligne présente un échantillonnage différent du profil comme le montrent les scans 1 et 2. Certains échantillonnages seront similaires et leurs profils vont se superposer, alors que d'autres seront décalés et permettront de décrire plus finement le contour.

Cette méthode se base donc sur la lecture des contours naturels d'une image et permet simultanément un suréchantillonnage du profil avec un moyennage des échantillons qui se superposent. Les différentes étapes d'estimation de la FTM sont décrites ci-après. Chacune de ces étapes fait appel à des outils simples et connus dans le domaine du traitement d'images. La méthode d'estimation est donc facilement reproductible.

Cette approche avait déjà été proposée par Ryan et al. (2003) et Dial et al. (2003) en utilisant des cibles artificielles manuellement disposées sur la trajectoire du satellite Ikonos [7].

## Introduction

Ce chapitre est consacré à l'implémentation d'une autre distance pour l'évaluation de la qualité géométrique des images satellite, basée sur l'estimation de la fonction de transfert de modulation des capteurs.

Une simulation de bruit est étudiée à la fin de ce chapitre pour comprendre les effets du bruit sur la stabilité des estimations de la MTF.

### 4.1 Détection du contour

Cette méthode consiste à détecter le contour réel par une simple lecture de chaque ligne de la matrice de l'image et de faire une différenciation entre les niveaux de gris de chaque pixel et le pixel qui suit pour détecter le point de passage du niveau de gris de plus haut au niveau plus bas.

Cette procédure se répète pour tous les lignes de la matrice et à la fin on trouve tous les points du contour réel comme le montre la figure 4.1.

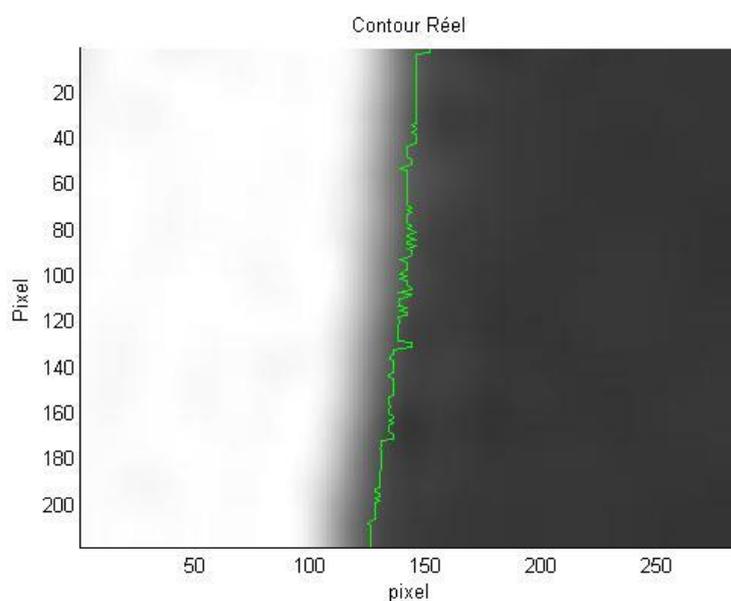


Figure 4.1 : Contour réel

## 4.2 Ajustement du contour

Après avoir détecté le contour l'on procède à l'ajustement en utilisant une simple fonction matlab `polyfit.m` qui estime les coefficients d'un polynôme  $p(x)$  de degré  $n$  qui ajuste les données,  $p(x(i))$  à  $y(i)$ , dans un sens des moindres carrés. Le résultat  $p$  est un vecteur ligne contenant les coefficients du polynôme en ordre décroissant des puissances, c'est exactement les coefficients  $a$  et  $b$  de la droite trouvée précédemment dans la méthode de Hough.

Ensuite on utilise une autre fonction matlab `polyval.m` qui renvoie la valeur d'un polynôme de degré  $n$  évalués à  $x$ . L'argument d'entrée  $p$  est un vecteur de longueur  $n + 1$  dont les éléments sont les coefficients en ordre décroissant des pouvoirs du polynôme à évaluer.

De cette façon on retrouve tous les nouveaux points de passage pour chaque ligne de notre matrice et on pourra reconstituer le contour aligné comme le montre la figure 4.2.

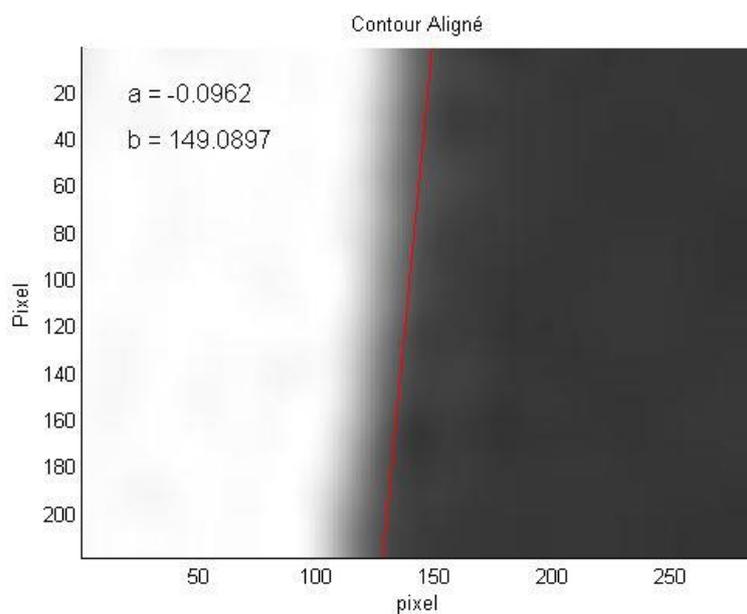


Figure 4.2 : Contour aligné

Quatre autres contours ont été testés et le tableau 4.1 reporte les résultats pour les coefficients a et b calculés à la main et par l'algorithme. Nous avons aussi indiqué les erreurs moyennes absolues pour chacun des paramètres.

Indice du contour	Paramètres calculés à la main	Calculés grâce à l'algorithme	Erreur moyenne absolue (MAE)
1	a=-0,14 b=149,98	a=-0,0962 b=149,0897	MAE(a) = 0,02140 MAE(b) = 0,43920
2	a=-0,08 b=151,4	a=-0,0349 b=150,5928	
3	a=-0,15 b=155,83	a=-0,1189 b=156,7715	
4	a=-0,10 b=148,6	a=-0,0509 b=147,7306	

Tableau 4.1 : résultats obtenus pour quatre autres contours.

On remarque que l'erreur (MAE) commise sur a est moins élevée que celle sur le paramètre b qui reste toutefois inférieure au pixel. Pour assurer une bonne superposabilité des différentes versions du profil, le paramètre le plus important est la valeur de la pente de la droite. Grâce à ces résultats, nous pouvons conclure que nous avons implanté correctement le calcul de l'équation de la droite.

La norme L2 est calculée pour vérifier la performance de l'ajustement. Plus la valeur de la norme sera faible, plus la qualité de la minimisation est bonne. La norme L2 entre deux séries de m valeurs s1 et s2 s'écrit :

$$L2(s_1, s_2) = 1/m * \sqrt{(\sum(s_1(i) - s_2(i))^2)} \quad (4.1)$$

La distance L2 est normée par rapport au nombre d'échantillons.

Il y a plusieurs avantages à manipuler une fonction analytique :

- \* sa dérivée est facilement calculable, et est aussi une fonction analytique qui peut être directement implantée avec les paramètres issus de la minimisation. Cette dérivée s'écrit :

$$f'(x) = \frac{-a_0 \ln(a_1) a_1^x}{(a_0 a_1^x + a_2)^2} \quad (4.2)$$

- \* le nombre d'échantillons peut parfaitement être contrôlé. Il s'agit d'un avantage considérable puisque la transformée de Fourier qui succède à la dérivation nécessite un nombre d'échantillons qui soit une puissance de 2,
- \* le point d'inflexion peut être théoriquement calculé par l'annulation de
- \* la dérivée seconde de la sigmoïde. Cette dérivée seconde s'écrit :

$$f''(x) = \frac{(a_0^2 a_1^{2x} - a_2^2)(a_0 \ln^2(a_1) a_1^x)}{(a_0 a_1^x + a_2)^4} \quad (4.3)$$

Elle s'annule pour x valant :

$$x_{inflexion} = \frac{\ln\left(\frac{a_2}{a_0}\right)}{\ln(a_1)} \quad (4.4)$$

## 4.3 Validation de l'algorithme

### 4.3.1 Détection de bord

La première étape est de déterminer la limite exacte du contour. Les positions du contour ont été déterminées ligne par ligne en utilisant les informations de pixels. Un profil du premier contour est indiqué dans Figure 4.3.

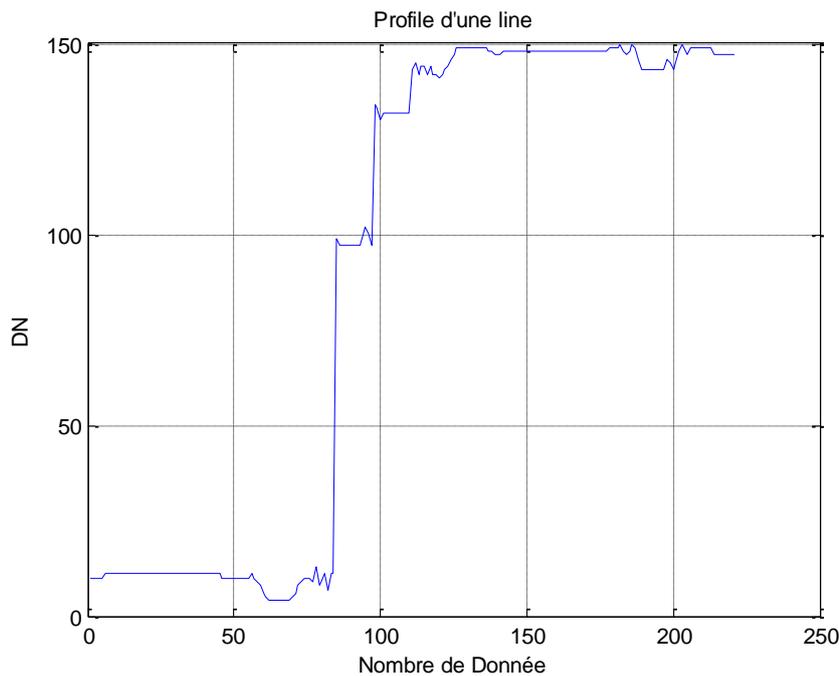
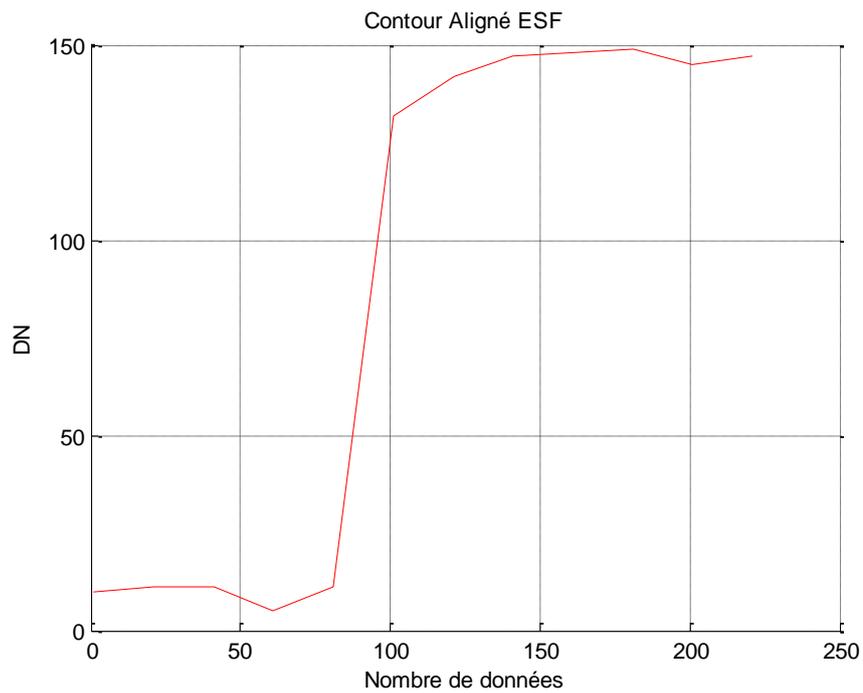


Figure 4.3 : Profil du premier contour.

Avec l'application de la fonction `spline.m` de Matlab on peut avoir un profil aligné du premier contour comme indiqué dans la figure 4.4.

Cet alignement nous donne un passage uniforme des niveaux de gris sombres vers les niveaux de gris clairs pour simplifier les calculs par la suite dans cette méthode d'estimation de la MTF.



*Figure 4.4 : Profil aligné du premier contour.*

Cette représentation du contour est appelée la Fonction de propagation du contour ou Edge Spread Function (ESF).

Une simple différenciation numérique ( $x[n] - x[n-1]$ ) est appliquée pour détecter la pente maximale comme illustré dans la figure 4.5.

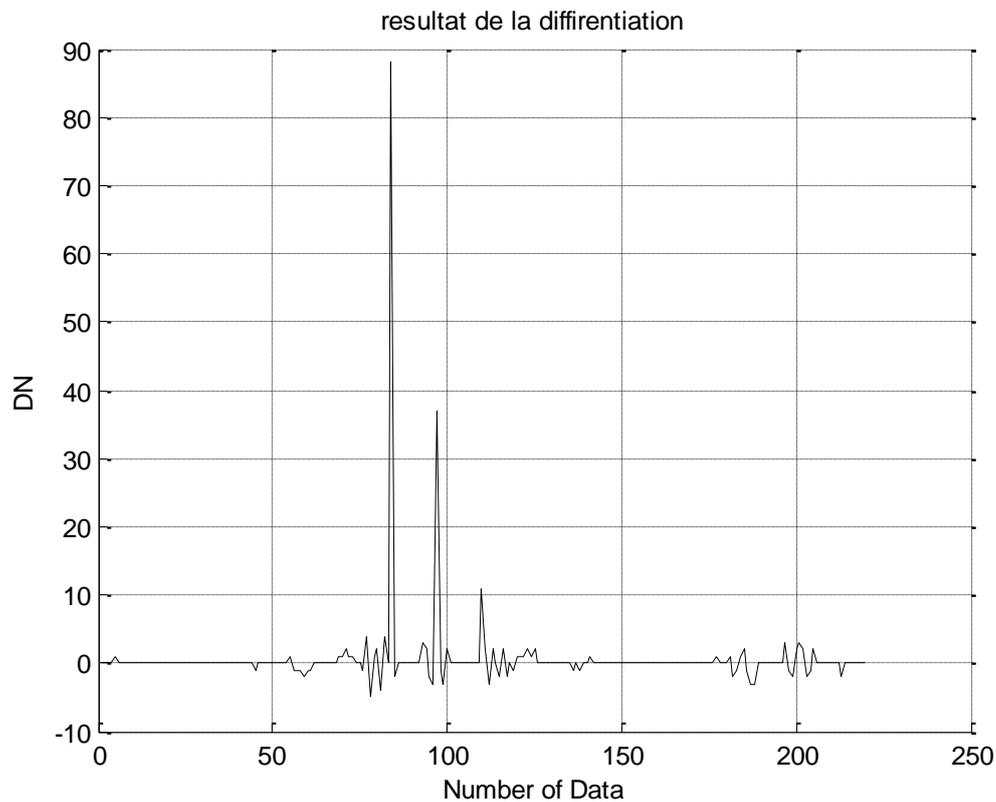
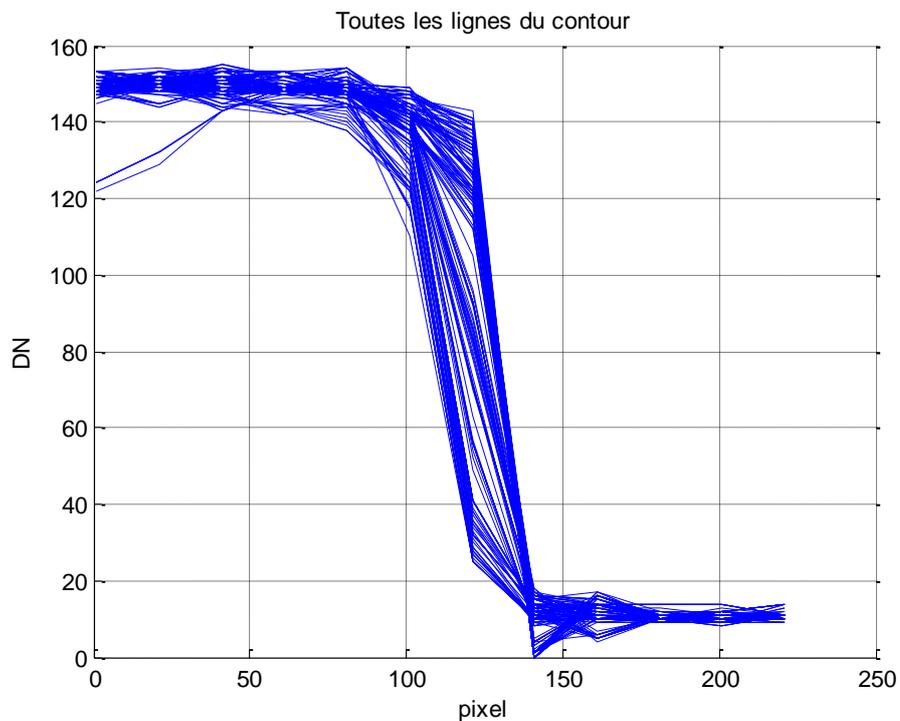


Figure 4.5 : Résultat de différenciation

Cette représentation du contour est appelée la Fonction d'étalement des lignes ou Line Spread Function (LSF). L'emplacement du passage par zéro de la dérivée seconde des coefficients polynomiaux indique le point d'inflexion de la courbe, qui est censé être le lieu bord du sous-pixel.

Chaque ligne utilisable de l'image test a été alignée à l'aide de la fonction MATLAB `spline.m`. Un exemple de toutes les lignes des contours pour le profil abscisse en direction de l'est ; est illustré à la figure 4.6.



*Figure 4.6 : Un exemple de toutes les lignes du contour*

Pour que les effets du bruit soient réduits au minimum il nous a été très utile de moyenner tous les lignes utilisables de l'image test avant leur alignement.

La figure 4.7 illustre le profil de la ligne moyenne avec tous les points de données de tous les contours de l'image test.

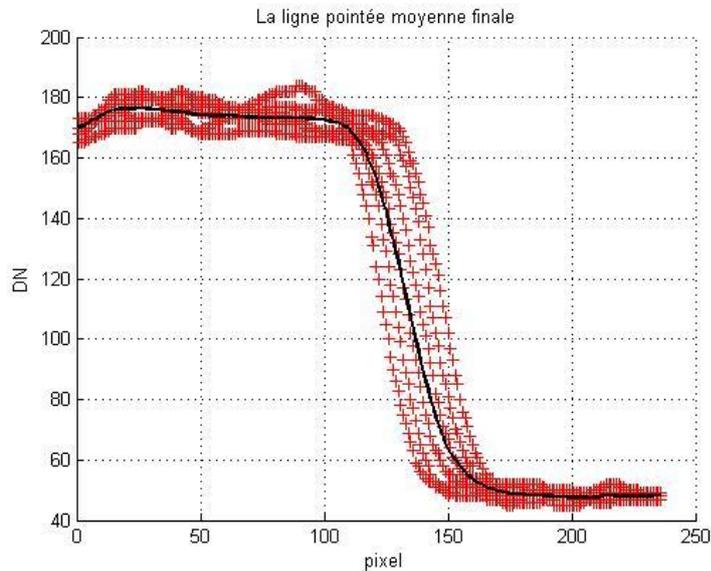


Figure 4.7 : Profil de la ligne moyenne avec tous les contours

Après avoir obtenu la ligne moyenne de tous les contours de l'image test on procède à l'alignement de cette ligne avec la fonction Matlab spline.m comme vue précédemment. Cet alignement est illustré dans la figure 4.8.a et 4.8.b.

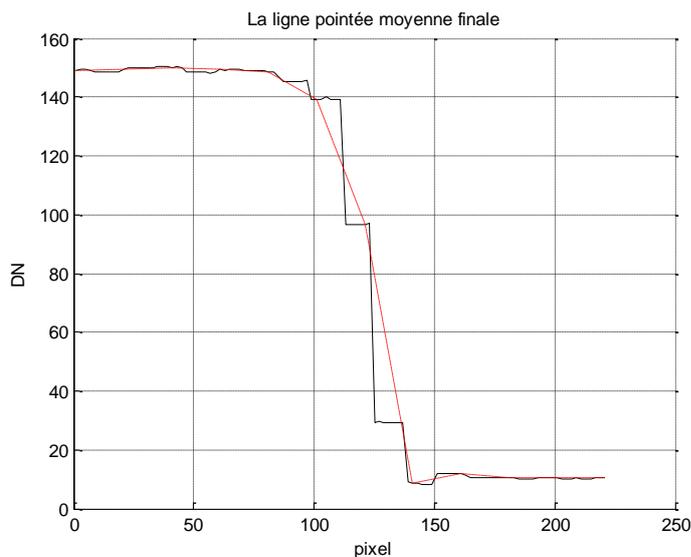
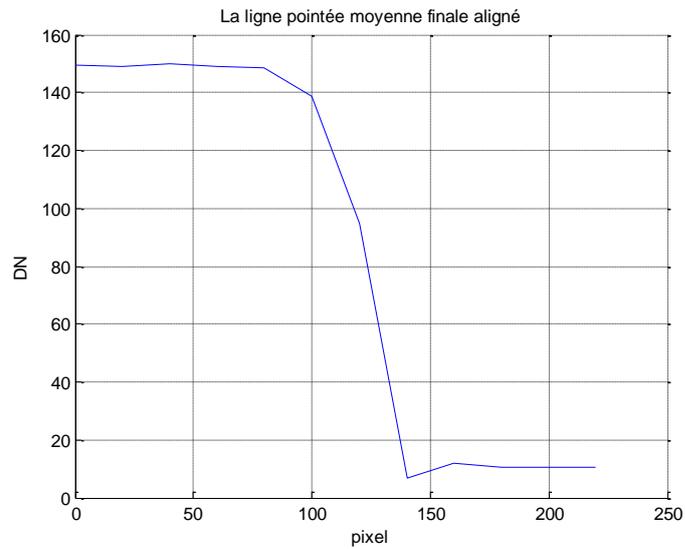


Figure 4.8.a : Alignement de la  
ligne moyenne



*Figure 4.8.b : la ligne moyenne alignée*

### 4.3.2 Fonction d'étalement des lignes (LSF)

Le calcul de la fonction d'étalement des lignes (LSF) a été effectué par une différenciation de la fonction de propagation du contour (ESF). Une différenciation numérique a été appliquée à la ligne moyenne finale de la Figure 4.8.b avec les résultats présentés dans la Figure 4.9. L'équation de différenciation est :

$$LSF(n) = ESF(n) - ESF(n - 1). \quad (4.5)$$

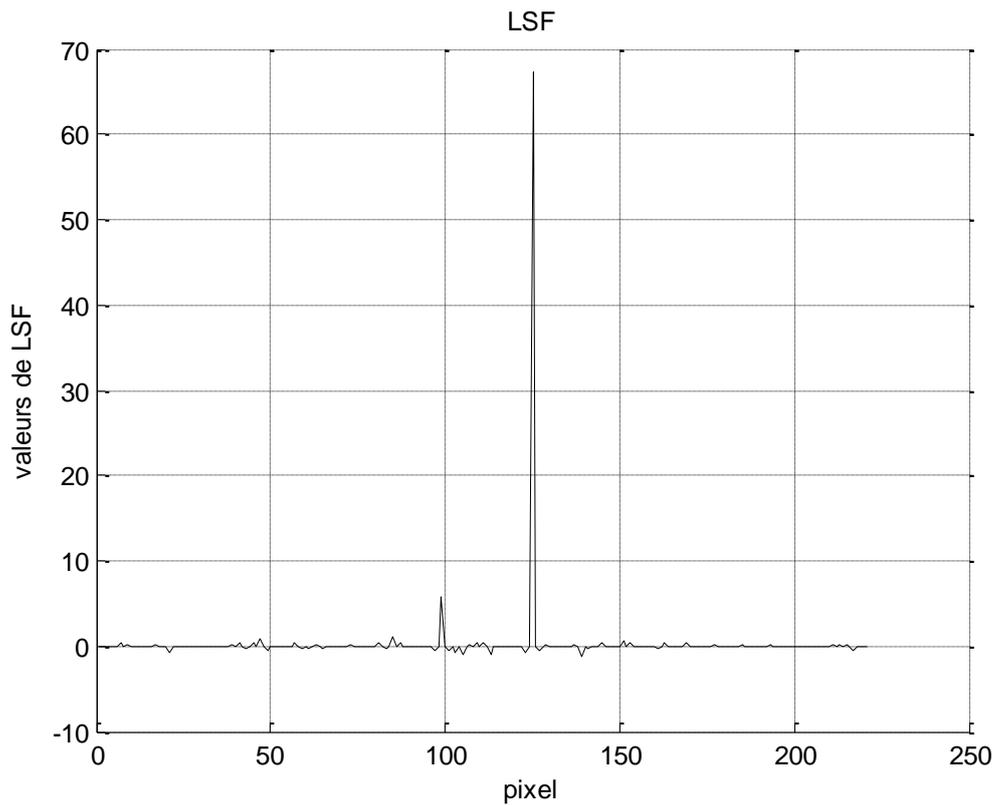


Figure 4.9 : Un exemple de LSF (Line Spread Function)

### 4.3.3 Équilibrage du LSF

Le profil LSF a été équilibré pour réduire le bruit présents dans les zones uniformes de chaque côté des bords. La LSF équilibrée est montrée sur la Figure 4.10 de l'échantillon 105 à 145 de la Figure 4.9. Ces deux points ont été soigneusement choisis pour minimiser les pertes de fréquence qui ont été causés par les différences DN entre ces deux points.

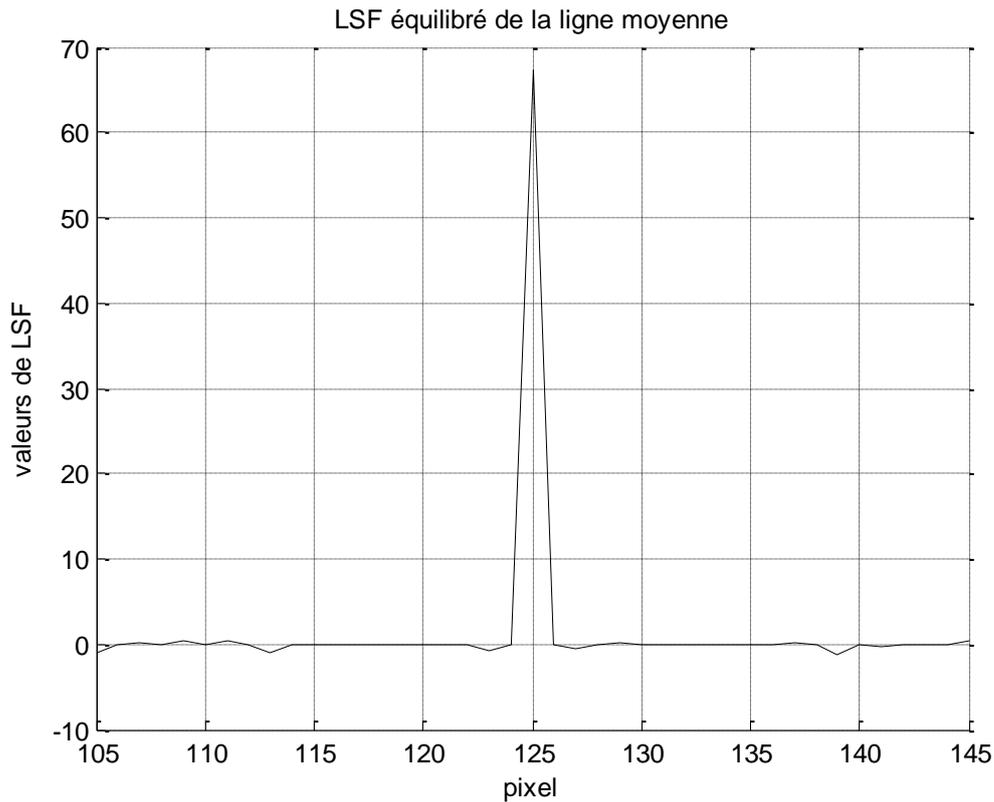


Figure 4.10 : LSF équilibrée (Fonction d'étalement des lignes)

#### 4.3.4 Calcul de la MTF

Une transformée de Fourier discrète est appliquée à la fonction d'étalement des lignes LSF. La MTF normalisée a été calculée en divisant les valeurs absolues de la fonction transformée par la première valeur absolue.

L'emplacement de la fréquence de Nyquist a été calculé en utilisant la résolution de la taille de l'ensemble des données et ligne pointée, qui était de 0,05 pixels :

$$\begin{aligned}
 \text{Fréquence de Nyquist} &= \frac{\text{la taille de l'ensemble des données} \times \text{résolution}}{2} + 1 \\
 &= \frac{\text{nombre des pixels équilibrées}}{2} + 1
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Le tracé de la MTF qui en résulte est illustré à la figure 4.11.

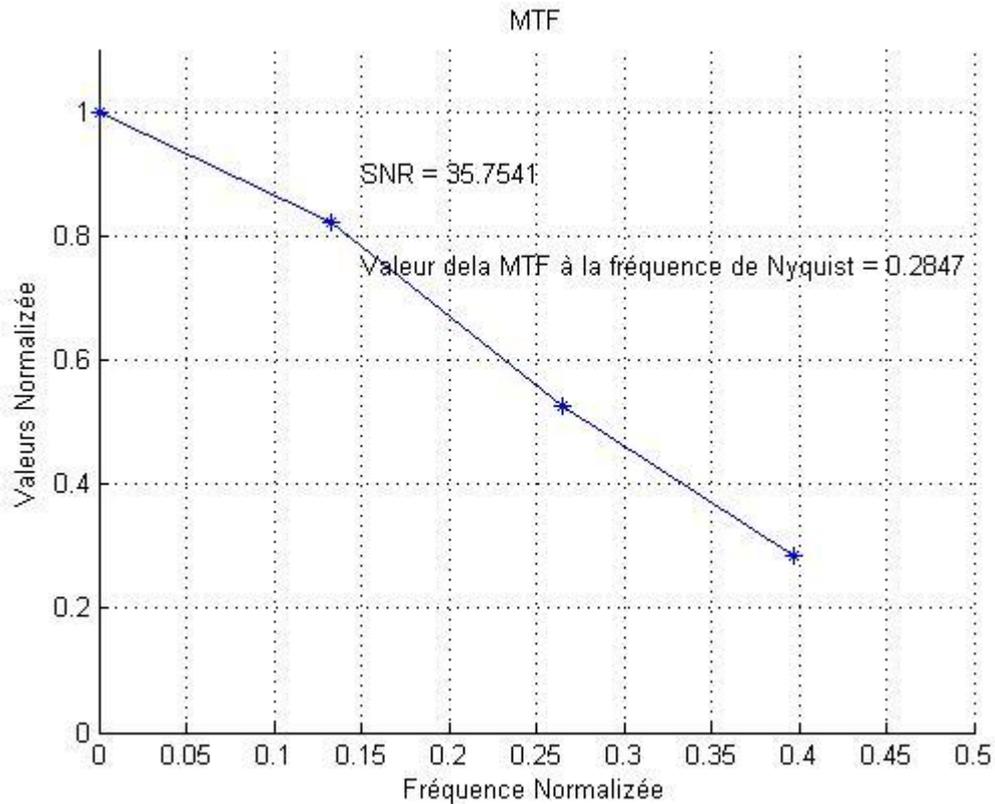


Figure 4.11. Exemple de la MTF

La courbe de la figure 4.11 est le résultat obtenu pour le contour de la figure 4.8. La valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist  $f_N$  vaut 0.28.

La valeur de la FTM à  $f_N$  vaut 0.2847 et à la moitié de  $f_N$  vaut 0.14. Le suréchantillonnage par un coefficient 2 permet d'observer les fréquences au-delà des limites imposées par Shannon et la FTM se rapproche de la valeur 0 à  $f_c$ .

Le repliement spectral est en partie éliminé par notre approche.

Pour la validation, nous nous sommes appuyés sur les spécifications des images SPOT5 utilisées ; les recherches bibliographiques montrent que la MTF des modalités Panchromatiques des images des satellites SPOT5 est égale ou supérieur à 0,25. Ces recherches ont déterminé la FTM des capteurs SPOT5 à partir de cibles placées dans des champs dans le but de les comparer aux spécifications initiales. Nous avons procédé de la manière suivante : Quatre contours ont été sélectionnés dans la modalité panchromatique. Chaque contour donne une valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist et nous comparons la moyenne de ces valeurs et leur dispersion.

#### **4.3.5 SPOT5 Panchromatique**

La spécification pour la modalité Pan des capteurs SPOT5 comme dit précédemment est égale ou supérieur à 0.25, ce qui correspond à la valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist.

Nous avons sélectionné quatre contours de la même image de Barcelone de modalité pan de la figure 4.12. La résolution spatiale de 2,5m permet de sélectionner des bâtiments. La qualité des transitions est bonne en ce qui concerne la différence en amplitude et le bruit est limité. Par contre, la longueur des transitions est assez faible puisque peu de bâtiments ont une taille qui excède une trentaine de mètres.



*Figure 4.12 : Image SPOT5 de modalité pan de Barcelone.*

Les résultats de nos différentes estimations sont présentés dans le tableau 4.2 comme suit : les quatre contours traités sont indicés de 1 à 4. Pour chacun, nous indiquons la longueur du contour en nombre de pixels, la taille de la transition en termes de différence de niveaux de gris, la norme L2 qui indique la performance de la minimisation entre le profil suréchantillonné moyenné et la sigmoïde ensuite on indique la valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist. Enfin, on reporte la valeur moyenne de la FTM.

<i>Indice du contour</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<i>Longueur du contour (en nombre de pixels)</i>	221	221	221	221
<i>Différence de radiométrie</i>	198.1760	102.3193	128.7251	194.9137
<i>Norme L2</i>	2.8341	1.3218	1.4308	2.9242
<i>Valeur de la MTF à la fréquence de nyquist</i>	0.2847	0.2942	0.2542	0.2665
<i>Valeur moyenne et intervalle</i>	0.2749			

*Tableau 4.2 : résultats de la routine d'estimation de la FTM pour la modalité Pan du satellite SPOT5.*

La valeur de la FTM moyenne estimée sur les quatre contours est de 0.27. On peut remarquer que quand la norme L2 diminue on se rapproche de la valeur de la MTF 0.25 ; c'est le cas du troisième contour. Comme on peut aussi constater que quand on a une différence de radiométrie importante on se rapproche aussi de la valeur de la MTF 0.25 ; on peut en conclure que si on a un contour avec une norme L2 minimale est une différence de radiométrie important qui englobe toute la dynamique de l'image ; on aboutit à de très bons résultats de la MTF.

Les graphes des autres contours sont en annexe A.

## 4.4 Comparaison des résultats avec le logiciel phETA

Pour mieux valoriser nos résultats ; nous les avons confrontés et comparés avec les résultats obtenus grâce au logiciel phETA ce qui fait l'objet de la partie suivante de ce chapitre.

Le logiciel phETA est un outil interactif qui permet aux utilisateurs de visualiser et de comprendre les résultats obtenus d'une analyse de la qualité d'une image numérique grâce aux transitions des contours de façon claire et simple.

L'objectif principal de PhETA est de fournir des visualisations compréhensibles riches et faciles de la qualité d'une image.

On s'intéresse dans ce logiciel à étudier la fonction de transfert de modulation MTF ; il suffit seulement de glisser une flèche dans l'image d'une façon perpendiculaire sur le contour ; on prend l'exemple du troisième contour précédemment utilisé par notre approche dans ce qui suit.

La figure 4.13 représente l'image utilisée dans le logiciel phETA dans laquelle se trouve le contour de la figure 4.14 utilisé par notre approche.



Figure 4.13 : Image du contour utilisée par le Logiciel phETA

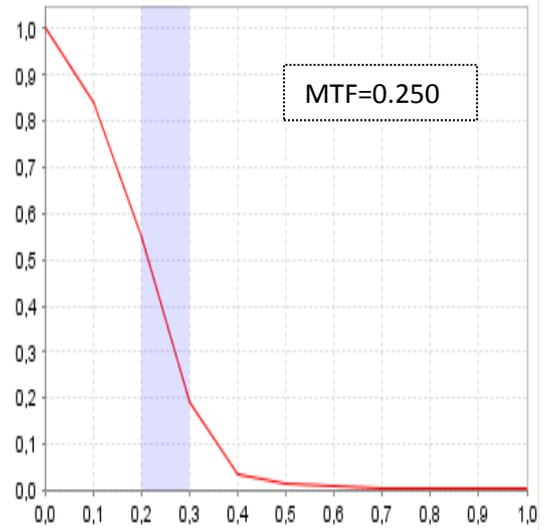


Figure 4.15 : La MTF obtenue grâce au Logiciel phETA.



Figure 4.14 : Contour extrait de l'image de la figure 4.13 utilisé par notre méthode.

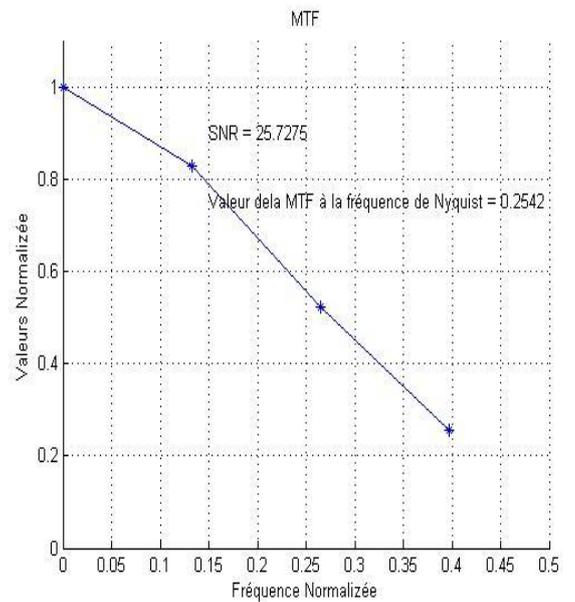


Figure 4.16 : La MTF obtenue grâce à notre méthode.

Il est très clair des figures 4.15 et 4.16 que notre approche donne le même résultat de la MTF que celle obtenue avec le Logiciel phETA avec une différence inférieure à 1%, on peut même constater que l'allure générale ou profil du graphe de la MTF de notre méthode est assez semblable à celui obtenu grâce au logiciel phETA.

Les résultats des autres contours sont en annexe A.

## 4.5 Analyse des erreurs

### 4.5.1 Définition Rapport signal / bruit (SNR)

Avant de discuter du système et des simulations de bruit au sol, le rapport signal/bruit SNR doit être défini pour les impulsions et les cibles contours. Souvent, le SNR est défini comme la relation de la valeur moyenne d'un signal d'entrée à son écart-type. Pour cette analyse, une formulation légèrement différente est proposée qui est conforme à la définition. Les définitions du SNR pour les méthodes bord de plage et d'impulsion sont présentées dans la figure 4.17. Pour une cible contour, le signal a été défini comme la différence entre les valeurs DN moyenne de chaque région, de chaque côté du bord. L'écart-type a été calculé comme la moyenne des écarts-types des deux régions. Pour les cibles d'impulsion, le signal a été défini comme la différence entre le pic et la valeur moyenne (du fond) de la base de DN. L'écart-type a été défini comme l'écart type du fond à l'exclusion du signal impulsionnel [7].

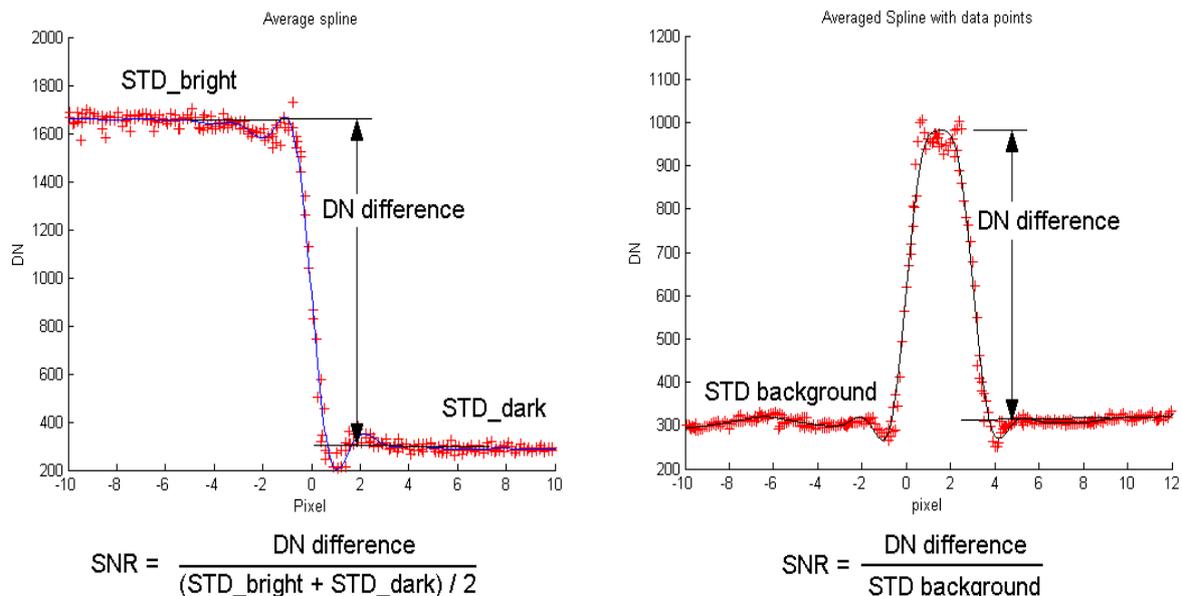


Figure 4. 17 : Définitions du SNR pour les profils contour (bord) et impulsion

### 4.5.2 Principe de génération de bruit

L'effet global de bruit de fond pourrait être représenté par une multi-échelle et une fonction continue dans le domaine spatial. Pour modéliser ce domaine du bruit, un bruit blanc gaussien des images a été envisagé.

Cette méthode consiste à additionner Vingt niveaux de résolutions d'image de bruit, de 1 à 20 carrés de taille sous-pixel, avec un choix au hasard de direction de compensation ou de décalage «x» et «y». Ce décalage permet l'échelonnement aléatoire des grilles de sous-pixels pour chaque niveau de résolution.

La Figure 4.18 montre des images de bruit sélectionné et la multi-échelle finale de l'image du bruit du sol. D'après le théorème de la limite centrale, l'addition de vingt champs gaussiens aléatoires crée un autre champ aléatoire gaussien. La variance du bruit global est alors donnée par une somme linéaire des écarts individuels.

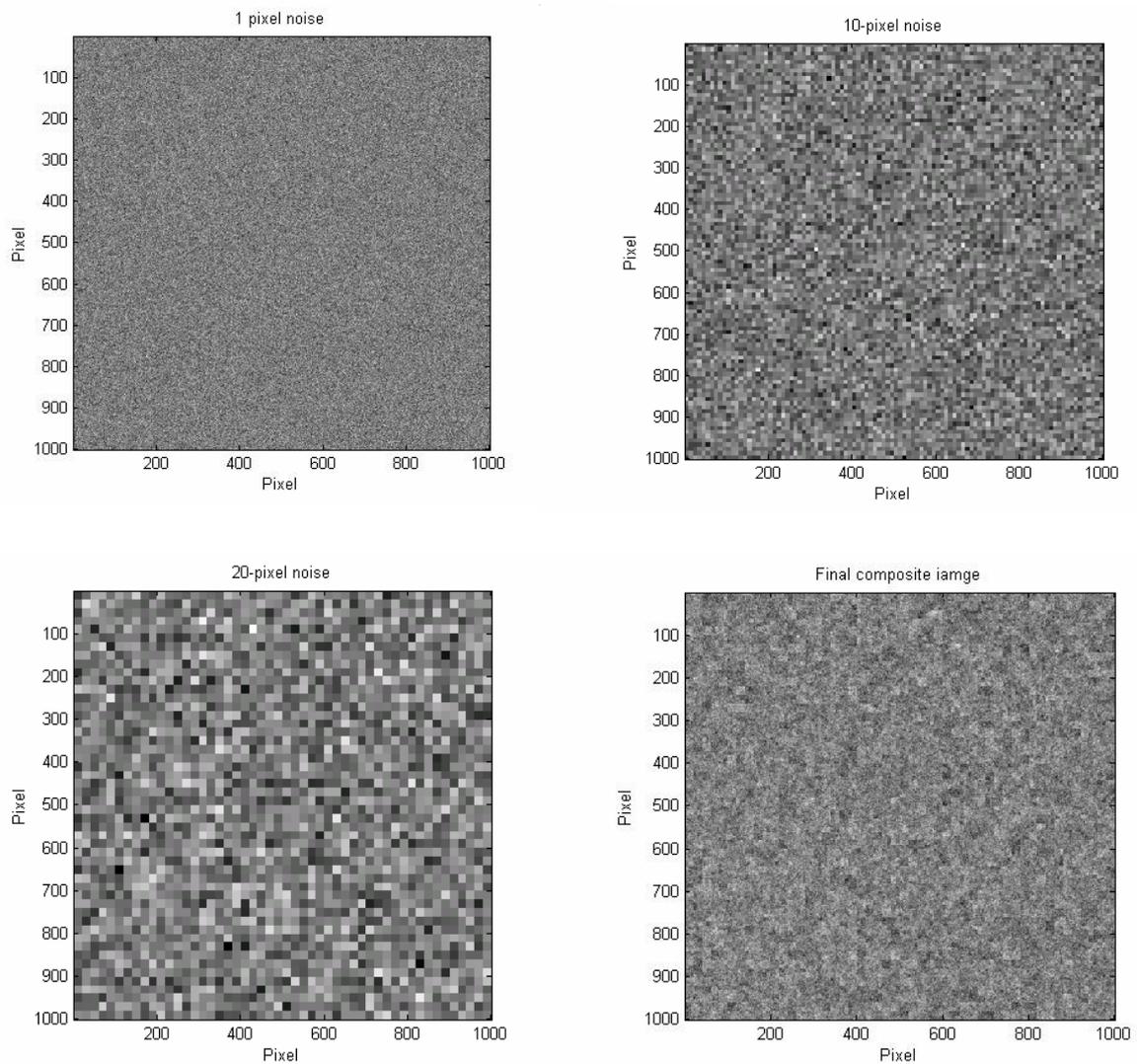


Figure 4.18 : Exemple sur l'image du bruit au sol.

Dans cet exemple, 1 pixel est égal à 5 cm, alors l'image du bruit 20-pixel a un grain de bruit de 1 mètre. L'image Finale composée est affiché en bas à droite.

### 4.5.3 Principe de simulation du bruit au sol

Les contours d'images sans bruit ont été déterminés avec une variété de hauteurs de transition, comme indiqué dans le tableau 4.3, afin de simuler différentes amplitudes du signal. L'image terrain multi-niveau de bruit est ajoutée aux images de synthèse avec contour sans bruit et les images bruyantes du contour qui en résultent ont été convoluées avec le système PSF à deux dimensions. La sortie a été rééchantillonnée à un 1 m GSD, et ensuite traitées avec l'estimateur contour à base de la MTF.

Cette méthode est illustrée dans la figure 4.19.

Clair	1100	1000	950	900	850	825	800	790	780	775	770
Sombre	400	500	550	600	650	675	700	710	720	725	730
Différence	700	500	400	300	200	150	100	80	60	50	40

Tableau 4.3 : Les niveaux de transition du contour pour la simulation de bruit du sol

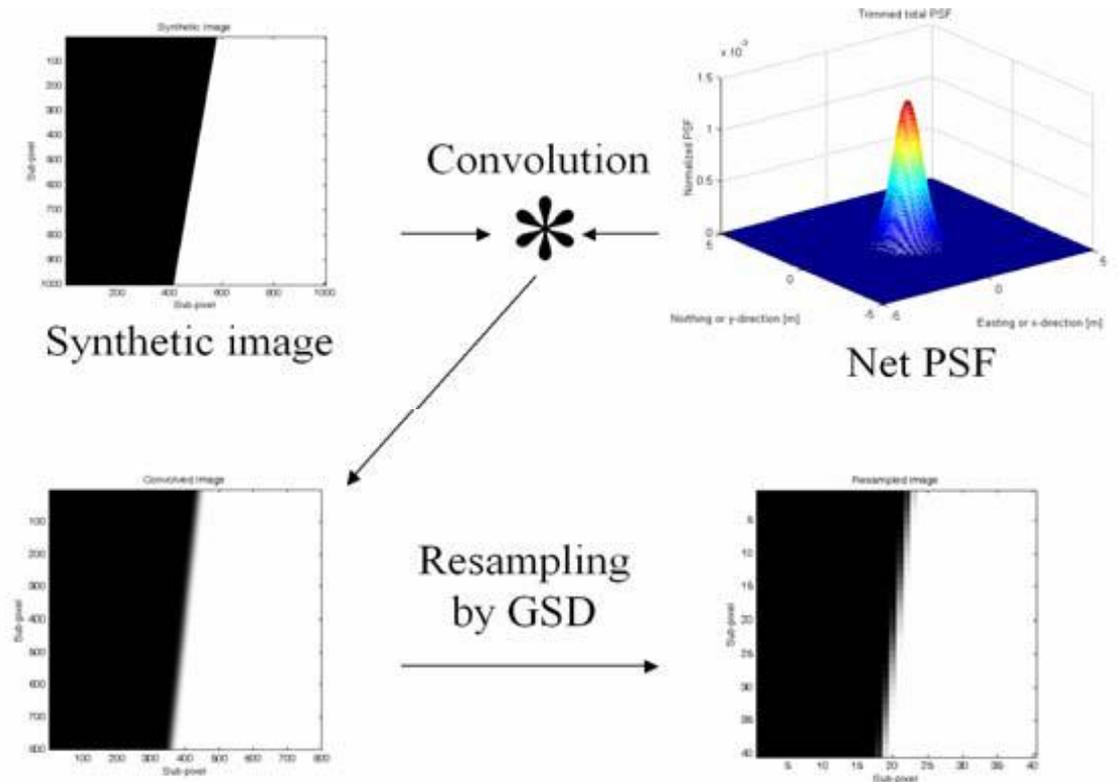


Figure 4.19 : Principe de simulation du bruit au sol

Un exemple sur la simulation du bruit au sol est présenté dans la figure 4.20. Les astérisques représentent les estimations de la MTF à la fréquence de Nyquist qui est tracées en fonction du SNR estimé des vingt simulations indépendantes utilisant chacun des onze images prédéterminées du contour bruyant.

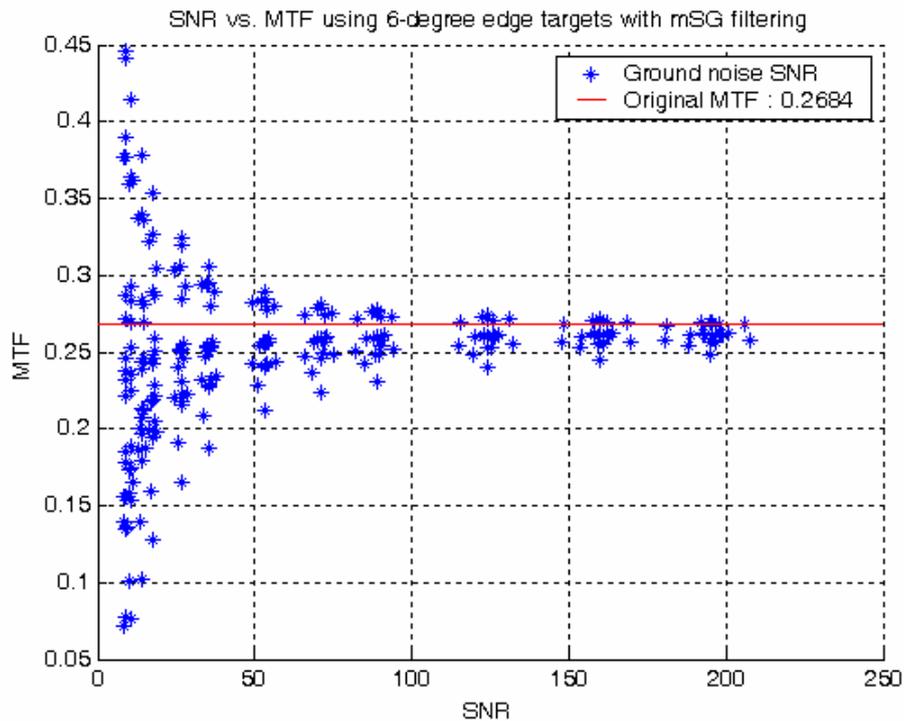


Figure 4.20 : Tracé du SNR et les valeurs de la MTF à la fréquence de Nyquist de la simulation du bruit au sol du contour cible.

Pour des valeurs du SNR supérieures à 100, la valeur moyenne de la MTF a été proche de l'estimation théorique de la MTF, mais preuve d'un préjugé biais statique ; encore une fois, les estimations de la MTF ont commencé à varier sensiblement pour des valeurs du SNR inférieures à 100, avec une plus grande variation se produisant pour des valeurs très inférieures du SNR. Ces résultats suggèrent également que l'estimation fiable de la MTF peut être atteinte pour les valeurs du SNR de 100 ou plus [8].

#### 4.5.4 Simulation de bruit du système

Dans la pratique, le bruit est généralement présent dans les images, et peut être important. Le modèle du bruit à simuler à deux sources. Une source est considérée comme du bruit de «terrain» provenant de la cible, causée par les caractéristiques de la cible qui produit une non-uniformité dans le signal d'entrée sol. L'autre source peut être considérée comme produite par le système du capteur dans son ensemble et est défini comme bruit du « capteur ». Les composants de ce bruit peuvent inclure des choses telles que le bruit thermique de l'électronique ou des Photons thermiques et Rayons cosmiques ; bruit de Non stationnarité (sensibilité des pixels) ; bruit de Non linéarité (effet photoélectrique). Le niveau de bruit du système a été modélisé comme une simple fonction à bruit blanc gaussien avec deux fonction Matlab ; `imnoise.m` ou `randn.m`.

Pour modéliser l'effet du bruit sur l'estimation du système de la MTF, une composante de bruit blanc gaussien a été ajoutée aux images test sur lesquelles on travaille. Les contours cibles utilisés ont un angle près de 6 degrés à la verticale avec une transition de niveau de luminosité approximative du numéro 150 (DN) à 0. Seul l'écart-type du bruit a été modifiée pour obtenir des niveaux différents du SNR en conjonction avec un signal constant. L'écart-type a varié de 2 à 100 (DN) par incréments de 1 (DN), qui a abouti à quatre-vingt-dix-neuf cibles bruyantes.

La fréquence de Nyquist MTF résultant des estimations pour les différentes valeurs du SNR obtenues à partir de chaque cible bruyante sont tracées dans la figure 4.21 avec la fonction `randn.m` et dans la figure 4.22 avec la fonction `imnoise.m` à titre d'exemple, où la vraie valeur de la MTF à la fréquence de Nyquist est indiquée par un trait plein droit rouge. Les autres résultats sont représentés à l'appendix B.

Un point du système de bruit du SNR de la figure représente une méthode complète d'estimation de la MTF du contour. Parce qu'il y avait quatre-vingt-dix-neuf niveaux de bruit du système (ou points de données), exactement le même nombre d'estimation de la MTF du contour ont été réalisées pour produire les figures 4.21 et 4.22. Il est évident que la quantité de bruit du système a des effets significatifs sur la stabilité des estimations MTF.

Dans une situation sans bruit, la méthode de bord de plage estimait une valeur de 0.2542 de la MTF à la fréquence de Nyquist ce qui est très proche de la vraie valeur de la MTF obtenues à des valeurs de SNR grande. Comme le SNR a diminué, les estimations de la MTF ont commencé à varier dans les limites apparentes exponentielles, avec de grandes variations au niveau SNR plus bas.

Pour une estimation raisonnable de la MTF, le SNR d'un contour d'une image devrait être grand.

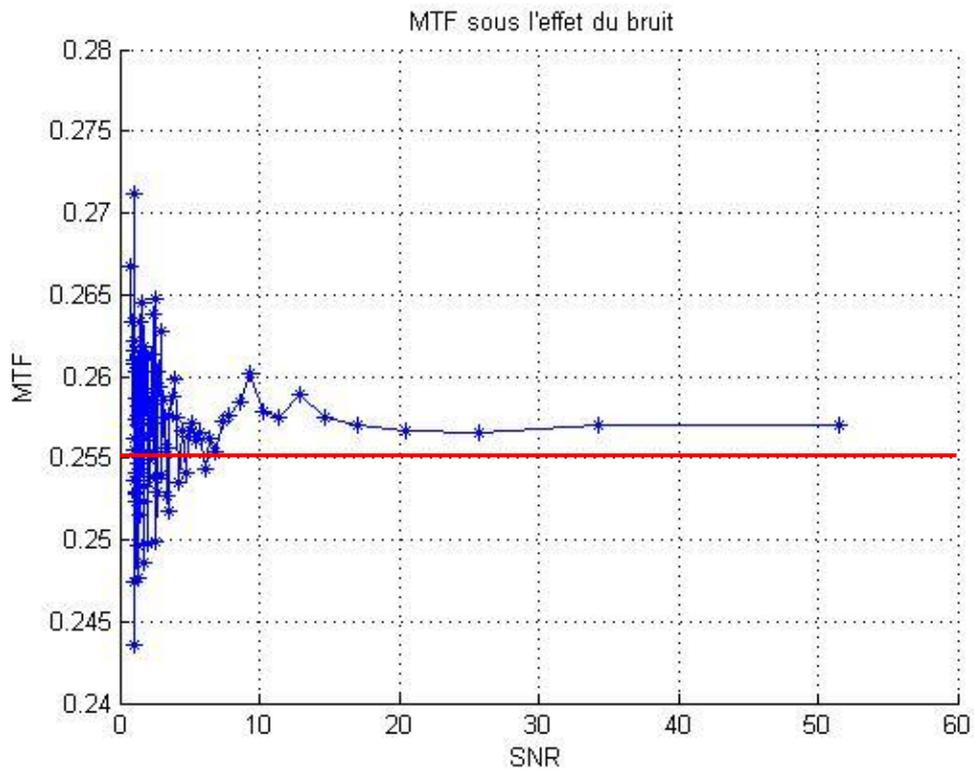


Figure 4.21 : Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction randn.m

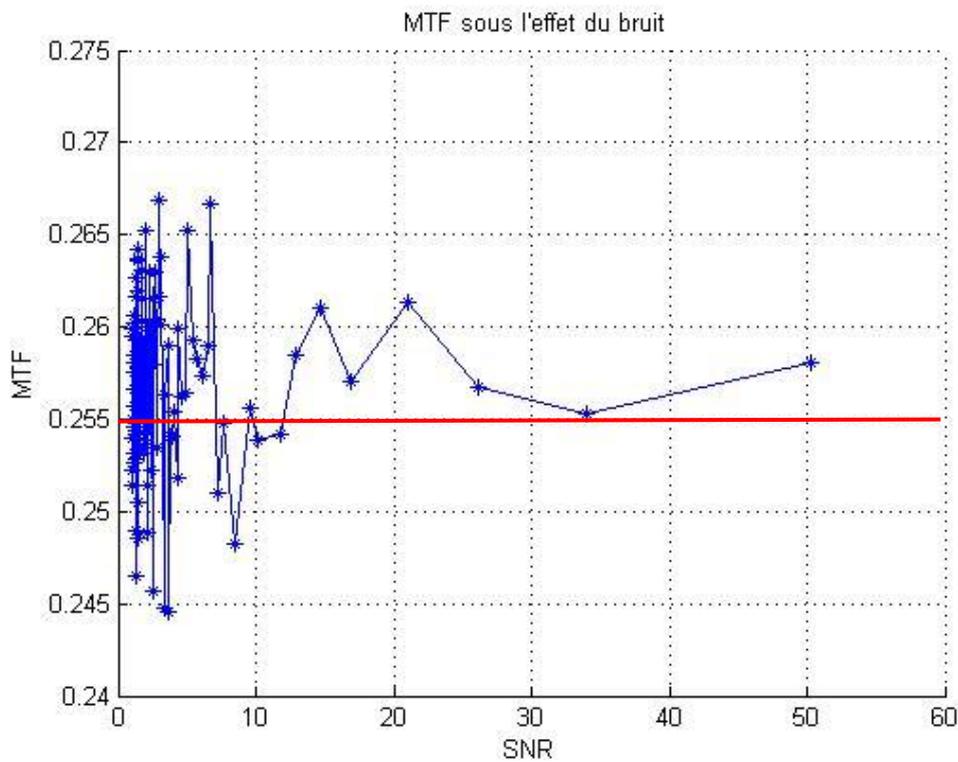


Figure 4.22 : Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction imnoise.m

Notre méthode de simulation de bruit directement sur les images test sans avoir besoin de généré du bruit au sol et le simuler donne de bonnes résultats de l'estimation de la MTF à la fréquence de Nyquist avec une légère différence de l'ordre 0.01 (inferieur de 5% dans la majorité des cas) par rapport à la MTF à la fréquence de Nyquist trouvée par la méthode bord de plage.

En remarque aussi que la méthode de simulation avec l'ajout de bruit blanc gaussien par la fonction `randn.m` est encore plus efficace que celle de l'ajout de bruit blanc gaussien par la fonction `imnoise.m`.

## 4.6 Conclusion sur la méthode d'estimation et perspectives d'amélioration

Le but était d'éviter le recours à l'utilisation de cibles artificielles. Bien que l'utilisateur devrait intervenir pour sélectionner un contour dans une image, il peut se satisfaire d'images qu'il a déjà à sa disposition. Cette méthode permet, à la condition qu'un contour d'intérêt soit identifié, de connaître la valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist de cette image en particulier, puisqu'il est possible que deux images d'un même satellite donnent des FTM différentes. En effet, nous avons eu l'occasion de manipuler deux images Pan du satellite SPOT5 qui ne donnaient pas la même FTM. Un autre avantage de la méthode présentée est sa simplicité d'implantation.

Notre méthode d'estimation de la courbe FTM se base sur l'hypothèse que le profil peut être ajusté par une fonction analytique qui est la sigmoïde. Cette supposition est importante car elle dicte la forme finale de la FTM.

La FTM finale doit être représentative de la chaîne d'acquisition comme nous l'avons expliquée précédemment.

On peut aussi reprocher l'initialisation manuelle de notre méthode. En effet, cette étape dépend de l'utilisateur, elle est donc entachée de subjectivité.

### **Conclusion générale:**

Ce travail a été une tentative pour caractériser les performances du système d'imagerie de satellites d'observation de la Terre en orbite par une estimation de sa réponse en fréquence spatiale avec une entrée sol. La méthode bord de plage donne de bons résultats. L'orientation de la cible est essentielle pour localiser les emplacements des sous-pixels des contours. Les méthodes d'entrée d'impulsions et de détection de contours pour la mesure de la MTF ont été étudiées en détails. Nous avons exploité et implémenter une méthode qui utilise les informations des pixels de l'image alignés sous forme de contours spécifiques. Les résultats que nous avons obtenus sont plus qu'encourageant. La valeur minimale sélectionnée de la MTF à la fréquence de Nyquist pour la bande panchromatique était de 0,25. Les tracés de la MTF ont indiqué beaucoup plus d'informations sur le capteur.

La méthode de l'estimation de la MTF d'un système d'imagerie d'un satellite est très importante, car on pourrait étudier la MTF d'un satellite dès sa mise en orbite et la prendre comme référence pour la comparer par la suite avec la MTF du même satellite après plusieurs mois ou années pour savoir comment notre capteur imageur se dégrade et travailler à compenser cette dégradation.

## **Perspectives :**

On se basant sur les résultats de la MTF encourageants obtenus à partir de la méthode de détection de contour, nous avons essayé de réimplémenter et d'étudier une méthode à partir des seules descriptions contenue dans la littérature.

L'approche choisie pour la cratérisation de la Qualité Image fait appel à l'intervention manuelle conséquente de l'utilisateur.

Dans un travail à venir nous proposons de travailler sur une seule image en réalisant un logiciel qui en détecte automatiquement les contours et en sélectionne le meilleur en prenant en compte quelque paramètres spécifiques comme l'angle du contour par rapport à la verticale et couvre une dynamique comparable en échelle à celle de l'image.

## Référence

- [1] M. Bergounioux, « Principes du traitement d'images; champs d'application, rappel d'optique, algorithmes et notions mathématique ». Janvier 2009.
- [2] Xavier DELAUNAY, « Compression d'images satellite par post-transformées dans le domaine ondelettes », Institut National Polytechnique de Toulouse, 12 novembre 2008.
- [3] André Jalobeanu, « Modèles, estimation bayésienne et algorithmes pour la déconvolution d'images satellitaires et aériennes », Université de Nice-Sophia Antipolis, 11 Déc. 2001.
- [4] Christine FERNANDEZ-MALOIGNE, « Introduction aux techniques de traitement et d'analyse d'images », Laboratoire IRCOM-SIC, UMR 6615 CNRS Université de Poitiers, UFR SCIENCES.
- [5] Philippe St-Onge, « Evaluation d'un modèle a priori basé sur un seuillage de la TCD en super-résolution et comparaison avec d'autres modèles a priori », Département d'informatique et de recherche opérationnelle Faculté des arts et des sciences, Université de Montréal, Septembre, 2008.
- [6] Taeyoung Choi, « IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method », South Dakota State University, 2002.
- [7] Claire THOMAS, « FUSION D'IMAGES DE RESOLUTIONS SPATIALES DIFFERENTES », Ecole des Mines de Paris, le 11 décembre 2006.

[8] Dennis Helder, Jason Choi , “Generic Sensor Modeling”, Image Processing Laboratory, Electrical Engineering Department, South Dakota State University, April, 2003 .

[9] D. Helder, T. Choi, M. Rangaswamy, “In-Flight Characterization of Image Spatial Quality using Point Spread Functions”, Image Processing Laboratory Electrical Engineering Department, South Dakota State University, December 3, 2003.

Appendis A : Résultats de simulation

IMAGE1

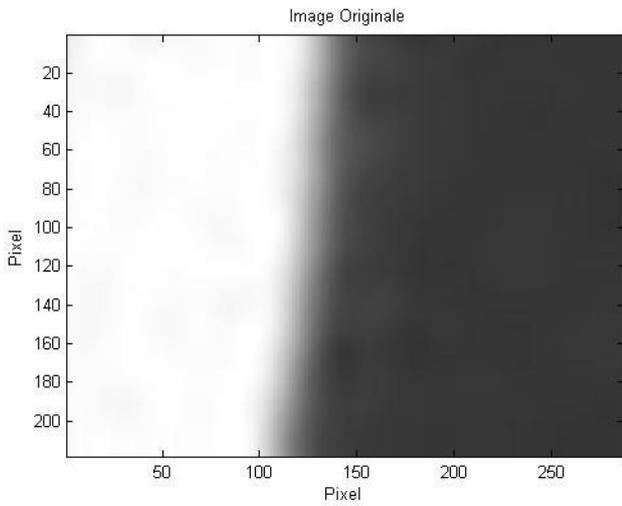
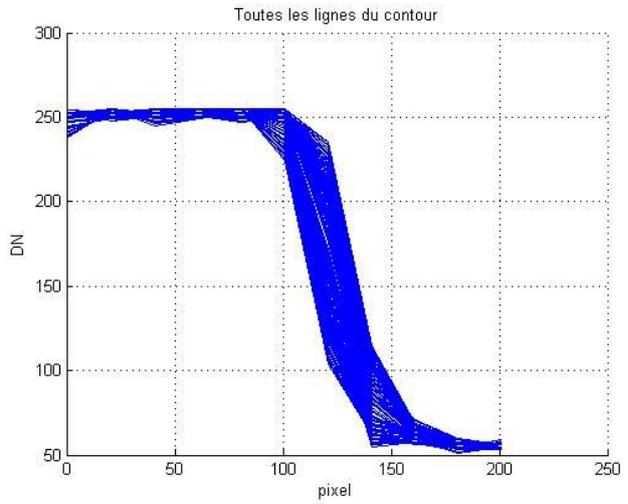
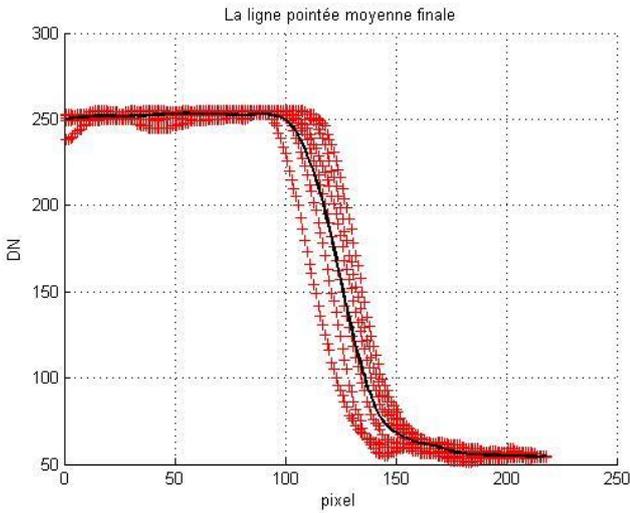


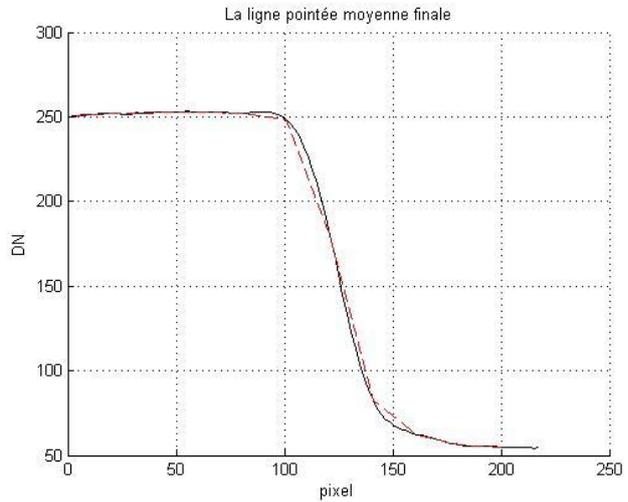
Image Originale



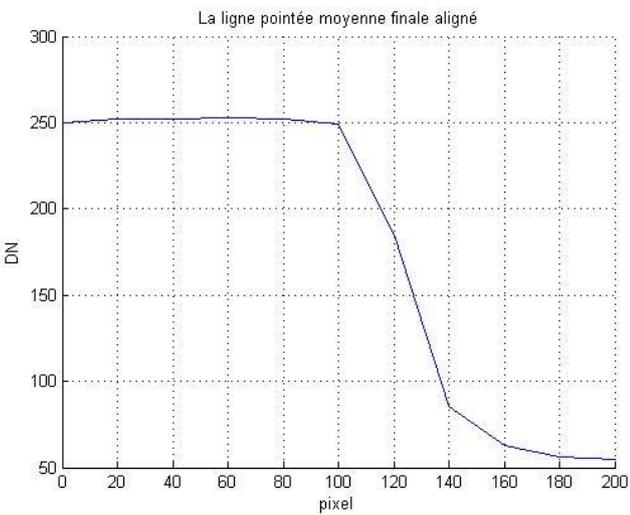
Toutes les lignes du contour



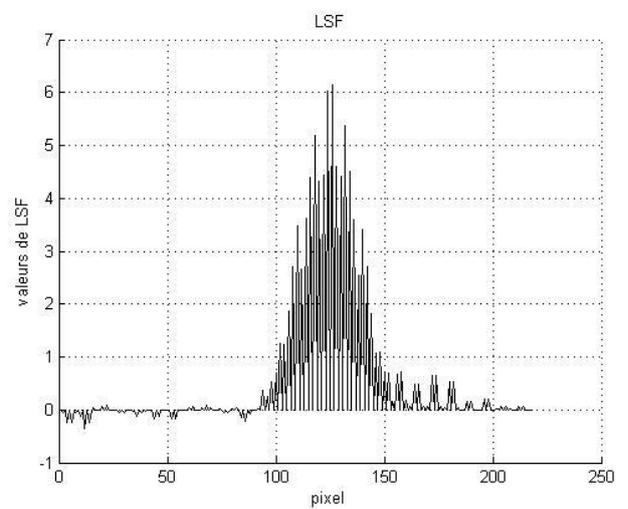
La ligne pointée moyenne finale



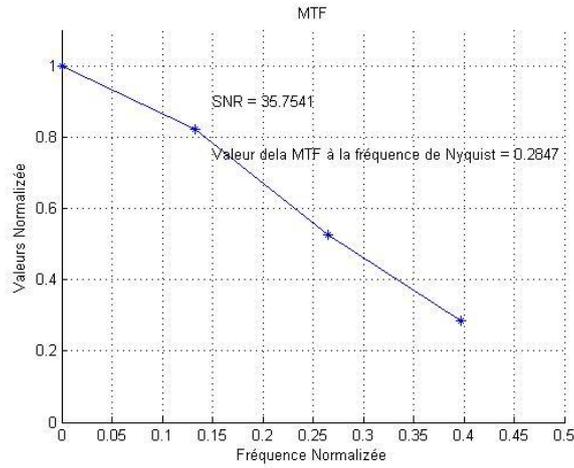
Alignement



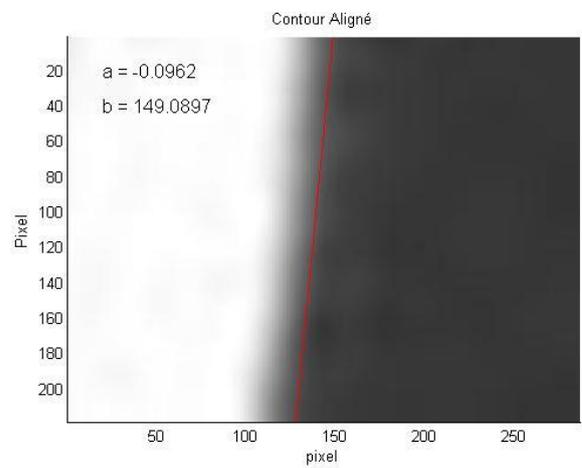
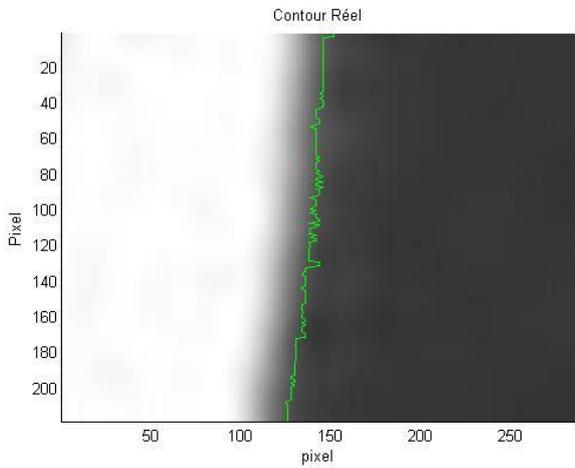
La ligne pointée moyenne finale alignée



LSF



MTF

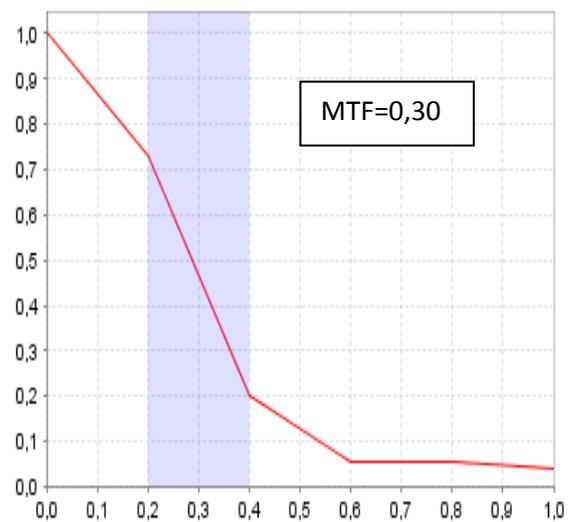


Contour Réel

Contour Aligné



Image du contour



MTF avec le Logiciel phETA

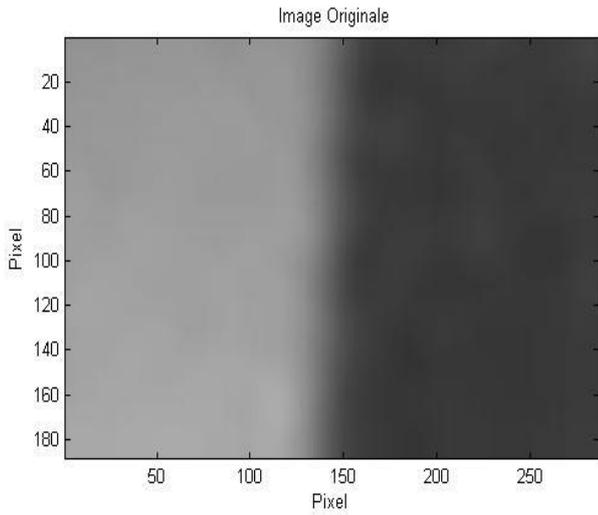


IMAGE2

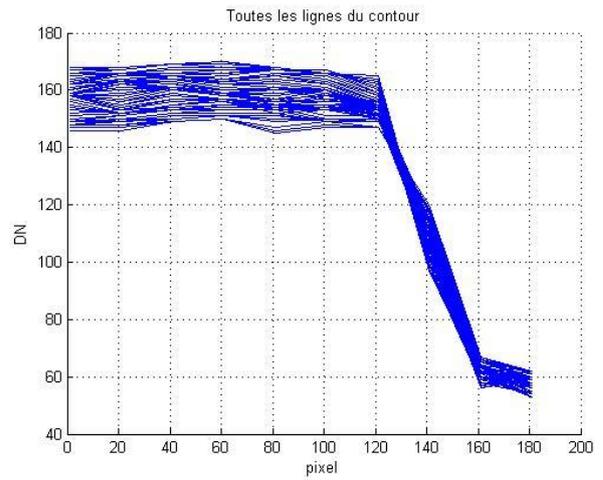
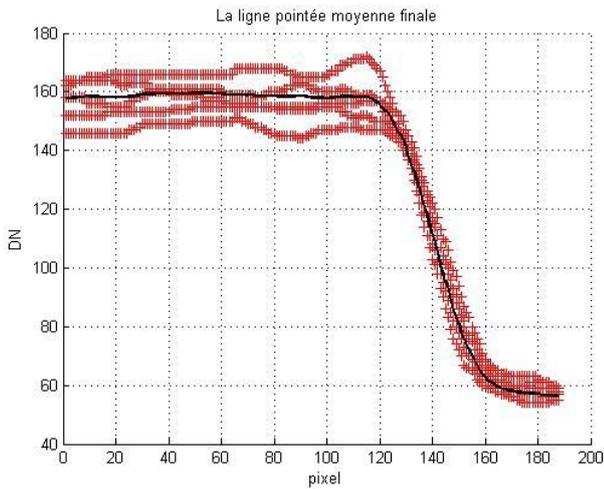
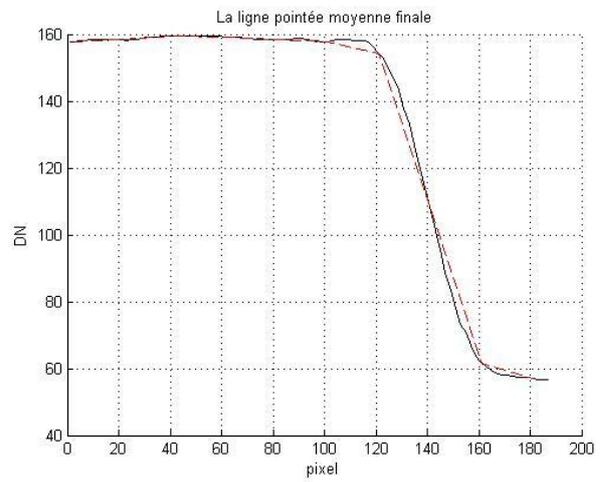


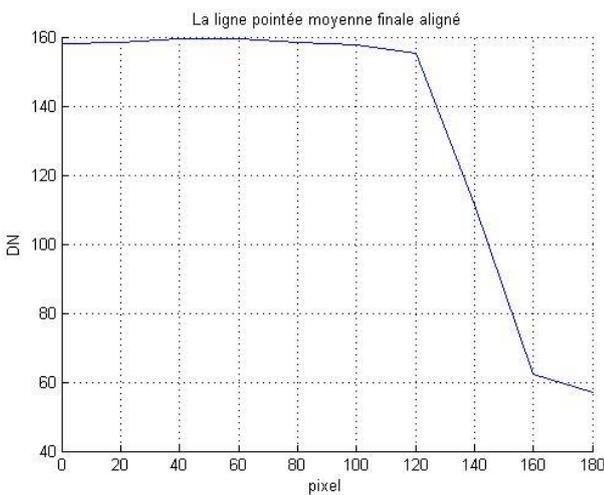
Image Originale



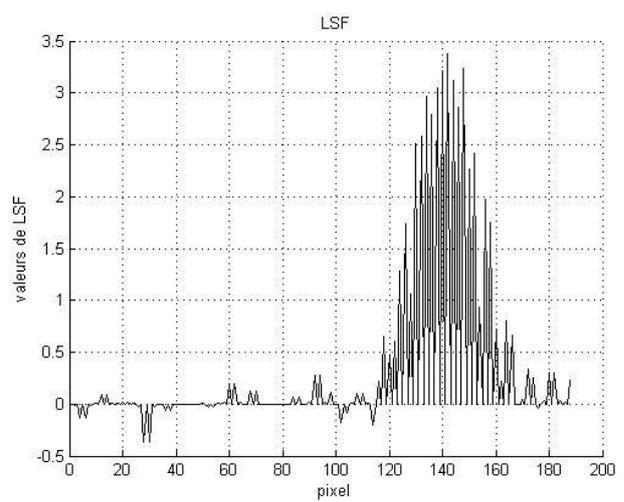
Toutes les lignes du contour



La ligne pointée moyenne finale

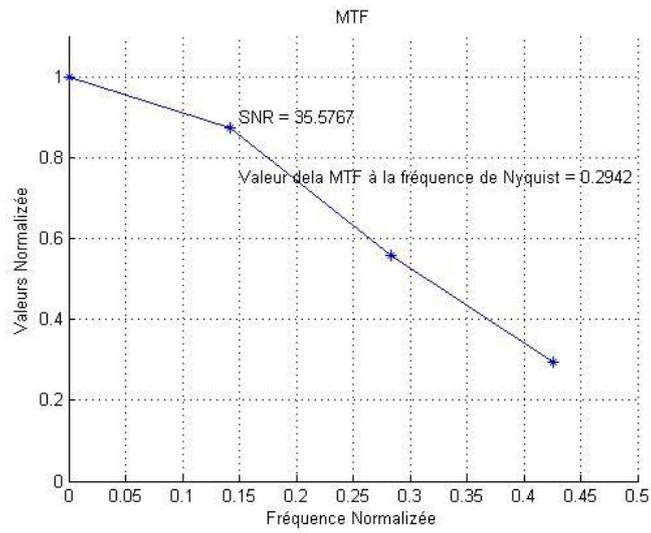


Alignement

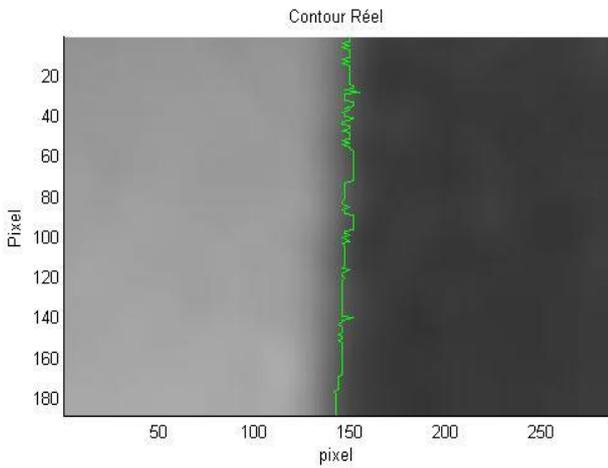


La ligne pointée moyenne finale alignée

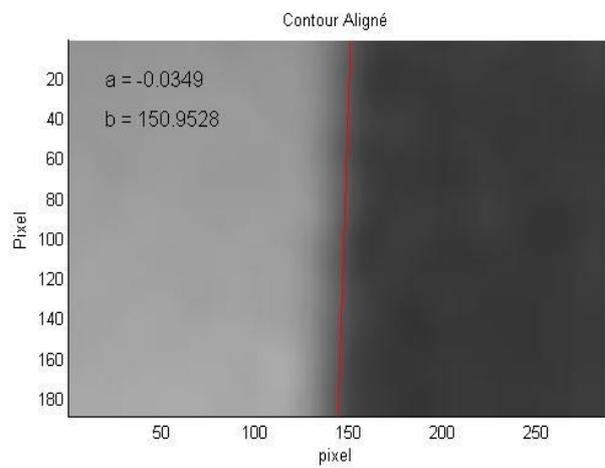
LSF



MTF



Contour Réel



Contour Aligné

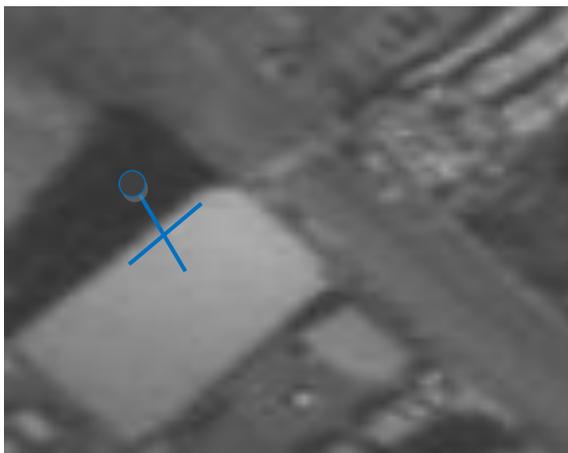


Image du contour

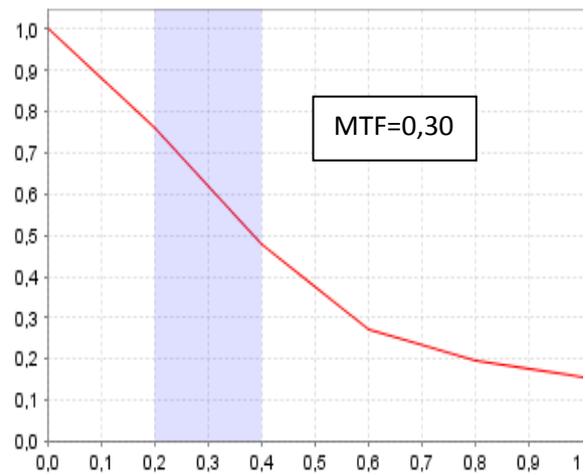


IMAGE3

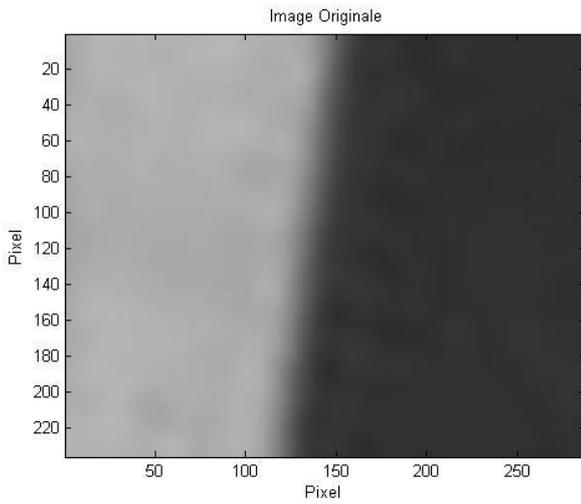
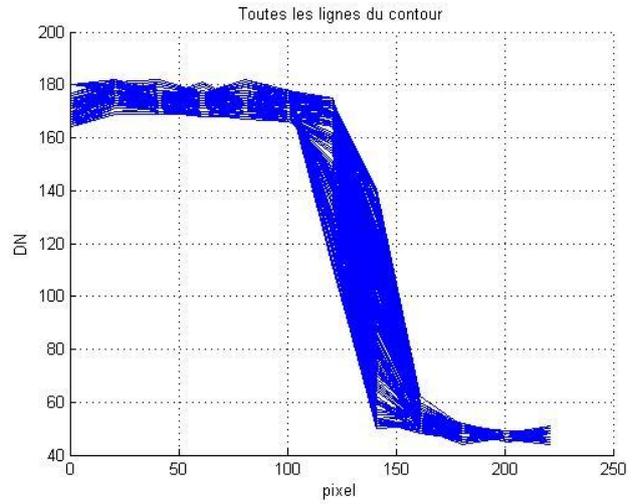
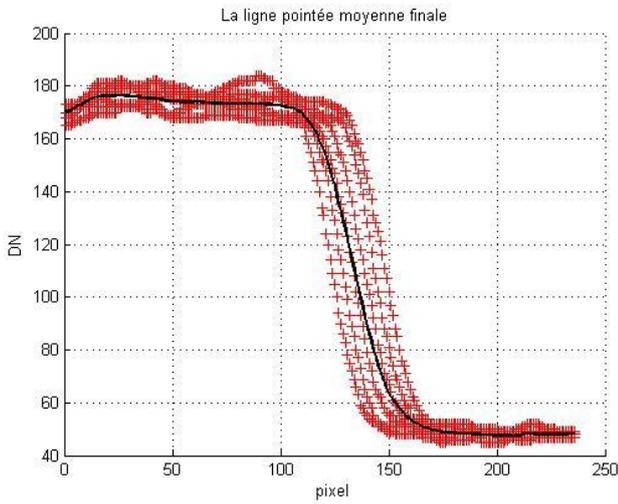


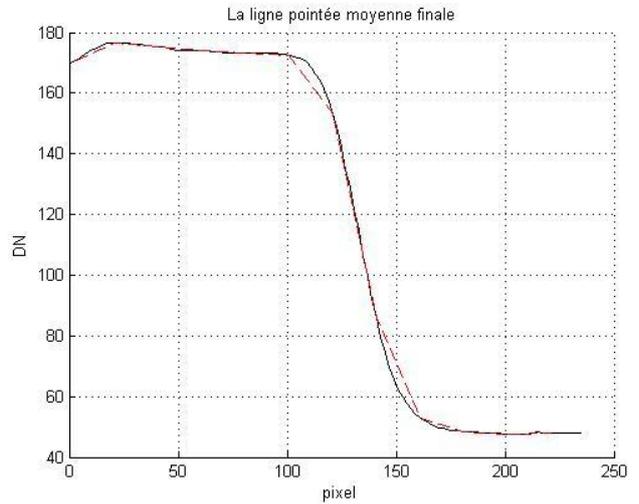
Image Originale



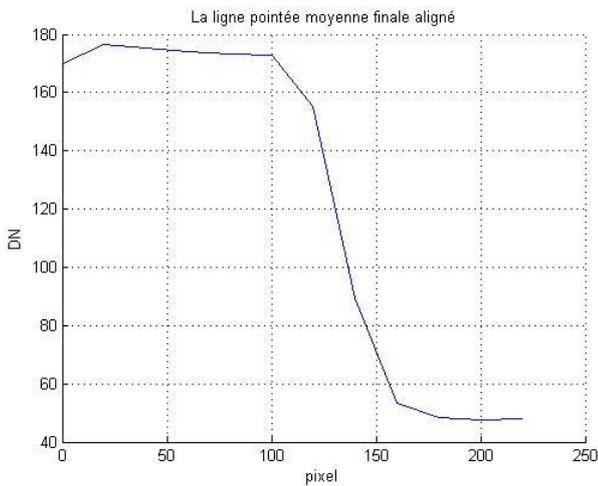
Toutes les lignes du contour



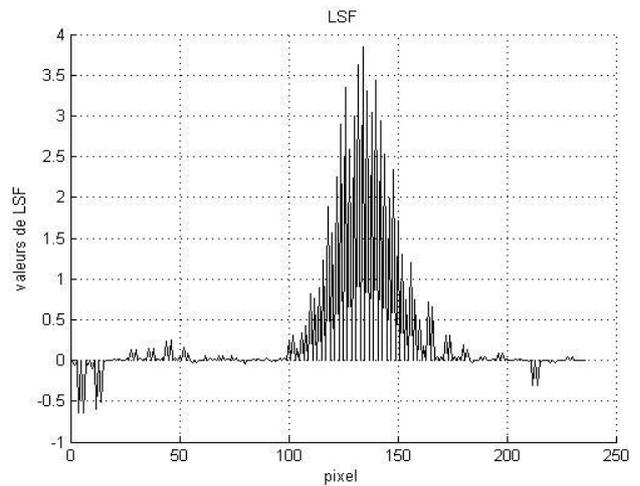
La ligne pointée moyenne finale



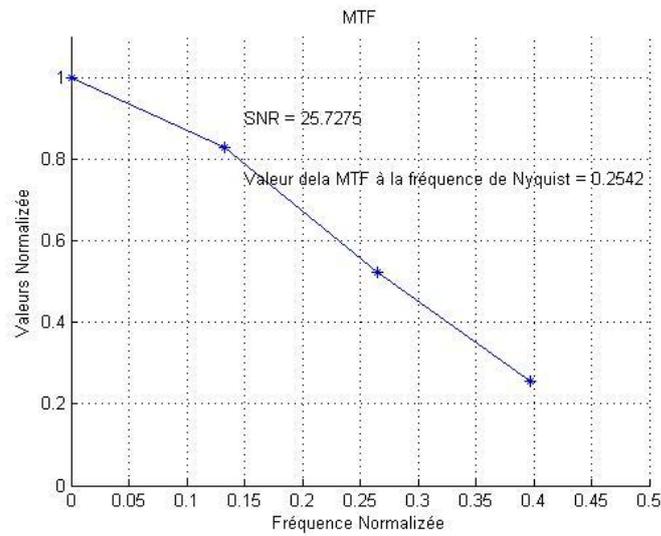
Alignement



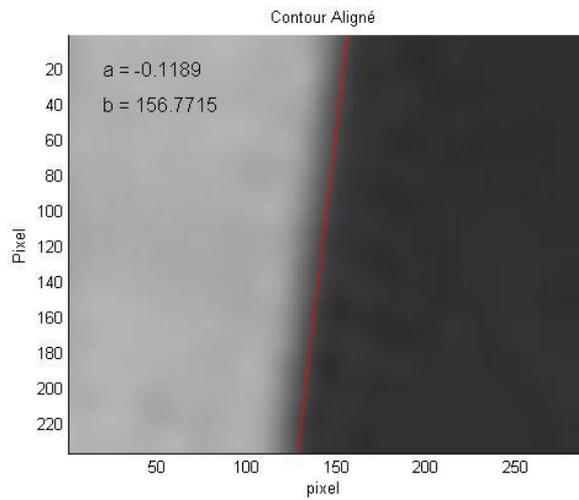
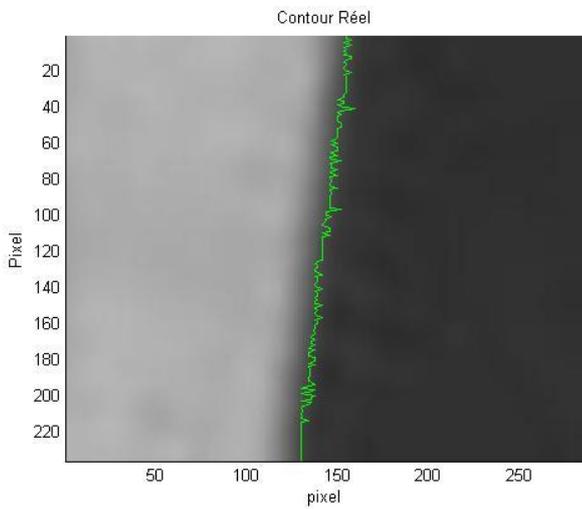
La ligne pointée moyenne finale alignée



LSF



MTF



Contour Réel

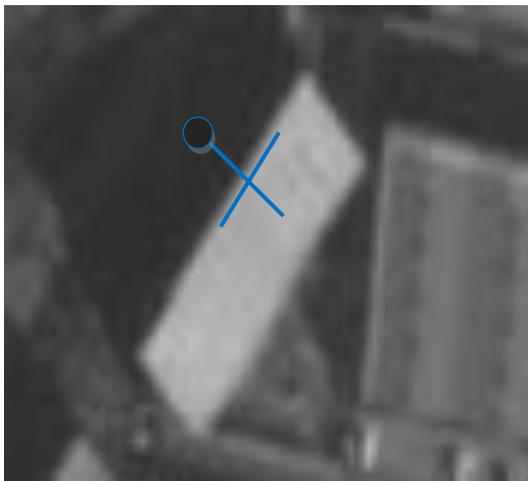
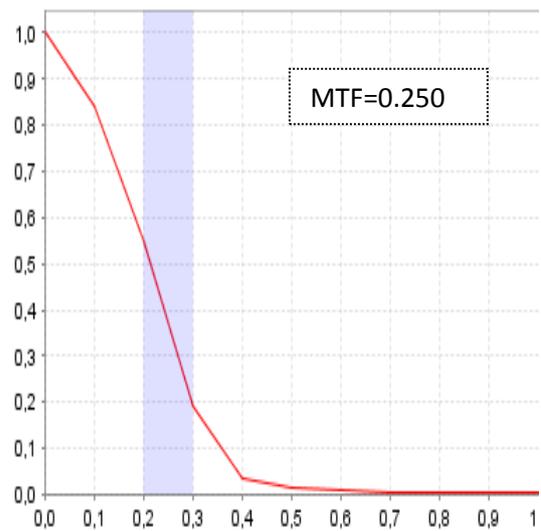


Image du contour

Contour Aligné



MTF avec le Logiciel phETA

IMAGE4

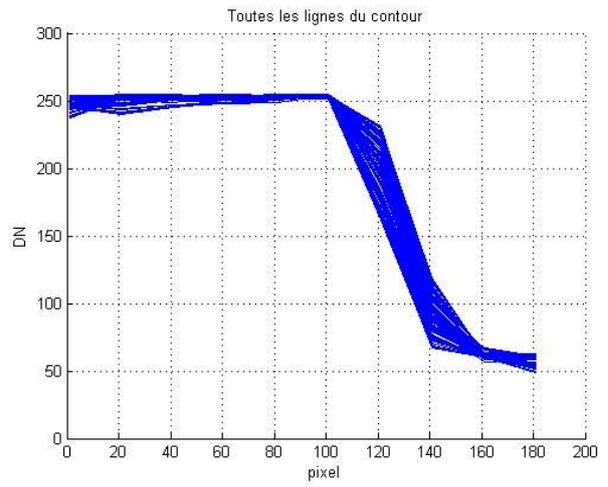
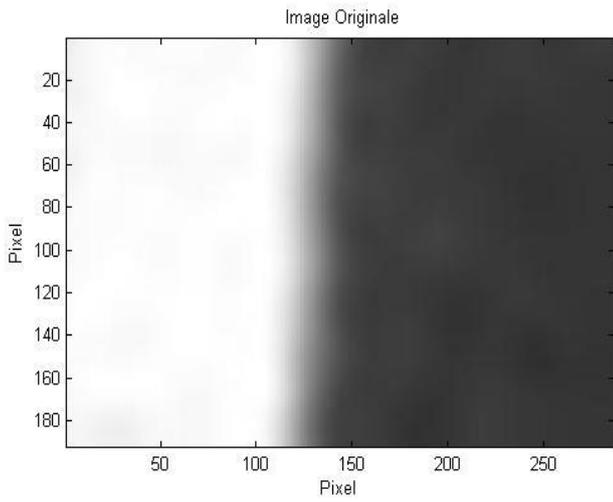
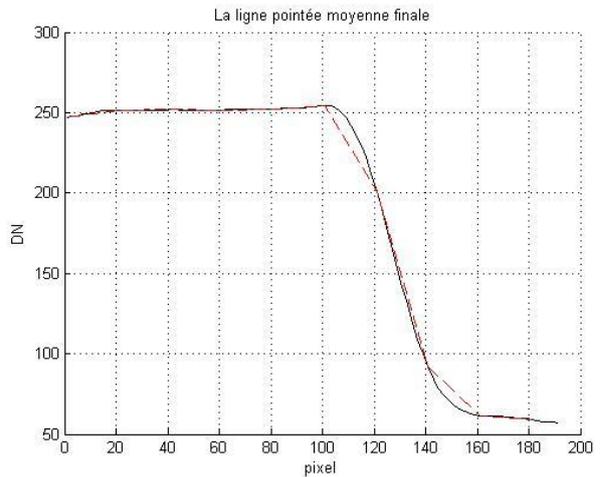
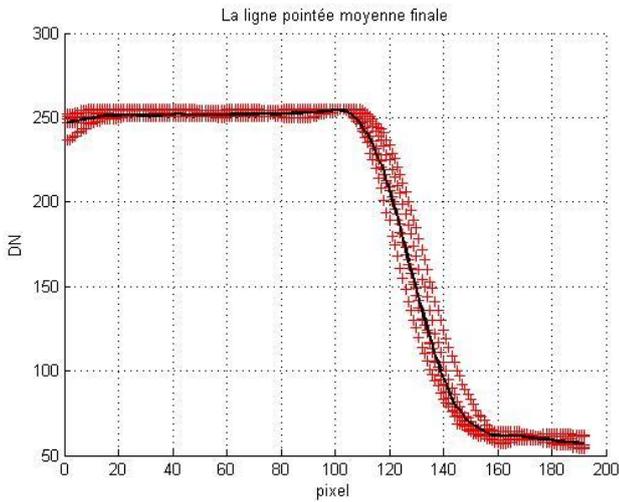


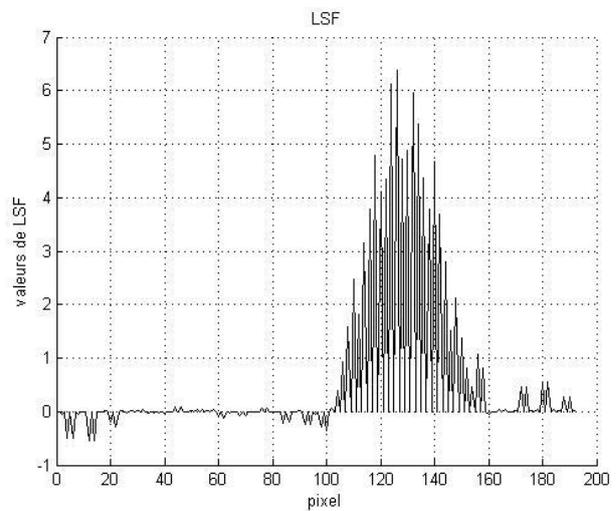
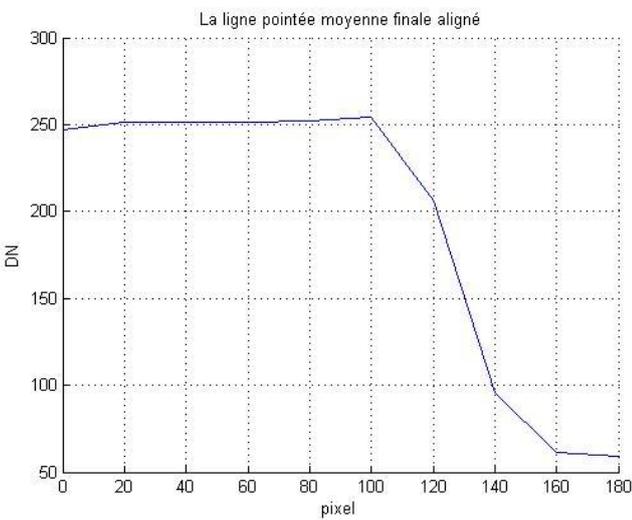
Image Originale

Toutes les lignes du contour



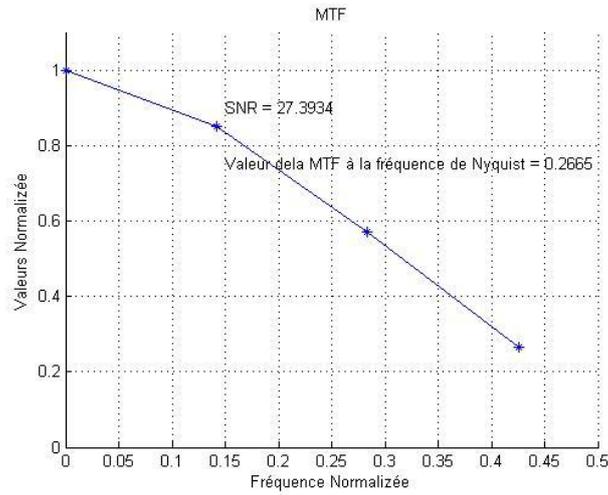
La ligne pointée moyenne finale

Alignement

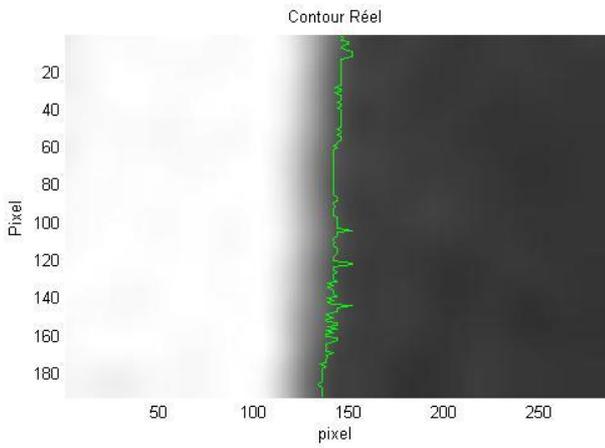


La ligne pointée moyenne finale alignée

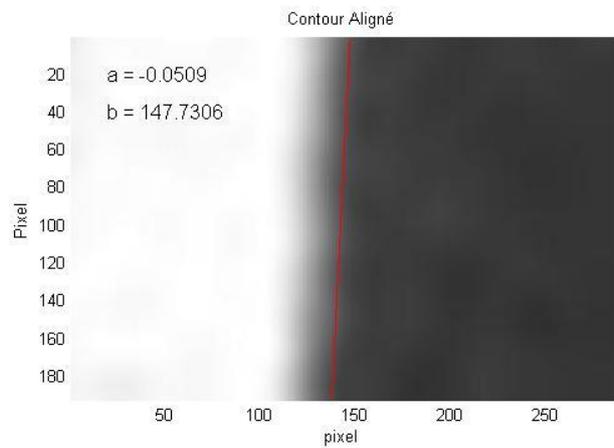
LSF



MTF



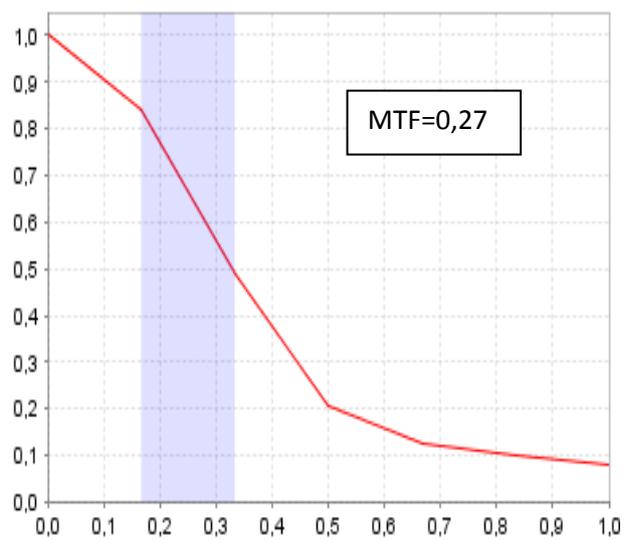
Contour Réel



Contour Aligné



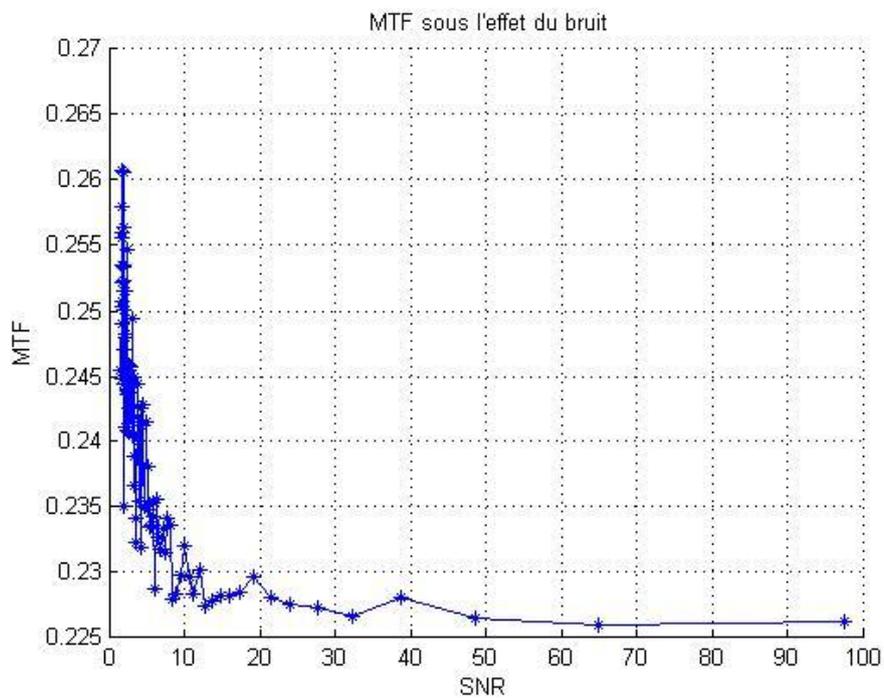
Image du contour



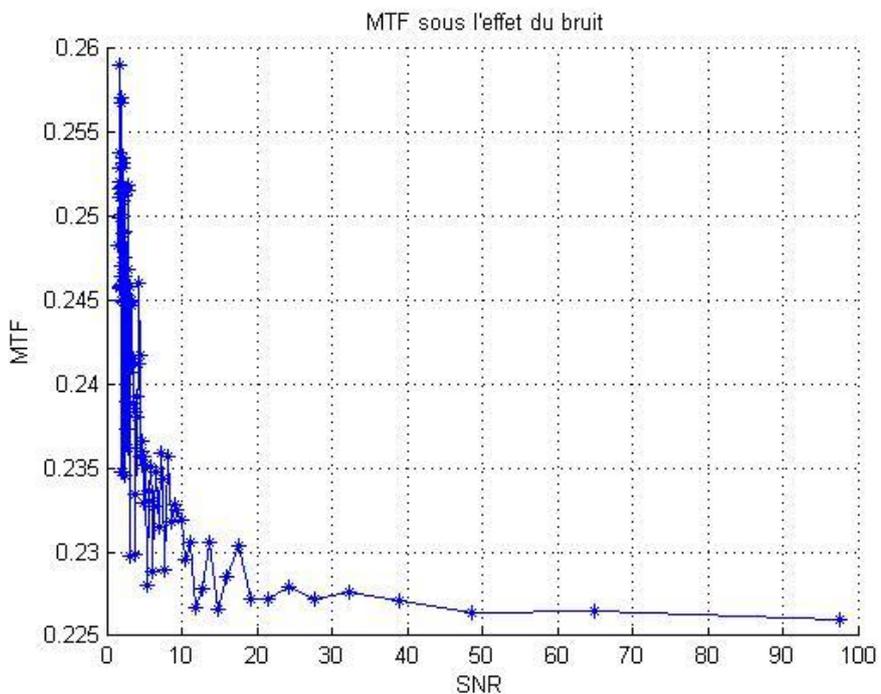
MTF avec le Logiciel phETA

## Appendis B : Simulation de bruit

Image 1

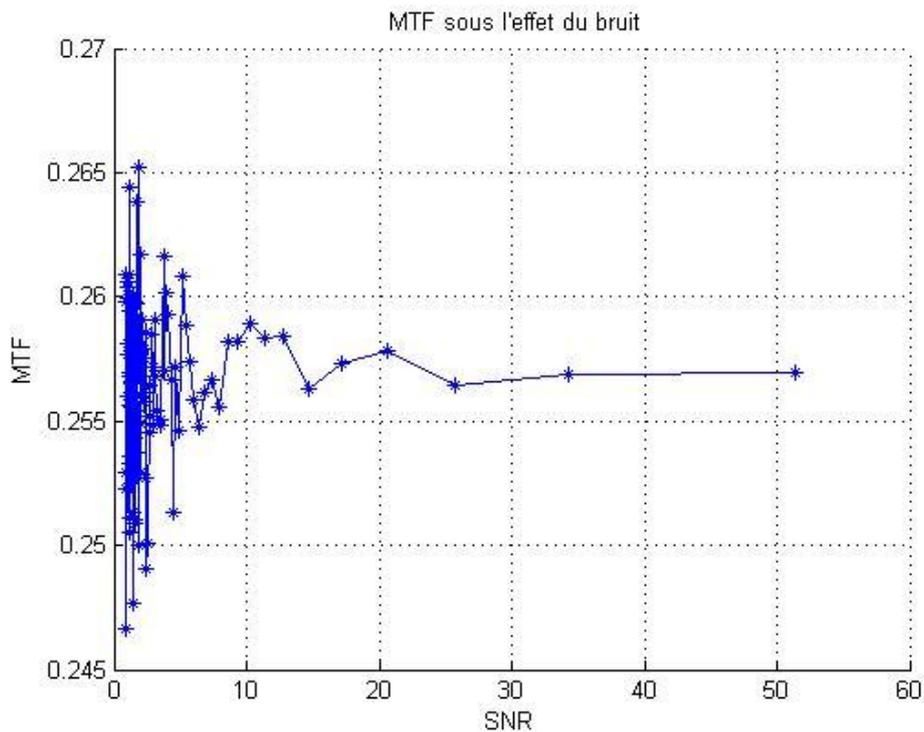


*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction randn.m*

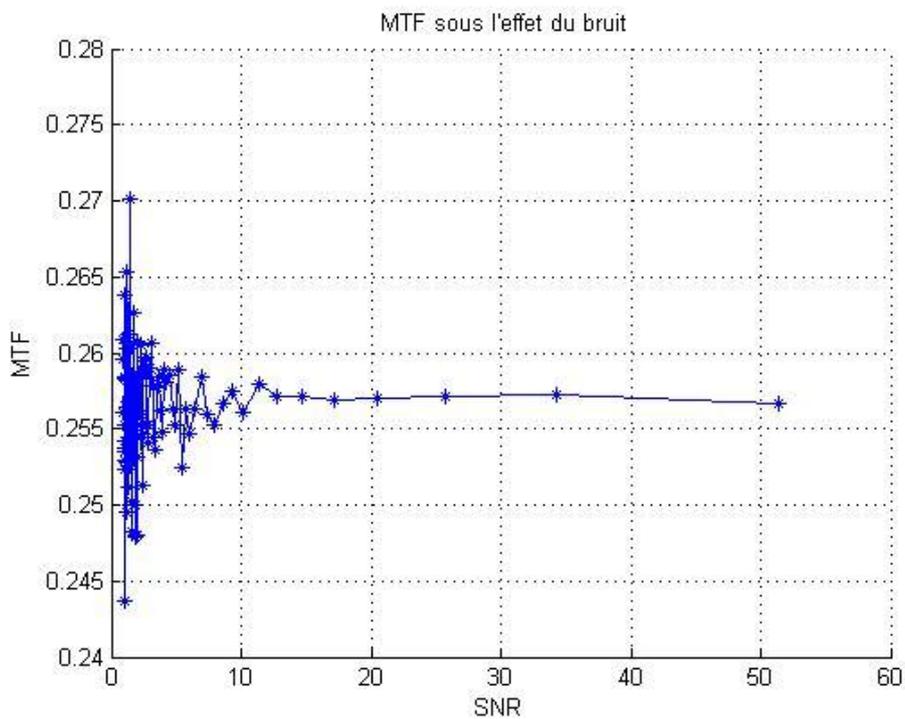


*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction imnoise.m*

Image 2

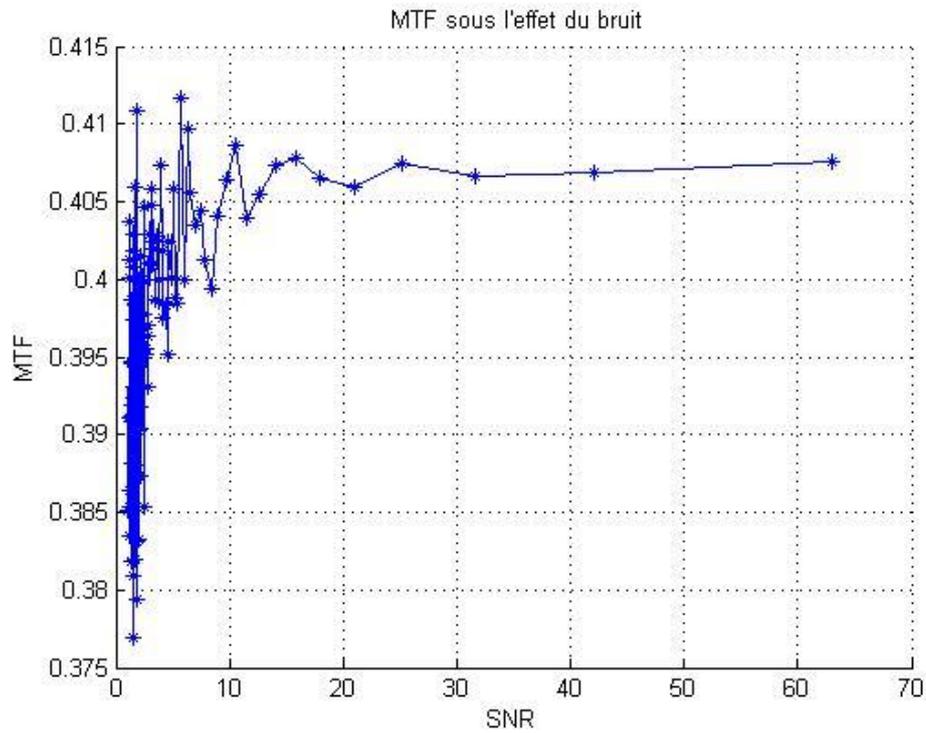


*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction randn.m*

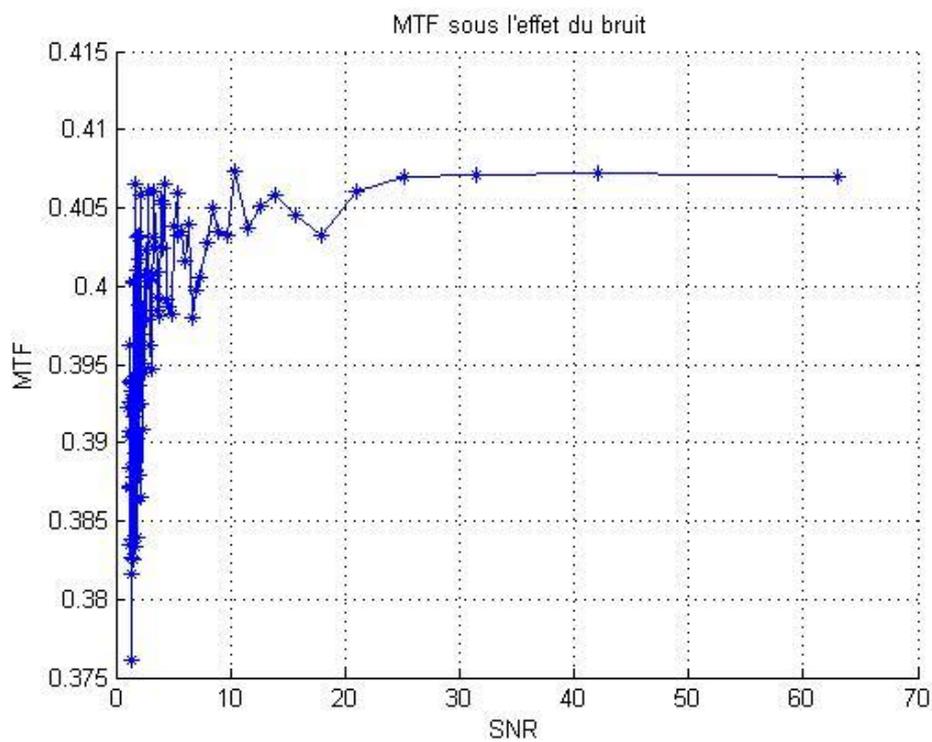


*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction imnoise.m*

Image 3

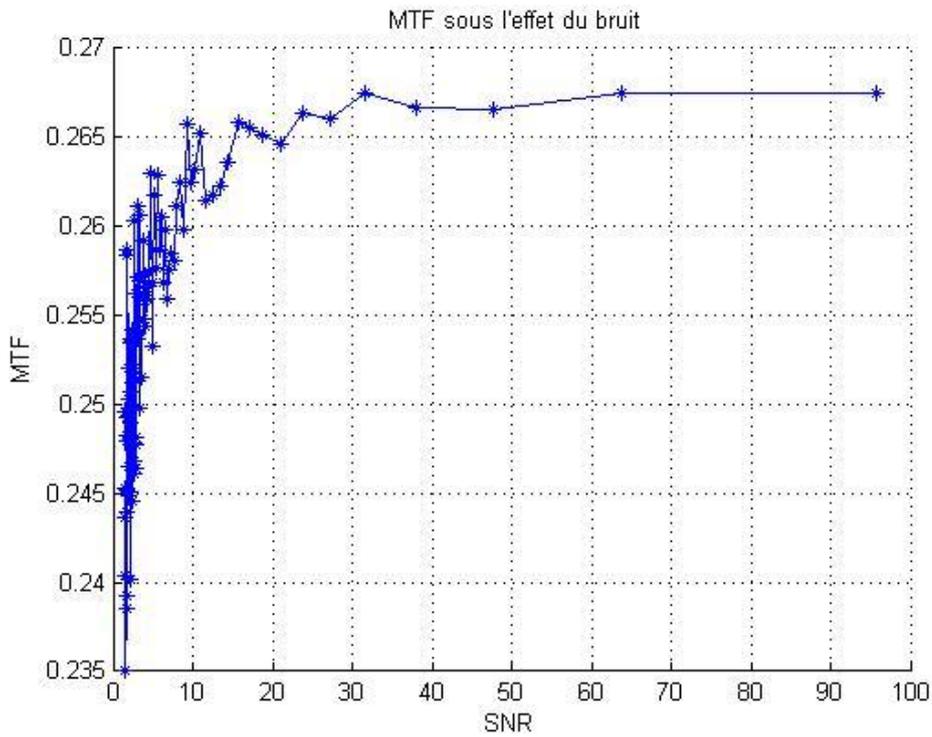


*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction randn.m*

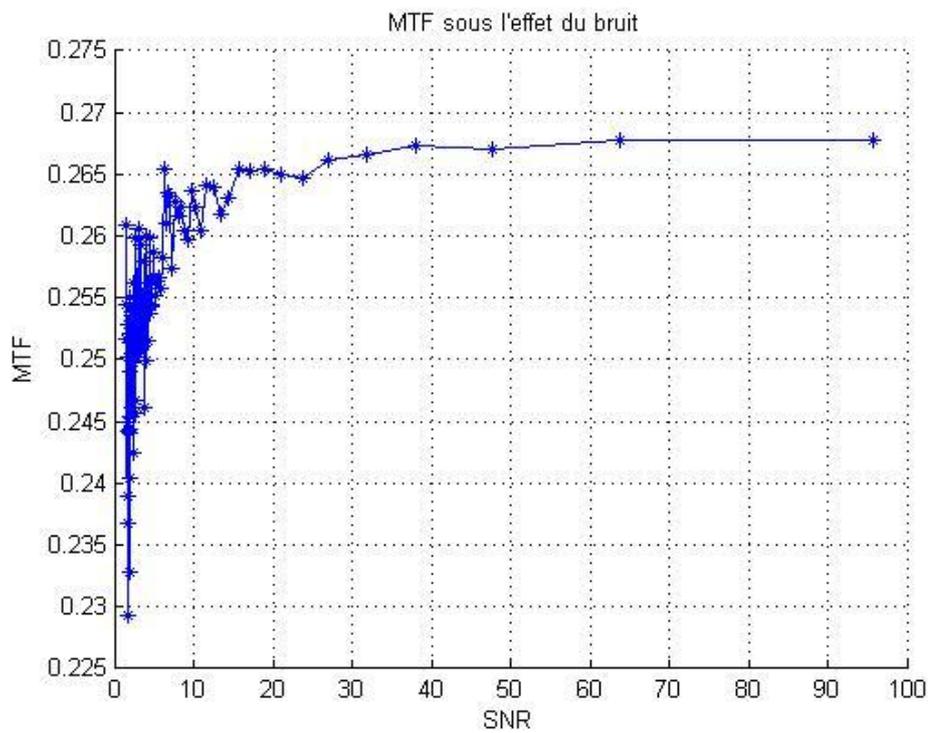


*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction imnoise.m*

Image 4



*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction `randn.m`*



*Simulation de la MTF à la fréquence de Nyquist par l'ajout de bruit blanc gaussien avec la fonction `imnoise.m`*