

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

ProQuest Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600

UMI[®]



Université d'Ottawa - University of Ottawa

**Analyse de la variabilité spatio-temporelle
de l'uniformité radiométrique des sites
d'étalonnage des capteurs d'observation de
la terre**

Thèse présentée par:

Khalid Omari

Pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M. Sc.)

**Département de géographie
Université d'Ottawa**

2002



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-76621-7

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à mon directeur de thèse, Abdou Bannari, pour son aide précieuse dans le déroulement de cette thèse. Je suis également reconnaissant à Drs. Philippe Teillet, Daniel Lagarec et Bernard Lauriol d'avoir accepté d'être membres du jury de cette thèse.

Le travail présenté ici a bénéficié d'un financement du conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et du centre canadien de télédétection (CCT). Mes remerciements vont, également, à l'Université d'Ottawa qui m'a accordé la bourse internationale.

Mes sincères remerciements vont aussi à Gunar Fedosedjevs, du CCT, et l'Université d'Arizona qui ont fourni les données images. J'apprécie énormément leurs conseils et discussions fructueux et leur disponibilité.

Je tiens également à remercier Jim Mc Grath pour l'aide technique.

Enfin merci à ma famille et à mes amis toujours présents.

Résumé

L'étalonnage radiométrique des capteurs de télédétection optique avec vérité terrain est la méthode qui peut garantir la meilleure précision avec un coût le moins cher. Néanmoins, la bibliographie nous a montré que cette méthode est contrôlée, entre autres, par le problème de la variabilité spatio-temporelle de l'uniformité radiométrique des sites. Dans la littérature, nous avons recensé plusieurs sites test utilisés pour l'étalonnage direct et indirect des capteurs satellitaires et aéroportés. Nous avons montré que chacun de ces sites a ses propres caractéristiques et son uniformité dépend de la variation de son humidité, sa couleur et sa brillance, sa rugosité, sa topographie, son climat, sa taille, etc.

Le but de cette thèse est de réaliser une étude d'uniformité des sites Newell County en Alberta (Canada), Lunar Lake Playa et Railroad Valley Playa au Nevada (États Unis). Les objectifs qui ont été soulignés sont la caractérisation spatiale, temporelle et spectrale et la détermination d'une taille appropriée pour chacun des trois sites. Aussi la mise au point sur le site qui répond le mieux aux critères d'un site d'étalonnage optimal des capteurs optiques. Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé des données provenant des capteurs opérant avec différentes résolutions spatiales et spectrales, à savoir HRV de Spot, TM de Landsat et AVHRR de NOAA. En s'appuyant sur les moyens du coefficient de variation et de la statistique de Getis, les résultats obtenus nous ont permis de trouver les emplacements les plus homogènes pour les trois sites. Ils nous ont permis également de définir une taille optimale de $7 \times 7 \text{ km}^2$ pour le site Newell County, $6 \times 6 \text{ km}^2$ pour le site Railroad Valley et $1 \times 1 \text{ km}^2$ pour le site de Lunar Lake. Les résultats ont montré également que le degré de la stabilité temporelle, sur les deux échelles annuelle et saisonnière, change d'un site à l'autre dépendamment de la nature de sa surface et des conditions climatiques.

Finalement, la comparaison des résultats obtenus montre que Railroad Valley est le site le mieux convenable, parmi les trois, pour l'étalonnage des capteurs optiques.

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table de matières.....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xii
Listes des abréviations.....	xiii

Chapitre 1: INTRODUCTION GÉNÉRALE

I.1. Introduction.....	1
I.2. Objectifs de la recherche.....	3
I.3. Hypothèses.....	4
I.3. Organisation de la thèse.....	4

Chapitre 2: ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE L'UNIFORMITÉ SPATIALE DES SITES TEST: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Introduction.....	6
2.2. Les différentes méthodes d'étalonnage.....	7
2.2.1. Étalonnage au laboratoire.....	7
2.2.2. Étalonnage à bord.....	7
2.2.2.1. Capteur solaire.....	7
2.2.2.2. Lampe interne.....	8
2.2.2.3. Visée de la lune.....	8
2.2.2.4. Panneau diffuseur.....	9
2.2.2.5. Nuages.....	9
2.2.2.6. Diffusion Rayleigh.....	9
2.2.2.7. Cibles désertiques.....	10
2.2.3. L'étalonnage absolu avec vérité terrain.....	10
2.3. Les critères d'un bon site d'étalonnage.....	12
2.4. Analyse bibliographique de l'uniformité spatiale des différents sites test.....	13
2.4.1. White Sands (Nouveau Mexique, USA)	13
2.4.1.1. Caractérisation de la surface de White Sands.....	14
2.4.1.2. La variabilité temporelle de la reflectance	

de White Sands.....	18
2.4.1.3. Effet de l'humidité de la surface de White Sands.....	20
2.4.1.4. Effet bidirectionnel.....	22
2.4.2. Le site de La Crau (France)	27
2.4.2.1. Caractérisation de la surface de La Crau.....	27
2.4.2.2. Homogénéité spatiale.....	29
2.4.2.3. Variabilité spectrale de La Crau.....	30
2.4.2.4. Effet bidirectionnel.....	33
2.4.3. Railroad Valley Playa (RVPN)(Nevada, USA).....	36
2.4.3.1. Localisation et caractérisation.....	36
2.4.3.2. Uniformité spatiale.....	37
2.4.3.3. Stabilité spectrale et temporelle.....	38
2.4.4. Lunar Lake Playa (RVPN)(Nevada, USA).....	40
2.4.5. Newell County Rangeland (NCRA)(Alberta, Canada).....	41
2.4.5.1. Localisation et caractérisation.....	41
2.4.5.2. Uniformité spatiale et spectrale.....	42
2.4.6. Dunhuang (Chine).....	44
2.4.6.1. Localisation et caractérisation.....	44
2.4.6.2. Stabilité spectrale et spatiale.....	45
2.4.6.3. Effet bidirectionnel.....	47
2.4.7. Sonora (Mexique).....	47
2.4.7.1. Effet bidirectionnel.....	48
2.4.7.2. Variabilité spectrale et humidité de surface.....	48
2.4.8. Les sites désertiques.....	50
2.5. Étude comparative entre les différents sites.....	53

Chapitre 3: MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Introduction.....	59
3.2. Les sites d'études.....	59
3.3. Les données images.....	59

3.3.1. Les capteurs.....	60
3.3.2. Les images.....	62
3.4. Méthodologie de la recherche.....	64
3.4.1. La statistique de Getis.....	66
3.4.2. Le coefficient de variation.....	69
3.5. Conclusion.....	69

Chapitre 4: ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1. Introduction.....	71
4.2. Traitement des données.....	71
4.2.1. Site de Newell County (NCRA)	71
4.2.1.1. Caractérisation spatiale.....	71
4.2.1.1.1. La méthode du coefficient de variation	71
4.2.1.1.2. La méthode de la statistique de Getis	77
4.2.1.2. Taille et localisation du site.....	82
4.2.1.3. Caractérisation temporelle.....	84
4.2.1.4. Caractérisation spectrale.....	89
4.2.1.5. Conclusions sur le site Newell County.....	90
4.2.2. Site de Railroad Valley (RVPN)	91
4.2.2.1. Caractérisation spatiale.....	91
4.2.2.1.1. La méthode du coefficient de variation	91
4.2.2.1.2. La méthode de la statistique de Getis	95
4.2.2.2. Taille du site.....	99
4.2.2.3. Caractérisation temporelle.....	102
4.2.2.4. Conclusions sur le site Railroad Valley.....	104
4.2.3. Site de Lunar Lake (LLPN)	105
4.2.3.1. Caractérisation spatiale.....	105
4.2.3.1.1. La méthode du coefficient de variation.....	105
4.2.3.1.2. La méthode de la statistique de Getis.....	106
4.2.3.2. Taille du site.....	109
4.2.3.3. Caractérisation temporelle.....	111
4.2.3.4. Conclusions sur le site Lunar Lake.....	116
4.2.4. Comparaison: Le site le plus approprié pour l'étalonnage.....	116

Chapitre 5: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1. Conclusions.....119
5.2. Recommandations.....121

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....122

ANNEXE1.....128

ANNEXE2.....138

ANNEXE3.....148

Liste des figures

Figure 2.1 :	Localisation du site de White Sands (Bassin de Turalosa).....	14
Figure 2.2a:	Photo de White Sands montrant des eaux emprisonnées dans les couches extérieurs de la surface du site.....	16
Figure 2.2b:	Photo de la végétation à White Sands.....	16
Figure 2.3 :	Photo de la région des dunes à White Sands.....	17
Figure 2.4 :	La distribution mensuelle des journées claires (du 7 Novembre 1988 à 6 Novembre 1991).....	17
Figure 2.5 :	Réflectance de la surface, avec sa déviation standard, mesurée à Chuck Site de White Sands Missile Range.....	18
Figure 2.6 :	Variation de l'albédo du sol de la région des dunes de White Sands pendant une journée.....	19
Figure 2.7 :	Variation annelle de l'humidité de White Sands Missile Range.....	21
Figure 2.8 :	Réflectance spectrale de White Sands, pour deux types de sables (secs et humides)	21
Figure 2.9 :	Réflectance de White Sands en fonction de la longueur d'onde, l'angle zénithal solaire et de visée et de l'angle azimutal	23
Figure 2.10:	Variation de la réflectance dans les quatre bandes de TM (1 à 4 du bas vers le haut) en fonction de l'angle de visée sous deux angles d'éclairément solaire	25
Figure 2.11:	Réflectances bidirectionnelles de la région des dunes de White Sands mesurées par le capteur aéroporté ASAS, par l'instrument PARABOLA et par simulation au laboratoire	26
Figure 2.12:	Carte de localisation du site de La Crau	28
Figure 2.13:	Photo de la surface de La Crau.....	29
Figure 2.14:	Effet de la dimension des pixels sur le coefficient de variation de la réflectance.....	31

Figure 2.15: Spectre moyen de la réflectance de La Crau entre 400 nm et 1000 nm	31
Figure 2.16: Réflectance spectrale des composantes de la surface de La Crau (.....) Galets, (____) Sol nu, (-----) Végétation	32
Figure 2.17: Évolution temporelle du coefficient de variation de la luminance moyenne du site La Crau.....	32
Figure 2.18: Variation de la BRDF pendant une journée (20 Septembre 1988).....	34
Figure 2.19: Variation relative du facteur de réflectance directionnel de la surface de La Crau dans les canaux XS2 et XS3 de Spot.....	35
Figure 2.20: Localisation de Railroad Valley Playa	37
Figure 2.21: Coefficient de variation (en %) en fonction de la taille de la fenêtre (N km par N km) sur le site de	38
Figure 2.22: Spectre moyen de la réflectance et sa déviation standard du site de RVPN mesurées à l'aide du CASI en considérant une taille de 7 km par 7 Km.....	39
Figure 2.23: Localisation de Newell County Rangeland.....	42
Figure 2.24: Coefficient de variation (en %) en fonction de la taille de la fenêtre (N km par N km) pour le site de NCRA	43
Figure 2.25: La réflectance moyenne et sa déviation du site de NCRA mesurées à l'aide du CASI en considérant une taille de 7 km par 7 Km.....	43
Figure 2.26: Spéctre de réflectance du sol du site de Dunhuang.....	46
Figure 2.27: Variation angulaire de la réflectance de la surface de Dunhuang pour les trois bandes multispectrales de SPOT.....	47
Figure 2.28: a) vue verticale du Désert de Sonora b) photo de la végétation du Désert de Sonora.....	48
Figure 2.29: Variation du facteur de réflectance de la surface du désert de Sonora dans le visible, le proche et le moyen infrarouge, en fonction de l'angle d'éclairément solaire.....	49

Figure 2.30: L'effet de la mixture du couvert végétal sur la réflectance du site de Sonora.....	50
Figure 3.1: Organigramme de la méthodologie.....	65
Figure 4.1: Images des coefficients de variation calculés avec des différentes Fenêtres (a : 3x3 , b : 5x5, c : 7x7 et d : 9x9 pixels) sur le canal 4 d'une image TM de Landsat-5 de Newell County acquise le 27 août 1996.....	73
Figure 4.2: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux d'une image HRV de Spot (a: vert, b: rouge et c: proche infrarouge) acquise sur Newell County en août 1998.....	75
Figure 4.3: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les 6 canaux d'une image TM de Landsat (a: TM1, b: TM2, c: TM3, d: TM4, e: TM5 et f: TM7) acquise sur Newell County le 27 août 1996.....	76
Figure 4.4: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les deux premiers canaux d'une image AVHRR de NOAA (a: visible, b: proche infrarouge) acquise sur Newell County le 28 août 1998.....	77
Figure 4.5: Images de la statistique de Getis G_i^* calculée avec des fenêtres différentes (a: 3x3 , b: 5x5, c: 7x7 et d: 9x9 pixels) sur le canal 3 d'une image TM de Landsat-5.	78
Figure 4.6: Images de la statistique de Getis G_i^* calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux d'une image HRV de Spot (a: vert, b: rouge et c: proche infrarouge) acquise sur Newell County en août 1998.....	80
Figure 4.7: Images de la statistique de Getis G_i^* calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les 6 canaux d'une image TM de Landsat (a: TM1, b: TM2, c: TM3, d: TM4, e: TM5 et f: TM7) acquise sur Newell County le 27 août 1996.....	81
Figure 4.8: MCV calculée en fonction de la dimension de la fenêtre (a) pour une image HRV acquise le 7 août 1998 et (b) pour une image TM acquise le 27 août 1996.....	83
Figure 4.9: Le site 7x7 km ² retenu à Newell County.....	84

Figure 4.10a: Coefficient de variation temporelle annuelle durant 5 années (1995-1999), fréquence d'une image par année.....	86
Figure 4.10b: Moyennes des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels durant 5 années (1995-1999).....	86
Figure 4.11: Coefficient de variation temporelle saisonnier, d'avril à octobre, durant la même année (1998).....	88
Figure 4.12: Coefficient de variation temporelle saisonnier, d'avril à juillet, durant la même année (1999).....	88
Figure 4.13: MCV en fonction de la taille de la fenêtre dans les trois canaux de HRV de Spot et leurs homologues de TM de Landsat (TM2, TM3, TM4), images acquises le 4 octobre 1998.....	90
Figure 4.14: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV3: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur Railroad Valley le 18 juin 1998.....	93
Figure 4.15: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (TM1: (a), TM2: (b), TM3: (c), TM4: (d), TM5: (e) et TM7: (f)) d'une image TM de Landsat acquise sur Railroad Valley en juin 1998.....	94
Figure 4.16: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre 5x5 pixels dans les deux premiers canaux d'une image AVHRR de NOAA-14 acquise sur Railroad Valley le 11 juillet 1998.....	95
Figure 4.17: Images de la statistique de Getis calculées avec une fenêtre 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV3: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur Railroad Valley le 18 juin 1998.....	97
Figure 4.18: Images de la statistique de Getis calculées avec une fenêtre 5x5 pixels dans les six canaux (TM1: (a), TM2: (b), TM3: (c), TM4: (d), TM5: (e) et TM7: (f)) d'une image TM de Landsat acquise sur Railroad Valley en juin 1998.....	98
Figure 4.19: Images de la statistique de Getis calculées avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les deux premiers canaux d'une image AVHRR de NOAA-14 acquise sur Railroad Valley le 11 juillet 1998.....	99
Figure 4.20: MCV calculée en fonction de la dimension de la fenêtre (a) pour	

une image HRV et (b) pour une image TM acquises le 18 juin 1998.....	101
Figure 4.21: Le site 6x6 km ² retenu à Railroad Valley (Nevada).....	102
Figure 4.22: Coefficient de variation temporelle saisonnière, d'avril à août, durant la même année (1999).....	104
Figure 4.23: Images du coefficient de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV3: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur Lunar Lake le 28 juin 1997.....	107
Figure 4.24: Images de la statistique de Getis calculées avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV2: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur Lunar Lake le 28 juin 1997.....	108
Figure 4.25: MCV calculée en fonction de la dimension de la fenêtre pour une image HRV acquise le 28 juin 1997.....	110
Figure 4.26: Le site 1x1 km ² retenu à Lunar Lake (Nevada).....	110
Figure 4.27: L'évolution temporelle des trois canaux HRV acquises sur le site Lunar Lake du mois de juin par référence au mois de mars de l'année 1997.....	113
Figure 4.28: L'évolution temporelle des trois canaux HRV acquises sur le site Lunar Lake du mois de juin 1998 par référence au mois de juin 1997.....	113
Figure 4.29: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans le canal rouge de HRV ((a) mars 1997, (b) juin 1997 et (c) juin 1998).....	114
Figure 4.30: Images de la statistique de Getis calculées avec une fenêtre de 5x5 pixels dans le canal rouge de HRV ((a) mars 1997, (b) juin 1997 et (c) juin 1998).....	115

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Facteurs de réflectances de la surface de White Sands mesurés dans les quatre premières bandes du capteur TM à l'aide du radiomètre Exotech sous cinq angles solaire (Slater <i>et al.</i> , 1987)	24
Tableau 2.2: Variation de l'azimut de balayage de SPOT en fonction de la date et de l'inclinaison de la visée comptée positivement vers l'est (Gu, 1991).....	36
Tableau 2.3: Réflectance moyenne du site de Dunhuang pour les bande de SPOT et TM (Wu <i>et al.</i> , 1997).....	46
Tableau 2.4: Latitudes et longitudes en degré et taille des zones désertiques choisies (Delphin <i>et al.</i> , 1991).....	53
Tableau 2.5: Localisation des sites désertiques sélectionnés par Cosnefroy <i>et al.</i> (1996).....	53
Tableau 2.6: Synthèse des caractéristiques des différents sites considérés dans cette étude	55
Tableau 3.1: Bandes spectrales du capteur AVHRR de NOAA-14.....	60
Tableau 3.2: Bandes spectrales du capteur HRV de SPOT.....	61
Tableau 3.3: Bandes spectrales du capteur TM de Landsat-5.....	61
Tableau 3.4: Liste des images acquises sur le site de Railroad Valley.....	63
Tableau 3.5: Liste des images acquises sur le site de Newell County Rangeland en Alberta.....	63
Tableau 3.6: Liste des images acquises sur le site de Lunar Lake Playa Nevada.....	64

Liste des abréviations

ASAS	Advanced Solid-state Array Spectroradiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CCT	Centre Canadien de Télédétection
CN	Compte Numérique
CNES	Centre National des Études Spatiales
CRSDA	China Centre for Resources Satellites Data and Application
CRSG	Centre for Remote Sensing in Geology
CV	Coefficient de Variation
CZCS	Coastal Zone Color Scanner
EOS	Earth Observing Systems
ERS	European Remote Sensing Satellite
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FOV	Field Of View
FTM	Fonction de transfert de modulation
GLI	Global Imager
GOES	Geosynchronous Operational Environmental Satellites
HRV	Haute Résolution dans le visible
INRA	Institut Nationale de la Recherche Agronomiques
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
LISA	Local Indicators of Spatial Association
LLPN	Lunar Lake Playa Nevada
MCV	Moyenne des Coefficients de Variation
MERIS	Envisat Medium-Resolution Imaging Spectroradiometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner
NCRA	Newell County Rangeland Alberta
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration

PARABOLA	Portable Apparatus for Rapid Acquisition of Bidirectional Observations of Land Atmosphere
POLDER	Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances
RVPN	Railroad Valley Playa Nevada
SAR	Synthetic Aperture Radar
SeaWIFS	Sea viewing Wide Field-of-view Sensor
SPOT	Satellite Probatoire d'Observation de la Terre
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager
TM	Thematic Mapper
VISSR	Visible Infrared Spin-Scan Radiometer

Introduction Générale

1.1. Introduction

Au cours des trois dernières décennies, la demande des produits satellitaires pour la gestion des ressources naturelles en particulier et l'environnement terrestre en général a augmenté énormément. En effet, les images numériques de télédétection sont largement utilisées dans les domaines forestiers, agricoles, météorologiques, hydrologiques, géologiques, urbains, etc. Toutefois, si les données radiométriques sont exploitées dans leur forme brute, les changements dans la réponse du capteur peuvent être incorrectement attribués aux changements des éléments biophysiques et géophysiques des scènes observées (Bannari *et al.*, 1999). Par conséquent, des erreurs grossières peuvent se propager dans toutes les opérations subséquentes de traitement d'image, à savoir: les indices de végétation, la confection et l'analyse des mosaïques, les analyses multitemporelles, les techniques de classification, etc. (Price, 1987; Teillet, 1994). Afin de profiter pleinement des produits dérivés des données satellitaires et aéroportées il faut constamment étalonner les capteurs, valider les données, assurer leur stabilité et effectuer une assurance de leur qualité (Teillet *et al.*, 1997).

Par ailleurs, les performances radiométriques d'un capteur de télédétection varient temporellement entre l'étalonnage au laboratoire avant le lancement et la mise en orbite (Slater *et al.*, 1987). Bien entendu, le processus de la mise en orbite du satellite (passage air-vide) peut changer significativement les caractéristiques du capteur. Les forces déployées par la fusée spatiale pour échapper à la pesanteur peuvent causer des déformations mécaniques du boîtier d'étalonnage et des configurations des systèmes électronique et optique du capteur (Bannari *et al.*, 1999). En outre, la largeur spectrale propre à chaque filtre peut subir un rétrécissement ou un

glissement lors du passage du satellite dans le vide ou avec le temps à cause de l'absorption par les gaz, la température et de l'angle d'incidence de l'éclairement solaire (Teillet *et al.*, 1990). Durant la vie orbitale du satellite, la contamination des miroirs par les gaz de l'environnement de la plate-forme, l'érosion des éléments optiques du système par l'oxygène atomique, les frottements cosmiques et la radiation solaire exercée sur les parties ensoleillées du satellite causent un vieillissement des différentes parties du capteur ce qui dégrade ces caractéristiques radiométriques dans le temps. Aussi, d'autres types de problèmes relatifs au capteur peuvent avoir lieu, entre autres, les bruits aléatoires issus des dispositifs électroniques, le résidu d'égalisation des détecteurs, la défaillance d'un détecteur, etc. (Slater, 1984). Cependant, dès la mise en orbite il est normal de soupçonner un changement des paramètres d'étalonnage relatif et absolu du capteur, et de se poser aussi des questions sur la qualité du système d'étalonnage interne (lampe, capteur solaire, etc.).

L'étalonnage radiométrique d'un capteur satellitaire est l'opération qui permet d'établir la relation qui existe entre la quantité physique mesurable en entrée de l'instrument, flux de rayonnement réfléchis par le système terre-atmosphère, et le compte numérique résultant en sa sortie transmis vers la station de réception au sol (Kastner et Slater, 1982). Certes, en général, l'étalonnage des instruments dédiés à l'observation de la terre n'est pas une tâche facile. Pour augmenter la précision de cette opération, il est souhaitable d'utiliser différentes méthodes de façons indépendantes (Teillet *et al.*, 1990; Henry *et al.*, 1993). En effet, différentes méthodes ont été utilisées pour l'étalonnage relatif et absolu des capteurs optique, visible et infrarouge: étalonnage au laboratoire avant vol dans un environnement bien contrôlé; étalonnage à bord à l'aide d'une lampe, d'une sphère, d'un panneau de diffusion solaire ou d'un capteur solaire; étalonnage par visée de la lune; étalonnage sur sites terrestres avec vérité terrain (mesures au sol ou par avion), étalonnage sur sites terrestres sans vérité terrain, étalonnage inter-instruments et étalonnage inter-bandes (Dinguirard et Slater, 1997; Bannari, 1998; Slater *et al.*, 1987; Teillet *et al.*, 1990).

À cause de l'inaccessibilité du satellite, la méthode d'étalonnage direct basée sur un site terrestre avec vérité terrain est souvent considérée comme efficace et assure le meilleur compromis

“précision-investissement” (Slater *et al.* 1987; Gu, 1991). Elle est utilisée avec succès par la NASA et par le Centre national des études spatiales (CNES), France, pour l'étalonnage des capteurs comme TM (*Thematic Mapper*) de Landsat et HRV (*Haute Résolution dans le visible*) de SPOT (*Satellite Probatoire d'Observation de la Terre*) sur des sites terrestres. Elle présente l'avantage de reproduire les conditions réelles d'acquisition des données relatives aux images. Sa précision dépend étroitement de la détermination précise de la réflectance moyenne du site d'étalonnage et de la précision des paramètres atmosphériques mesurés au moment de l'acquisition de l'image. Dans les meilleures conditions de stabilité du site et des mesures au sol, elle assure une précision d'étalonnage autour de $\pm 3 \%$ (Slater et Dinguirard, 1999). Bien entendu, un site d'étalonnage n'est jamais choisi au hasard, pour être adéquat il doit satisfaire à un certain nombre de critères (Slater, 1985; Slater *et al.*, 1987; Leroy, 1990; Teillet *et al.*, 1997; Scott *et al.*, 1996), tels que: l'homogénéité spatiale, la stabilité spectrale et temporelle, le caractère presque lambertien pour minimiser les effets bidirectionnels, la brillance qui doit être élevée pour minimiser la contribution de l'atmosphère au signal, avec un très faible taux de couverture nuageuse, un faible taux de précipitation et une très faible variation de l'humidité de surface. Le site doit être suffisamment large afin de minimiser l'effet de l'environnement et pour qu'il soit utilisé pour l'étalonnage de nombreux capteurs y compris ceux qui ont une faible résolution spatiale. Il doit être aussi à haute altitude pour réduire les effets atmosphériques et sans relief.

La bibliographie montre que les chercheurs se penchent souvent sur l'analyse des problèmes de la variabilité temporelle de la radiométrie des capteurs dans leurs orbites. Toutefois, bien que l'analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'uniformité radiométrique d'un site test soit aussi fondamentale, très rare sont les travaux qui abordent l'étude de ce problème. Dans le cadre de cette thèse nous analysons la stabilité spatio-temporelle de l'uniformité radiométrique de trois sites tests différents qui sont exploités pour les opérations d'étalonnage des capteurs de télédétection par la NASA et le Centre canadien de télédétection.

I.2. Objectifs de la recherche

Les objectifs spécifiques de l'étude sont:

- La caractérisation spatiale de chacun des sites en considérant des images à trois échelles différentes. À ce niveau, nous considérons des images acquises avec des résolutions spatiales de 20 m dans le cas des données de HRV (*Haute Résolution dans le visible*) de SPOT , 30 m dans le cas des données prises par le capteur TM (*Thematic Mapper*) de Landsat-5 et de 1,1 km dans le cas des images de AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) acquises au nadir.
- Taille et localisation des sites: cette étape consiste à déterminer la taille du site la plus appropriée pour un étalonnage optimal des capteurs, ainsi que la localisation géographique de la zone la plus stable et la plus convenable pour l'étalonnage.
- La caractérisation spectrale de chacun des sites vise la comparaison des propriétés de la réflectance de chaque site en fonction du temps et en considérant les bandes multispectrales du capteur HRV de SPOT, les bandes du visible et proche infrarouge de AVHRR de NOAA et les bandes du visible, du proche et du moyen infrarouge de TM de Landsat.
- La caractérisation temporelle de chacun des sites: cette étape vise l'analyse de l'évolution temporelle du site en fonction des résolutions spatiale et spectrale, en utilisant des images acquises à différentes dates au-dessus des sites considérés dans cette étude.

1.3. Hypothèses

Deux hypothèses sont proposées:

- La méthode d'analyse d'autocorrelation spatiale locale basée sur la statistique de Getis pourra être un excellent moyen, comparée à la réalité terrain, pour l'étude de l'uniformité spatiale des sites d'étalonnage des capteurs satellitaires optiques.

- L'utilisation du coefficient de variation permet de caractériser l'évolution temporelle et l'homogénéité spatiale des sites d'étalonnage.

I.4. Organisation de la thèse

La présente thèse est divisée en 5 chapitres. Le premier chapitre est une introduction soulevant la nécessité de l'étalonnage des capteurs pour valider leurs produits et fixe les objectifs de ce travail. Le deuxième chapitre est une étude bibliographique qui décrit les différentes méthodes d'étalonnage et caractérise de nombreux sites test utilisés pour ce but. Le troisième chapitre localise les sites d'études et décrit les méthodes de traitement ainsi que les données utilisées dans cette recherche. Le quatrième chapitre présente une analyse des résultats obtenus. Le cinquième chapitre regroupe les conclusions de ce travail et suggère des recommandations.

Analyse de la variabilité de l'uniformité spatiale des sites test: Étude bibliographique.

2.1. Introduction

Dans la bibliographie, nous avons recensé plusieurs sites tests utilisés pour l'étalonnage direct des capteurs satellitaires et aéroportés, tels que : le site du désert de gypse à "White Sands" au Nouveau-Mexique (USA), le site de "La Crau" au sud de la France, le site "Railroad Valley Playa" au Nevada (USA), le site "Newell County Rangeland" en Alberta (Canada), le site "Dunhuang" dans la province de Gansu en Chine, le site "Sonora" au nord-ouest du Mexique, les sites désertiques de l'Afrique du Nord et de la péninsule arabe (Slater, 1985; Gu, 1991; Teillet *et al.*, 1997; Teillet *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 1997; Whitlock *et al.*, 1987; Cosnefroy *et al.*, 1996; Delphin *et al.*, 1991). Toutefois, chacun de ces sites a ses propres caractéristiques et son uniformité radiométrique dépend de sa stabilité temporelle, sa stabilité atmosphérique, sa stabilité spectrale et son homogénéité spatiale.

Le but de cette étude bibliographique est de décrire brièvement les différentes méthodes utilisées pour l'étalonnage radiométrique des capteurs optiques de télédétection, localiser et caractériser les différents sites tests cités ci-dessus en analysant leur stabilité temporelle et homogénéité spectrale et spatiale. En outre, établir une comparaison entre eux en considérant leur uniformité spatiale. Précisons ici que les sites "Tinga Tingana" dans le désert Strzelecki au sud l'Australie et "Uyuni Salt Flats" en Bolivie sont traités dans le cadre d'une communication présentée au 22^e symposium canadien sur la télédétection (voir annexel) et ne seront pas considérés dans la présente étude (Omari *et al.*, 2000).

2.2. Les différentes méthodes d'étalonnage

2.2.1. Étalonnage au laboratoire

Tous les capteurs sont étalonnés de façon relative et absolue au laboratoire avant leur lancement. Généralement, on utilise comme source une sphère intégrante dont l'intérieur est muni de lampes baffles et tapissé d'une peinture très réfléchissante et stable (Leroy, 1990). Cette étape consiste principalement à déterminer avec précision la réponse spectrale du capteur, les coefficients d'étalonnage relatif et absolu, contrôler la linéarité des détecteurs du capteur, caractériser la FTM (*Fonction de transfert de modulation*), la polarisation et l'effet du dérayage (Dinguirard et Slater, 1999). La principale limitation de cette méthode est que la sensibilité radiométrique du capteur peut évoluer entre le moment d'étalonnage avant le lancement et la vie orbitale. Par exemple, on a observé un rétrécissement de 5 à 20 % des bandes spectrales du capteur HRV de SPOT, principalement dû à une désorption d'humidité des filtres lors du passage air-vide (Leroy, 1990). Aussi, après deux ans de fonctionnement de SPOT-1 sur son orbite, le signal mesuré par le capteur HRV a subi une perte relative de son intensité qui varie entre 3 % et 16 % par rapport à la valeur mesurée avant lancement (Dinguirard *et al.*, 1988).

2.2.2. Étalonnage à bord

Cette méthode consiste à faire viser le capteur à bord du satellite par une source lumineuse bien connue qui peut être une source artificielle (une lampe) ou naturelle (le soleil). Dans ces conditions, l'étalonnage doit se faire en respectant l'ouverture totale du champ d'observation de l'instrument en passant la lumière sur la totalité de son plan focal et en couvrant la totalité de sa dynamique spectrale.

2.2.2.1. Capteur solaire

Cette méthode utilise la lumière solaire recueillie à l'extérieur de l'instrument à l'aide d'un capteur solaire à fibres optiques et la faire parvenir sur les détecteurs après le passage dans l'ensemble du système optique du capteur (Leroy, 1990). Par exemple, SPOT utilise un faisceau

de fibres optiques pour collecter l'éclairement solaire. Le problème c'est que lors de l'enregistrement des images de la surface terrestre, l'ouverture du capteur (plan focal) est totalement illuminée par le flux incident. Par contre, pour un étalonnage à bord, le faisceau lumineux émis par le capteur solaire passe seulement à travers une petite portion de l'ouverture du système d'acquisition sans simuler toute l'ouverture du système ce qui introduit une incertitude substantielle dans l'étalonnage du capteur (Slater, 1985).

2.2.2.2. Lampe interne

Différents systèmes satellitaires sont dotés de lampes d'étalonnage, par exemples, les capteurs MSS (*Multispectral Scanner*) et TM de la série Landsat et les capteurs HRV de SPOT. Le principe de cette méthode est d'embarquer une lampe à filament au "tungstène" à bord du satellite dans le boîtier d'étalonnage pour qu'elle illumine le plan focal du système optique du capteur. Avant le lancement, la lampe doit être étalonnée au laboratoire pour connaître son émission et sa luminance, et on doit supposer que cette émission reste stable au moment des mesures en orbite. Toutefois, cette méthode est sujette à plusieurs inconvénients: vieillissement significatif de la lampe, à la fois, en émission et en répartition spectrale, et aussi l'impossibilité de détecter tout changement dans la transmission du système optique du capteur (Slater, 1984).

2.2.2.3. Visée de la lune

La luminance de la surface lunaire est déterminée en utilisant les connaissances de la luminance du soleil et de la réflectance de la lune qui est très stable dans le temps (Kieffer et Wildey, 1985). Le principe de cette méthode est d'orienter le satellite vers la lune pour obtenir une image chaque 28 jours. Selon ces chercheurs, elle assure une précision de ± 1 à ± 2 % pour l'étalonnage absolu des capteurs à bord des satellites Landsat-4 et 5. Les difficultés de cette méthode sont essentiellement dues au changement de l'orientation du satellite et aux besoins de communications dans les bandes S et L pour le contrôle de l'attitude du satellite (Kieffer et Wildey, 1985). Quant à la source des erreurs, elle réside au niveau du changement de l'angle de phase de la lune entre deux mesures (Dinguirard et Slater, 1997).

2.2.2.4. Panneau diffuseur

Les panneaux diffuseurs sont des surfaces presque lambertiennes dans le spectre solaire, de caractéristiques spectrales stables durant les années de la mission, et ne sont pas facilement contaminés par l'environnement extérieur (Guzman *et al.*, 1991). La plupart des capteurs développés par la NASA dans le cadre de son programme EOS (Earth Observing Systems) sont équipés de panneaux diffuseurs. Selon Dinguirard et Slater (1997), cette méthode assure une précision relative de $\pm 0,5 \%$ et présente l'avantage de couvrir la partie bleue du spectre solaire qui est faiblement couverte par la lumière de la lampe.

2.2.2.5. Nuages

Cette méthode est utilisée pour l'étalonnage inter-bandes des canaux 1 et 2 de AVHRR de NOAA-7,9 et 11 (Vermote et Kaufman, 1995). Elle est basée sur des mesures au-dessus des nuages brillants caractérisés par une réflectance spectrale stable. Les nuages doivent être à haute altitude (10 km et plus) ce qui nécessite seulement les corrections de Rayleigh et de l'ozone car les aérosols et la vapeur d'eau sont concentrés à base altitude (Dinguirard et Slater, 1999). Cette méthode assure une précision de $\pm 4 \%$ pour l'inter-étalonnage des bandes de POLDER (*Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances*) (Hagolle *et al.*, 1997).

2.2.2.6. Diffusion Rayleigh

Pour l'étalonnage des canaux qui opèrent dans les courtes longueurs d'ondes (0,4 - 0,5 μm), il est possible d'utiliser une méthode dont le principe est de mesurer, au-dessus des surfaces océaniques, la quantité de la lumière diffusée par l'effet de Rayleigh. La pression atmosphérique étant peu variable (1 %), cette quantité de lumière est de fait remarquablement stable et prévisible théoriquement avec une bonne précision (Leroy, 1990). Il faut naturellement s'affranchir à des contributions de la cible visée et aux aérosols dans le signal satellitaire. On réduit partiellement la contribution de la cible en visant la mer avec des angles de visées assez larges, cela a un effet d'affaiblir d'avantage le signal. Quant à la contribution des aérosols au

signal, elle est estimée en s'appuyant sur l'analyse du signal dans une bande spectrale de longueur d'onde élevée, proche ou moyen infrarouge. Dans une telle bande, la réflectance de l'eau et la contribution de la diffusion de Rayleigh sont négligeables et seule subsiste l'information sur les aérosols (Leroy, 1990). Ceci permet d'estimer le contenu atmosphérique en aérosols et de corriger le signal satellitaire dans les courtes longueurs d'onde que l'on cherche à étalonner. La principale limitation de cette méthode est qu'elle n'est pas valable pour l'étalonnage des bandes des plus grandes longueurs d'onde et elle nécessite des meilleures conditions atmosphériques et des conditions géométriques spécifiques. Cette méthode est bien adaptée pour l'étalonnage des capteurs dont le champ de vision (FOV) est assez large, comme Végétation-SPOT, Polder, MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), VISSR (*Visible Infrared Spin-Scan Radiometer*), CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*), etc. (Gordon, 1987; Vermote *et al.*, 1992; Vermote et Kaufman, 1995)

2.2.2.7. Cibles désertiques

Les sites désertiques ont souvent été utilisés pour l'étalonnage multitemporel des capteurs satellitaires, à cause de leur stabilité temporelle (Kaufman et Holben, 1993; Rao et Chen, 1995; Cabot *et al.*, 1994; Henry *et al.*, 1993). Leurs propriétés optiques sont suffisamment stables dans le temps ce qui ne nécessite pas des mesures *in situ* (Cosnefroy *et al.*, 1996). Le potentiel des régions désertiques de l'Afrique du Nord et de la péninsule Arabe, pour l'étalonnage des capteurs satellitaires, a fait l'objet de plusieurs études (Cosnefroy *et al.*, 1993 et 1996; Delphin *et al.*, 1991). Plus loin dans cette étude, nous allons discuter du potentiel d'utilisation de ces sites pour l'étalonnage radiométrique des capteurs optiques.

2.2.3. L'étalonnage absolu avec vérité terrain

L'étalonnage d'un capteur optique à partir d'un site connu au sol consiste à déterminer la luminance apparente qui lui parvient depuis la surface terrestre à travers l'atmosphère à partir d'un modèle de transfert radiatif. Cette méthode nécessite la connaissance de la luminance ou la réflectance moyenne du site et des paramètres atmosphériques qui interfèrent au moment du

passage du satellite au-dessus du site d'étalonnage. C'est la méthode la plus utilisée pour l'étalonnage des capteurs comme HRV de SPOT ou TM de Landsat, elle permet de reproduire les conditions réelles de l'acquisition des images au-dessus du site d'étalonnage et implique l'éclairement total de l'ouverture du capteur par la scène observée (Teillet, 1985). Généralement, elle assure une précision d'environ $\pm 5\%$ avec une tolérance de $\pm 10\%$ (Santer et al., 1992). La difficulté majeure de cette méthode est de caractériser avec précision les paramètres atmosphériques sur le site lors du passage du satellite, ainsi que la réflectance moyenne du site.

La réflectance moyenne du site d'étalonnage peut varier en fonction des caractéristiques et des conditions du site: la topographie, l'effet bidirectionnel, l'ombre, l'humidité, et les caractéristiques spatiales et spectrales du site (Teillet et Fedosejevs, 1986; Slater *et al.*, 1987; Gu, 1991). Aussi, les erreurs qui peuvent se glisser au moment de la mesure de la réflectance moyenne du site d'étalonnage sont de quatre sources différentes (Kimes *et al.*, 1983; Guenther, 1987; Guyot, 1989; Gu, 1991; Bannari, 1998): instruments de mesures (sensibilité thermique, linéarité, dérèglement et différence entre le champ de visée réel et le champ nominal), méthodologie de mesures (géométrie d'éclairement et de visée, environnement, échantillonnage spatial, éclairement solaire), l'erreur sur la méconnaissance de la sensibilité spectrale en orbite, et conditions expérimentales (atmosphère, géométrie d'éclairement et de visée, environnement et objets à proximité). Quant à la précision des paramètres atmosphériques, elle dépend étroitement de la performance des instruments de mesures (sensibilité thermique, linéarité, ouverture du champ d'observation et dérèglement), de l'habileté de l'opérateur qui manipule les instruments et de la précision du modèle de transfert radiatif utilisé (Gu, 1991; Slater *et al.*, 1987).

Les mesures sur le site d'étalonnage peuvent être réalisées de trois façons différentes selon les budgets disponibles et la précision recherchée (Slater *et al.*, 1987; Santer *et al.*, 1992; Biggar *et al.*, 1991; Teillet *et al.*, 1990). La première méthode permet d'effectuer des mesures des paramètres atmosphériques et de la réflectance moyenne du site directement au sol à l'aide d'un opérateur qui utilise un radiomètre ou un spectroradiomètre portable. La seconde méthode assure la mesure de ces mêmes paramètres, mais à l'aide d'une plate-forme mobile (camion ou véhicule

tout terrain). Quant à la troisième méthode, en plus des paramètres atmosphériques elle mesure la luminance apparente du site à une certaine altitude à l'aide d'un capteur imageur ou non. Les instruments de mesures sont installés sur un avion ou sur un hélicoptère. La luminance mesurée est ensuite corrigée afin d'obtenir une luminance en haut de l'atmosphère à l'altitude du capteur satellitaire (Abel *et al.*, 1988; Markham *et al.*, 1990; Teillet *et al.*, 1999; Slater *et al.*, 1987). L'avantage de cette dernière méthode est, entre autres, le passage de l'avion au-dessus du site qui coïncide avec celui du capteur satellitaire, l'acquisition rapide des données dans la même géométrie d'acquisition que le capteur satellitaire, ce qui minimise l'effet bidirectionnel (Biggar *et al.*, 1994; Slater *et al.*, 1991; Dinguirard et Slater, 1999).

2.3. Les critères d'un bon site d'étalonnage

La méthode d'étalonnage avec vérité terrain nécessite toujours des sites tests bien connus. Les plus populaires sont: le site du désert de gypse à "White Sands" au Nouveau-Mexique (USA), le site de "La Crau" au sud de la France, le sites "Lunar Lake Playa" et "Railroad Valley Playa" au Nevada (USA). Récemment des nouveaux sites ont été sélectionnés, comme le site "Newell County Rangeland" en Alberta au Canada, le site "Dunhuang" dans la province de Gansu en Chine, le site "Tinga Tingana" au désert Strzelecki au sud l'Australie et le site "Uyuni Salt Flats" en Bolivie. Chacun de ces sites a ses propres caractéristiques et son uniformité radiométrique dépend de son homogénéité spatiale, de sa stabilité temporelle, atmosphérique et spectrale. Bien entendu, un site d'étalonnage n'est jamais choisi au hasard, pour être adéquat il doit satisfaire un certain nombre de critères que nous résumons comme suit (Slater, 1985; Slater *et al.*, 1987; Leroy, 1990; Teillet *et al.*, 1997; Scott *et al.*, 1996) :

- Bonne uniformité spatiale : un site très uniforme spatialement permet de minimiser le nombre des mesures au sol (un nombre limité de mesures avec une bonne répartition peut être représentatif de la totalité du site).
- Avoir un caractère lambertien afin d'éliminer ou de minimiser au maximum les effets bidirectionnels.
- Avoir des caractéristiques spectrales proches de celles d'un sol nu: stabilité spectrale.

- Avoir une réflectance élevée de façon à minimiser la contribution atmosphérique au signal.
- Être le plus stable possible temporellement.
- Un nombre de journées claires élevé, sans nuage (ou avec un très faible taux de couvertures nuageuses) et une très faible quantité de précipitation.
- Très faible concentration atmosphérique en aérosols et en vapeur d'eau.
- Très faible variation de l'humidité de surface.
- Sans relief, pour éviter l'effet de l'ombre.
- Le site doit avoir des dimensions suffisamment grandes afin de minimiser l'effet de l'environnement et pour qu'il soit utilisé pour l'étalonnage de nombreux capteurs, y compris ceux qui présentent une faible résolution au sol (Teillet *et al.*, 1997).
- Le site doit être à haute altitude afin de réduire l'effet des aérosols atmosphériques et de la vapeur d'eau (Slater *et al.*, 1996).
- Facilité de repérage sur les images satellitaires.
- Le site doit être de forme carrée ou rectangulaire et orienté dans la direction de la ligne de la trace au sol des capteurs (Teillet *et al.*, 1998b)
- Le site doit être accessible mais d'accès généralement limité à la circulation.

2.4. Analyse bibliographique de l'uniformité spatiale de différents sites test

La réflectance d'une surface naturelle est souvent affectée par les variations de la couleur et de la brillance du sol, de l'humidité, de la rugosité, de la topographie, des effets atmosphériques, de la géométrie d'acquisition et de visée, et de l'effet de l'environnement avoisinant (Price, 1987; Cierniewski et Verbrugge, 1997). En nous basant sur la bibliographie, nous caractériserons chacun des sites test, en fonction de la présence du couvert végétal, des variations climatiques, des problèmes d'uniformité spatiale, du caractère lambertien, de la variation de l'humidité du sol, ainsi que de la stabilité spectrale et temporelle.

2.4.1. White Sands au Nouveau Mexique (États-Unis)

Le site de “White Sands Missile Range” (WSMR) situé dans le bassin de Tularosa dans le sud central du Nouveau Mexique ($32^{\circ} 52' N$, $106^{\circ} 17' O$) est le site le plus utilisé par la NASA pour l'étalonnage absolu des capteurs optiques (Markham *et al.*, 1990; Wheeler *et al.*, 1994). Il est localisé à une altitude de 1200 m environ par rapport au niveau moyen de la mer en couvrant une superficie d'environ 30 km de diamètre et limité par des chaînes de montagnes: “Sacramento” dans l'est et le nord, “San Andreas” dans l'ouest et “Oragon” dans le sud (Teillet et Fedosejevs, 1986; Wheeler *et al.*, 1994; Frouin et Simpson, 1995; Thome *et al.*, 1994). C'est une surface de sable gypseux où on sépare une zone de plaine et une zone de dunes (figure 2.1). La première zone est relativement plate et uniforme, elle respecte la majorité des critères d'un bon site d'étalonnage cités ci-dessus (Slater *et al.*, 1987).

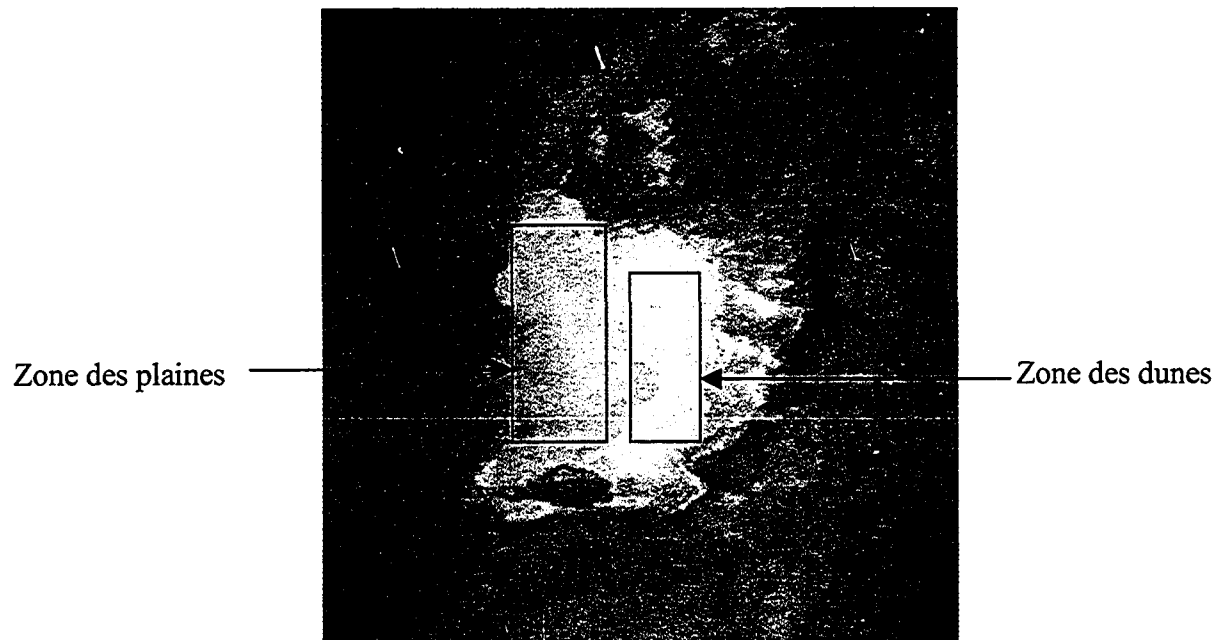


Figure 2.1: Localisation du site de White Sands (Bassin de Tularosa)

2.4.1.1. Caractérisation de la surface de White Sands

La région des plaines localisée à l'ouest des dunes est une surface étendue caractérisée par son uniformité relative. Ses propriétés sont presque lambertiennes et sa réflectance est élevée dans le visible et le proche infrarouge, typiquement de 50 % à 70 % (Thome *et al.*, 1993; Kastner et Slater, 1982; Slater *et al.*, 1987; Teillet *et al.*, 1987). Malheureusement, ces caractéristiques sont locales à certaines places précises et ne sont pas appliquées à la totalité de la surface du site (Markham *et al.*, 1990). En effet, la surface des plaines n'est pas parfaitement horizontale et n'est pas totalement perméable en tous les points, ce qui laisse des parties humides en gardant de l'eau dans les couches externes (5 à 6 cm au-dessous de la surface)(figure 2.2 a). Cette humidité affecte la couleur de la surface du site qui devient sombre après chaque précipitation et favorise le développement des algues et des lichens (Markham *et al.*, 1990; Frouin et Gautier, 1987). La végétation est peu présente dans cette région (figure 2.2 b), sa densité augmente pour devenir relativement forte dans le bord ouest de la région et diminue pour disparaître complètement dans le bord est du site (Wheeler *et al.*, 1994). Quant aux dunes, elles sont relativement stables avec une végétation limitée (Markham *et al.*, 1990). Les problèmes principaux dans cette zone sont les variations de la topographie des dunes qui change à cause des tourbillons très forts dans la régions et l'ombre crée par la topographie des dunes dont la hauteur est d'une moyenne d'environ 6 mètres. Par conséquent, la réflectance de la surface change significativement notamment pour des forts angles zénithaux (Frouin et Gautier 1987; Markham *et al.*, 1990). La photo de la figure 2.3 acquise sur les dunes montre bien les effets des ombres dans cette région. Ces effets compliquent les problèmes bidirectionnels et laissent, par conséquent, cette région indésirable pour l'étalonnage par rapport à celle des plaines de gypse (Wheeler *et al.*, 1994).



Figure 2.2a: Photo de White Sands montrant des eaux emprisonnées dans les couches supérieures de la surface du site.



Figure 2.2b: Photo montrant la végétation dans le site de White Sands



Figure 2.3: Photo de la région des dunes dans le site de White Sands

Par ailleurs, il est très important de rappeler ici que le climat de la région de White Sands est caractérisé par un nombre élevé des journées claires, par conséquent, la présence des aérosols dans l'atmosphère dans cette région est réduite. D'ailleurs, les mesures réalisées sur ce site à 0,55 mm montrent que durant toute l'année l'épaisseur optique de l'atmosphère est moins de 0,1 (Frouin et Simpson, 1995). Sur une période annuelle, la figure 2.4 montre la distribution par mois des journées claires et favorables pour l'étalonnage. C'est durant les trois derniers mois de l'année (octobre, novembre et décembre) que la majorité des journées sont claires, alors que la période des pluies est de juillet à septembre (Wheeler *et al.*, 1994).

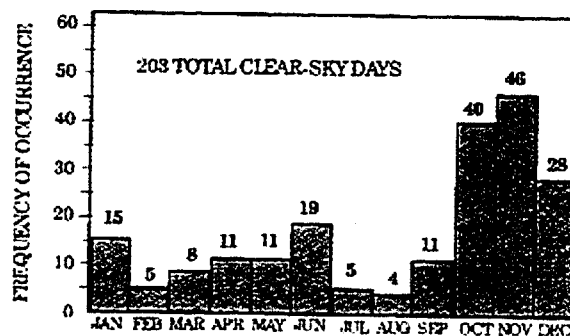


Figure 2.4: La distribution mensuelle des journées claires durant une année sur le site White Sands, du 7 Novembre 1988 à 6 Novembre 1991 (Wheeler *et al.*, 1994)

2.4.1.2. La variabilité temporelle de la réflectance de la surface de White Sands

La variabilité temporelle de la surface du site dépend fortement des variations climatiques d'une saison à l'autre et durant une même journée. En effet, en considérant différentes saisons et différentes années, une étude réalisée par Thome *et al.* (1993) sur les sites les plus secs des plaines de gypse a montré une variation nette de la réflectance dans la bande 2 du capteur TM de Landsat (figure 2.5). Sur cette figure on constate que la réflectance est maximale (0,57) durant la période de juillet et août et minimale en février et mars. Santer *et al.* (1993), a constaté que la surface du site de White Sands a subi une régression non seulement au niveau de son uniformité spatiale mais aussi au niveau de sa brillance.

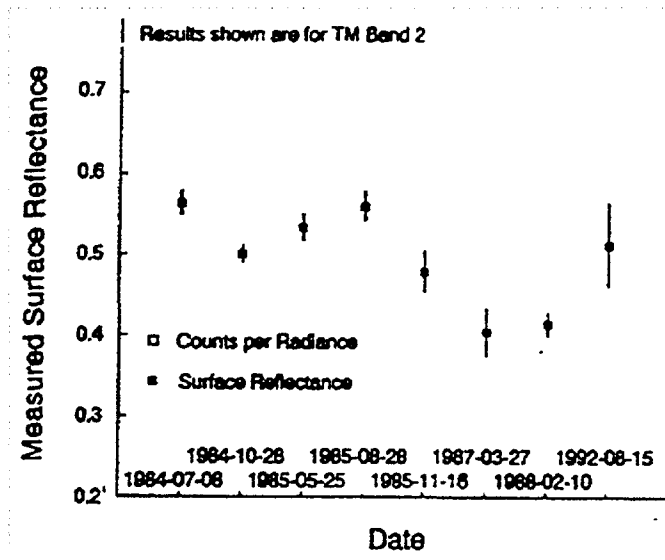


Figure 2.5: Réflectance de la surface mesurée dans la bande 2 du capteur TM sur le White Sands (Thome *et al.*, 1993)

Par ailleurs, Wheeler *et al.* (1994) ont essayé de caractériser le comportement journalier de la réflectance de la surface des plaines de gypse de White Sands en considérant quatre jours à différentes dates de l'année 1991 : 25 janvier, 17 mars, 10 avril et 3 juin. Les résultats obtenus par ces chercheurs durant la journée du 25 janvier montrent que l'albédo de surface a subi une variation d'environ 30 % à cause de l'évaporation qui augmente progressivement durant la journée (figure 2.6). Les mêmes résultats sont obtenus durant la journée du 17 mars, mais avec une évaporation très rapide au début de la matinée causée par un vent fort et une température bien élevée. Par contre, durant les journées du 10 avril et 3 juin l'albédo de surface se montre stable avec une variation inférieure à 3 %. Cette stabilité est due principalement à une humidité uniforme du sol et un vent relativement faible la journée du 3 juin. La seule différence entre ces deux dernières dates c'est que la surface du site est moins humide la journée du 10 avril 1991 avec un albédo de surface relativement élevé.

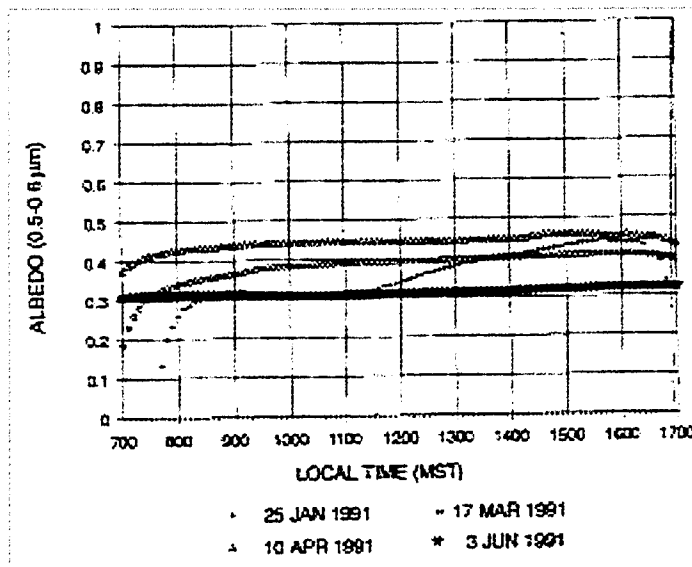


Figure 2.6: Variation de l'albédo du sol de la région des dunes de (WSMR) pendant une journée (Wheeler *et al.*, 1994)

2.4.1.3. Effet de l'humidité de la surface de White Sands

L'humidité est l'un des facteurs majeurs qui affectent la réflectance des sols (Guyot, 1989; Whitlock *et al.*, 1994). Toutefois, il faut noter que les systèmes de télédétection optique ne mesurent que la réflectance de surface. Or, celle-ci devient humide le soir et le matin très tôt à cause de la rosée et du brouillard et s'échauffe graduellement au cours de la journée au fur et à mesure que l'altitude du soleil augmente. Bien entendu, durant une journée le degré de réchauffement varie en fonction de la saison et des conditions climatiques. Cependant, malgré les efforts des chercheurs pour choisir des sites d'étalonnage dans des zones arides sans humidité ou avec un très faible taux d'humidité, la variabilité de la réflectance de la surface du site demeure dépendante du degré de son humidité. Une étude au laboratoire a montré que la réflectance du site de White Sands varie de 10 à 15 % en fonction de l'humidité de sa surface pour différentes géométries d'acquisition et d'éclairement (Walraven et Coulson, 1972). Aussi, d'après Williamson (1975), l'albédo de surface de White Sands est assez influencé par les conditions d'humidité durant toute l'année (figure 2.7). Ce chercheur a mesuré la variation de l'humidité de la surface de White Sands sur deux sites, le premier dans la région des plaines de gypse et le second se localise dans la région des dunes. Les résultats obtenus montrent une variation saisonnière avec des valeurs minimales d'environ 10 % durant l'été, par contre en hiver elle est de l'ordre de 20 % et 30 %, respectivement, sur les dunes et sur les plaines (figure 2.7). En outre, cette étude montre que la région des plaines de gypse est plus humide (21,5 % environ) que celle des dunes (17,8 % environ). Cependant, ces variations dépassent de 2 à 3 fois l'erreur maximale fixée pour un étalonnage avec vérité terrain sur le site de White Sands, soit $\pm 10\%$ (Slater *et al.*, 1987).

Une autre étude menée par Hovis (1966) sur le sable de White Sands dans un état sec et humide montre que dans le visible comme dans l'infrarouge la réflectance du sable humide est plus faible que celle du sable sec, notamment dans le moyen infrarouge où la différence peut atteindre 40 % (figure 2.8). Aussi, les travaux de Walraven et Coulson (1972) ont montré l'influence de l'humidité sur la réflectance de White Sands (figure 2.9a), particulièrement dans la région des

plaines de gypse, ce qui pourrait introduire des erreurs dans le processus d'étalonnage des capteurs (Frouin et Gautier, 1987).

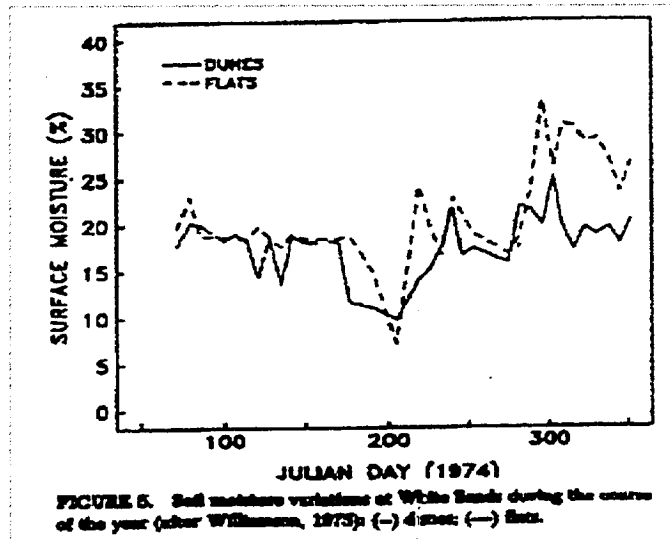


Figure 2.7: Variation annuelle de l'humidité du site de White Sands (Williamson, 1975)

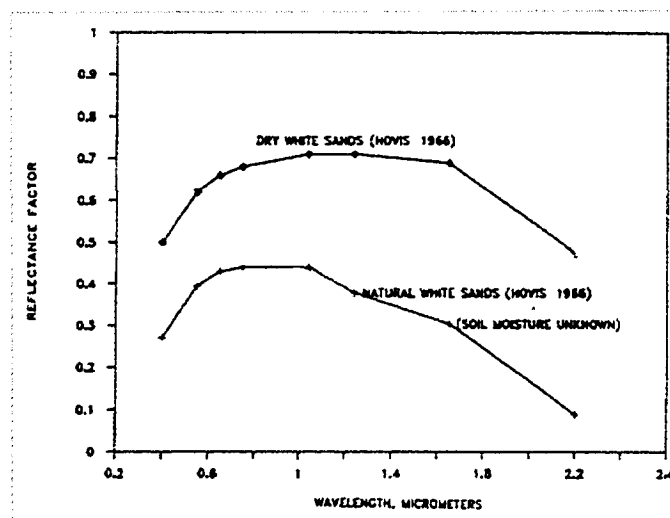
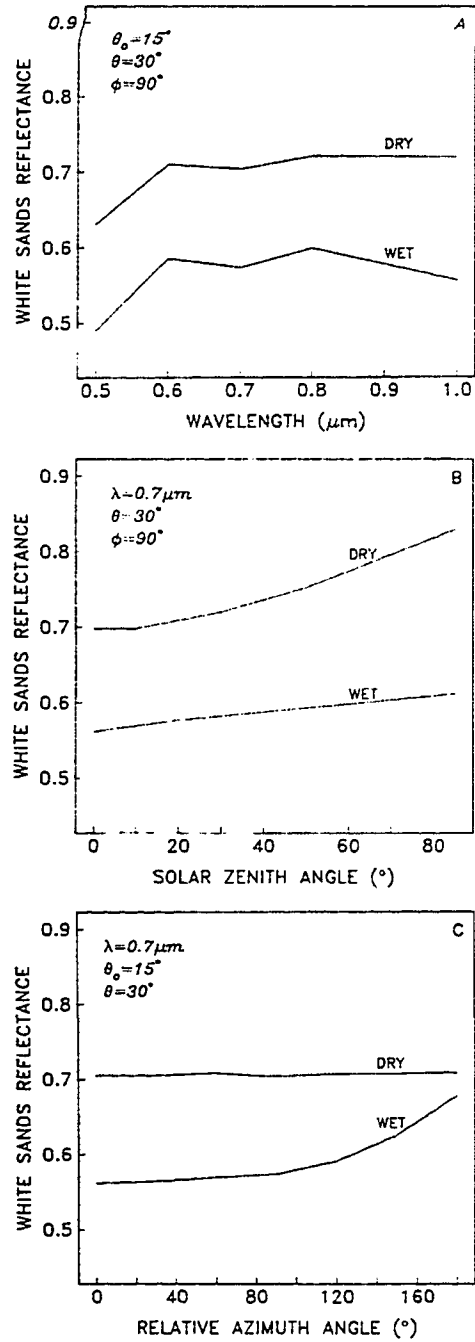


Figure 2.8: Réflectance de White Sands pour deux états de surface : sec et humide (Hovis, 1966, cité par Whitlock *et al.*, 1987)

2.4.1.4. Effet bidirectionnel

Puisque les surfaces naturelles ne sont généralement pas des diffuseurs lambertiens, l'anisotropie de la réflectance de la surface en fonction de la géométrie d'éclairement et d'observation, connue sous le nom anglais "*bidirectional reflectance distribution function*" (BDRF), affecte sérieusement le signal satellitaire. La combinaison des effets de la BDRF aux effets atmosphériques et topographiques engendre de fortes distorsions radiométriques (Kaufman *et al.*, 1997). Afin d'évaluer le caractère lambertien de la surface des plaines de White Sands durant une même journée, Slater *et al.* (1987) ont mesuré la réflectance de surface dans les quatre premières bandes du capteur TM à l'aide du radiomètre Exotech dans une position verticale et sous différents angles d'éclairement solaire (tableau 2.1). Les résultats de cette étude montrent que lorsque l'angle solaire passe de $34,5^\circ$ à $73,4^\circ$, dans les quatre bandes, le facteur de réflectance subit une variation inférieure à 0,5 % (tableau 2.1) ce qui indique le caractère relativement lambertien de cette surface au moins dans cet intervalle de variation de l'angle solaire.

Figure 2.9: Réflectance de la surface de White Sands en fonction de la longueur d'onde, de l'angle zénithal solaire et de visée et de l'angle azimutal (Walraven et Coulson, 1972).



En mesurant la réflectance de la surface de White Sands dans des états sec et humide, sous un angle d'observation de 30°, Walraven et Coulson (1972) ont montré que l'effet de l'angle d'éclairement solaire se manifeste plus sur une surface sèche que humide. En effet, lorsque l'angle solaire passe de 0° à 80°, la réflectance augmente de 15 % et 5 %, respectivement, pour un sable sec et humide (figure 2.9b). En considérant un petit angle solaire (15°), cette étude a montré aussi une très faible dépendance de la réflectance des angles azimutaux notamment pour le sable sec (figure 2.9c). Alors que pour le sable humide, la figure 2.9c montre l'évidence de la composante spéculaire surtout pour une azimut relative entre 130° et 180° (Walraven et Coulson, 1972).

Tableau 2.1: Facteurs de réflectances de la surface de White Sands mesurés dans les quatre premières bandes du capteur TM à l'aide du radiomètre Exotech sous cinq angles solaire (Slater *et al.*, 1987)

Angle solaire en degré	bande spectrale (TM)			
	1	2	3	4
73,4	0,393	0,463	0,497	0,538
63,1	0,397	0,464	0,501	0,542
55,0	0,396	0,464	0,499	0,542
47,0	0,392	0,461	0,497	0,541
45,1	0,393	0,461	0,499	0,541
34,5	0,388	0,454	0,490	0,528

En considérant toujours les quatre premières bandes de TM, Begni *et al.* (1986) ont essayé de mettre en évidence l'effet de l'angle de visée sur la réflectance de surface de White Sands. Deux séries de mesures ont été réalisées sous deux angles solaires différents (43,2° et 37,6°) avec un déphasage horaire de 50 minutes. Pour chacune des deux séries l'angle de visée varie de + 45° à - 45° avec un pas de mesures de 5°. Sur la figure 2.10 nous remarquons que la réflectance augmente de 5 % et 3 %, respectivement, pour les angles solaires de 43,2° et de 37,6°. Markham *et al.* (1990) ont réalisé une autre étude comparative basée sur des mesures de réflectances acquises sur la région des dunes par capteur aéroporté (ASAS), par instrument de mesures au sol (PARABOLA) (Deering *et al.*, 1989) et par des simulations au laboratoire (Walraven et Coulson,

1972). Toutes ces mesures ont été réalisées à 660 nm, environ, sous une géométrie d'acquisition qui varie de $+45^\circ$ à -45° avec un pas de mesures de 15° . Indépendamment du type du capteur et de la méthode d'acquisition, cette comparaison montre que les courbes de réflectances ont la même allure (figure 2.11). Par contre, les réflectances acquises avec des instruments aéroportés sont plus faibles que celles réalisées au laboratoire, cette différence peut être expliquée par l'effet de l'ombre causé par la topographie des dunes, par l'effet de l'environnement et aussi à cause des fluctuations atmosphériques (Markham *et al.*, 1990). Sur la figure 2.11 nous constatons que la réflectance varie de 3 à 8 % lorsque l'angle de visée passe du nadir à une inclinaison de -45° . Dans une autre étude, Teillet *et al.* (1987) ont observé une faible décroissance de la réflectance (1 à 2 %) lorsque l'angle de visée varie de 0° à $25,2^\circ$, aussi bien dans le visible que dans le proche infrarouge.

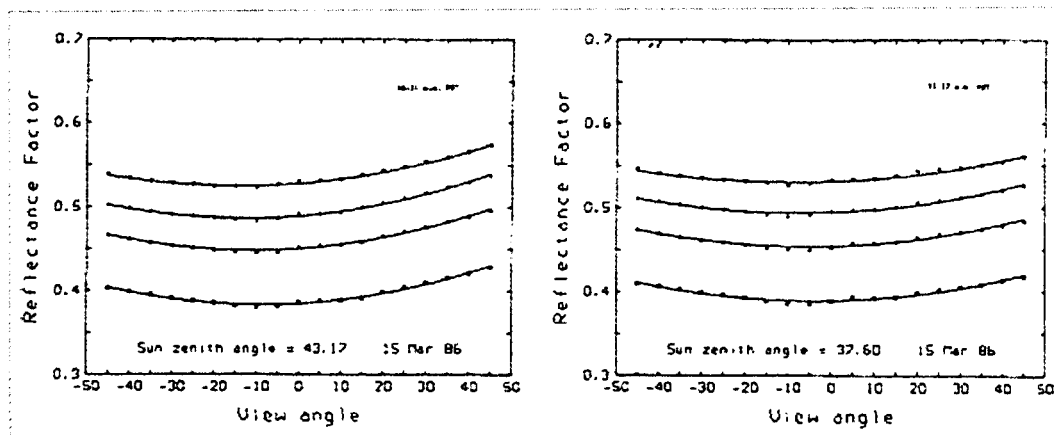


Figure 2.10: Variation de la réflectance dans les quatre bandes de TM (1 à 4 du bas vers le haut) en fonction de l'angle de visée sous deux angles d'éclairement solaire différents (Begni *et al.*, 1986).

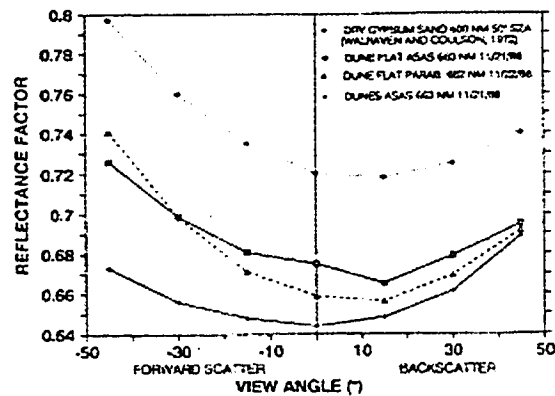


Figure 2.11: Réflectances bidirectionnelles de la région des dunes de White Sands mesurées par le capteur aéroporté ASAS, par l'instrument PARABOLA et par simulation au laboratoire (Markham *et al.*, 1990).

Dans la littérature, plusieurs travaux ont montré que la zone de “Chuck Site”, située dans l’est des plaines gypseuses, est caractérisée par une bonne stabilité spectrale (Teillet *et al.*, 1987; Abel *et al.*, 1993; Thome *et al.*, 1997). Généralement, les propriétés des réflectances des plaines sont différentes de celles des dunes de White Sands. En effet, dans la région des dunes la réflectance est souvent sujette aux effets d’ombre causés par la topographie dans cette zone qui varie continuellement sous l’effet des tourbillons et des vents très présents dans cette région (Wheeler *et al.*, 1994). Quant à la région des plaines, le problème majeure est celui de la variation de l’humidité du sol. Contrairement aux effets de la BDRF, la végétation et l’humidité du sol n’ont relativement qu’une faible influence sur les caractéristiques de la réflectance du site. Selon Slater *et al.* (1987) et Teillet *et al.* (1987) le site de White Sands (Chuck Site) est une surface presque lambertienne surtout si l’acquisition est verticale comme dans le cas du capteur TM de Landsat. Par contre, si le capteur observe la terre dans une position inclinée (par exemple le cas de SPOT $\pm 27^\circ$) les propriétés non lambertiennes des sables gypseux peuvent introduire une erreur d’environ 10 % dans le calcul des paramètres d’étalonnage (Jackson *et al.*, 1990). Cependant, il est donc souhaitable d’utiliser une méthode d’acquisition rapide des réflectances du site afin de minimiser les effets de la BDRF.

2.4.2. Le site la Crau (France)

Afin d'avoir l'indépendance en matière d'étalonnage radiométrique des capteurs satellitaires de la série SPOT, le Centre National des Etudes Spatiales (CNES) a sélectionné, parmi d'autres, le site de La Crau au sud de la France (Santer *et al.*, 1992). Bien entendu, le choix de ce site a fait l'objet de nombreuses études et investigations en Europe et en Afrique du nord par l'équipe de l'Institut Nationale de la Recherche Agronomiques (INRA) d'Avignon.

2.4.2.1. Caractérisation de la surface de La Crau

Le site sélectionné est d'une dimension de 400 m² (20 x 20 pixels de SPOT), il est localisé dans le centre La Crau sèche (60 Km²) au sud de la France à 50 km nord-ouest de Marseille (43° 50' N et 4° 87' E) et à 40 km au sud d'Avignon (figure 2.12) (Gu *et al.*, 1990). C'est une plaine parfaitement plate dont la surface est couverte de galets de dimensions relativement homogènes, entre lesquelles pousse une faible végétation verte à la fin de l'hiver et en printemps, et sèche et sénescence en juillet (figure 2.13) (Gu *et al.*, 1990; Rondeaux *et al.*, 1998). Durant l'hiver, ce site sert essentiellement de pâturage pour les animaux. Le climat de La Crau est de type méditerranéen, sec et ensoleillé pendant l'été mais il peut être frais et pluvieux en hiver (le taux moyen des précipitations moyen est de 610 mm par année). D'après Santer *et al.* (1992), les propriétés optiques de ce site varient peu durant toute l'année. L'ensemble du site de La Crau a été utilisé, entre autres, pour l'étalonnage et l'inter-étalonnage des capteurs HRV de SPOT, TM de Landsat et AVHRR de NOAA (Gu *et al.*, 1991).

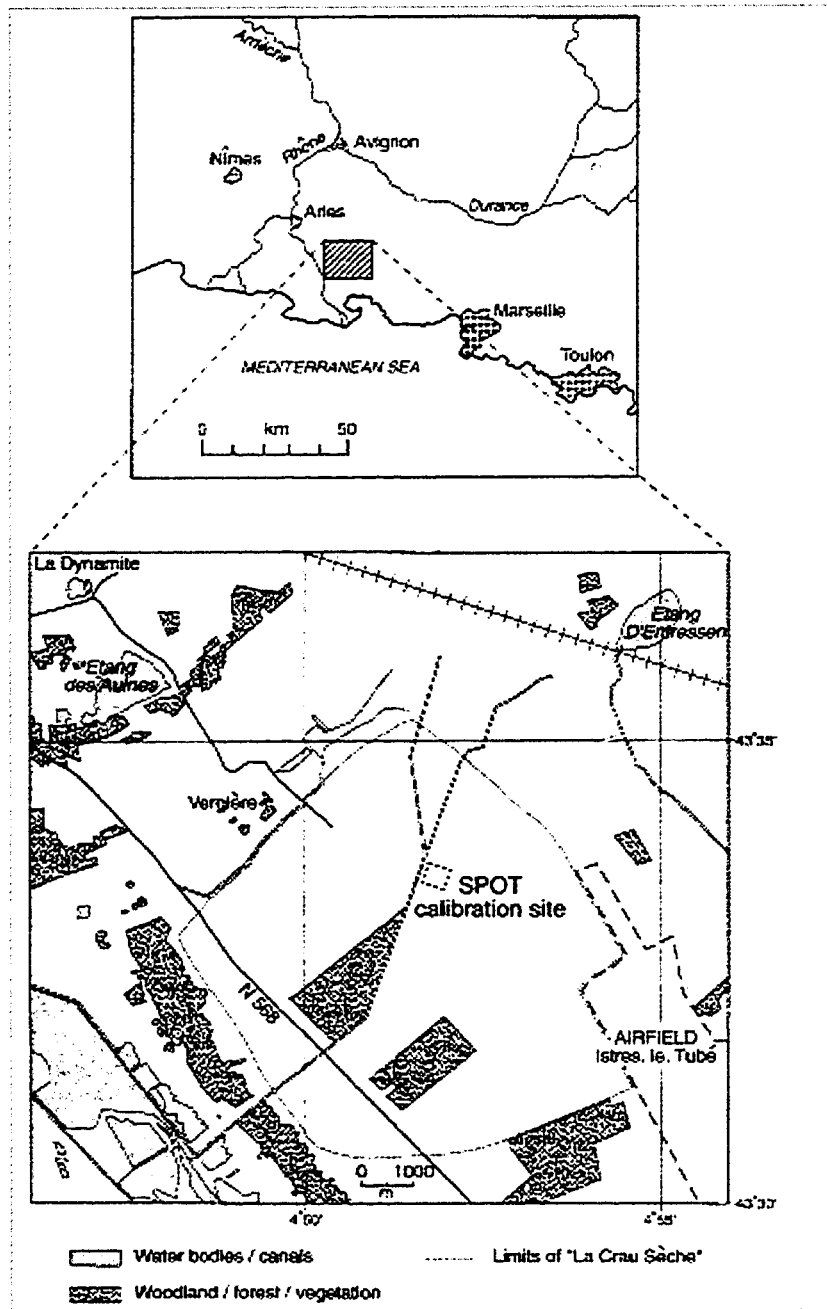


Figure 2.12: Carte de localisation du site de La Crau (Rondeaux *et al.*, 1998)

2.4.2.2. Homogénéité spatiale

Les travaux de Gu *et al.* (1990) ont permis de montrer que la surface de La Crau est relativement homogène avec un coefficient de variation inférieur à 2 % dans les 3 canaux de SPOT, mais dans certaines parties de La Crau ce coefficient peut atteindre 6 %. Ces chercheurs estiment que les faibles variations remarquées sur la réflectance sont dues essentiellement aux contrastes entre le sol et la végétation. Ils ont montré également que lorsque la dimension du pixel augmente de 0,5 m à 19,6 m le coefficient de variation diminue (figure 2.14). Cette figure montre également que les coefficients de variations de la réflectance sont plus faibles dans le proche-infrarouge (XS3) que dans le visible (XS1 et XS2). Cela est certainement dû au fait que les galets qui recouvrent le sol (figure 2.13) ont une réflectance plus élevée dans le visible que dans le proche infra-rouge. Ainsi, dans le visible, le contraste entre galets et végétation est élevé alors qu'il est relativement faible dans le proche infra-rouge. La variabilité de la réflectance qui est due principalement à l'hétérogénéité de la répartition des plantes, est donc plus faible dans le canal XS3 que dans les canaux XS1 et XS2 (Gu, 1991).



Figure 2.13: Photo de la surface de La Crau (Cierniewski et Verbrughe, 1997).

2.4.2.3. Variabilité spectrale et temporelle de La Crau

Dans le visible comme dans le proche infrarouge, le spectre moyen de la surface de La Crau ne présente aucune bande d'absorption remarquée (figure 2.15) (Gu *et al.*, 1992). Il est relativement continu avec une augmentation régulière du visible au proche infra-rouge, l'influence de la végétation éparse est bien limitée (une diminution légère à 680 nm qui correspond à la bande d'absorption de la chlorophylle). Cependant, la surface de La Crau n'est pas parfaitement uniforme, elle est couverte des galets dont les dimensions varient de 1,5 cm à 10 cm ce qui crée des ombres (figure 2.13), de végétation éparse (sèche ou verte en fonction de la saison) et du sol complètement nu (Cierniewski et Verbrugge, 1997). Ces trois composantes principales ont été mesurées à l'aide d'un spectroradiomètre par Rondeaux *et al.* (1998) afin de montrer le comportement spectral de chacune des composantes et sa contribution dans la réflectance résultante au capteur (figure 2.16). Notons que les mesures des galets et végétations ont été prises dans le point "hot SPOT" pour éviter les effets d'ombres, alors que celles du sol nu ont été acquises au nadir. La figure 2.16 présente les spectres (350 à 2500 nm) des trois composantes considérées, nous constatons que toutes les courbes ont un comportement similaire dans le visible et le proche infrarouge, car la végétation était sèche au moment de l'acquisition des mesures. Par contre, dans le moyen infrarouge une remarquable bande d'absorption distingue le spectre de la végétation des deux autres composantes. Le contraste entre galets, végétation et sol nu est seulement de 5 % dans le proche infra-rouge, alors qu'il est de 10 % dans le visible et le moyen infra-rouge. Aussi, nous constatons une différence nette entre ces trois spectres notamment entre 2000 et 2500 nm. Cependant, d'après Rondeaux *et al.* (1998) la réflectance résultante mesurée au-dessus du site de La Crau doit être corrigée des effets de l'ombre causés par les galets et de la variation saisonnière de la réflectance de la végétation de La Crau.

Quant à l'évolution temporelle du site, elle a été étudiée par Gu *et al.*, (1990) en calculant le coefficient de variation des réflectances moyennes au cours du temps (figure 2.17). Bien que les calculs ont été effectués sur des données brutes non corrigées des effets atmosphériques, les résultats montrent, dans les trois canaux de SPOT, que le site est bien stable dans le temps.

Également, ces résultats montrent le faible effet de l'environnement, d'ailleurs Santer *et al.* (1992) présumant que cet effet ne peut être significatif que si la taille du site dépasse 10 km de diamètre.

Figure 2.14: Effet de la dimension des pixels sur le coefficient de variation de la réflectance de la surface de La Crau (Gu *et al.*, 1990).

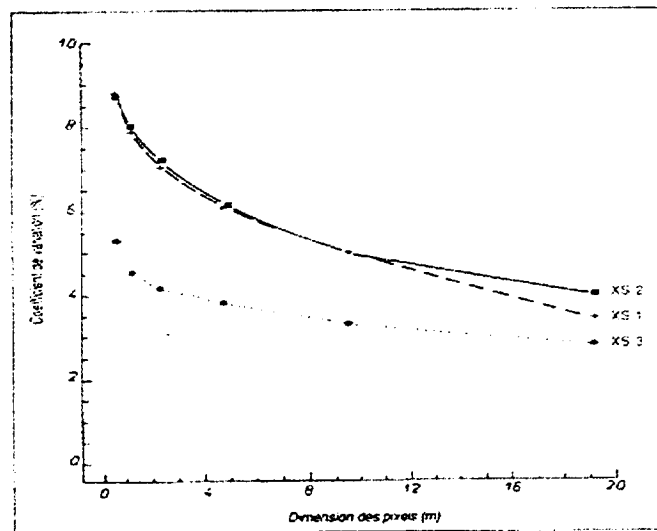
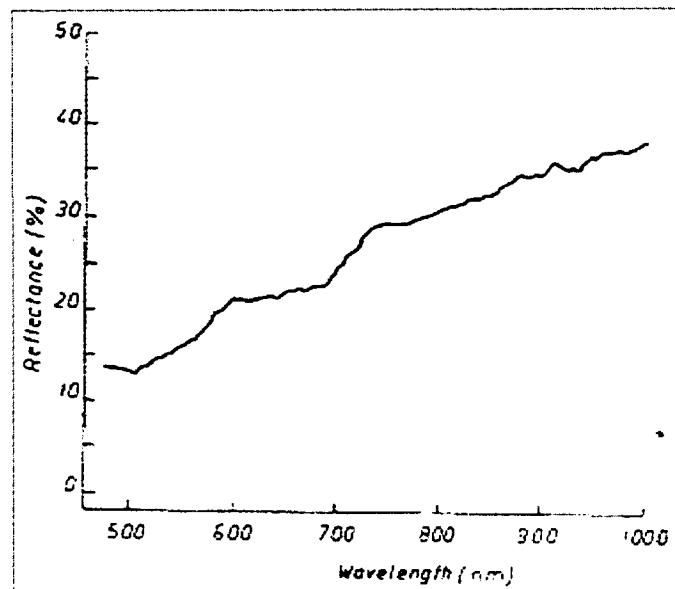


Figure 2.15: Spectre moyen de la surface de La Crau entre 400 nm et 1000 nm (Gu *et al.*, 1992).



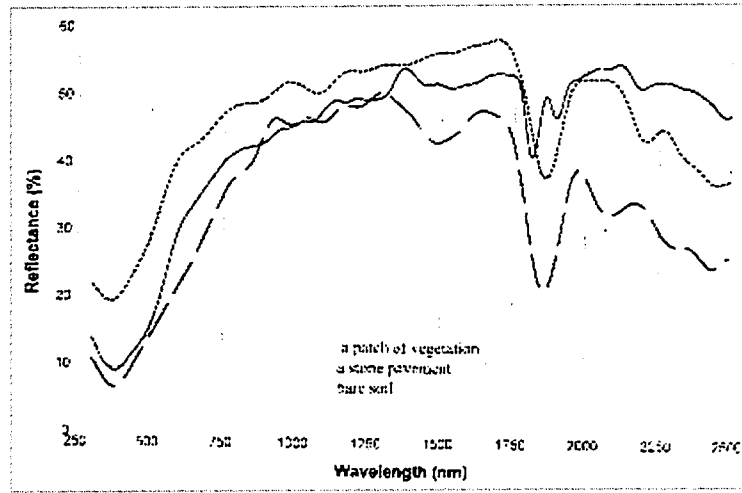


Figure 2.16: Réflectances spectrales des différentes composantes de la surface de La Crau: Galets, _____ Sol nu, ----- Végétation (d'après Rondeaux *et al.*, 1998).

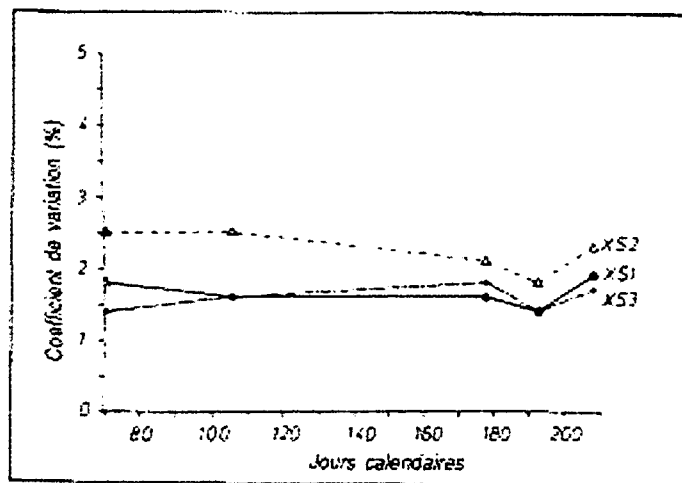


Figure 2.17: Évolution temporelle du coefficient de variation de la luminance moyenne de La Crau (Gu *et al.*, 1990).

2.4.2.4. Effets bidirectionnels

Comme nous avons discuté auparavant, le facteur de réflectance bidirectionnel dépend généralement de la nature de la surface, des angles solaire et d'observation, de la longueur d'onde, etc. (Moran *et al.*, 1995, Rondeaux *et al.*, 1998). Une analyse de la BDRF de la surface de La Crau durant la journée du 20 septembre 1988 a montré que la réflectance de ce site est pratiquement constante (figure 2.18). Sur cette figure on constate une très légère évolution du facteur de réflectance en fonction de la hauteur du soleil, notamment dans les canaux 2 et 3 de SPOT (Gu *et al.*, 1991). Aussi, Rondeaux *et al.* (1998) ont indiqué une augmentation de la réflectance d'environ 3 % pour une variation de l'angle solaire de 20° à 70°, montrant ainsi l'indépendance de la réflectance prise au nadir de la variation de l'angle solaire.

La figure 2.19 représente dans un demi-espace la variation relative du facteur de réflectance directionnel de La Crau pour les canaux HRV2 et HRV3 (Gu, 1991). L'azimut par rapport au soleil est indiqué sur le cercle extérieur, alors que les cercles concentriques correspondent aux différentes inclinaisons de la visée. Le cercle central (inclinaison de la visée de 30°) délimite le cône dans lequel sont comprises toutes les visées de SPOT. Notons que les résultats de cette étude montrent que la variation relative du facteur de réflectance directionnel est similaire pour les deux canaux du visible (XS1 et XS2), la raison pour laquelle juste la figure qui correspond à XS2 est présentée. En considérant les graphiques de la figure 2.19 et les données du tableau 2.2, nous constatons que les variations de la réflectance du sol de La Crau, dans le visible comme dans le proche infrarouge, peuvent atteindre facilement $\pm 10\%$ entre une visée verticale et une visée oblique de $\pm 30^\circ$ de SPOT. Selon Gu (1991), la hauteur du soleil affecte la réflectance oblique et la réflectance verticale de la surface de La Crau. Dans le plan vertical perpendiculaire à la direction des rayons solaires le facteur de réflectance est peu sensible à la hauteur du soleil et à l'inclinaison de la visée. Dans le plan vertical parallèle aux rayons solaires le facteur de réflectance est relativement indépendant de l'angle solaire pour des inclinaisons de la visée n'excédant pas $\pm 20^\circ$. Pour les fortes inclinaisons de l'angle de visée le facteur de réflectance dépend alors de la hauteur du soleil. Rondeaux *et al.* (1998) ont obtenu des valeurs maximales du facteur de réflectance bidirectionnel, dans la direction de rétro-diffusion (qui correspond à

l'azimut 180°), particulièrement dans le canal de 1,6 mm, pour une visée de 55° . Alors que les valeurs les plus faibles de ce facteur sont obtenues dans la direction du soleil (azimut 0°). Ces résultats montrent le caractère non lambertien de la surface de La Crau ce qui nécessite donc de corriger l'effet de la variation angulaire de la réflectance pour l'étalonnage des capteurs satellitaire. En outre, ces erreurs de BDRF peuvent être évitées en effectuant des mesures au sol avec la même géométrie de visée que le satellite (Gu *et al.*, 1992).

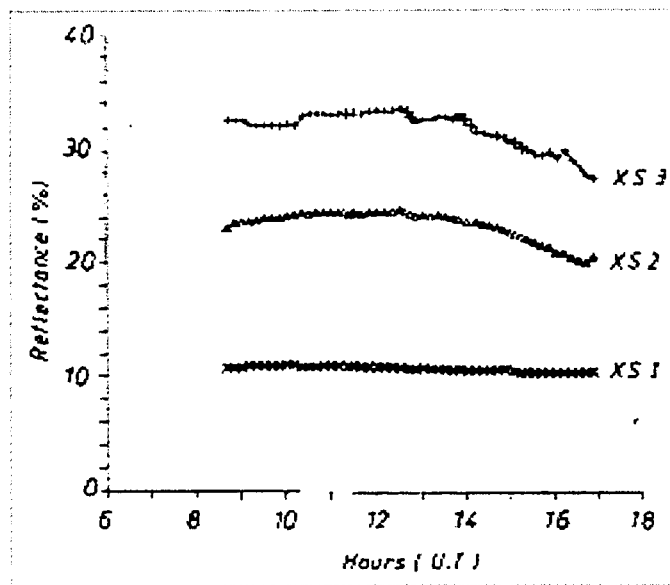


Figure 2.18: variation de la BDRF de La Crau pendant la journée du 20 Septembre 1988 (Gu, 1991)

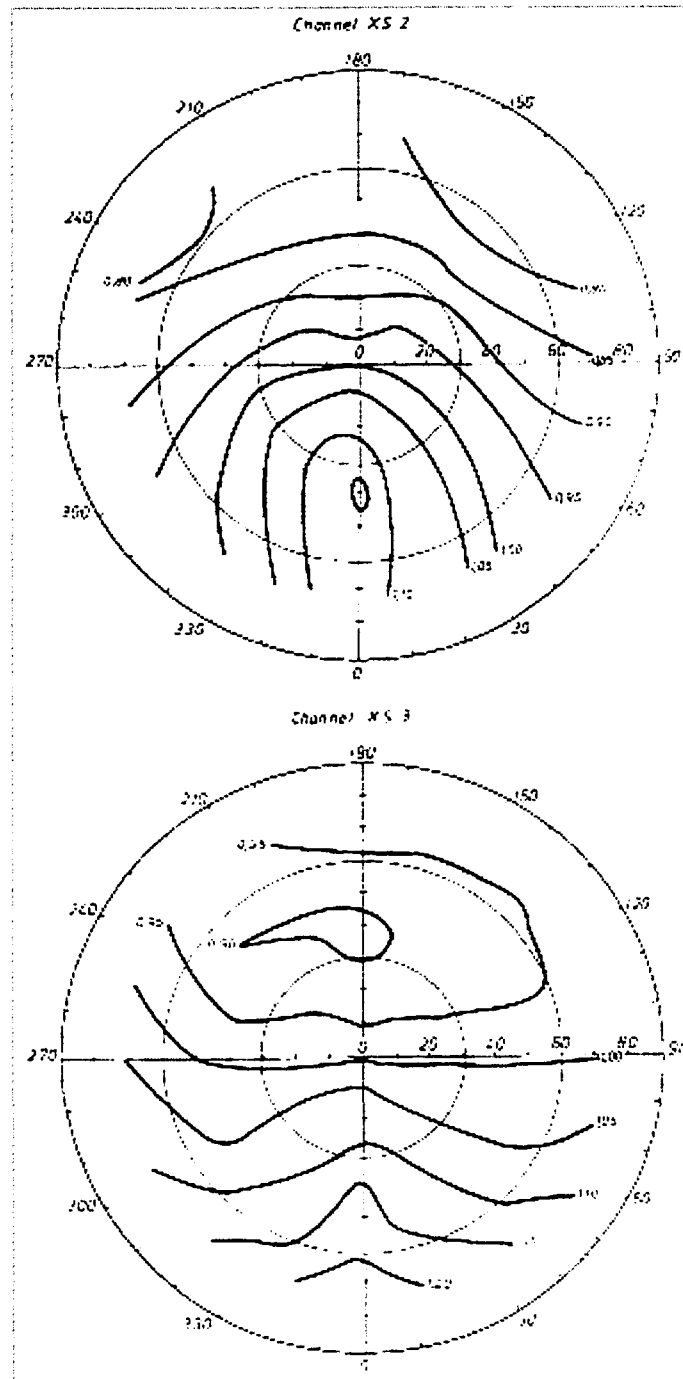


Figure 2.19: Variation relative du facteur de réflectance directionnel de la surface de La Crau dans les canaux HRV2 et HRV3 de SPOT (Gu, 1991)

Tableau 2.2: Variation de l'azimut de balayage de SPOT en fonction de la date et de l'inclinaison de la visée comptée positivement vers l'est (Gu, 1991).

Dates	L'angle de visée de SPOT (en degré)						
	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30
21 Juin	44,5	44,0	43,0	41,0	140,0	141,5	142,5
21 Mars , 23 Septembre	59,5	59,5	58,0	56,0	125,0	126,5	127,5
21 Décembre	66,5	66,0	65,0	63,0	118,0	119,5	120,5

D'après cette étude bibliographique, nous pouvons dire que malgré un coefficient de variation des réflectances moyennes inférieur à 2 % dans les trois canaux de SPOT, la surface de La Crau n'est pas parfaitement uniforme. Elle est couverte des galets de différentes tailles, d'une végétation éparse qui varie d'une saison à l'autre et d'une couche de lichens causée par l'humidité et la proximité du site de la mer (Cierniewski et Verbrugge, 1997). Aussi, les mesures de la BDRF ont indiqué une variation de $\pm 10\%$ pour un depointage maximal de SPOT. Donc le caractère non lambertien de la surface de La Crau doit être pris en compte dans les étalonnages radiométriques des capteurs effectués sur ce site.

2.4.3. Railroad Valley Playa (Nevada , USA)

2.4.3.1. Localisation et caractérisation

Le site de Railroad Valley Playa est localisé approximativement à 300 miles dans le nord de Las Vegas et à 100 miles dans l'est de Tonopah au centre du Nevada ($38^{\circ} 28' N$ et $115^{\circ} 41' O$) (figure 2.20). Son climat est continental avec un taux de journées claires élevé et une variation importante des moyennes de précipitations (Teillet *et al.*, 1995). Ses dimensions sont approximativement de 12 km par 12 km à une altitude de 1435 m au dessus du niveau de la mer (Teillet *et al.*, 2001). Cette région est caractérisée par un sol plat est très homogène et constituée

de dépôts lacustres compacts riches en argile formant une surface relativement brillante avec un faible couvert végétal (Teillet *et al.*, 2001) (figure 2.20). Grâce à ses dimensions larges, ce site est bien adapté à l'étalonnage radiométrique des capteurs de faible résolution comme AVHRR de NOAA, Végétation de SPOT-4, SeaWIFS (Sea viewing Wide Field-of-view Sensor), MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) de EOS, MERIS (Envisat Medium-Résolution Imaging Spectroradiometer) et GLI (Global Imager) de ADEOS-2 (Teillet *et al.*, 1997).

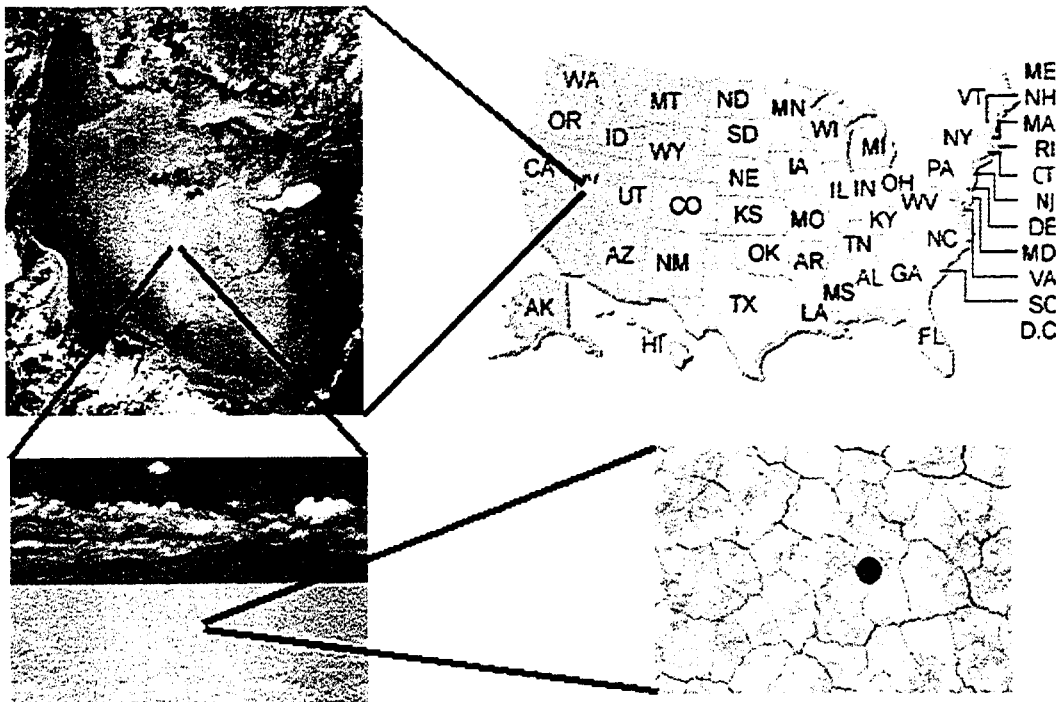


Figure 2.20 : Localisation de Railroad Valley Playa

2.4.3.2. Uniformité spatiale

Selon Scott *et al.* (1996), l'uniformité spatiale du site de Railroad Valley Playa dépend de la résolution spatiale de l'image examinée. En se basant sur l'analyse des images acquises par trois capteurs différents (HRV, TM et AVHRR), ces chercheurs ont montré que lorsque la taille du site de Railroad Valley Playa passe de 3 km par 3 km à une taille de 2 km par 2 km, la variation de

l'uniformité spatiale passe de $\pm 2,5\%$ à $\pm 1,5\%$. Cette variation peut être expliquée par la diminution de l'effet de l'environnement lorsque la taille du site change. Dans la même région, l'analyse des images de AVHRR en considérant une surface de 3 km par 3 km montre une variation de l'uniformité spatiale inférieure à 1 %. En considérant la totalité du site sur une image AVHRR de NOAA, Teillet *et al.* (1998b) ont montré que le coefficient de variation est d'environ 2 % aussi bien pour la bande 1 que pour la bande 2.

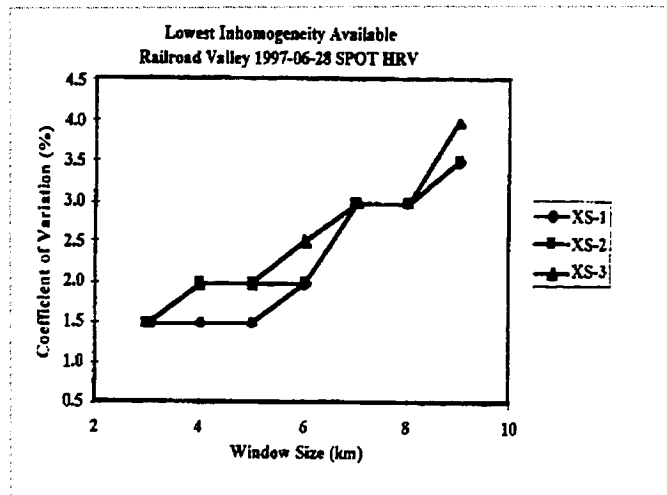


Figure 2.21: Coefficient de variation (en %) en fonction de la taille de la fenêtre (N km par N km) sur le site de RVPN (Teillet *et al.*, 1998b).

Afin de caractériser l'uniformité spatiale de chaque N km² du site de Railroad Valley Playa, Teillet *et al.* (1998b) ont calculé le coefficient de variation en considérant une fenêtre dont la taille varie de 3 km par 3 km à 20 km par 20 km avec un pas d'échantillonnage de 1 km. Évidemment, la zone de ce site qui montre le plus faible coefficient de variation sera la plus uniforme et, par conséquent, sera utilisée pour l'étalonnage des capteurs. Les résultats obtenus par ces chercheurs sur des données SPOT simulées sont illustrés sur la figure 2.21. Nous constatons comment le coefficient de variation augmente en fonction de la taille du site. Il montre la plus faible valeur (1,5 %) pour une fenêtre de taille 3 km par 3 km. Et il est égale à 2% et à 3 %, respectivement, lorsque la taille du site passe de 5 km par 5 km à 8 km par 8 km. Du fait qu'il est souhaitable d'avoir un site de taille suffisamment large pour couvrir plusieurs pixels

de différents capteurs, un site de 7 km par 7 km peut être considéré puisque le coefficient de variation reste sous 3 % (Teillet *et al.*, 1998b; Mitchell *et al.*, 1997). Toutefois, cette étude a montré que certaines places du site sont moins uniformes bien que la moyenne du coefficient de variation indique une faible variabilité.

2.4.3.3. Stabilité spectrale et temporelle

Scott *et al.* (1996) ont montré que le site Railroad Valley playa (RVPN) présente une bonne stabilité spectrale entre 0,6 et 2,0 μm . Dans une autre étude basée sur 11 lignes de vols du capteur aéroporté CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), couvrant un site de 7 km par 7 km de RVPN, Teillet *et al.* (2001) ont montré que la signature spectrale de ce site (corrigée des effets atmosphériques et filtré des bruits résiduels de l'instrument) et sa déviation standard montrent une faible variation aussi bien dans le visible que dans le proche infrarouge (figure 2.22). Sur cette figure nous remarquons que la signature spectrale de ce site augmente progressivement en fonction de la longueur d'onde avec une très légère dépression à 0,65 μm environ, qui peut être due à la présence de la végétation.

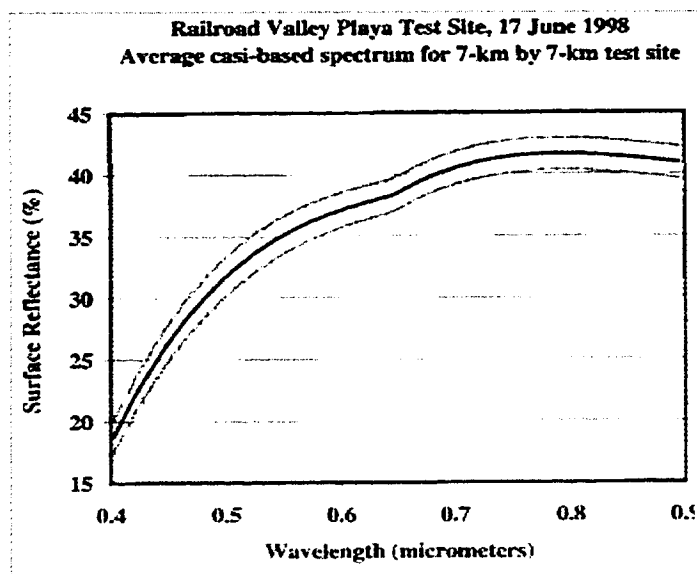


Figure 2.22: Spectre moyen de la réflectance et sa déviation standard du site de RVPN mesurées à l'aide du CASI en considérant une taille de 7 km par 7 Km (Teillet *et al.*, 2001)

Par ailleurs, d'après Teillet *et al.* (1995), Railroad Valley playa subit des variations temporelles importantes à cause des changements de la structure de la surface causés par le vent et par les inondations après les précipitations et la fonte des neiges. En se référant à des images acquises sur ce site à différentes dates et durant différentes années, Scott *et al.* (1996) ont estimé que l'uniformité spatiale de la réflectance de ce site est maintenue de la mi-saison de l'été à la fin de l'année. Quant à la réflectance bidirectionnelle de ce site, elle indique un comportement non lambertien de la surface et que ce caractère diminue au fur et à mesure que l'altitude du soleil augmente.

2.4.4. Lunar Lake Playa Nevada (LLPN)

Lunar Lake Playa Nevada (LLPN) est un site localisé à 20 km au sud-ouest de Railroad Valley playa ($38^{\circ} 23' N$ et $115^{\circ} 59' O$) à une altitude de 1750 m et couvrant une surface totale de 2 km par 4,5 km (Teillet *et al.*, 1995). La région centrale de ce site (0,5 km par 0,5 km) est une surface lisse et homogène, caractérisée par son comportement presque lambertien, par sa brillance élevée (supérieur à 0,5) et par son uniformité spatiale (Teillet *et al.*, 1995; Shepard *et al.*, 1991; Scott *et al.*, 1996). Malheureusement, ces caractéristiques sont éphémères à cause des variations temporelles qui marquent cette région (Teillet *et al.*, 1995). En effet, après chaque précipitation ou chaque tempête de neige, la surface de LLPN devient complètement inondée, ce qui modifie ses caractéristiques après son dessèchement. Ces transformations sont accentuées de plus par le vent très fort dans ces régions.

La structure du sol de LLPN se constitue, en dépôts lacustres compacts riche en argile formant une surface composée des tuiles des dimensions variant de 20 cm à 30 cm de diamètre le sud du playa et de 10 à 20 cm dans le nord (similaire à la surface de railroad Valley). La composition minéralogique de ce site est constituée approximativement de 90 % des sméctites, kaolinites et vermiculites, avec moins de 10 % des carbonates, quartz, feldspath et des micas (Shepard *et al.*, 1991, 1993). Ces compositions sont mal réparties sur la totalité de la surface du site. Les données multitemporelles du radar ERS-1 ont montré que le comportement de rétro-diffusion de ce site est affecté par les effets de l'humidité de sa surface (Teillet *et al.*, 1995). Quant à la végétation,

elle est moins influençant, elle se caractérise par sa rareté dans cette région (Teillet *et al.*, 1995). Ce site est bien convenable pour l'étalonnage des capteurs de hautes résolutions spatiales aéroportés et satellitaires comme HRV de SPOT, TM de Landsat-5, ETM+ de Landsat-7, etc. (Van *et al.*, 1993; Teillet *et al.*, 1999). Malheureusement, à cause de ces petites dimensions, il ne peut pas être employé avec fiabilité pour les capteurs satellitaires de faible résolution spatiale à cause de l'effet de l'environnement.

2.4.5. Newell County Rangeland (NCRA) (Alberta, Canada)

2.4.5.1. Localisation et Caractérisation

Le site Newell County Rangeland (NCRA) est sélectionné par les chercheurs du centre canadien de télédétection comme un site alternatif pour l'étalonnage des capteurs satellitaires et aéroportés (Teillet *et al.*, 1997; 2001). Il est localisé au nord-ouest de Medicine Hat en Alberta ($50^{\circ} 18' N$ et $111^{\circ} 38' O$) avec une dimension de 10 km (E-O) par 5 km (N-S) et à une altitude de 754 mètres par rapport au niveau moyen de la mer (figure 2.23). Il est très plat et uniforme, et constitué principalement de prairies (Teillet *et al.*, 2001, 1998a) (figure 2.23). Le climat de cette région se caractérise par des faibles précipitations (une moyenne de 280 mm par année), un taux d'évaporation élevé (800 mm par année) et un taux de journées claires élevé avec des vents forts (Smith *et al.*, 1995). Il constitue avec ceux du Nevada (Railroad Valley Playa et Lunar Lake Playa) et celui de White Sands, les sites de référence pour les activités QUASAR (Assurance de qualité et référence de stabilité) (Teillet *et al.*, 1997).

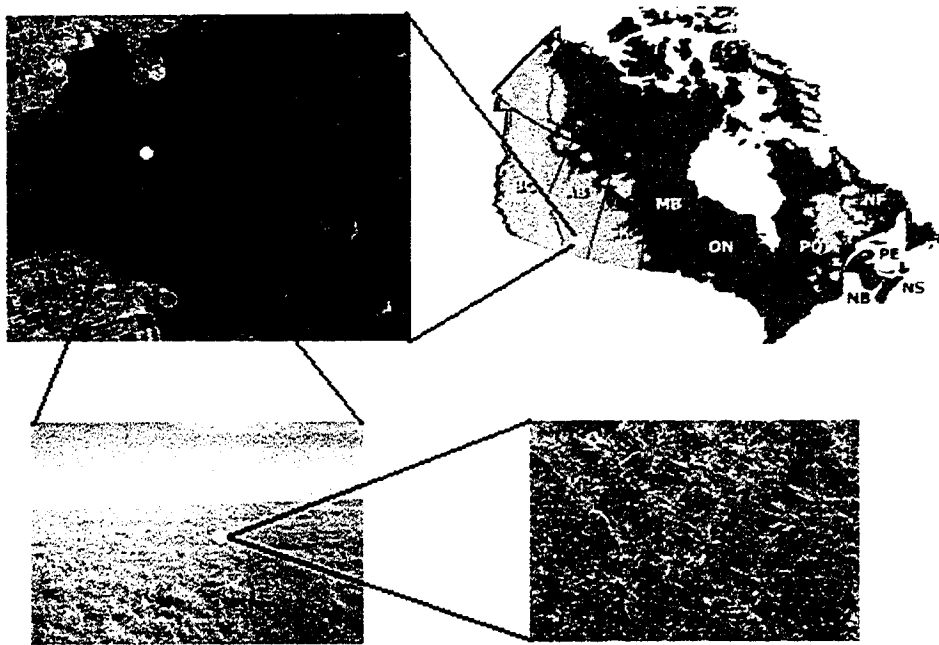


Figure 2.23 : Localisation de Newell County

2.4.5.2. Uniformité spatiale et spectrale

Afin de caractériser l'uniformité spatiale du site de Newell County Rangeland, Teillet *et al.* (1998b) ont calculé le coefficient de variation en fonction de la taille du site à partir des images HRV de SPOT. Les résultats obtenus par ces chercheurs illustrent bien comment le coefficient de variation augmente en fonction de la dimension de la fenêtre et aussi en fonction de la bande spectrale considérée (figure 2.24). Comparativement aux canaux vert et proche infrarouge où le coefficient de variation ne dépasse pas 2,5 % en fonction de la taille de la fenêtre, le coefficient de variation le plus élevé est de 3,5 % dans la bande rouge pour une fenêtre de 8 km par 8 km. Par contre, une fenêtre de 6 km par 6 km assure un coefficient de variation inférieur ou égale à 2% dans les trois bandes de SPOT (figure 2.24). D'après Teillet *et al.* (1998b), dans la perspective d'avoir un site qui pourra être utilisé par des capteurs satellitaires de différentes résolutions spatiales, un site de 7 km par 7 km peut être considéré puisque le coefficient de variation reste inférieur à 3 %. Toutefois, cette faible valeur du coefficient de variation ne

signifie pas une uniformité spatiale parfaite du site, car elle est la moyenne de plusieurs pixels dont l'uniformité est différente à cause de l'humidité ou par l'existence des marécages sur plusieurs points au niveau du site.

Figure 2.24: Coefficient de variation (en %) en fonction de la taille du fenêtre (N km par N km) pour le site de NCRA (Teillet *et al.*, 1998b)

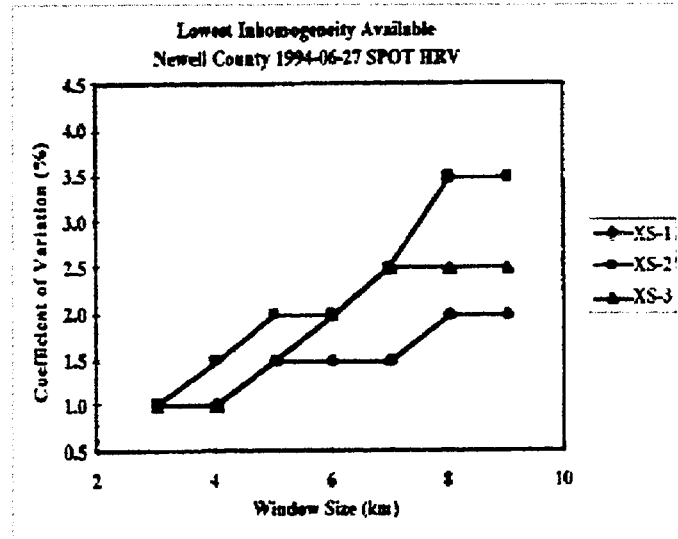
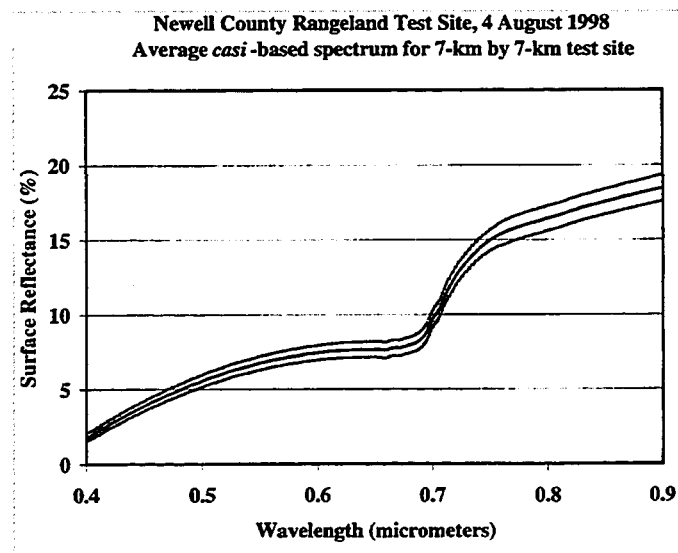


Figure 2.25: La réflectance moyenne et sa déviation du site de NCRA mesurées à l'aide du CASI en considérant une taille de 7 km par 7 Km (Teillet *et al.*, 2001).



Par ailleurs, en exploitant des images hyperspectrales aéroportées, Teillet *et al.* (1998a) ont essayé de caractériser les variations spectrales du site Newell County Rangeland de l'Alberta. La figure 2.25 montre la signature spectrale moyenne de ce site dans le visible et le proche infrarouge. Cette signature est calculée à partir de 11 ligne-images du capteur CASI en considérant un site d'une taille de 7 km par 7 km (Teillet *et al.*, 2001). L'allure générale de cette courbe de réflectance ne reflète ni la signature pure d'une végétation photo-synthétiquement active totalement couvrante ni celle d'une végétation complètement sénescente. Il est donc probable que ce site se compose d'une végétation mixte (vivante et sénescente) avec une composante sénescente dominante, comme il est probable que c'est un couvert formé d'une végétation complètement homogène avec un vieillissement avancé (perte progressive des pigments chlorophylliens) puisque les données ont été acquises durant le mois de août.

2.4.6. Dunhuang (Chine)

2.4.6.1. Localisation et caractérisation

Depuis 1986, le Centre for Remote Sensing in Geology (CRSG) et le China Centre for Resources Satellites Data and Application (CRESDA) ont piloté plusieurs projets pour la sélection d'un site d'étalonnage des capteurs optiques des satellites de la chine (Wu *et al.*,1997). Le site "Dunhuang" situé dans la partie nord-ouest du désert de Gobi à 35 km de la ville de Dunhuang a été sélectionné. Il est d'une superficie de 400 par 400 mètres, situé au milieu d'une région désertique de 30 par 40 km, homogène et sans relief (40° 12' N, 94° 26' E). L'altitude de la partie nord du site est de 1250 m, celle du milieu est de 1160 m, alors que la partie du sud est à 1105 m.

La surface alluviale du site est généralement de couleur grise, elle est formée par une mixture de graviers, de poussières et de sables, dont les dimensions varient entre 1 et 15 cm. Celles de grandes dimensions se trouvent à la périphérie du côté sud du site. Celui-ci est dénué de végétation au centre, mais elle est peu abondante dans ses bords. Le climat est aride continental avec un taux de journées claires élevé (112 par année, avec un maximum de jours claires dans la seconde moitié de l'année) et un faible taux de précipitations (34 mm par année, avec un

maximum de précipitations en juillet). L'atmosphère est généralement sec avec un taux d'humidité moins de 60 % à chaque mois et une température annuelle moyenne d'environ 9,5°C (Wu *et al.*,1997). En outre, les activités humaines et industrielles sont trop faibles dans la région de Dunhuang ce qui n'affecte pas la transmission atmosphérique au-dessus du site. D'ailleurs, Wu *et al.* (1997) présument que les effets de la vapeur d'eau sont très limités et que l'épaisseur atmosphérique totale est d'environ 0,11 à 0,5 mm, et une épaisseur optique des aérosol inférieur à 0,08.

2.4.6.2. Stabilité spectrale et uniformité spatiale

Il est important de noter ici qu'ils sont très rares les travaux sur ce site, la seule source d'information que nous avons trouvé se limite uniquement aux travaux de Wu *et al.* (1997). Les résultats de ces chercheurs sont le fruit d'une coopération entre le Centre for Remote Sensing in Geology de Chine et l'équipe de l'INRA d'Avignon en France dans le cadre d'une étude de caractérisation du site Dunhuang. Deux radiomètres ont été utilisés pour mesurer les réflectances de la surface du site dans deux directions perpendiculaires, un photomètre solaire pour les mesures atmosphériques et un radiomètres thermique ont aussi été utilisés afin de mesurer la température de brillance. Les résultats de cette étude montrent que la réflectance de la surface du site de Dunhuang est relativement stable entre 0,4 et 2,5 mm (figure 2.26), avec une valeur moyenne de 26 % dans cet intervalle spectral. À cause de la nature sèche du site, les bandes d'absorption d'eau n'ont qu'une faible influence sur le spectre de réflectances.

Le tableau 2.3 résume les résultats des mesures de réflectances de la surface du site de Dunhuang en simulant les bandes spectrales de SPOT et celles de TM (n: nombre de mesures, ρ : réflectance, σ : déviation standard, Cv: coefficient de variation). Nous remarquons que les valeurs moyennes des réflectances varient de 17 % pour 400 nm à 32 % pour 1600 nm. Pour les deux séries de mesures, le tableau 2.3 montre une excellente homogénéité du site avec un coefficient de variation des réflectances inférieur à 3 % dans les bandes de SPOT (malgré la différence dans la géométrie d'acquisition entre les deux séries, verticale le 28 août et incliné à 24° le 29 août) et moins de 0,8 % dans les bandes de TM, et une déviation standard de la réflectance moins de 1 %.

Les mesures thermiques ont affirmé l'homogénéité spatiale et spectrale du site. D'après ces résultats nous pouvons dire que le site de Dunhuang constitue un bon site d'étalonnage radiométrique des capteurs satellitaires.

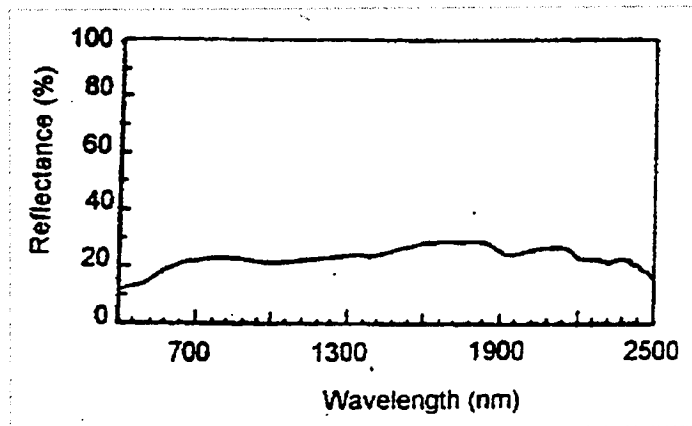


Figure 2.26: Spectre de réflectance de la surface du site de Dunhuang (Wu *et al.*, 1997).

Table 2.3: Réflectance moyenne du site de Dunhuang pour les bandes de SPOT et TM (Wu *et al.*, 1997)

Paramètres	SPOT			Landsat				
	XS1	XS2	XS1	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5
28/8/96								
n	201	201	104	160	160	160	160	160
ρ (%)	20,1	23,1	25,7	17,2	21,1	23,6	24,5	31,8
σ (%)	0,51	0,68	0,65	0,56	0,59	0,70	0,73	0,48
Cv(%)	2,5	2,9	2,5	3,3	2,8	3,0	3,0	1,5
29/8/96								
n	196	196	98	158	158	158	158	158
ρ (%)	22,6	26,1	29,3	17,0	20,9	23,4	24,3	31,6
σ (%)	0,53	0,50	0,52	0,42	0,49	0,62	0,67	1,00
Cv(%)	2,3	1,9	1,8	2,5	2,3	2,7	2,8	3,2

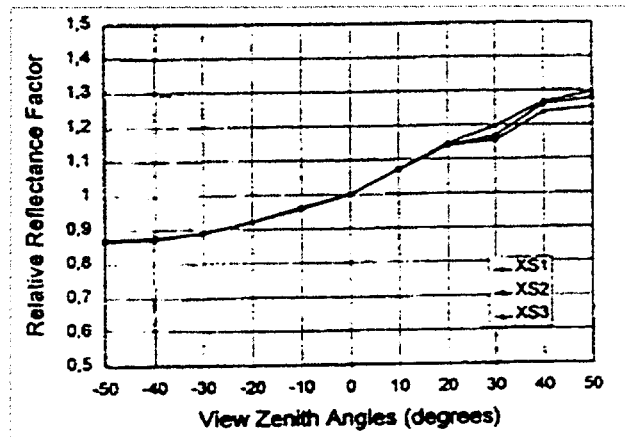


Figure 2.27: Variation angulaire de la réflectance de la surface de Dunhuang dans les trois bandes de SPOT (Wu *et al.*, 1997).

2.4.6.3. Effet bidirectionnel

Afin de quantifier les propriétés directionnelles de la surface du site de Dunhuang, Wu *et al.* (1997) ont simulé des réflectances dans les trois bandes spectrales de SPOT. Les mesures ont été acquises dans le plan principal du soleil sous un angle d'éclairement de 33° en variant l'angle d'observation de -50° (anti-spéculaire) à $+50^\circ$ (spéculaire) avec un pas de 10° . La figure 2.27 illustre bien le caractère non lambertien du site de Dunhuang dans le visible et le proche infrarouge. La réflectance augmente de 0,87 à 1,3 lorsque l'angle de visée passe de -50° à $+50^\circ$ par rapport à la verticale. Cependant, bien que ce site présente plusieurs avantages pour l'étalonnage des capteurs satellitaires, il est nécessaire de prendre en considération l'effet bidirectionnel lors de l'utilisation de ce site pour l'étalonnage des capteurs comme HRV de SPOT en mode incliné ou les capteurs à large FOV comme AVHRR de NOAA et Végétation de SPOT.

2.4.7. Sonora (Mexique)

Le site Sonora est localisé à l'extrême nord-ouest du Mexique (32° N, 114° W), c'est une surface désertique plate et large (> 50 km), située à une altitude d'environ 200 mètres et caractérisée par

une végétation éparses mais très uniforme (figure 2.28). Les conditions atmosphériques sont très favorables avec un ciel clair est presque toujours ensoleillé, un faible taux d'aérosol et un climat sec (Whitlock *et al.*, 1987). La réflectance de la surface de ce site est de l'ordre de 0,3 dans le visible, elle montre une faible variation avec une déviation standard égale à 1,5 %.

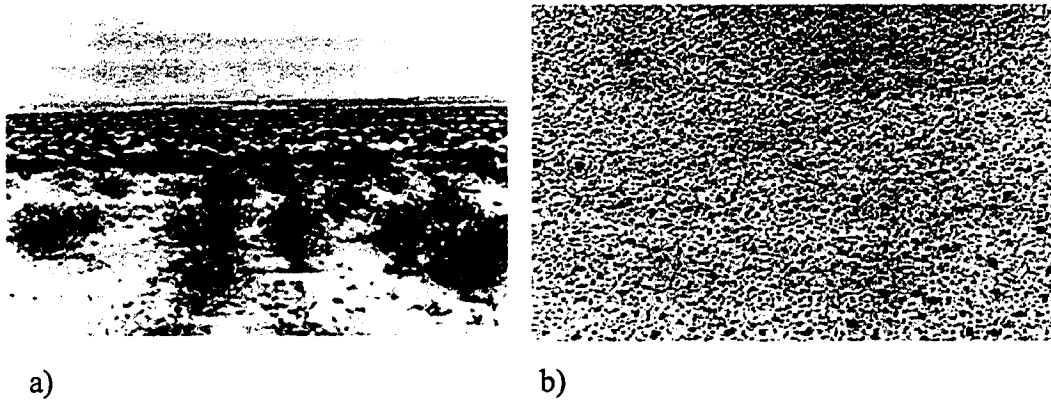


Figure 2.28: photos du désert de Sonora, (a) vue oblique, (b) vue verticale (Whitlock *et al.*, 1987).

2.4.7.1. Effets bidirectionnels

La figure 2.29 illustre la variation du facteur de réflectances de la surface du désert de Sonora dans le visible, le proche et le moyen infrarouge, pour une visée verticale et différents angles zénithaux solaires. Généralement, les spectres augmentent régulièrement de 0,4 mm à 1,7 mm par la suite il y a une faible diminution entre 1,7 et 2,2 mm. Aussi, au fur et à mesure que l'angle zénithal solaire augmente, nous remarquons une réduction significative du spectre de réflectance, dans le visible, le proche et le moyen infrarouge (Whitlock *et al.*, 1987). Cette variation est probablement due aux ombres causés par la végétation forte présente dans cette région.

2.4.7.2. Variabilité spectrale et humidité de surface

Du fait que la végétation présente dans le désert du Sonora est relativement sèche durant la période d'acquisition des mesures (mai 1985), la figure 2.30 montre une faible influence de la

végétation sur les spectres, absence de l'absorption dans le rouge. Toutefois, afin de mettre en évidence l'effet de la mixture du couvert végétal du site de Sonora (végétation morte et vivante, et la présence relativement faible de la sauge sèche), Whitlock *et al.* (1987) ont calculé le rapport entre le spectre du couvert et celui du sable nu. En effet, la figure 2.30 montre que ce rapport de réflectances (végétation / sable) est contrôlé par la nature du couvert végétal. Il est inférieur à l'unité entre 0,75 μm et 1,2 μm ce qui indique l'effet de la végétation sénescente, et supérieur à 1 entre 1,2 μm et 1,8 μm ce qui montre l'effet d'une végétation verte. Alors que pour des longueurs d'ondes au delà de 1,8 μm ce rapport est affecté par la présence de la sauge sèche.

Par ailleurs, en effectuant des mesures de réflectances au laboratoire sur des échantillons du désert de Sonora à différents taux d'humidité, Whitlock *et al.* (1987) ont montré une variation significative de la réflectance en fonction de la longueur d'onde. Lorsque le taux d'humidité augmente de 0 à 16 %, la réflectance peut être réduite d'environ 50 %. D'après l'analyse des rares travaux qui étaient réalisés sur ce site, nous pouvons dire qu'il est n'est pas convenable pour l'étalonnage des capteurs optiques de télédétection.

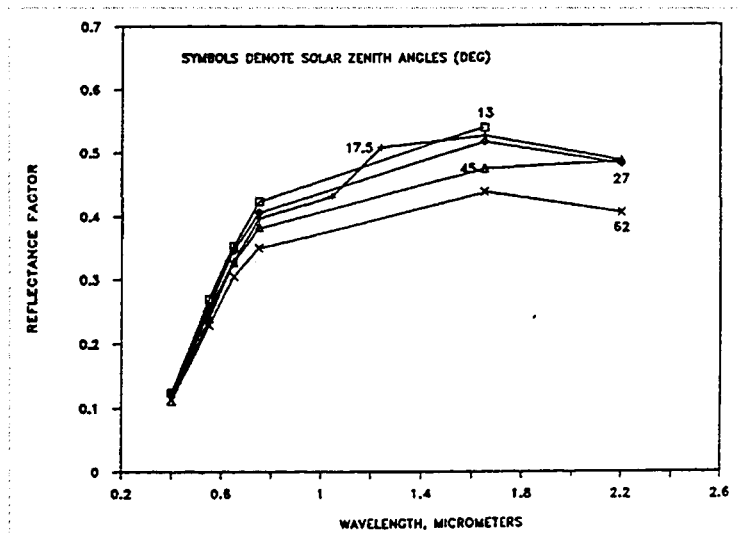


Figure 2.29: Variation du facteur de réflectance de la surface du désert de Sonora dans le visible, le proche et le moyen infrarouge, en fonction de l'angle d'éclairement solaire (Whitlock *et al.*, 1987).

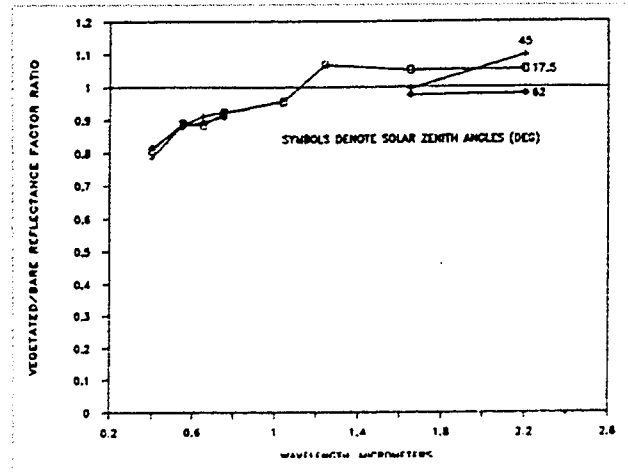


Figure 2.30: L'effet de la présence de la végétation sur la réflectance du site de Sonora (Whitlock *et al.*, 1987)

2.4.8. Les sites désertiques (Afrique du nord et péninsule arabe)

Les sites désertiques ont souvent été utilisés pour l'étalonnage multitemporel des capteurs AVHRR de NOAA (Staylor 1990; Kaufman et Holben, 1993), METEOSAT (Cabot *et al.*, 1994) et HRV de SPOT (Henry *et al.*, 1993). Dans ces régions les couverts végétaux sont très rares et les activités humaines sont absentes (Santer *et al.*, 1991). La réflectance apparente acquise au-dessus de ces sites est supposée parfaitement stable dans le temps et tout changement temporel peut donc être automatiquement attribué aux changements dans la sensibilité radiométrique du capteur. Le potentiel des régions désertiques de l'Afrique du Nord et de la péninsule Arabe pour l'étalonnage des capteurs satellitaires a fait l'objet de plusieurs études (Cosnefroy *et al.*, 1993 et 1996; Delphin *et al.*, 1991; Santer et Roger, 1993). Ces régions sont aussi utilisées pour inter-étalonner les capteurs à grand champ angulaire, tels que: Végétation-SPOT, MODIS, POLDER et MERIS (Delphin *et al.*, 1991).

La méthode basée sur les sites désertiques dépend fortement de la résolution spatiale du capteur, de l'effet bidirectionnel, des variations spatio-temporelles du site et de sa topographie. Pour la localisation et la sélection des sites désertiques candidats, la méthode exploite des images de

faible résolution spatiale comme AVHRR et METEOSAT. Les sites sélectionnés doivent présenter les critères suivants (Cosnefroy *et al.*, 1996; Kaufman *et al.*, 1990): leur tailles doit être de plusieurs dizaines de pixels, une bonne uniformité spatiale, une excellente stabilité temporelle, une faible couverture nuageuse, une faible variabilité atmosphérique, une faible couverture végétale, des faibles effets directionnels, absence ou faible variation de la topographie. En outre, il faut y avoir suffisamment d'images acquises au-dessus des sites candidats durant un intervalle de temps assez large et avec une correction géométrique précise ce qui permettra leur superposition.

Afin d'analyser la couverture nuageuse sur les sites sélectionnés, le satellite ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) d'observation des conditions météorologiques peut être utilisé. Quant aux précipitations et toutes autres informations relatives aux conditions météorologiques, elles peuvent être obtenues à partir des stations météorologiques les plus proches des sites candidats. En plus des images AVHRR et METEOSAT, l'utilisation des images de large résolution spatiale (HRV, TM, ETM+) permet d'analyser avec plus de précision les structures géomorphologiques des sites, puisque le relief change la radiométrie de l'image et permet d'amplifier l'effet bidirectionnel (Cosnefroy *et al.*, 1996).

Une étude de caractérisation a été effectuée par Delphin *et al.* (1991) sur différents sites désertiques de l'Afrique du Nord et la péninsule Arabe basée sur des images de METEOSAT et de AVHRR a permis de sélectionner 6 sites situés au: Soudan (1 site), Libye (3 sites), Algérie (1site) et en Arabie Saoudite (1 site). Les coordonnées en latitude et longitude de ces sites ainsi que leurs tailles sont indiquées dans la tableau 2.4. Les résultats de cette étude montrent que :

- La variabilité temporelle de ces sites est de 2 % à l'échelle de la semaine et de 3 % à l'échelle saisonnière. Les écarts ainsi relevés au cours de l'année sont dus à l'évolution temporelle des sites couplée aux effets directionnels liés aux variations d'éclairement solaire.
- Ces zones sont spatialement homogènes, leur étude géomorphologique a montré qu'elles sont constituées des dunes et pierres et elles sont dénuées de végétation.

- La variabilité spectrale de ces sites est très faible, elle est de l'ordre de 1,5 % sur une durée de 8 ans des données de NOAA-AVHRR. Les principaux écarts sont dus aux nuages et aux aérosols qui introduisent une perte de contraste dans les deux canaux de AVHRR.
- La principale source d'erreurs est celle liée aux effets directionnels. En effet, l'acquisition des images METEOSAT-4 avec des angles zénithaux solaires variant de 0° à 60° révèle des variations bidirectionnelles de 10 % pour les sites du Sahara de l'Afrique du Nord et 15 % pour le site de l'Arabie Saoudite (Delphin *et al.*, 1991).

Par ailleurs, une autre étude réalisée par Cosnefroy *et al.* (1993) en exploitant les images de METEOSAT et de NOAA a permis de sélectionner 3 sites parmi 20 candidats. Cette sélection a été basée sur l'uniformité spatiale et la variabilité temporelle à différentes échelles et longueurs d'ondes. Le tableau 2.5 résume les coordonnées en latitude et longitude et le taux de précipitation par année, ainsi que le taux des journées claires des 3 sites sélectionnés. Généralement, les images de METEOSAT montrent que les 3 sites sélectionnés sont uniformes spatialement et complètement dénués de la végétation. Les données météorologiques indiquent qu'ils sont des zones plus secs pendant toute l'année avec une moyenne des précipitations variante de 0,1 mm à 1,9 mm par mois dépendant du site. Quant à l'étude géomorphologique à partir des images HRV de SPOT et TM de Landsat, elle a révélé que ces sites (à l'exception de celui de Soudan qui est caractérisé par un couvert des galets et pierres) sont constitués des dunes de sables de quelques kilomètres et d'altitude qui varient de 10 m à 100 m avec des inter-dunes variantes de quelques dizaines de mètres à 2-3 km. En outre, ces résultats montrent que la stabilité temporelle de ces sites est bien contrôlée par les effets directionnels (variation horaire et saisonnière) qui causent des changements dans la réflectance de surface variant de 8 à 15 %. Toutefois, si les effets directionnels sont corrigés, le taux de variation temporelle sera réduit à l'ordre de 1 à 2 % (Cosnefroy *et al.*, 1993).

Tableau 2.4: Latitudes et longitudes en degré et taille des zones désertiques choisies (Delphin *et al.*, 1991)

Site	latitude N-O	longitude N-O	latitude S-E	longitude S-E	taille (km par km)
Soudan	26,5 E	23 N	29,2 E	20,6 N	250 par 250
Libye 1	22,8 E	29,9 N	27,2 E	27,7 N	450 par 250
Libye 2	21,8 E	28,5 N	26,6 E	26,2 N	450 par 250
Libye 3	18,8 E	28,6 N	22,7 E	26,2 N	500 par 250
Algérie	1,2 E	31,7 N	02,6 E	30,0 N	450 par 250
Arabie Saoudite	42,2 E	29,8 N	46,1 E	28,3 N	250 par 200

Tableau 2.5: localisation des sites désertiques sélectionnés par Cosnefroy *et al.* (1996)

Zone	Nom	Latitude (N)	Longitude (E)	Précipitation (mm / année)	Journée claires (% / année)
1	Soudan	21,74°	28,22°	0,2	69
2	Egypte	27,12°	26,10°	0,4	65
3	Libye	28,55°	23,39°	0,8	59

2.5. Étude comparative entre les différents sites

Il est bien évident que tous les sites présentés dans le cadre de cette étude sont sélectionnés parmi d'autres par des scientifiques afin de servir comme des sites d'étalonnage radiométrique des capteurs de télédétection. Toutefois, le problème de l'uniformité est bien fondamental, et chacun des sites montre des forces et des faiblesses, ce qui explique d'ailleurs l'existence de plusieurs sites. Nous avons soulevé des problèmes relatifs à la variation de l'humidité des surfaces des sites et qui affecte

automatiquement leur brillance, la présence de la végétation qui cause des variations spectrales, la non "lambertianité" de la surface qui intensifie les effets bidirectionnels, la topographie qui engendre des problèmes d'ombre et accentue aussi les effets de la BDRF, la stabilité atmosphérique et finalement la taille du site, qui peut augmenter l'effet de l'environnement et limiter son utilisation par les capteurs de faible résolution spatiale, si elle est petite. À la lumière de cette analyse bibliographique nous avons résumé dans le tableau 2.6 les caractéristiques (avantages et inconvénients) des différents sites considérés dans cette étude (Omari *et al.*, 2000).

L'analyse de ce tableau révèle que tous les sites sont pratiquement non lambertiens et souffrent des effets bidirectionnels à différents degrés en fonction de la rugosité et le taux d'humidité de la surface, du relief ainsi que de la végétation présente. Si nous considérons le site de White Sands (qui à l'avantage d'être le plus documenté et le plus caractérisé par les chercheurs), évidemment c'est la zone des plaines qui est exploitable et utilisable dans les opérations d'étalonnage. Contrairement à la zone des dunes qui cause plusieurs problèmes à cause de la topographie et l'ombre, la surface des plaines a un comportement à peu près comme celui du site LLPN. Elle est presque lambertienne notamment pour les capteurs opérant avec un angle d'observation au nadir. Alors qu'elle engendre une variation du facteur de réflectance d'environ 10% pour des angles de visées inclinés. Également, le coefficient de réflectance du site de La Crau varie d'environ 10% entre une observation au nadir et une observation maximale de SPOT, $\pm 27^\circ$. Ces variations sont causées par les ombres créées par les galets qui couvrent la surface du site et la végétation passablement présente dans cette région.

Malgré la couleur claire et brillante des sites désertiques de l'Afrique du nord et de la péninsule Arabe, la variation continue de leur topographie à cause des tempêtes de sable engendre des problèmes de BDRF. Quant au site désertique de Sonora, les effets bidirectionnels sont principalement causés par la présence d'une végétation arbustive et par l'effet de son ombre. Ainsi, les investigations sur les sites RVPN et Dunhuang ont montré que leurs surfaces sont non lambertiennes et qu'il faut prendre en considération les effets bidirectionnels lors de leur utilisation pour l'étalonnage des capteurs. Alors que

le problème des effets de la BDRF n'est pas caractérisé dans la littérature pour le site de Newell County.

Tableau 2.6: synthèse des caractéristiques des différents sites considérés dans cette étude

Site	Humidité	Brillance	Effet de la végétation	Effet de la BRDF	Effet du relief	Effet de l'Ombre	Taille	Effets atmosphériques	Caractère lambertien	Altitude
White Sands	⊕	⊕	○	○1 ⊕2	⊕1 ⊕2	⊕1 ⊕2	⊕	⊕	○1 ⊕2	⊕ ⊕
La Crau	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	○	○	○	⊕	⊕
RVPN	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
LLPN	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	○	⊕
NCRA	⊕	⊕	**	*	⊕	⊕	⊕	○	⊕	⊕
Dunhuang	⊕	○	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Sonora	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Deserts	⊕	⊕	⊕	⊕	○	○	⊕	⊕	⊕	○

⊕ : pauvre et variable ⊕ : bon ○ : acceptable
 1 : réfère aux plaines 2 : réfère aux dunes * : non caractérisé
 ** : la surface de NCRA est un couvert végétal

Comme nous l'avons expliqué auparavant, une réflectance bien élevée permet de réduire l'influence des effets atmosphériques sur le signal électromagnétique et minimiser l'impact des erreurs des mesures. Cependant, bien que les sites cités dans cette étude se caractérisent généralement par des réflectances supérieures à 0,1 dans toutes les longueurs d'ondes, leur degré de brillance varie pour différentes raisons. Bien entendu, la brillance de la surface de chacun des sites est liée, entre autres, à son humidité, à la présence de la végétation et à l'ombre qui peut être causé à la fois par la topographie et la présence de la végétation. En outre, les précipitations et la fonte des neiges inondent certains sites, ce qui modifie la brillance et les caractéristiques de leurs surfaces après dessèchement. D'ailleurs, comme résumé dans le tableau 2.6, à l'exception des sites désertiques et le site de Dunhuang, la variation de l'humidité de surface est un problème qui affecte tous les autres sites. Cependant, malgré la brillance de la surface du site

(comme White Sands ou LLPN) le facteur d'humidité d'une part, baisse la valeur de la réflectance de surface et d'autre part, favorise le développements de lichens, des algues et une faible végétation herbacée. Ainsi, les variations climatiques entre l'été et l'hiver dans le bassin méditerranéen affectent l'humidité et les propriétés optiques du site de La Crau en lui donnant une couleur relativement sombre. Comparativement aux autres sites, la surface du site de Newell County Rangeland en Alberta est moins brillante à cause de la variation phénologique du couvert, la présence d'une végétation sénescence locale ou dispersée et l'humidité qui reste présente à l'intérieur du couvert.

Par ailleurs, la stabilité temporelle d'un site est très importante pour l'étalonnage et le contrôle de la radiométrie des capteurs satellitaires à long terme. De plus un site parfaitement stable permet l'inter-étalonnage entre différents capteurs sans la nécessité d'un passage simultané au-dessus du site. La majorité des sites présent dans cette étude subissent des variations saisonnières en fonction de leurs climats et comme discuté ci-dessus leur stabilité temporelle est contrôlée, entre autres, par la variabilité de l'humidité de leurs surfaces et la variation phénologique de la végétation. Généralement, les sites désertiques qui reçoivent le plus faible taux des précipitations, sont les plus stables avec un taux de variation de 2 % à l'échelle de la semaine et de 3 % à l'échelle de la saison. À cause de leur stabilité dans le temps et l'absence de toute activité humaine, ils peuvent assurer non seulement un suivi radiométrique multitemporel des capteurs optiques mais également la réalisation d'un étalonnage absolu avec une précision du même ordre ou mieux que White Sands (avec la condition que le site soit sans relief). Tandis que la variation saisonnière de la végétation est le problème principale qui affecte la réflectance de surfaces des sites de La Crau, Sonora et Newell County Rangeland. Ainsi, la majorité des sites présentés dans cette étude se caractérisent par une très bonne stabilité des conditions atmosphériques (tableau 2.6) sauf les sites de La Crau et Newell County Rangeland où les conditions atmosphériques sont relativement variables. Notons ici que la bibliographie n'est pas assez riche en informations sur la variabilité temporelle de ce site. Par contre, Railroad Valley playa a subit des variations temporelles importantes à cause des changements de la structure de sa surface causés par le vent et par les inondations après les précipitations ou après la fonte des neiges. En outre, les données

multitemporelles SAR de COMSS porté sur ERS-1 acquises au-dessus de ce site ont montré qu'il a subi des variations temporelles importantes. Néanmoins, les images de AVHRR acquises à différents mois de l'année et à différentes années ont indiqué que la stabilité de Railroad Valley Playa est maintenue de la mi-saison de l'été à la fin de l'année.

L'uniformité spatiale est un paramètre fondamentale dans la sélection des sites d'étalonnage. Les résultats obtenus par différents chercheurs ont montré que les sites désertiques de l'Afrique du nord et la péninsule arabe sont caractérisés par une absence de la végétation, une très faible variation spectrale sur une longue durée (8 ans), absence d'activité humaine, une excellente stabilité atmosphérique et temporelle et par une bonne uniformité spatiale avec un coefficient de variation inférieur à 2 %. En plus, leurs tailles sont convenables pour l'étalonnage de tous les capteurs satellitaires indépendamment de leur champs d'observation et de leur résolution spatiale. Toutefois, bien que le site Sonora est un site désertique, il ne montre pas une excellente uniformité spatiale à cause de l'évolution de son couvert végétal éparse et il est jugé par certains chercheurs comme non convenable pour l'étalonnage des capteurs.

White Sands ne présente pas une excellente uniformité spatiale pour la totalité de sa surface. Cependant, la zone de "Chuck Site" dans la région des plaines de gypse est caractérisée par une bonne uniformité en plus de sa réflectance élevée et de son caractère presque lambertien. Ainsi, elle est la zone la plus utilisée pour l'étalonnage des capteurs. Par ailleurs, malgré un coefficient de variation inférieur à 2% dans les trois canaux de SPOT, la surface de La Crau n'est pas parfaitement uniforme et loin d'être lambertienne. Elle est couverte des galets de différentes tailles, d'une végétation éparse qui varie d'une saison à l'autre et d'une couche de lichens causée par l'humidité et l'approximité du site de la mer. D'après cette étude, nous pouvons dire que la zone des plaines de White Sands est bien adaptée pour l'étalonnage radiométrique des capteur que le site de La Crau.

L'analyse des images HRV de SPOT acquises au-dessus des sites de Newell County Rangeland et de Railroad Valley playa montre un coefficient de variation inférieur ou

égal à 3 % se qui laisse croire à une bonne uniformité spatiale de ces deux sites. Toutefois, une faible valeur du coefficient de variation ne signifie pas une uniformité spatiale parfaite du site, car elle est la moyenne de plusieurs pixels dont l'uniformité est différente à cause de l'humidité ou par l'existence des éléments de signatures spectrales différentes. En général, le site de Railroad Valley Playa se caractérise par une bonne stabilité spectrale, sans relief, la présence d'une très faible végétation, une surface brillante et une taille suffisamment large pour l'étalonnage des capteurs de faible résolution spatiale. Dans la même zone, le site de Lunar Lake Playa Nevada présente d'autres avantages par rapport au site Railroad Valley Playa (surface homogène et uniforme spatialement), malheureusement sa taille ne permet que l'étalonnage des capteurs de fine résolution spatiale (HRV, TM et ETM+).

D'après les premiers résultats obtenus sur le site de Dunhuang de la Chine, celui-ci présente des excellentes qualités, à savoir: un climat aride avec un taux élevé des journées claires, une atmosphère sec et bien stable dans le temps, une bonne homogénéité spectrale et spatiale (un coefficient de variation inférieur à 3,3 % pour toutes les bandes de SPOT et les quatre premières bandes de TM), sans relief, sans végétation et faible taux de précipitation. D'après la bibliographie, il faut prendre en considération seulement les effets de la BDRF pour l'utilisation de ce site pour l'étalonnage des capteurs. Cependant, il est probable que Dunhuang est un site qui regroupe plusieurs excellents critères, mais du fait que nous avons trouver qu'une seule source d'information, il faut d'autres travaux sur ce site afin de mieux le caractériser.

À la lumière de cette analyse bibliographique nous pouvons dire qu'il y'a encore du travail à faire afin de bien caractériser les différents sites d'étalonnage et de localiser parfaitement les zones d'excellente stabilité spatiale, spectrale et temporelle pour augmenter la précision des opérations d'étalonnage.

Méthodes et matériels

3.1. Introduction

En se référant à la bibliographie, nous avons caractérisé la plupart des sites terrestres servant dans les opérations d'étalonnage des capteurs optiques dans le chapitre précédent. Nous présenterons dans ce chapitre les différents types de données utilisés dans le cadre de ce travail. Nous évoquerons brièvement les propriétés des différents instruments utilisées. Ce chapitre décrit également les méthodes utilisées pour atteindre les objectifs soulignés au début de cette thèse, à savoir la caractérisation spatiale, spectrale, et temporelle des sites d'étalonnage sélectionnés dans le cadre de cette étude.

3.2. Sites d'étude

Pour la localisation et la caractérisation des sites d'étude, nous référons le lecteur aux section 2.4.3, 2.4.4 et 2.4.5 des pages 35, 39 et 40 respectivement.

3.3. Données

Les données utilisées dans le cadre de cette recherche sont une gracieuseté du Centre canadien de télédétection. Malgré les contraintes de disponibilité, elles sont sélectionnées pour répondre aux objectifs scientifiques fixés dans cette étude. Elles sont acquises par trois capteurs différents (TM, HRV et AVHRR) au-dessus des trois sites considérés dans cette étude à différentes dates et sous des angles d'observation presque au nadir. Dans cette section nous présentons très brièvement les caractéristiques des capteurs TM, HRV et AVHRR, ainsi que des informations sur les images que nous disposons (Tableaux 3.4 à 3.5).

3.3.1. Les capteurs

AVHRR de NOAA

Actuellement, les données AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) couvrant la totalité de la planète sur une base hebdomadaire constituent avec les instruments VÉGÉTATION de SPOT-4, MODIS, GOES (*Geosynchronous Operational Environmental Satellites*) et METEOSAT les seuls moyens d'observation globale, répétitive et systématique. L'objectif principal de ce capteur est de fournir des informations sur la couverture nuageuse (localisation, température, réflectance) et d'estimer la température de la surface de la mer. Entre autres, il est utilisé pour la suivi et la cartographie des ressources naturelles terrestres à l'échelle du globe. Il survole la terre à une altitude de 870 km avec une largeur de champs de 2800 km d'environ. Ce capteur opère dans cinq bandes spectrales: visible, proche et moyen infrarouge et deux bandes dans l'infrarouge thermique avec une résolution spatiale de 1,1 km au nadir (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Bandes spectrales du capteur AVHRR de NOAA-14

Bandes spectrales	Longueurs d'onde ($\lambda_i - \lambda_s$) μm
Visible	0,58 - 0,68
Proche infra rouge	0,725 - 1,10
Moyen infra rouge	3,55 - 3,93
Infra rouge thermique	10,30 - 11,30; et 11,50 - 12,50

HRV de SPOT

Le satellite français SPOT (*Satellite Probatoire d'Observation de la Terre*) porte une charge utile composée de deux instruments optiques appelés HRV (*Haute Résolution*

dans le visible) capable d'observer la terre dans quatre bandes spectrales (Tableau 3.2). SPOT survole la terre à une altitude d'environ 830 km. La largeur du champ de son observation au sol est de 60 km, mais elle peut être portée à 117 km par une inclinaison de ces deux capteurs de 1,8° par rapport à la verticale. Le dépointage possible de l'axe de visée peut aller jusqu'à 27° de part et d'autre de la verticale offrant ainsi l'accès à des points situés dans un couloir de 950 km de large. Ce capteur a l'avantage d'avoir une grande résolution spatiale et il permet d'avoir des images d'une scène avec une répétitivité de 26 jours.

Tableau 3.2: Bandes spectrales du capteur HRV de SPOT

Bandes spectrales	Longueurs d'onde ($\lambda_i - \lambda_s$) (μm)	Résolution spatiale (m)
Panchromatique	0,51 - 0,73	10
XS1: Vert	0,50 - 0,59	20
XS2: Rouge	0,61 - 0,68	20
XS3: Proche infra rouge	0,79 - 0,89	20

Tableau 3.3: Bandes spectrales du capteur TM de Landsat-5

Bandes spectrales	Longueur d'onde ($\lambda_i - \lambda_s$) (μm)	Résolution spatiale (m)
TM1: Bleu	0,45 - 0,52	30
TM2: Vert	0,52 - 0,60	30
TM3: Rouge	0,63 - 0,69	30
TM4: Proche infra rouge	0,76 - 0,90	30
TM5: Moyen infra rouge	1,55 - 1,75	30
TM6: Infrarouge thermique	10,4 - 12,5	120
TM7: Moyen infra rouge	2,10 - 2,35	30

TM de LANDSAT-5

Le capteur TM (*Thematic Mapper*) fait partie de la série des satellites américaines Landsat, il fournit des informations dans sept bandes spectrales couvrant le visible, le proche et le moyen infra rouge et l'infrarouge thermique (Tableau 3.3). Le satellite Landsat gravite autour de la terre à une altitude de 700 km avec des traces au sol de 185 km par 185 km. La résolution spatiale de ce capteur est de 30 m dans le visible, le proche et le moyen infrarouge, et de 120 m en infrarouge thermique. Ce capteur permet un suivi temporel des couverts végétaux avec précision grâce à la disponibilité des bandes spectrales du proche et moyen infrarouge. La répétitivité de ce capteur est de 16 jours.

3.3.2. Les images

La caractérisation de l'uniformité spatio-temporelle d'un site nécessite des données satellitaires acquises durant une période approximative de dix ans incluant différentes résolutions spatiales et spectrales, bien distribuées sur une échelle annuelle ou au moins sur l'échelle de la période ou le site est utilisable. Cependant, bien que nous utilisons dans cette étude 8 images de TM, 10 de HRV et 10 de AVHRR, il est très difficile d'atteindre un niveau de précision "idéale" à cause des contraintes des coûts très élevés pour avoir toutes les images et de la disponibilité des images acquises à des dates souhaitées en couvrant tous les sites. Parmi les images existantes dans la base des données du Centre canadien de télédétection et celle de l'Université d'Arizona à Tucson (États Unis), nous avons sélectionné les images sans nuages et qui répondent le plus à nos objectifs (Tableaux 3.4, 3.5 et 3.6). Ainsi, il est impossible d'utiliser les images de AVHRR sur le site de Lunar Lake Playa du Nevada à cause de sa petite taille qui est localisée dans un seul pixel.

Tableau 3.4: Liste des images acquises sur le site de Railroad Valley

Satellites	Capteurs	Bandes	Dates
SPOT-2	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	14 Juin 1998
SPOT-2	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	18 Juin 1998
SPOT-1	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	10 Mars 1997
SPOT-1	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	28 Juin 1997
Landsat-5	TM	TM1 à TM7	14 Juin 1998
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	16 Août 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	04 Juillet 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	09 Juin 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	05 Mai 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	15 Avril 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	11 Juillet 1998

Tableau 3.5: Liste des images acquises sur le site de Newell County Rangeland en Alberta

Satellites	Capteurs	Bandes	Dates
SPOT-2	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	27 Juin 1994
SPOT-2	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	04 Octobre 1998
SPOT-2	HRV-1	XS1, XS2 et XS3	07 Août 1998
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	20 Août 1999
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	04 Octobre 1998
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	08 Août 1998
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	27 Avril 1998
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	30 Août 1997
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	27 Août 1996
Landsat-5	TM	TM1 à TM5 et TM7	26 Septembre 1995
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	07 Juillet 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	23 Mai 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	15 Avril 1999
NOAA-14	AVHRR	1 et 2	28 Août 1998

Tableau 3.6: Liste des images acquises sur le site de Lunar Lake Playa Nevada

Satellites	Capteurs	Bandes	Dates
SPOT-2	HRV-1	HRV1, 2 et 3	18 Juin 1998
SPOT-1	HRV-1	HRV1, 2 et 3	28 Juin 1997
SPOT-1	HRV-1	HRV1, 2 et 3	10 Mars 1997

3.4. Méthodologie de la recherche

La figure 3.1 illustre les quatre différentes étapes de la méthodologie de notre étude. La première étape consiste à sélectionner et à couper les régions des sites dans toutes les images. Précisons que pour chaque site, les images découpées (sous-images) doivent encadrer la même région indépendamment de la résolution spatiale de l'image. La deuxième étape consiste à appliquer les méthodes basées sur la statistique de Getis (G_i^*) et le coefficient de variation (CV). Ces méthodes seront appliquées sur chacune des sous-images. La troisième étape consiste à établir une analyse de la variabilité de l'uniformité de chacun des sites en fonction des résolutions spatiale, spectrale et temporelle, ainsi qu'en fonction de la taille et de la localisation dans chaque site. Dans cette section, nous présentons les différentes méthodes de traitement qui seront utilisées dans le cadre de cette étude, ainsi que les images qui seront exploitées. Quant à la quatrième étape, elle consiste à mettre au point le site le plus approprié pour l'étalonnage des capteurs optiques.

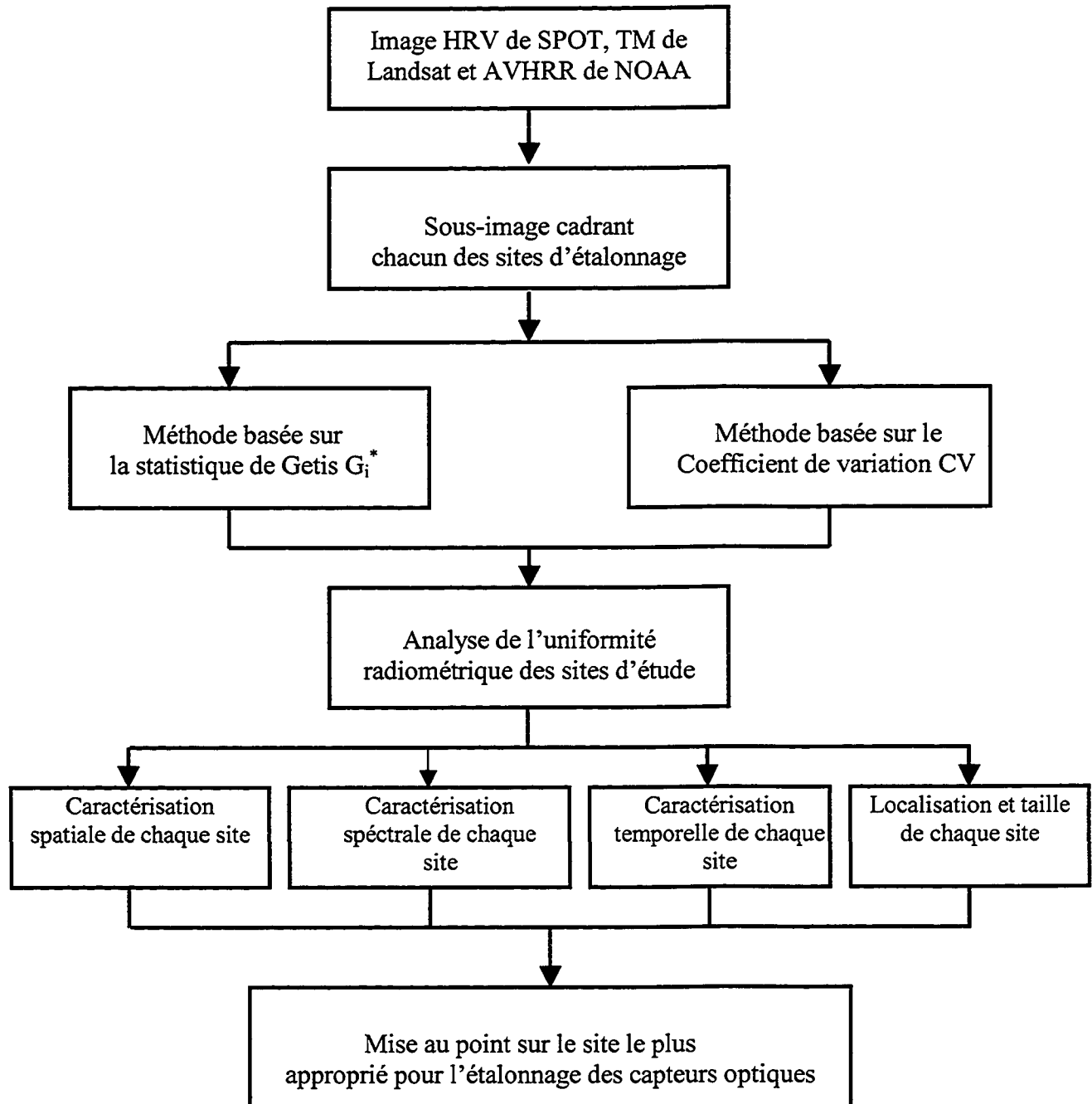


Figure 3.1: Organigramme de la méthodologie.

Bien entendu, pour effectuer ces travaux nous allons utiliser des outils comme le logiciel de traitement d'image PCI pour visualiser nos images, dans leur état brut, et découper les sous-images encadrant les régions des sites. Ce logiciel sera utilisé également pour transformer les images des sites sous un autre format accepté par le logiciel MATLAB où les programmes concernant les deux méthodes (CV et G_i^*) seront développés et appliqués à ces images (Annexe 3). Le principe de ces deux méthodes est expliqué dans les deux paragraphes suivants.

3.4.1. La statistique de Getis

L'autocorrélation spatiale peut être définie comme le degré de dépendance entre les valeurs de la même variable "X" associées à des emplacements "j" proches les uns des autres (Derksen *et al.*, 1998). La mesure de ce paramètre nécessite de prendre en considération à la fois, l'information sur son emplacement et sur les données qui lui sont attribuées (Goodchild, 1986). Dans le cas de la télédétection, les emplacements "j" sont les coordonnées des pixels et les données attribuées "X" sont les comptes numériques (Wulder, 1998).

Comme les images de la télédétection régularisent les paysages dans des grilles de même dimension et régulièrement espacées sous forme de pixels (Fisher, 1987), on peut s'attendre à ce qu'il y ait une dépendance entre ces pixels, entraînant des groupements de différentes intensités. Cette dépendance se traduit par une autocorrélation spatiale positive lorsqu'on a un groupement des valeurs semblables des comptes numériques (CN), et par une autocorrélation spatiale négative lorsqu'on a un groupement des valeurs dissimilaires (Derksen *et al.*, 1998).

L'autocorrélation spatiale peut être mesurée en utilisant la statistique globale ou locale. Les indicateurs globaux permettent une seule mesure résumant toutes les inter relations spatiales de toute la zone d'étude. Cette mesure peut être peu fiable si la nature et

l'étendue de l'autocorrélation spatiale varient significativement sur l'image de la zone d'étude. Cependant, le LISA (Local Indicators of Spatial Association), a été développée par Anselin (1995) pour découvrir les régimes spatiaux discrets qui peuvent être indétectables par les indicateurs globaux (Wulder, 1998). En effet, les mesures de LISA évaluent l'étendue et la nature de la concentration des valeurs des CN dans une zone limitée à l'intérieur de la surface d'étude entière (Wulder et Boots, 1998). Parmi ces indicateurs locaux il y a la statistique de Getis (Getis et Ord, 1992; Ord et Getis, 1995). Wulder et Boots (2001) ont montré récemment que cette statistique peut être appliquée avec succès sur les images de la télédétection. Testé sur une image de TM de Landsat acquise sur un couvert forestier présentant une mixture de différentes espèces d'arbres, la méthode a montré son utilité pour l'extraction de l'information concernant la structure spatiale de l'image. Dans une autre étude, en utilisant cette statistique sur des données SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*) acquises sur des prairies couvertes de neige, Derksen *et al.*, (1998) ont identifié les configurations dominantes des groupements et l'influence de ces dernières sur la circulation atmosphérique.

Notons qu'il y a deux versions de la statistique de Getis. La première statistique, notée G_i , exclut la valeur du compte numérique attribuée au pixel considéré " i " de la somme locale, alors que, cette valeur est incluse dans la seconde statistique notée G_i^* . Cette dernière est la plus appropriée aux applications de la télédétection, car elle permet également le calcul de la statistique en fonction d'une fenêtre dont les dimensions sont choisies par l'utilisateur (Wulder et Boots, 1998). Elle est définie comme suit (Ord et Getis, 1995):

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j - W_i^* \bar{x}}{s[W_i^*(n - W_i^*) / (n - 1)]^{1/2}} \quad (3.1)$$

- La matrice des poids spatiaux $\{W_{ij}(d)\}$ est à la fois binaire et symétrique:

$W_{ij} = 1$ pour tous les pixels qui se trouvent à l'intérieur de la distance " d " du pixel considéré " i "

$W_{ij} = 0$ pour tous les pixels se trouvant à l'extérieur de "d".

- $W_{ij}(d)X_j$ est la somme des comptes numériques "X" des pixels situés à l'intérieur de la distance "d" centrée sur le pixel "i" (i incluse).
- X_i est le compte numérique du pixel i et X_j est les comptes numériques des pixels j situés à l'intérieur de la distance d .
- W_i^* est le nombre des pixels à l'intérieur de la distance "d" (i incluse):

$$W_i^* = \sum_j w_{ij}(d) \quad (3.2)$$

"s" est la variance de x :

$$s^2 = \sum_j x_j^2 / n - \bar{x}^2 \quad (3.3)$$

où "n" est le nombre total des pixels.

Dans l'équation (3.1), un groupement des pixels de comptes numériques élevés est indiqué par des valeurs de G_i^* largement positives. Alors qu'un groupement des pixels de comptes numériques faibles est indiqué par des valeurs de G_i^* largement négatives (Wulder et Boots, 1998). Dans le cas de notre étude, la statistique de G_i^* sera utilisée pour la première fois dans une caractérisation des sites d'étalonnage. Elle nous permettra de sélectionner les zones hétérogènes ou homogènes au niveau de chaque site. Par conséquent, elle nous aidera à chercher l'emplacement le plus uniforme des sites en fonction des résolutions spatiale et spectrale et en considérant différentes fenêtres de traitement (la taille du site). Pour affranchir cet objectif, la statistique G_i^* sera calculée à partir de l'équation (3.1) en fonction de différentes fenêtres (distances d), dont la taille varie de 3×3 à 9×9 pixels en considérant toutes les images. Ensuite, la valeur G_i^* sera affectée au pixel "i" pour chaque fenêtre sélectionnée. Les images résultantes des statistiques Getis " G_i^* " permettent de visualiser les groupements des pixels de comptes numériques faibles ou élevés et leurs étendus en fonction de la fenêtre sélectionnée. Ceci nous emmènera à analyser les résultats en fonction des objectifs de notre étude.

Signalons que d'après l'équation (3.1), le calcul de la statistique de Getis dépend de la taille entière de l'image de traitement, c'est à dire son nombre de colonnes et son nombre de lignes. Et cette taille varie de quelques pixels dans le cas des images AVHRR à

quelques centaines de pixels dans le cas des images HRV et TM. Aussi, pour le même pixel i , on peut avoir différentes valeurs de G_i^* pour différentes tailles de l'image de traitement. Ainsi, la comparaison des valeurs de G_i^* , du même pixel calculés avec la même fenêtre, d'une image à l'autre n'est valable que lorsque ces images ont les mêmes dimensions et la même résolution spatiale.

3.4.2. Coefficient de variation

La connaissance de la variation relative est indispensable dans l'évaluation de l'uniformité d'un site car elle permet de déterminer le degré de sa variabilité spatiale et temporelle. Parmi les outils, souvent utilisés par les chercheurs pour mesurer la dispersion relative, figure le coefficient de variation (Gu *et al.*, 1990; Teillet *et al.*, 1998 b). Il est défini par le rapport de l'écart type (σ) à la moyenne (\bar{x}) :

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} (\%) \quad (3.4)$$

Le coefficient de variation a été utilisé pour caractériser l'uniformité radiométrique et l'évolution temporelle du site La Crau en France par Gu *et al.* (1990) en exploitant des images du capteur HRV de SPOT. Ces chercheurs ont fixé une fenêtre de 20 x 20 pixels (soit une superficie de 400 x 400 m au milieu de La Crau sèche) et ils l'ont déplacé avec un pas d'échantillonnage d'un pixel sur chacune des images brutes, afin de dériver les images de coefficients de variation. D'après ces chercheurs, cette méthode a permis de choisir l'emplacement le plus homogène du site de La Crau avec un coefficient de variation de 2 %. En outre, Teillet *et al.* (1998b) ont calculé le coefficient de variation à partir des images HRV de SPOT acquises sur les sites de Railroad Valley Playa (Nevada) et Newell County Rangeland (Alberta), en considérant une fenêtre dont la taille varie de 3 km x 3 km à 20 km x 20 km avec un pas d'échantillonnage de 1 km. Les résultats obtenus par ces chercheurs ont montré que les zones les plus homogènes ont un coefficient de variation de 2,5 % et 3 %, respectivement, pour les sites Newell County Rangeland et Railroad Valley Playa. Par référence aux travaux de recherches cités ci-dessus, dans le cadre de cette recherche, nous considérons un site homogène lorsque le coefficient de variation est de 3% ou moins.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le schéma général de notre méthodologie. Nous avons présenté les différentes méthodes, les différentes étapes de traitement et les données images qui seront utilisées dont le but de faire la mise au point sur le site (taille et position) qui répond le plus aux critères d'un excellent site pour l'étalonnage radiométrique des capteurs optiques.

Analyse des résultats

4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats des traitements réalisés dans le cadre de ce travail. Ces résultats sont le fruit de l'application des méthodes évoquées dans le chapitre précédent en considérant chacun des trois sites. Une analyse de ces résultats sera abordée au fur et à mesure, tout en les comparant avec ceux des travaux précédents. Finalement, une comparaison sera établie pour identifier le site qui répond le mieux aux critères d'un bon site d'étalonnage des capteurs.

4.2. Traitement des données

4.2.1. Newell County Rangeland

4.2.1.1. Caractérisation spatiale

L'uniformité spatiale du site a été évaluée en calculant le coefficient de variation et la statistique de Getis G_i^* , définis dans le chapitre précédent, avec différentes fenêtres centrées dans tous les pixels des images TM, SPOT et AVHRR. Les images de la distribution spatiale du coefficient de variation et de la statistique de G_i^* ont été alors comparées en fonction de la taille de la fenêtre du traitement et en fonction des résolutions spatiale et spectrale des images pour chaque zone.

4.2.1.1.1. La méthode du coefficient de variation

Une observation préliminaire réalisée sur des images rehaussées nous a permis de localiser la zone la plus homogène pour notre site. Cette zone constituera la partie centrale lors des traitements des images. Nous avons dérivé, ensuite, des images du coefficient de variation à partir des canaux de HRV, TM et AVHRR en considérant des

fenêtres de 3x3, 5x5, 7x7 et 9x9. Ces fenêtres sont déplacées avec un pas de 1 pixel sur l'ensemble des images. Pour chaque position de la fenêtre nous avons calculé le coefficient de variation de l'ensemble des pixels constituant la fenêtre en question. Ces valeurs sont affectées au pixel se trouvant au centre de la fenêtre. Nous avons ensuite représenté les images des coefficients de variation.

La figure (4.1) représente des images du CV dérivées du canal TM4 (proche infrarouge) d'une image TM acquise le 27 août 1996 en fonction de différentes tailles de la fenêtre de traitement. Les traitements sur les autres canaux de TM et ceux de HRV ont abouti aux mêmes résultats. Une comparaison entre les images de cette figure nous permet de constater l'effet de la taille de la fenêtre sur le résultat. Une petite fenêtre (3x3) permet de caractériser la variabilité de l'homogénéité au niveau du pixel central de la fenêtre et limite sa dépendance juste avec les pixels avoisinant. Avec une grande fenêtre (9x9), cette dépendance s'élargit dans un espace plus large. D'après cette figure, nous constatons que les valeurs du CV les plus élevées (de l'ordre de 20 % et plus) sont relevées sur les limites des champs agricoles et sur quelques endroits limités et dispersés dans la région des prairies (images (b), (c) et (d) de la figure 4.1). Ces valeurs élevées signalent un changement dans le type du couvert et la présence des petites parcelles du sol nu et des marécages. La figure (4.1) montre aussi des valeurs du CV faibles et relativement uniformes (de l'ordre de 1 à 3,4 %) dans la zone des prairies. Nous constatons également qu'au fur et à mesure que la taille de la fenêtre du calcul de CV augmente, les hétérogénéités se génèrent dans un espace de plus en plus large. Cette figure illustre que, les fenêtres 7x7 et 9x9 dissimulent la variabilité du pixel en question par rapport à ceux qui l'entourent dans l'image. Alors que la fenêtre 3x3, elle ne considère pas la variabilité de ce pixel par rapport à ceux plus loin. De ce fait, nous avons considéré une fenêtre de 5x5 pour les prochains traitements.

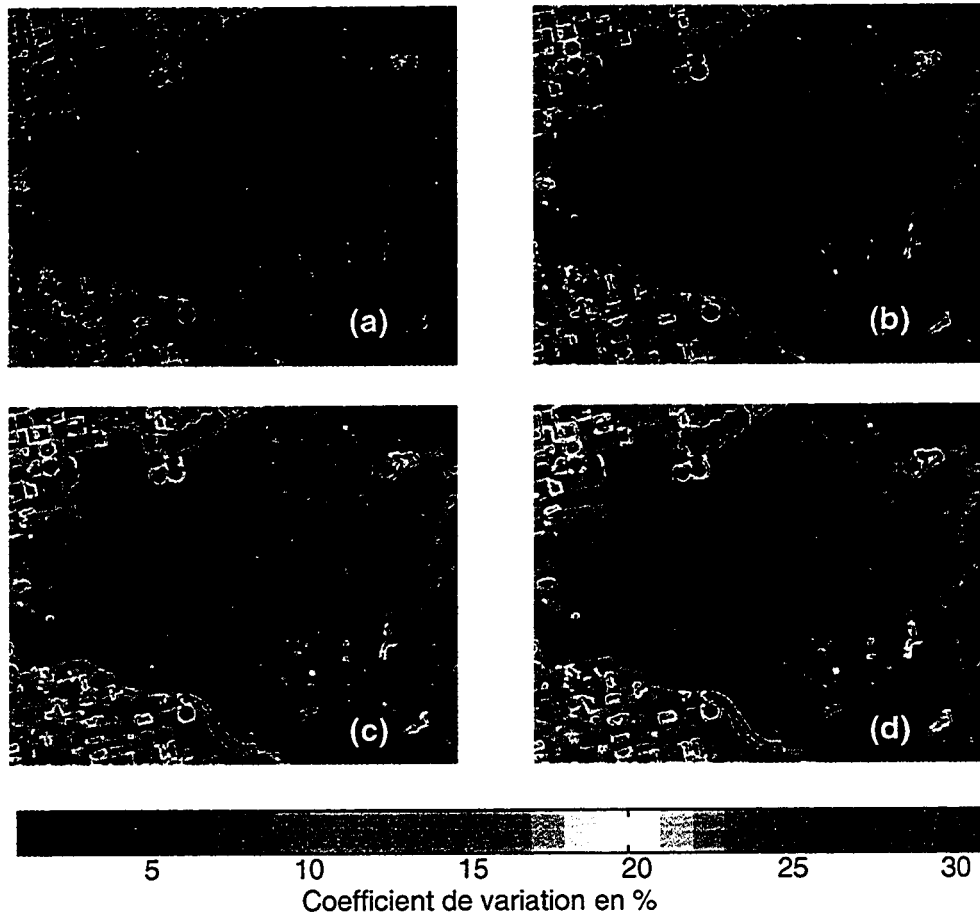


Figure 4.1: Images des coefficients de variation calculés avec des fenêtres différentes (a: 3x3, b: 5x5, c: 7x7 et d: 9x9 pixels) sur le canal 4 d'une image TM de Landsat-5 de Newell County rangeland acquise le 27 août 1996 .

Afin d'évaluer la variabilité de l'uniformité spatiale de Newell County Rangeland en fonction de la longueur d'onde, nous avons dérivé des images du coefficient de variation (CV) calculé avec une fenêtre de 5x5 dans les 6 canaux d'une image TM acquise en août 1996 et dans les trois canaux d'une image HRV acquise en août 1998 (figures 4.2 et 4.3). Dans le canal vert (HRV1 et TM2) et particulièrement le bleu (TM1), les images des CV ne permettent pas de révéler une variabilité notable de l'uniformité du site à cause de la

non sensibilité de ce canal à la variation du couvert végétal. Les images des CV dans les canaux du rouge et proche infrarouge (c et d de la figure 4.3, b et c de la figure 4.2) ont permis de discerner clairement les zones d'agriculture où le CV atteint des valeurs très élevées (supérieur à 30%) notamment sur les périmètres des champs et celles des prairies où les valeurs de CV sont relativement faibles (de l'ordre de 2 à 3%). Il existe, cependant, des petites portions des sols nus ou des marécages secs répartis dans la zone des prairies et annoncent des valeurs du CV élevées. Ces deux canaux sont connus par leur grand contraste entre le sol nu et la végétation vivante. Les images de CV des canaux du moyen infrarouge (figures 4.3.e et 4.3.f) apparaissent plus contrastées, notamment celle correspondante au canal TM7 où le CV est extrêmement variable (entre 2 et 65 %). D'après cette image, on peut nettement observer une grande variabilité spatiale non seulement dans les zones agricoles mais aussi dans la zone des prairies. Cette variation peut être expliquée par la sensibilité du canal TM7 au stade évolutif de la végétation, et par la composition du couvert végétal de ce site éventuellement mixte.

Les images du CV dérivées cette fois des données AVHRR de NOAA, qui ont une résolution spatiale de 1,1 km au nadir, ont abouti à des résultats qui concordent avec ceux obtenues des données TM et HRV. La figure 4.4 est un exemple de ces images dérivées avec une fenêtre de 5x5 (qui correspond à environ 6x6 km²) dans les deux canaux visible et proche infrarouge d'une image du site acquise le 28 août 1999. D'après cette figure, nous remarquons que la région du site se distingue par une bonne uniformité avec un CV de l'ordre de 1 à 2% dans les deux canaux, respectivement.

D'après les résultats obtenus des différents capteurs (différentes résolutions spectrales et spatiales), on constate que, dans les canaux du visible, la zone du site se distingue par une uniformité spatiale relative. Quant à la zone en moyen infrarouge et avec un degré moins élevé dans le proche infrarouge, elle s'est caractérisée par une variabilité considérable (le CV varie de 2 à 65 % environ). Par conséquent, elle peut constituer une source d'erreur importante lors de l'utilisation du site pour l'étalonnage des capteurs, particulièrement l'étalonnage des canaux du moyen infrarouge.

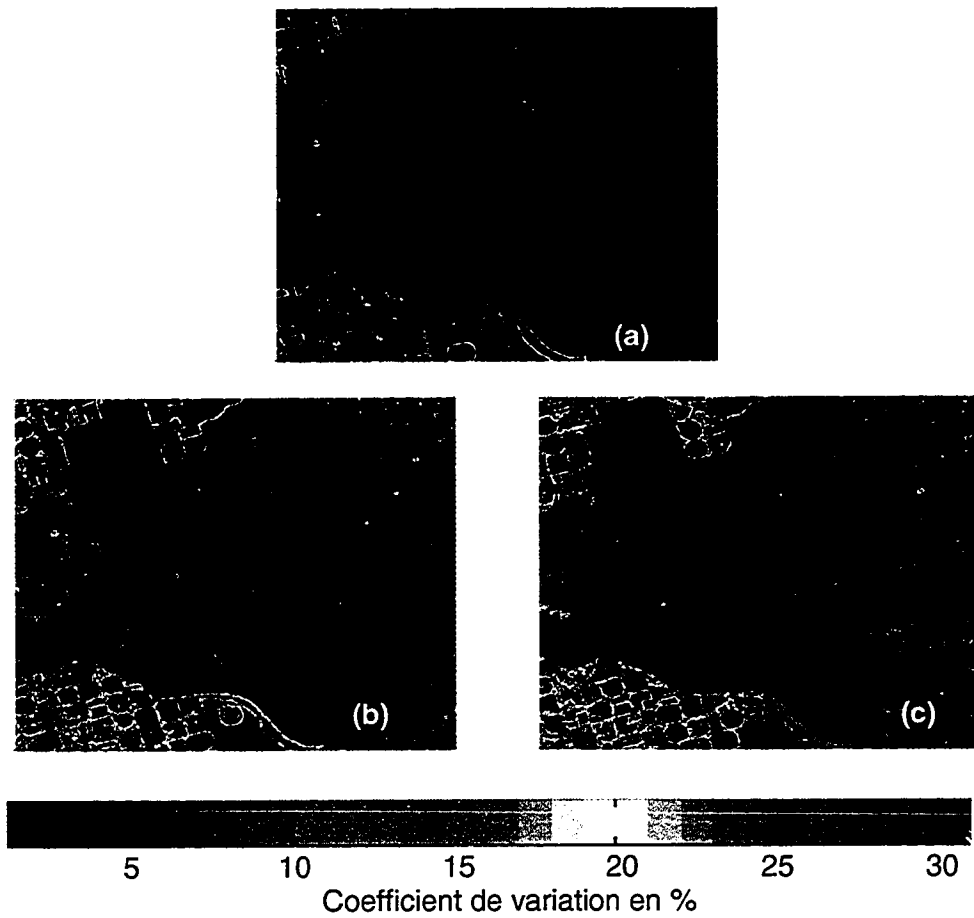


Figure 4.2: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux d'une image HRV de SPOT (a: vert, b: rouge et c: proche infrarouge) acquise sur Newell County Rangeland en août 1998.

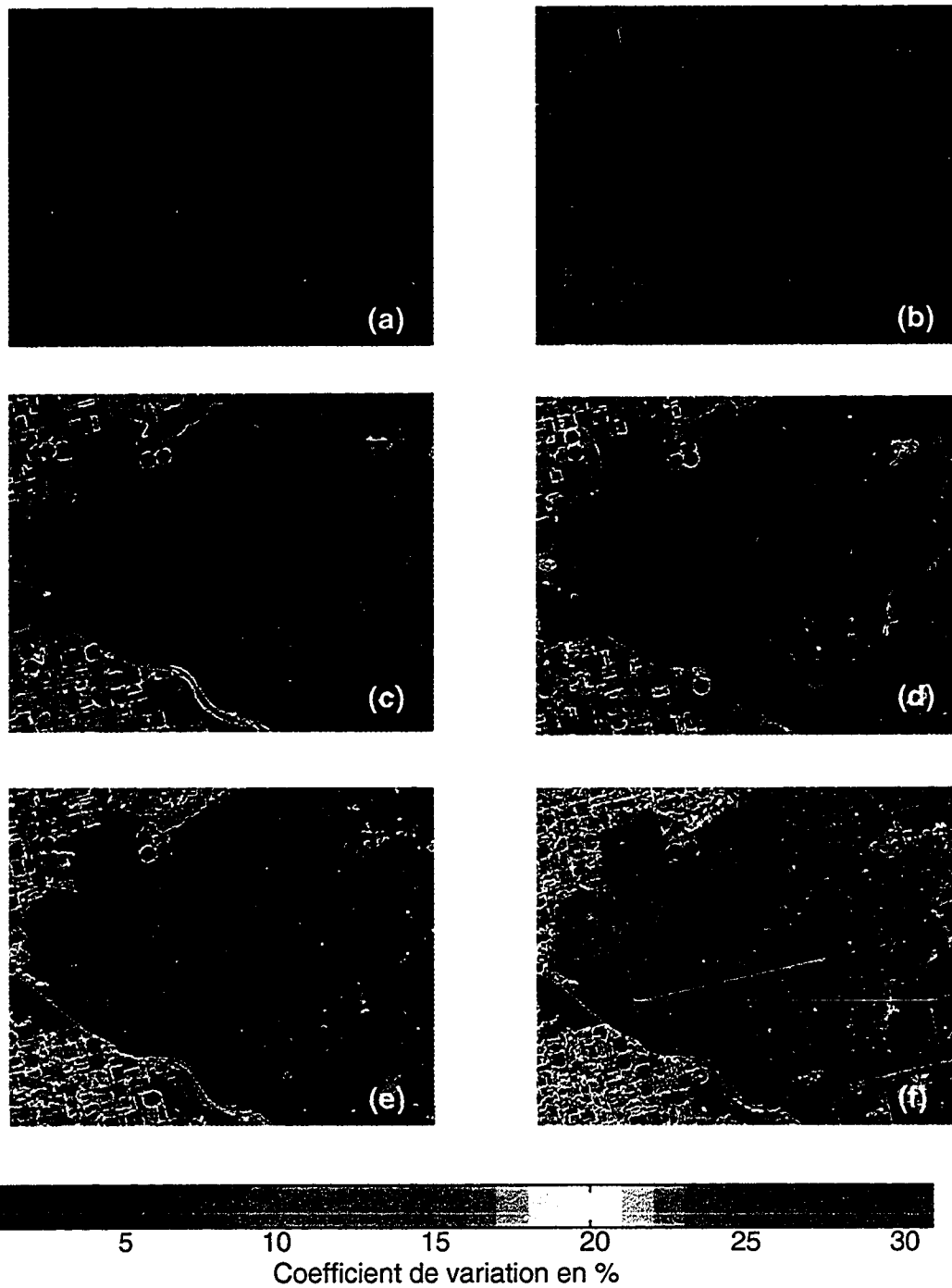


Figure 4.3: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les 6 canaux d'une image TM de Landsat (a: TM1, b: TM2, c: TM3, d: TM4, e: TM5 et f: TM7) acquise sur Newell County Rangeland le 27 août 1996.

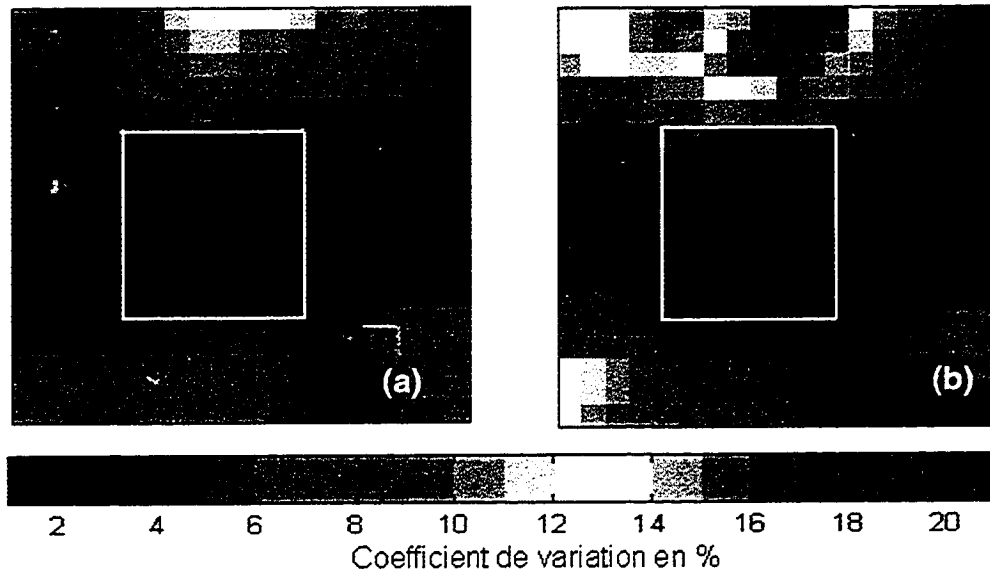


Figure 4.4: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de taille 5x5 pixels dans les deux premiers canaux d'une image AVHRR de NOAA (a: visible, b: proche infrarouge) acquise sur Newell County Rangeland le 28 août 1998.

4. 2.1.1.2. Méthode de la statistique de Getis

Pour atteindre le même objectif, nous avons dérivé, de la même façon que le coefficient de variation, des images de la statistique de Getis (G_i^*) à partir des images HRV et TM. Cette statistique est calculée à partir de l'équation (3.1) avec quatre fenêtres différentes, 3x3, 5x5, 7x7 et 9x9. Dans le but d'une évaluation numérique et visuelle, les valeurs de G_i^* sont affichées sous forme d'images où les valeurs négatives de G_i^* sont ramenées toutes à 0. D'après la bibliographie, la statistique de Getis amplifie la dépendance spatiale du pixel central avec son voisinage. Si le maximum de G_i^* se produit quand la taille de la fenêtre est petite, alors l'autocorrélation spatiale maximale se produit dans la proximité étroite au pixel au centre de la fenêtre. Si le maximum de G_i^* se produit avec une taille de fenêtre plus grande, alors la dépendance spatiale est plus éloignée du pixel du centre de la fenêtre.

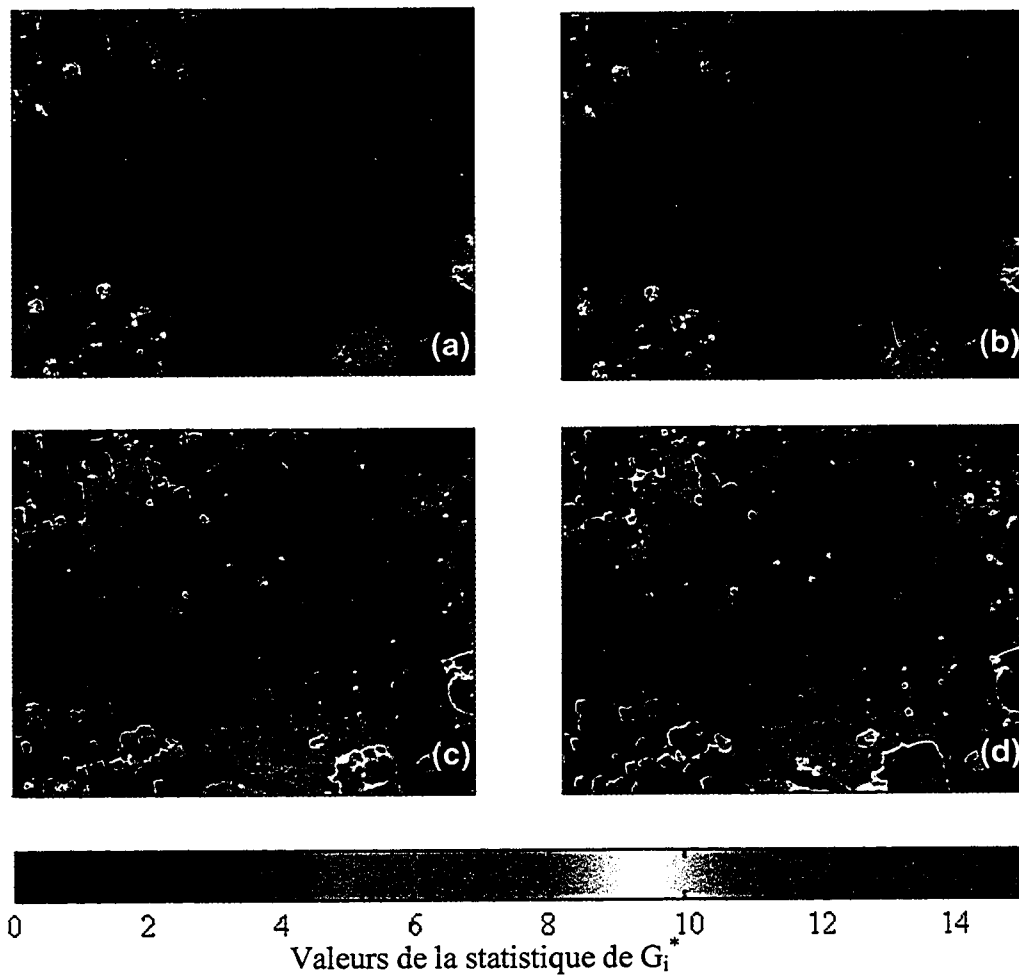


Figure 4.5: Images de la statistique de Getis G_i^* calculée avec des fenêtres différentes (a: 3x3, b: 5x5, c: 7x7 et d: 9x9 pixels) sur le canal 3 d'une image TM de Landsat-5

La figure 4.5 présente des images de la statistique de Getis calculées avec des fenêtres différentes à partir du canal 3 (rouge) d'une image TM de Landsat-5 acquise le 27 août 1996. D'après cette figure, on constate qu'une petite fenêtre (3x3) indique que la dépendance spatiale du pixel avec son voisinage est restreinte à une région très limitée en considérant juste les pixels avoisinant le pixel central de la fenêtre. Par contre, une grande fenêtre (9x9) indique une dépendance spatiale plus étendue. Ainsi, dans l'image (a) de la figure 4.5, cette dépendance se manifeste par des groupements très limités relativement à ceux de l'image (4.5d) où les groupements sont plus étendus et leurs valeurs sont plus

importantes. Nous remarquons également, d'après cette figure, que le calcul des valeurs de G_i^* , avec une fenêtre donnée, crée des limites brouillées entre les différentes composantes de la scène. Les images de cette figure nous fournissent un aperçu sur la zone susceptible pour l'emplacement du site. C'est à dire la zone où la statistique de Getis montre la variation la plus faible dans l'étendue le plus large possible. D'après ces images, la partie centrale peut effectivement répondre à ces critères. En effet, cette zone indique des faibles valeurs de G_i^* dans toutes les fenêtres du calcul et leur variation est aussi faible (faible changement de couleur dans les images). Les faibles valeurs de G_i^* signifient que cette zone est généralement moins brillante et leur faible variation signifie qu'elle est homogène, notamment dans les deux premières images qui correspondent aux fenêtres 3x3 et 5x5. Alors que pour les autres fenêtres (7x7 et 9x9), les figures 4.5c et 4.5d montrent des petites hétérogénéités notables dans des endroits limités et dispersés probablement à cause de la nature du site qui se constitue par une végétation mixte, par la présence des petites parcelles du sol nu et des petits marécages desséchés. Ces constatations concordent avec les travaux précédents réalisés par Teillet *et al.* (2001) dans ce même site.

Par ailleurs, nous avons essayé d'évaluer l'effet de la statistique de Getis (G_i^*) dans les autres canaux de HRV et du TM. Les figures 4.6 et 4.7 illustrent des images de G_i^* avec une fenêtre de 5x5. Elle montre que TM5 et TM7 (moyen infrarouge) affichent des valeurs élevées de G_i^* dans la région des prairies (figures 4.7e et 4.7f). Ce comportement peut être expliqué par la sensibilité de ces deux canaux au stade évolutif de la végétation, notamment au stade de la sénescence (cellulose et lignine), et aux propriétés des sols sous-jacents aux couverts, leurs constituants minéralogiques et à leur état d'humidité. Par contre, les bandes du visible (figures 4.6a et b et 4.7a, b et c) ont des valeurs de G_i^* semblables et relativement faibles comparativement aux bandes TM5 et TM7. Quant à la bande TM4 (proche infrarouge) où la diffusion de la végétation est maximale, on peut clairement distinguer entre deux régions. D'une part, la région des prairies (partie centrale des figures 4.6c et 4.7d) qui se manifeste par un groupement des pixels large et homogène mais d'une faible intensité radiométrique (couleur bleu foncée). D'autre part, la région agricole qui se manifeste par des groupements des pixels avec des intensités

plus élevées et très variables spatialement. Cependant, la statistique de G_i^* dans ce canal n'a pas permis de bien discerner les petites hétérogénéités révélées dans les autres canaux et qui correspondent au dessèchement des petits marécages. La comparaison entre les deux figures 4.6 et 4.7 indique que la statistique de Getis a un comportement semblable dans les canaux de HRV et leurs homologues de TM et cela malgré la différence entre les résolutions spatiales des deux images. D'après les figures 4.5, 4.6 et 4.7, nous pouvons voir que la zone des prairies est uniforme et, par conséquent, elle peut constituer un emplacement convenable pour le site Newell County Rangeland.

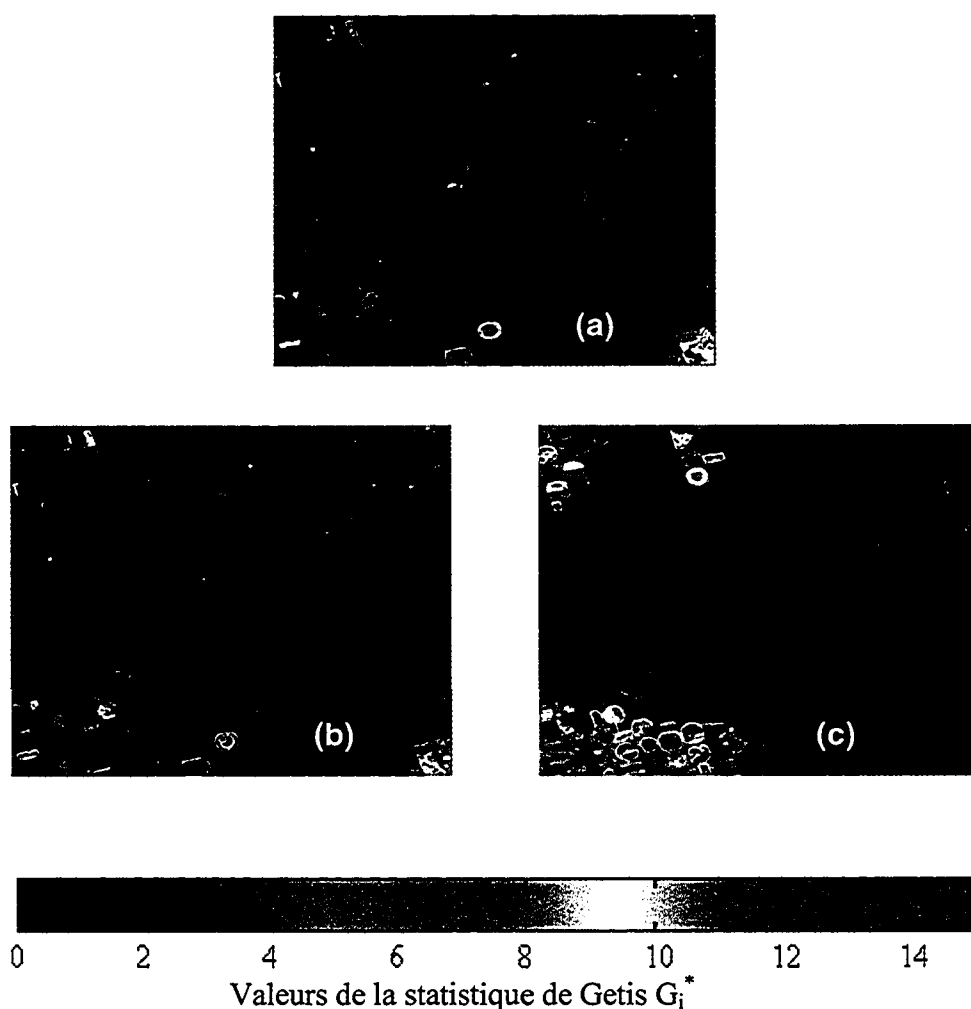


Figure 4.6: Images de la statistique de Getis G_i^* calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux d'une image HRV de SPOT (a: vert, b: rouge et c: proche infrarouge) acquise sur Newell County Rangeland en août 1998.

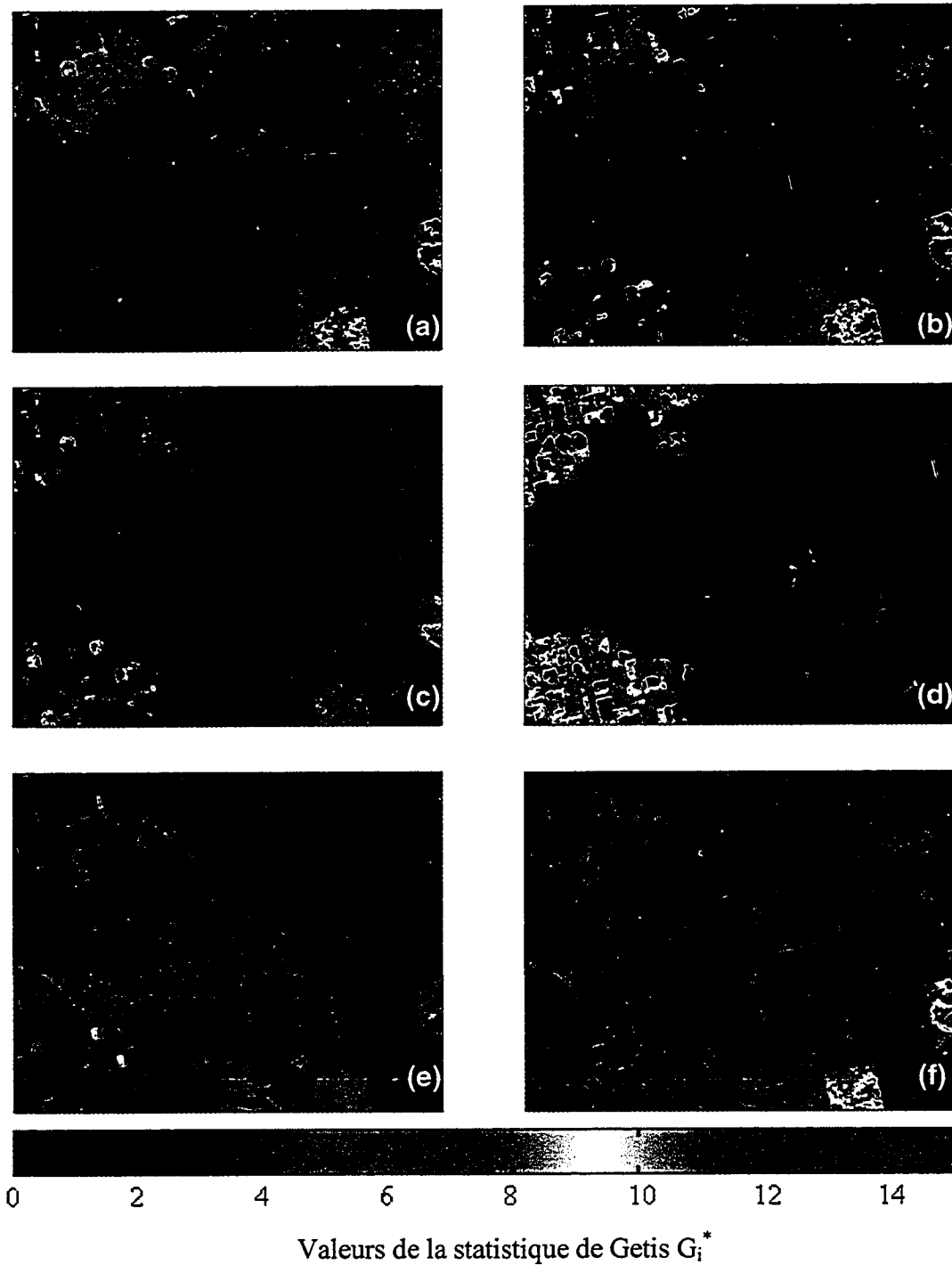


Figure 4.7: : Images de la statistique de Getis G_i^* calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les 6 canaux d'une image TM de Landsat (a: TM1, b: TM2, c: TM3, d: TM4, e: TM5 et f: TM7) acquise sur Newell County Rangeland le 27 août 1996.

4. 2.1.2. Taille et localisation du site

Après la fixation de la taille de la fenêtre du coefficient de variation à 5x5, correspondant à une surface de 100x100 m² pour les images HRV, 150x150 m² pour les images TM et environ 6x6 Km² pour les images AVHRR, nous avons considéré différentes dimensions du site à différents emplacements. Pour chaque dimension, nous avons calculé la moyenne du coefficient de variation (MCV) en considérant différents points centraux à différents emplacements (les points blancs dans l'image de la figure 4.9). Les résultats obtenus montrent qu'une zone de 7x7 km² se distingue des autres zones par un coefficient de variation inférieur à 3 %. En effet, la figure 4.8 illustre bien qu'à partir des données HRV et TM, la MCV ne dépasse pas les 3 % et reste presque constante au fur et à mesure que la taille de la fenêtre augmente. La MCV ne dépasse pas la précision souhaitée (3%), notamment dans les trois canaux du visible des deux capteurs (figures 4.8a et b). En outre, dans les canaux du proche et du moyen infrarouge de TM nous remarquons que la MCV est d'environ 2,5 % dans TM4 et TM5. Par contre, dans l'autre canal du moyen infrarouge (TM7), la MCV varie entre 3,9 % et 4,3 %. Ce comportement peut être expliqué par la nature de NCRA qui est constituée d'un couvert végétal homogène mais mixte: végétation vivante et sénescence. Cette constatation concorde avec les travaux de Teillet *et al.* (2000) qui ont montré à partir de données hyperspectrales, acquises durant le mois d'août, que la réflectance moyenne du site NCRA ne reflète ni la signature pure d'une végétation photo-synthétiquement active totalement couvrante ni celle d'une végétation complètement sénescence. En effet, la bande TM7 est très sensible à la variation phénologique de la végétation, notamment au stade de la sénescence (cellulose et lignine), et aux propriétés des sols sous-jacents aux couverts, leurs constituants minéralogiques et à leur état d'humidité (Bannari *et al.*, 2000).

À la lumière de ces résultats, nous pouvons dire que le site sélectionné, d'environ 7x7 km² (carré de la figure 4.9), pourrait être utilisé dans les opérations d'étalonnage radiométrique de plusieurs capteurs satellitaires y compris ceux de faible résolution spatiale comme AVHRR et MODIS.

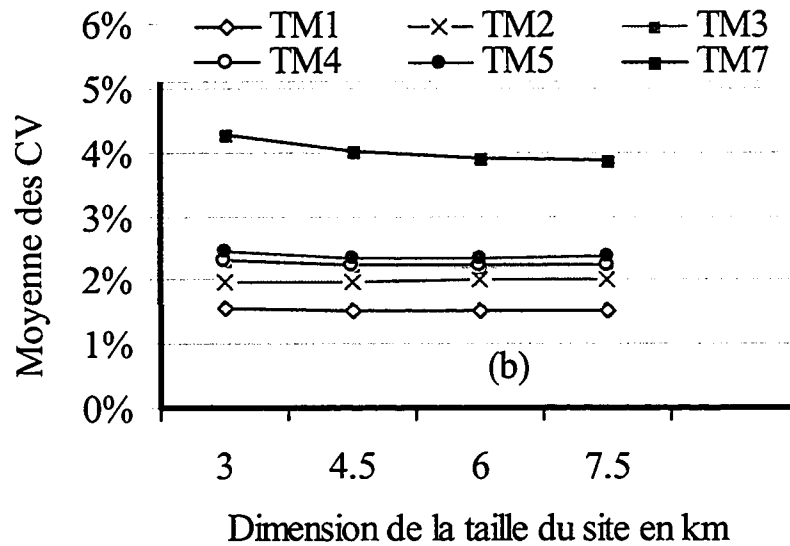
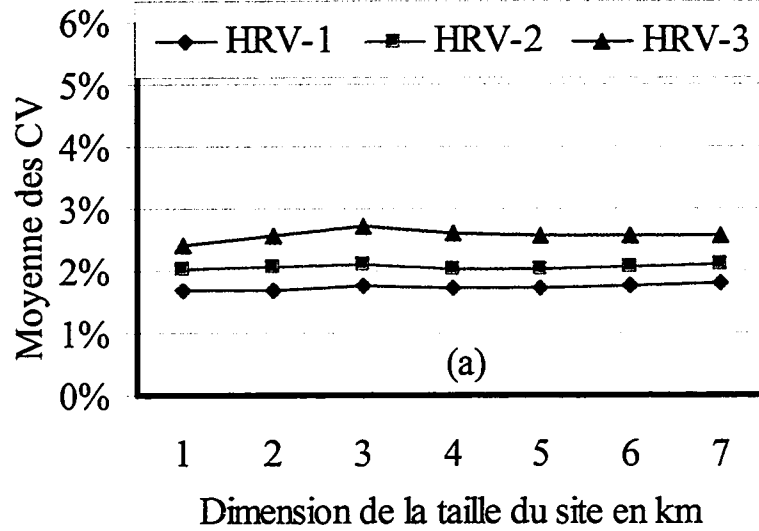


Figure 4.8: MCV calculée en fonction de la dimension du site (a) pour une image HRV acquises le 7 août 1998 (b) pour une image TM acquise le 27 août 1996 sur le site NCRA.

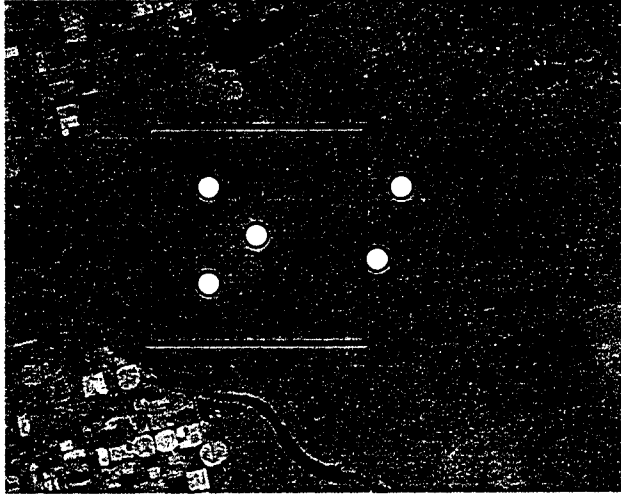


Figure 4.9: Le site 7x7 km² retenu à Newell County Rangeland

4.2.1.3. Caractérisation temporelle

Tel que mentionné dans le deuxième chapitre, la stabilité temporelle d'un site est un critère très important pour la précision des opérations d'étalonnage. Des grandes variations temporelles des propriétés optiques de la surface exigeraient des mesures au sol à chaque fois qu'un étalonnage est effectué. Dans ce paragraphe, nous allons examiner comment l'état de la surface de Newell County sélectionné varie d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre.

Variation annuelle:

Pour l'analyse du comportement multitemporel du site, nous avons utilisé une série de 5 images TM acquises entre 1995 et 1999 durant les mois d'août et septembre. Pour la mise en évidence de la variation temporelle du site, nous avons calculé le CV temporel par référence à l'année 1995. Le CV temporel est obtenu en calculant le coefficient de variation des moyennes des comptes numériques de chaque image par rapport à celle de l'image de référence. D'après la figure 4.10a, nous remarquons que le site a subi une

variation relativement faible au cours des cinq années. En effet, le coefficient de variation temporel a évolué légèrement, mais il est resté sous la valeur de 5 % dans tous les canaux des images considérées, à l'exception de l'année 1998 où il a augmenté progressivement dans tous les canaux, particulièrement dans le canal du proche infrarouge (TM4) dont la valeur a excédé les 10 %. Malheureusement, rien ne peut nous permettre d'expliquer correctement le comportement spectral du site durant cette année car on ne dispose pas des données météorologiques sur la région pendant cette période. Néanmoins, ces résultats nous permettent de conclure que, à l'exception de l'année 1998, le site est relativement stable durant la même saison (été) d'une année à l'autre.

Par ailleurs, en exploitant les mêmes images, nous avons essayé de découvrir si l'uniformité spatiale est affectée temporellement. La figure 4.10b représente l'évolution de la moyenne des coefficients de variation (MCV) calculés avec une fenêtre de 5x5 sur le site retenu (7x7 km²). Cette méthode consiste à comparer les MCV du site calculées dans différentes dates. D'après cette figure, on constate que l'uniformité spatiale du site est relativement stable. En effet, la valeur du MCV varie entre 1,5 % et 3,5 % dans les cinq premiers canaux (TM1, TM2, TM3, TM4 et TM5), alors qu'elle est de 4 % dans le canal du moyen infrarouge TM7. Certes, d'après la figure 4.10a, le site a évolué d'une façon relative, durant la même saison d'une année à l'autre, mais il a maintenue une bonne uniformité durant les périodes d'acquisition des images utilisées (figure 4.10b).

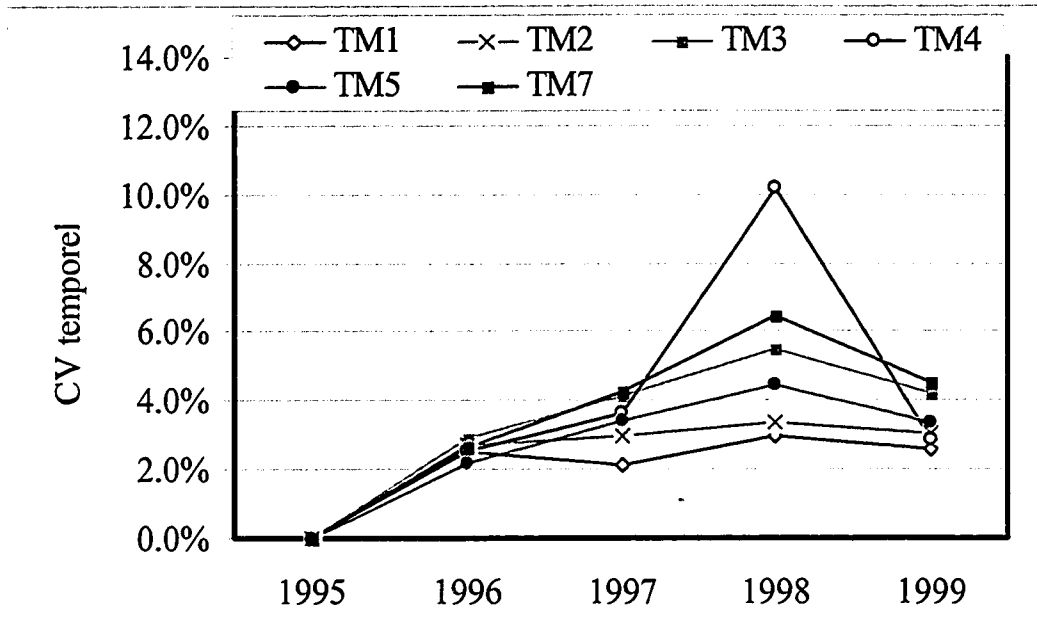


Figure 4.10a : Coefficient de variation temporelle annuelle durant 5 années (1995-1999), fréquence d'une image par année du site NCRA.

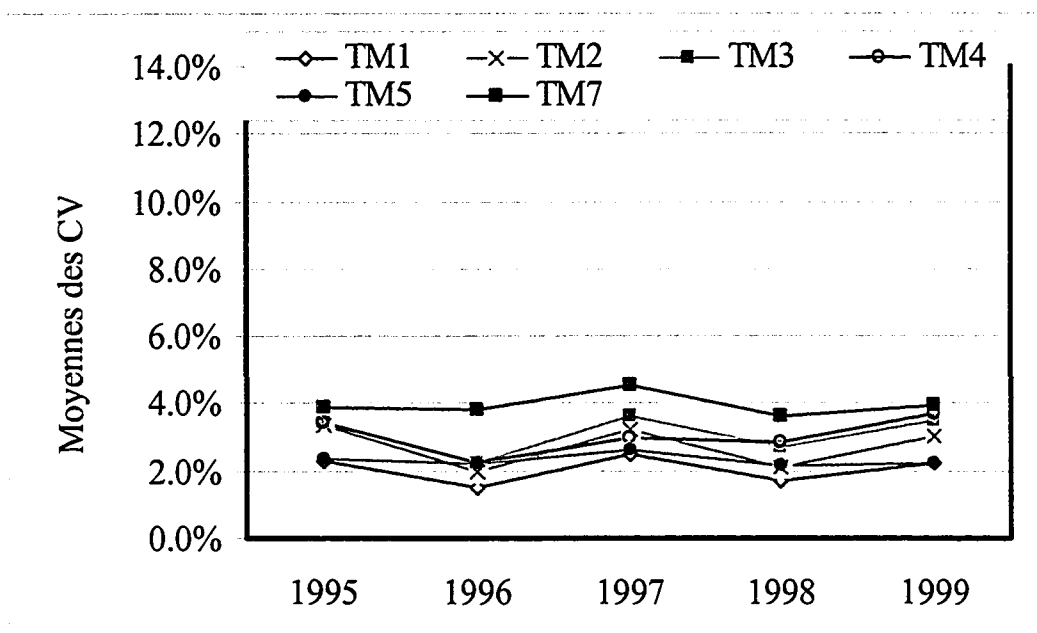


Figure 4.10b: Moyennes des Coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels durant 5 années (1995-1999) du site NCRA.

Variation saisonnière

Du fait que le site NCRA est constitué principalement d'une végétation homogène (prairies), une caractérisation de la variabilité saisonnière de ce site est d'une importance majeure. Les données que nous avons pu trouver, dans la base des données du centre canadien de Télédétection, pour faire cette analyse se constituent de trois images TM acquises en avril (printemps), août (été) et octobre (automne) de l'année 1998. La figure 4.11 illustre la variation du CV saisonnier dans les six canaux de l'image. Nous constatons que, par rapport à la saison référence (avril), la valeur du CV n'a pas dépassé les 3 % dans les deux canaux du visible (TM1 et TM2) durant les saisons d'été et d'automne. Par contre, dans les 4 autres canaux (TM3, TM4, TM5 et TM7), qui se caractérisent par une grande sensibilité aux stades évolutifs des couverts végétaux, les valeurs du CV ont augmenté durant l'été (phase de la croissance maximale) et, par la suite, elles ont diminué au début de l'automne (commencement de la sénescence). En effet, durant l'été, le CV atteint une variation de 10 %, notamment dans le canal TM4 qui est le plus sensible à la biomasse. Notons que dans le canal TM7 (moyen infrarouge), le CV dépasse les 6 %. Quant au canal TM3 (rouge) qui est sensible à la présence de la chlorophylle, le CV passe d'environ 6 % durant l'été à environ 4 % en automne. Par ailleurs, les résultats obtenus à partir des données AVHRR acquises en 1999, ont révélé que Newell County Rangeland a subi une variation importante dans le visible entre les mois d'avril, mai et juillet. Par référence au mois d'avril, la valeur du CV accède 15 % en mai et dépasse 19 % en juillet. Par contre, dans le proche infrarouge, cette valeur atteint 8 % en mai et 5 % en Juillet (figure 4.12).

Cependant, malgré la logique de l'analyse dégagée ci-dessus et bien que le site soit constitué principalement de couverts végétaux, il est difficile dans le contexte de cette étude de conclure rapidement sur le comportement saisonnier du site du fait que les données TM d'août 1998 montrent une forte variation du CV comparativement aux autres années (figure 4.10a). D'un autre côté, les données AVHRR ne sont pas assez représentatives, du fait que le site se trouve à différents emplacements dans les images par rapport au nadir. À cause de l'effet panoramique du capteur et la courbure de la terre, le bloc des pixels AVHRR (7x7) considéré couvre des superficies plus grandes que celle

du site et qui varient d'une image à l'autre. En outre, l'effet de l'atmosphère peut lui aussi contribuer à cette variation saisonnière, notamment dans le visible. Il est donc souhaitable de reprendre l'analyse du comportement saisonnier du site en considérant les trois saisons (printemps, été et automne) durant plusieurs années.

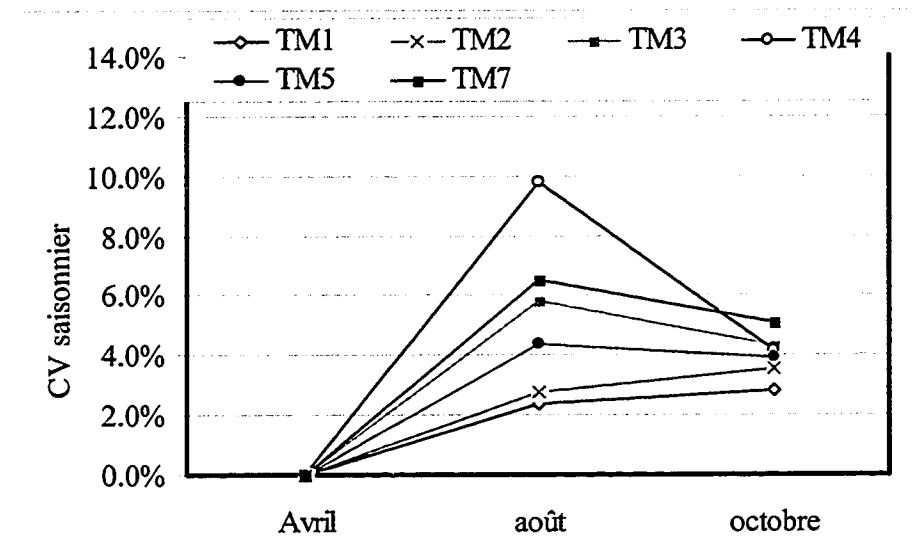


Figure 4.11: Coefficient de variation temporelle saisonnier (avril, août et octobre), durant la même année (1998)

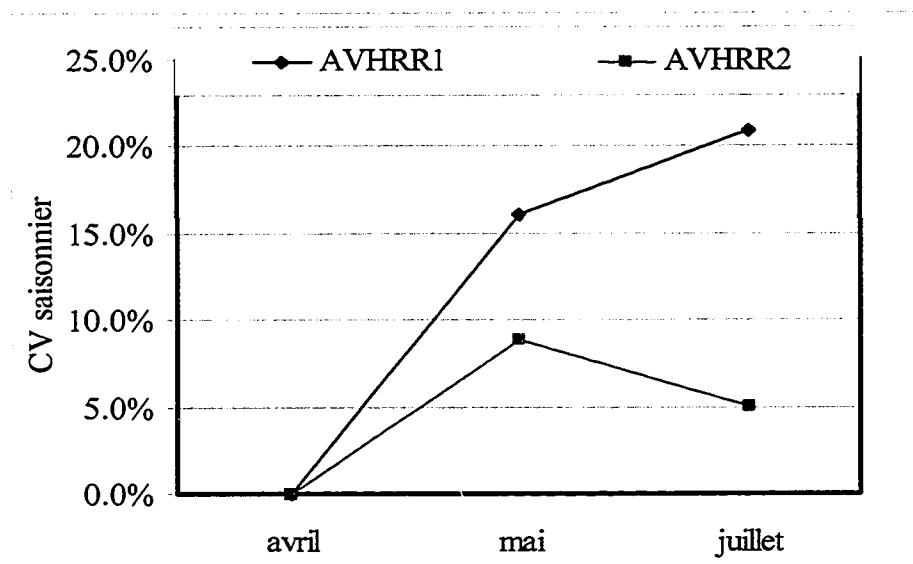


Figure 4.12: Coefficient de variation temporelle saisonnier (avril, mai et juillet) durant la même année (1999).

4.2.1.4. Caractérisation spectrale

Afin d'analyser l'impact de la variation de la longueur d'onde sur l'uniformité spatio-temporelle du site NCRA, nous avons considéré deux autres images TM et HVR acquises durant la même journée, le 4 octobre 1998. La figure 4.13 permet une comparaison de la moyenne des coefficients de variation (MCV) calculée dans les trois canaux de HRV et aussi dans leurs homologues de TM en fonction de la taille de la fenêtre. Nous remarquons que les différentes courbes restent monotones mais avec des faibles valeurs dans les canaux de HRV (moins de 3 %) par rapport à leurs homologues de TM (entre 3 et 4 %). Cette différence peut être expliquée par la non-coïncidence des bandes spectrales homologues entre capteurs (largeur des bandes) et aussi par la variation de la fonction de réponse spectrale (qui est une combinaison de la réponse typique du filtre et celle des détecteurs) entre les bandes spectrales homologues. L'effet de la géométrie d'acquisition peut, lui aussi, introduire des variations étant donné que les deux capteurs ont des géométries de visées relativement différentes, bien qu'elles soient au nadir. Quant à la différence de la résolution spatiale entre les deux capteurs, elle peut introduire des faibles variations; le coefficient de variation est calculé avec des fenêtres de résolutions spatiales différentes. Évidemment, à cause de cette différence, le voisinage considéré par chaque pixel central n'est pas le même entre les deux images lors du traitement, ce qui permet de révéler certaines hétérogénéités locales. On peut ajouter également l'effet de l'atmosphère qui peut se manifester de façon relativement différente dans les bandes homologues des deux capteurs. Si nous considérons maintenant les figures 4.8a et 4.8b issues de deux images acquises durant le même mois mais à deux années différentes, nous remarquons que la MCV ne dépasse pas les 3 % dans les trois canaux de HRV ainsi que dans leurs homologues de TM. Toutefois, il faut vraiment faire attention lors de l'analyse des résultats compte tenu qu'une faible valeur de la MCV ne signifie pas automatiquement une uniformité spatiale parfaite du site, car elle est la moyenne de plusieurs pixels dont l'uniformité diffère à cause de l'existence de l'humidité ou des marécages au niveau du site (Omari *et al.*, 2001) (voir annexe 2).

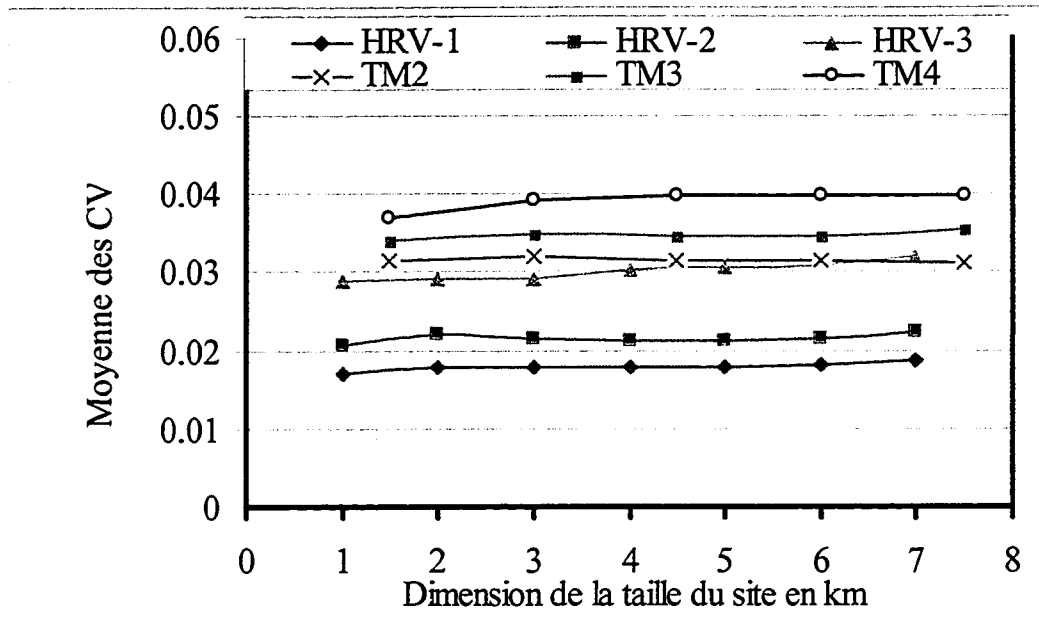


Figure 4.13: MCV en fonction de la taille de la fenêtre dans les trois canaux de HRV de SPOT et leurs homologues de TM de Landsat (TM2, TM3, TM4), images acquises le 4 octobre 1998.

4.2.1.5. Conclusions sur le site de Newell County Rangeland:

- Nous avons défini un site dans les prairies de Newell County Rangeland avec une taille de 7 par 7 km². Ce site se distingue par une bonne uniformité spatiale dans le visible alors que dans le proche et moyen infrarouge cette uniformité est affectée, notamment dans le canal TM7 à cause de sa nature constituée d'un couvert végétal.
- La comparaison de la statistique de Getis et du coefficient de variation indique une complémentarité entre les deux méthodes. En effet, comparativement au CV, la statistique de Getis a permis de mieux identifier la nature hétérogène du site en signalant des petites irrégularités dispersées au niveau de ces prairies et en distinguant ces dernières des zones agricoles. D'autre part, le CV a permis de bien identifier les changements qu'a subi la surface de ce site au cours du temps.

- L'ensemble des résultats obtenus de la statistique de Getis et du coefficient de variation appliqués aux canaux de HRV et de leurs homologues de TM a indiqué que ces deux statistiques sont insensibles à la différence entre les résolutions spatiales des deux capteurs.
- La comparaison des bandes spectrales de HRV avec leurs homologues de TM de deux images acquises sur le site durant la même journée nous a montré que Newell County Rangeland est spectralement uniforme.
- La caractérisation temporelle annuelle indique que le site est relativement stable d'une année à l'autre durant la même saison. Par contre, à l'échelle saisonnière, les résultats révèlent que le site est instable d'une saison à l'autre.
- Afin de mieux juger l'évolution temporelle de ce site, il faut signaler ici qu'il est important de reprendre la caractérisation de ce site dans les mêmes saisons dans d'autres années.

4.2.2. Railroad Valley Playa (RVPN)

4.2.2.1. Caractérisation spatiale

La caractérisation spatiale du site Railroad Valley Playa est réalisée en employant les deux méthodes (coefficient de variation et statistique de Getis), en utilisant des données TM, AVHRR et HRV et en tenant compte des travaux évoqués dans la littérature (Teillet *et al.*, 1998b, 1995, Scott *et al.*, 1996).

2.2.2.1.1. Méthode du coefficient de variation

Les figures 4.14 et 4.15 présentent les images dérivées du coefficient de variation calculé avec une fenêtre de 5x5 dans tous les canaux TM et HRV des images de RVPN. Elles montrent que les quatre premiers canaux TM et les trois canaux HRV (visible et proche infrarouge) ont des valeurs de CV très faibles comparativement aux canaux TM5 et TM7.

Ces derniers ont montré les contrastes les plus forts et ont permis de délimiter clairement la zone du *playa* et le relief (figures 4.15(e) et 4.15(f)). Ils ont permis également de bien montrer des petites parcelles hétérogènes dispersées au milieu du *playa*. L'ensemble des images des deux figures montrent une excellente homogénéité spatiale de la région centrale de ce site avec des faibles valeurs du CV (de l'ordre de 1,5 %) dans tous les canaux (une zone de couleur bleu foncé dans les images des figures 4.14 et 4.15).

Bien entendu, les images de CV dérivées des deux premiers canaux AVHRR (visible et proche infrarouge) ont aussi donné des résultats semblables à ceux obtenus à partir des données TM et HRV (figure 4.16). En effet, cette figure montre une bonne uniformité de la zone du *playa* avec un CV de l'ordre de 2,5 à 3,5 % dans les deux canaux (images a et b de la figure 4.16). Il est évident que ces résultats ne sont pas représentatifs du fait que la résolution spatiale du capteur AVHRR, 1,1 Km au nadir, a dissimulé quelques hétérogénéités identifiées à partir des données TM et HRV (figures 4.14 et 4.15).

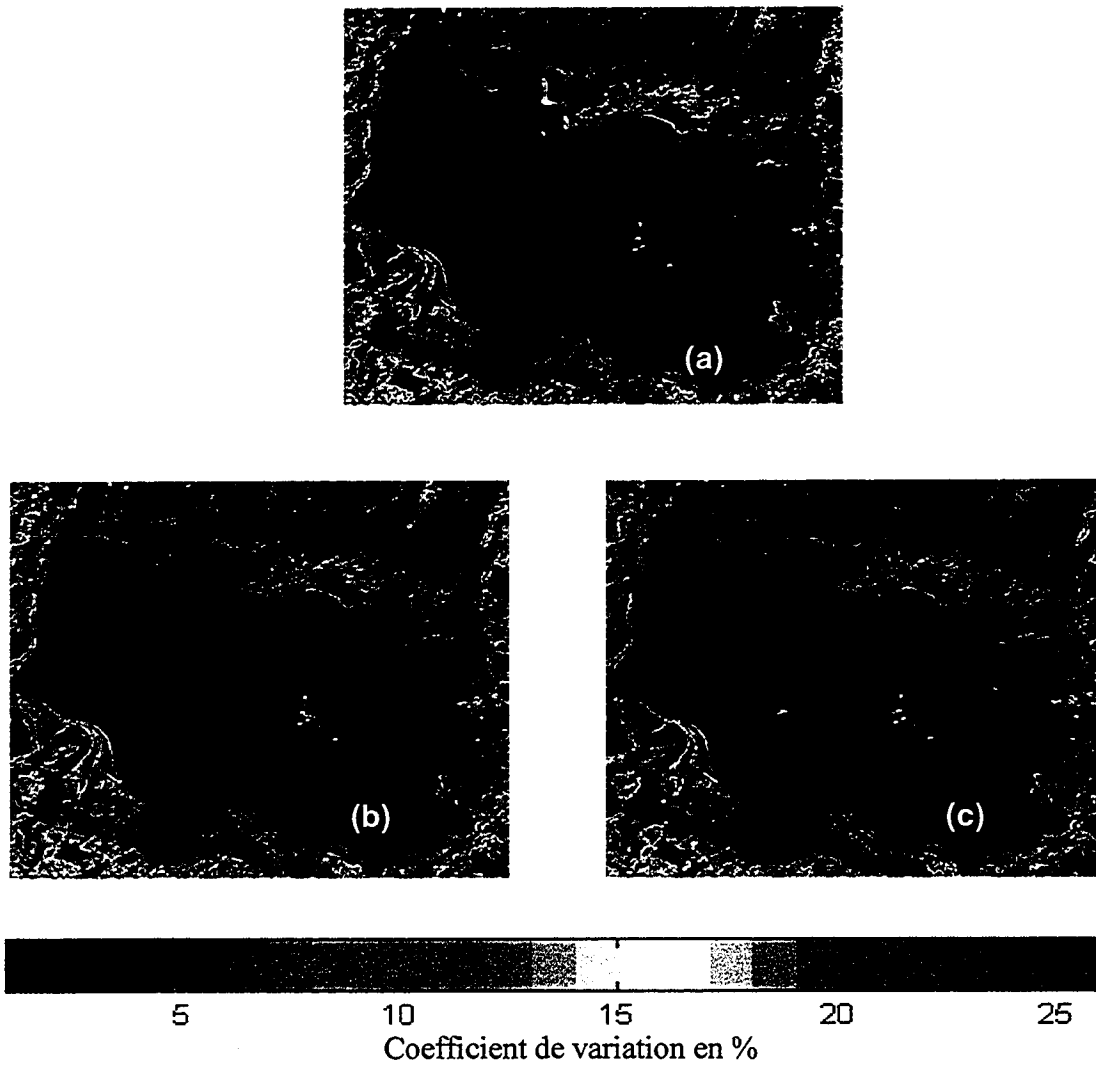


Figure 4.14: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV2: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur RVPN le 18 juin 1998.

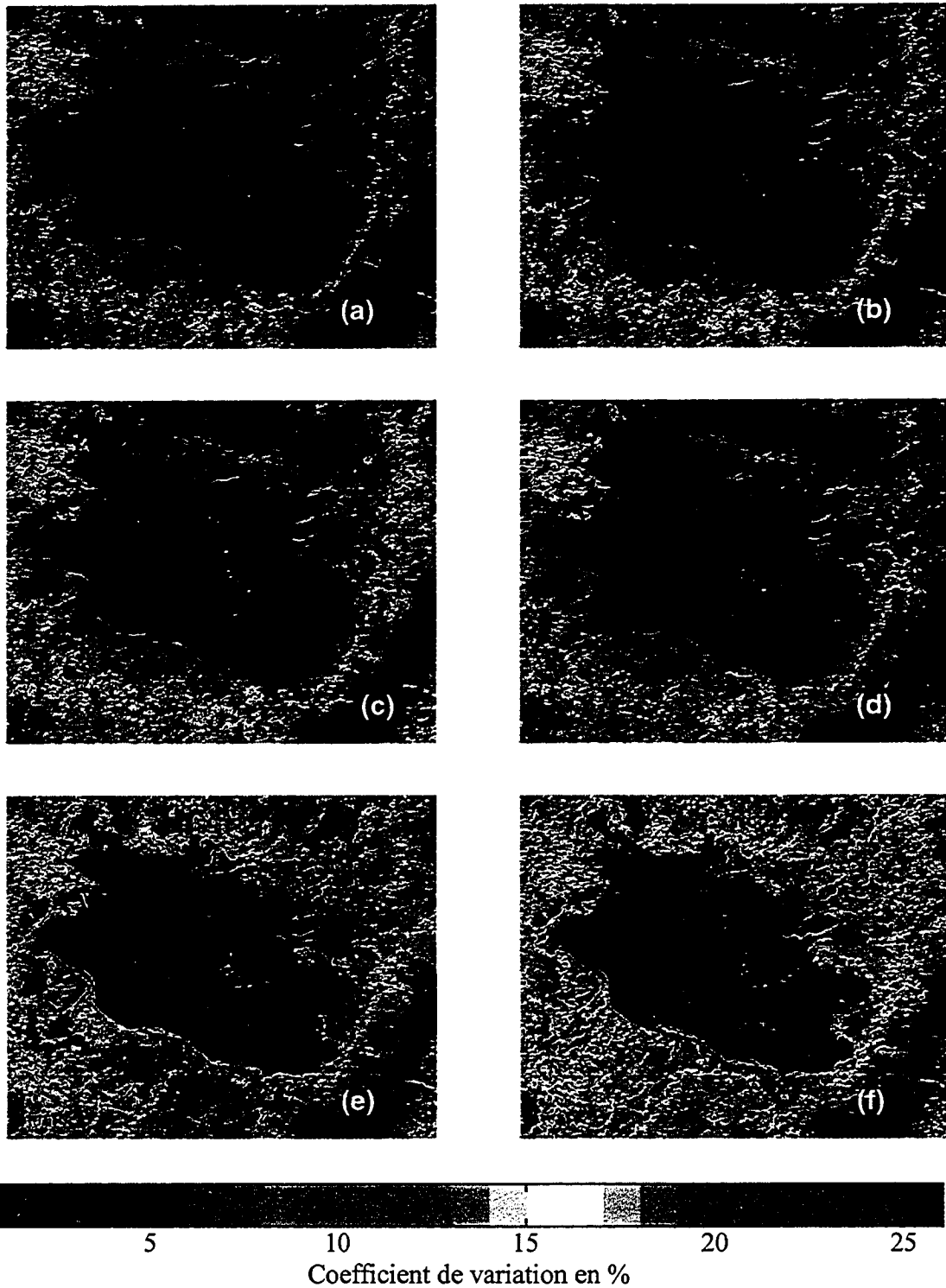


Figure 4.15: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les six canaux (TM1: (a), TM2: (b), TM3: (c), TM4: (d), TM5: (e) et TM7: (f)) d'une image TM de Landsat acquise sur RVPN en juin 1998.

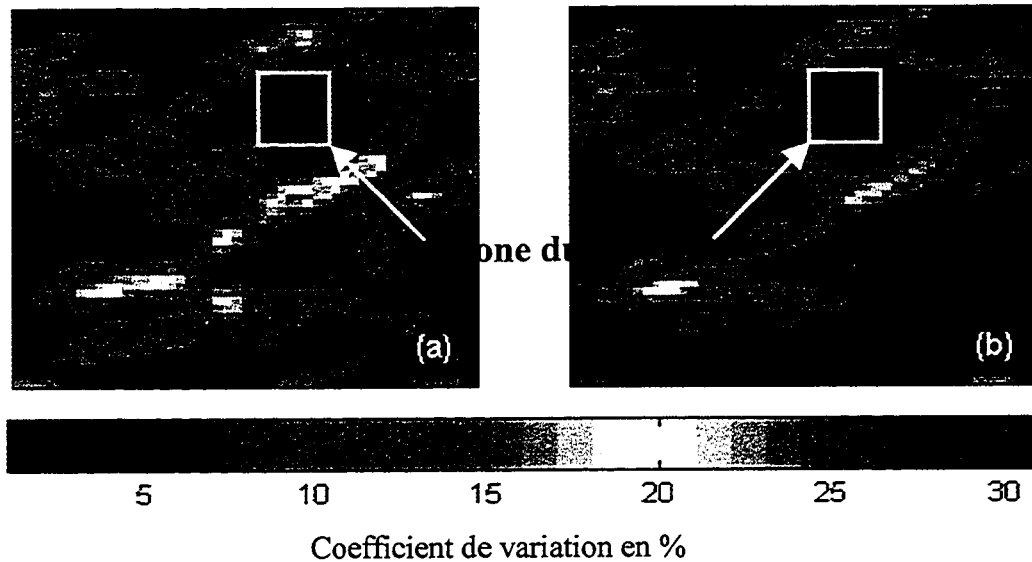


Figure 4.16: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les deux premiers canaux d'une image AVHRR de NOAA-14 acquise sur RVPN le 11 juillet 1998.

4.2.2.1.2. Méthode de la statistique de Getis

De la même façon que pour le site Newell County Rangeland, nous avons dérivé des images correspondantes aux calculs de la statistique de Getis G_i^* avec une fenêtre de 5x5 dans tous les canaux TM, HRV et AVHRR. Les figures 4.17 et 4.18 représentent un exemple de ces traitements dérivés des mêmes données utilisées pour le calcul du coefficient de variation. On constate, d'après les figures 4.17 et 4.18, que la zone du *playa* se caractérise par une brillance assez élevée (couleur jaune à rouge au milieu des images des deux figures) et par une bonne homogénéité (faible variation de G_i^*). Cette constatation est bien visible dans le premier canal de HRV (figure 4.17a), ainsi que dans les deux canaux TM1 et TM2 (figures 4.18a et b). On identifie, d'après ces deux figures, les zones accidentées (présence du relief) qui affichent des valeurs de G_i^* très élevées et très variables, et une zone sombre entourant le *playa* (couleur bleue dans les figures 4.17 et 4.18) qui se caractérise par des faibles valeurs de G_i^* . Dans les canaux rouge et proche infrarouge (figures 4.18 c et d), la zone du *playa* affiche des valeurs faibles de G_i^* , comparativement aux canaux bleu et vert. Ceci montre que cette zone est dénuée de la

végétation qui diffuse au maximum dans le canal du proche infrarouge. Dans le moyen infrarouge TM5 et particulièrement dans le canal TM7 (figures 4.18e et f), la zone du *playa* est relativement moins brillante. Elle affiche des valeurs de G_i^* très faibles par rapport aux deux premiers canaux. Cette remarque est nettement visible sur les bords du *playa*. Ce comportement peut être attribué à l'effet de l'humidité dans le sol du *playa*. Par ailleurs, l'analyse des figures 4.17 et 4.18, montre que la statistique de Getis dérivée à partir des canaux de HRV est semblable de celle dérivée à partir de leurs homologues de TM. Ceci montre que G_i^* est insensible à la différence entre les résolutions spatiales des deux capteurs.

Les images de G_i^* dérivées des deux canaux AVHRR avec la même fenêtre qui est de 5x5 pixels, qui correspond à 6 km par 6 km d'environ, montrent que le *playa* du RVPN est brillante et homogène, notamment dans le canal du visible (Couleur rouge dans les deux images de la figure 4.19). Mais la faible résolution spatiale du capteur AVHRR a dissimulé le contraste identifié dans les images des figures 4.17 et 4.18.

Les résultats dégagés des deux méthodes montrent que, G_i^* a dévoilé la nature hétérogène du site RVPN dans les canaux du visible des trois capteurs (HRV, TM et AVHRR). Cette méthode a montré que certaines places sont plus brillantes que d'autres. Vu que ce site est complètement dénué de la végétation, ce contraste peut être expliqué probablement par l'effet de l'humidité du sol et par la présence de différents minéraux dans la surface de ce *playa*. Toutefois, dans le proche et moyen infrarouge, G_i^* a montré que ce site est moins brillant et relativement homogène particulièrement dans le moyen infrarouge. Notons que cette méthode a fourni les mêmes résultats indépendamment de la résolution spatiale des capteurs utilisés. Par contre, la méthode du CV a montré que le site de RVPN est relativement homogène dans tous les canaux (visible, proche et moyen infrarouge). Également, cette méthode n'a pas montré une variation liée à la différence des résolutions spatiales des capteurs.

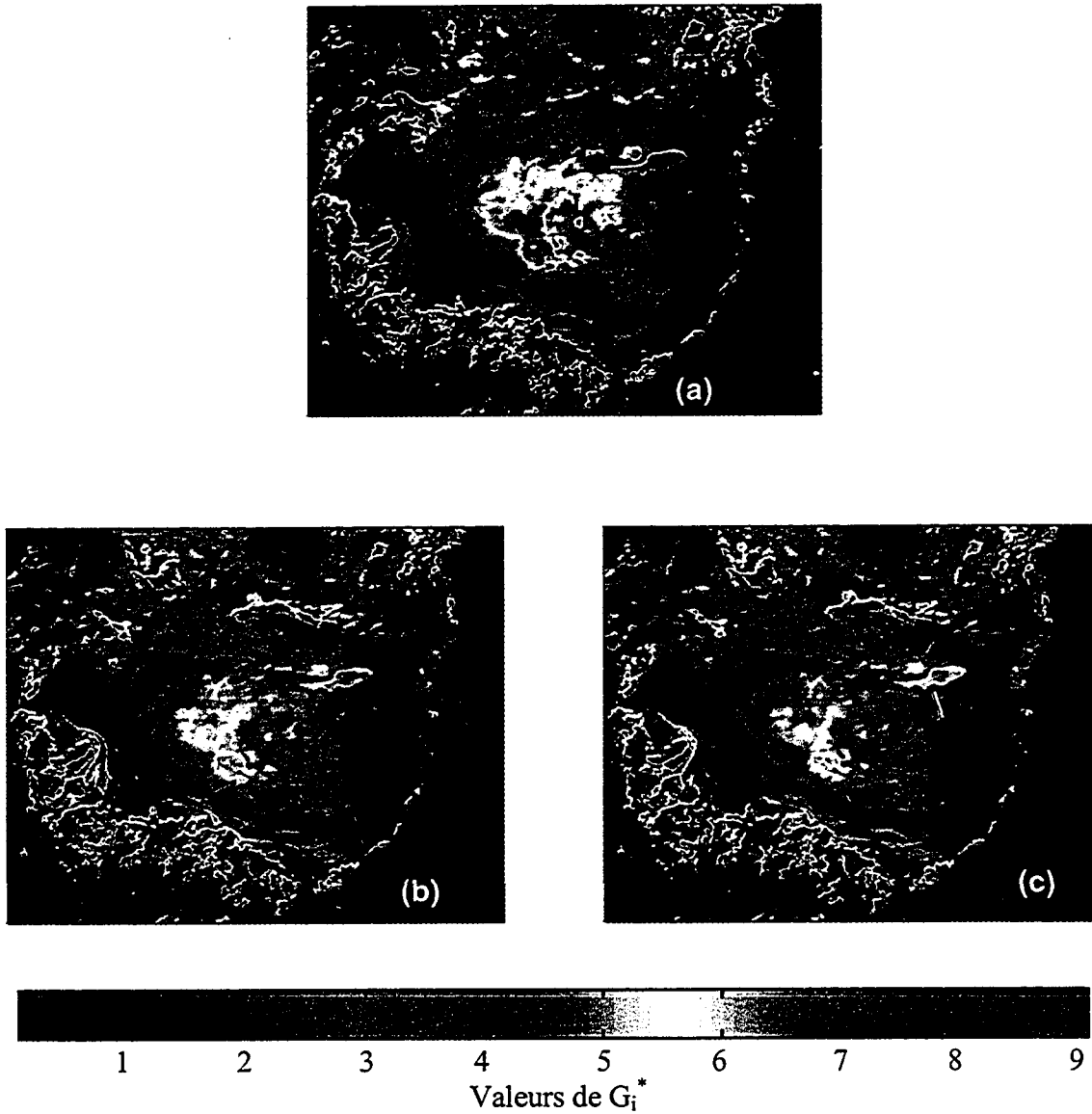


Figure 4.17: Images de la statistique de Getis calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV2: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur RVPN le 18 juin 1998.

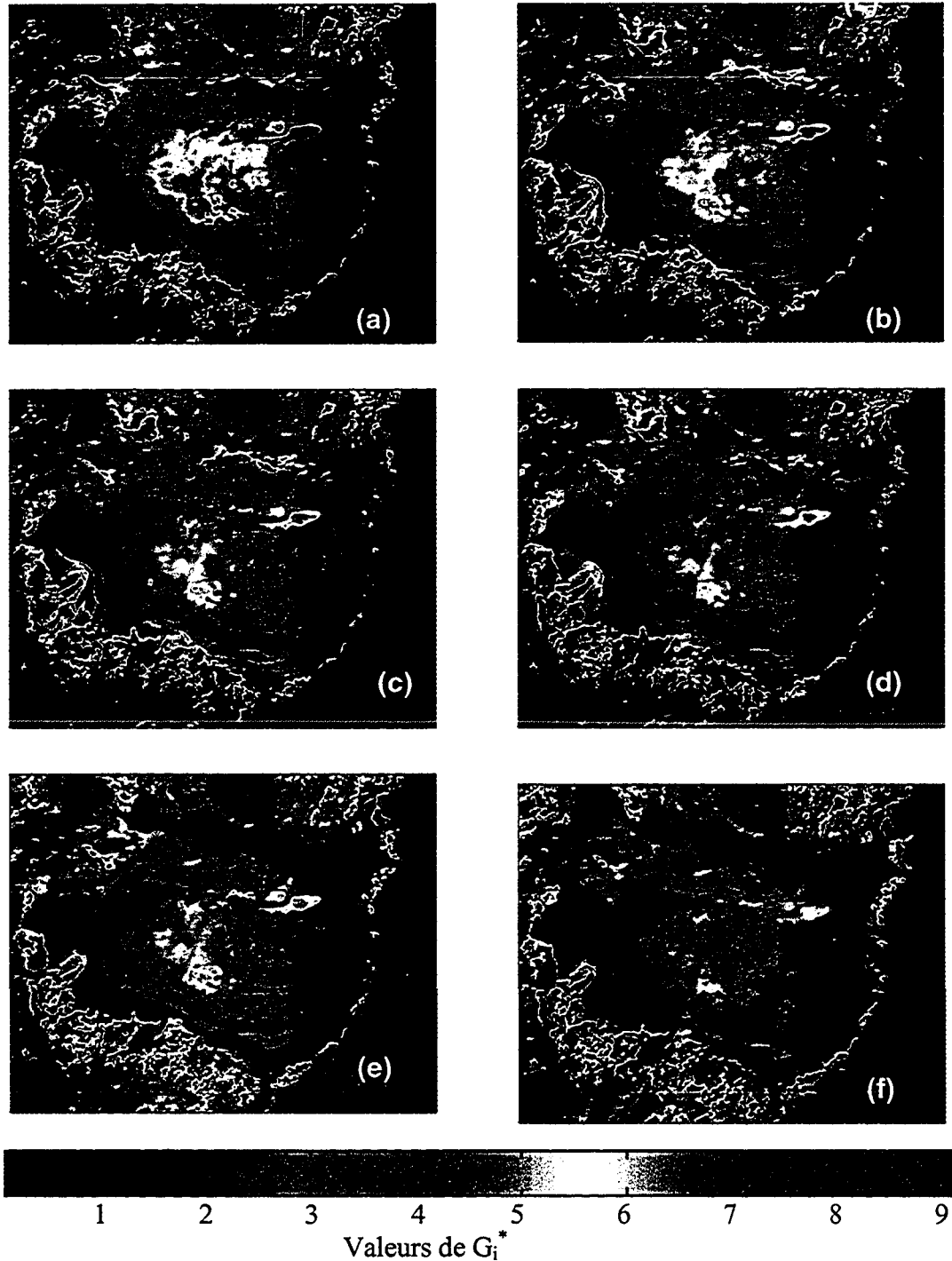


Figure 4.18: Images de la statistique de Getis calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les six canaux (TM1: (a), TM2: (b), TM3: (c), TM4: (d), TM5: (e) et TM7: (f)) d'une image TM de Landsat acquise sur RVPN en juin 1998.

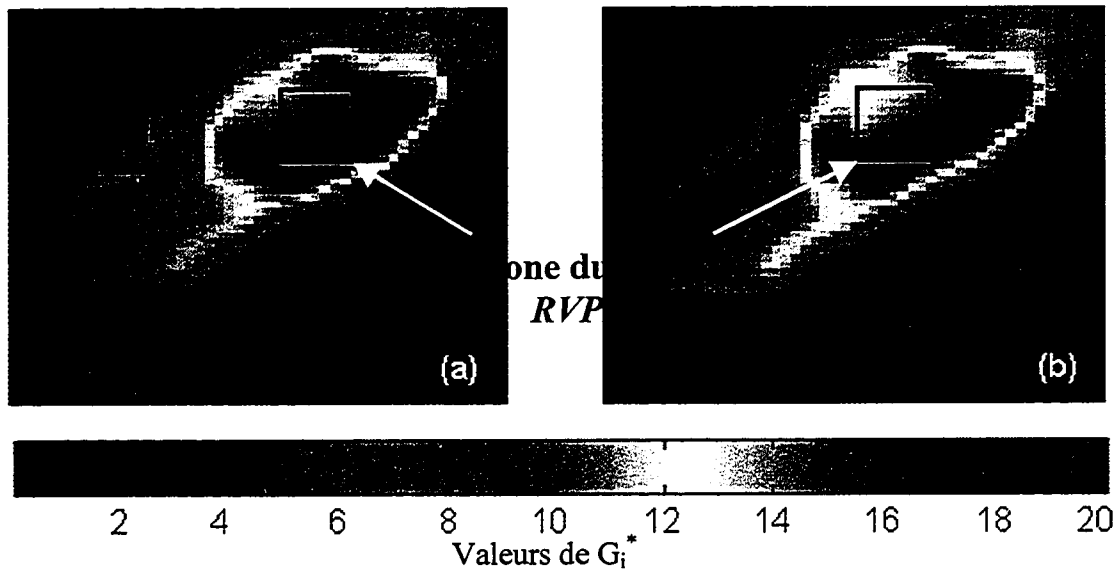


Figure 4.19: Images de la statistique de Getis calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les deux premiers canaux d'une image AVHRR de NOAA-14 acquise RVPN le 11 juillet 1998.

4.2.2.2. Taille du site

Dans le but de fixer une taille convenable pour le site de Railroad Valley Playa, nous avons calculé la moyenne des coefficients de variation (MCV) avec des fenêtres croissantes à partir des différents points dans le *playa*. Ceci nous a conduit à choisir l'emplacement le plus homogène pour le site (le centre du carré de la figure 4.21, les autres points de la figure sont les différents emplacements testés). La figure 4.20 représente la variation de la MCV en fonction de la taille du site à partir des données HRV et TM acquises la même journée, le 18 juin 1998, avec des conditions atmosphériques presque semblables. D'après les courbes de cette figure, on constate que la MCV augmente légèrement au fur et à mesure que la taille du site augmente dans tous les canaux TM et HRV (figures 4.20 a et b). En effet, cette figure indique que la MCV dans les trois canaux HRV et leurs homologues de TM reste sous la valeur de 2%, même si la taille du site dépasse 7 km². Également, on remarque que la variation de la MCV dans les deux canaux du moyen infrarouge (TM5 et TM7) est plus élevée comparativement aux autres canaux, particulièrement TM7 qui dépasse 4% lorsque la

taille du site dépasse 7,5 km². Ce comportement est attribué probablement à la variation de l'humidité du sol dans le site et à sa composition minéralogique.

Cette figure montre que la MCV a un comportement identique pour tous les canaux HRV et leurs homologues de TM, elle évolue légèrement autour de 1 % indépendamment de la taille du site, avec une faible variation de la MCV dans les canaux HRV par rapport à ceux de TM. Ceci est dû à la différence de la sensibilité spectrale des deux capteurs et à la différence de leurs géométries d'acquisition. Mais en général, d'après ces résultats, le site de RVPN montre une bonne uniformité spectrale. Ce critère important constitue une source d'erreurs non négligeables si des mesures à une longueur d'onde sont employées pour étalonner d'autres longueurs d'onde. Ceci s'applique dans l'inter-étalonnage des capteurs avec différentes bandes spectrales.

D'après ces résultats, une taille de 6x6 km² pour le site de Railroad Valley Playa a été considérée avec une MCV de l'ordre de 2 % dans les cas des canaux TM et de 1,5 % dans le cas des canaux HRV. La figure 4.21 montre l'emplacement et la taille de ce site (carré sur l'image). Cette taille permet l'utilisation du site pour l'étalonnage des capteurs de faible comme de haute résolution spatiale. Or, d'après ces mêmes résultats et d'après une analyse visuelle des images, le site peut être utilisé avec une taille plus grande si nécessaire (jusqu'à 8x8 km²). Teillet *et al.* (1998 b) ont désigné une taille de 7x7 km² dans la même zone du site en utilisant des données HRV de SPOT et avec un coefficient de variation inférieur à 3 % dans les trois canaux de HRV. Aussi, Scott *et al.* (1996) ont considéré un ensemble de sites, avec des tailles de 3x3 km², localisés dans différentes zones dans le *playa* de RVPN. Ces sites sont choisis à cause de leur faible variation ($\pm 2,5$ % dans les trois canaux HRV et les quatre premiers canaux TM et moins de 1 % dans les deux premiers canaux AVHRR).

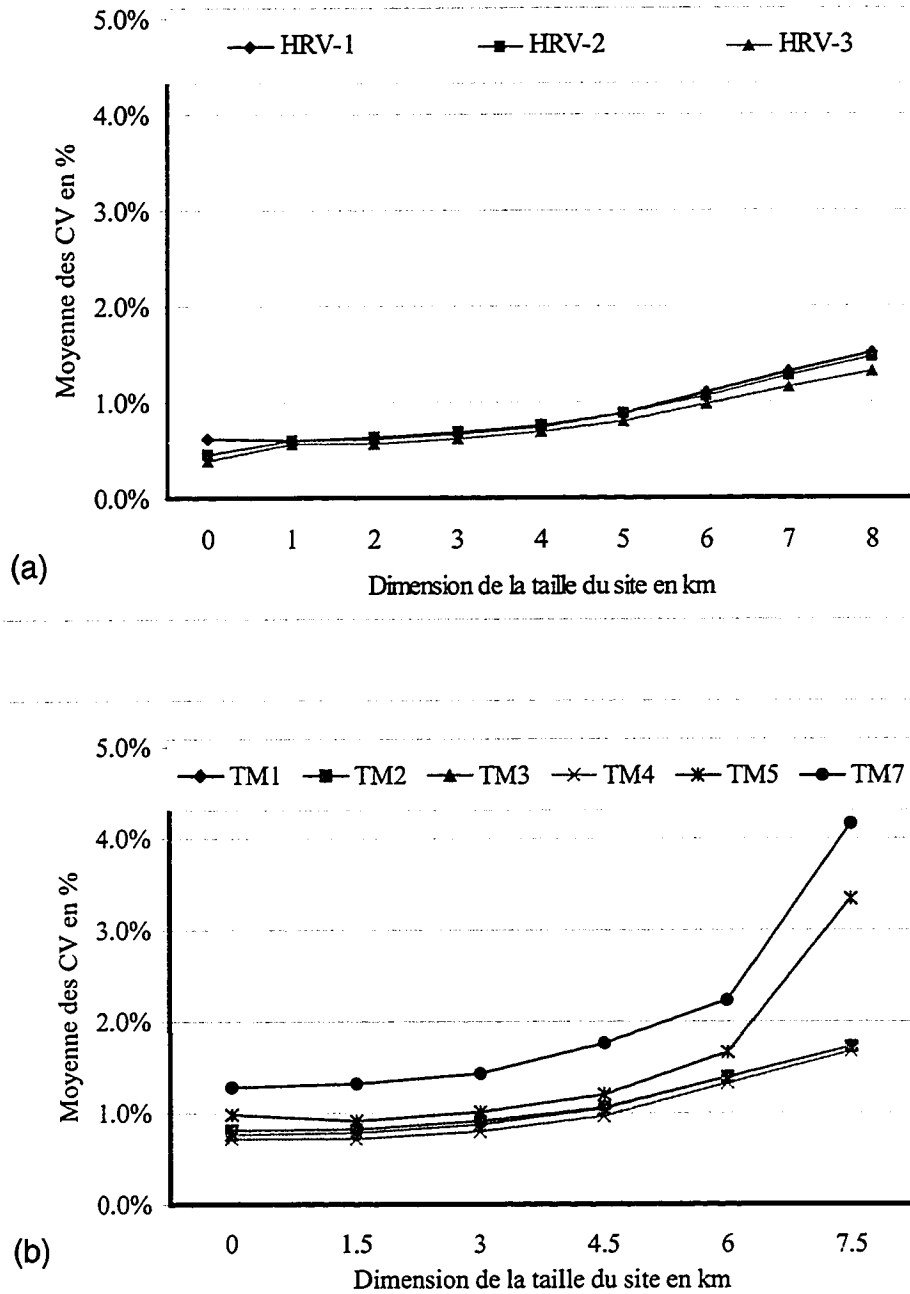


Figure 4.20: MCV calculée en fonction de la dimension de la fenêtre (a) pour une image HRV et (b) pour une image TM acquises le 18 juin 1998.

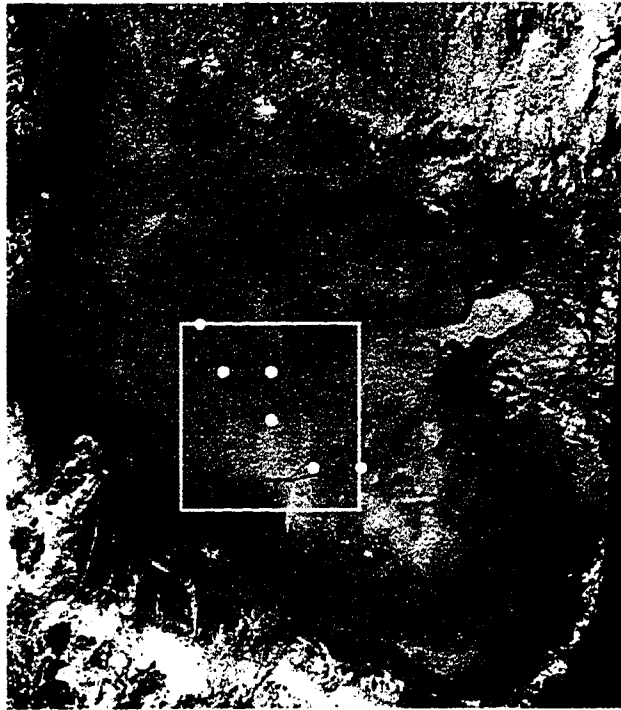


Figure 4.21: Le site 6x6 km² retenu à Railroad Valley Playa (Nevada).

4.2.2.3. Caractérisation temporelle

Pour quantifier la variation saisonnière de Railroad Valley Playa, nous avons entrepris une étude en utilisant une série de 5 images AVHRR, prises avec une fréquence d'une image chaque mois, d'avril à août 1999. Toutefois, il est important de noter l'indisponibilité des images, HRV et TM, suffisantes pour réaliser cette étude. La figure 4.22 illustre le CV temporel en fonction de ces dates. Elle montre que le site de RVPN se distingue par une bonne stabilité durant ces 5 mois avec un CV inférieur ou égale à 1% dans le premier canal et à 3% dans le deuxième canal de AVHRR, à l'exception du mois mai où le CV dépasse 2% dans le premier canal et 4% dans le deuxième canal. Cette variation peut être expliquée par des changements de l'état de la surface; causées par une variation de l'humidité de sol ou par des changements dans sa structure attribués à une redistribution des composantes du sol causée par les vents. Cependant, la comparaison des données HRV de SPOT acquises en mars et juin 1997 ont révélé une variation importante du site.

Le CV temporel, entre ces dates, a évolué approximativement de 20 % à 22 % dans les trois canaux HRV. De leur côté, Teillet *et al.* (1995) ont indiqué que RVPN subit une variation saisonnière importante en utilisant une série d'images radar à synthèse d'ouverture SAR (Synthetic Aperture Radar) d'ERS-1 (European Remote Sensing Satellite). Selon eux, cette variation est attribuable à des changements de texture de la surface causés par les vents ou par les inondations surgies après des tempêtes de pluies ou de neiges (Teillet *et al.*, 1995).

Contrairement aux données AVHRR qui ont montré que RVPN est stable temporellement, les données HRV de SPOT ont indiqué que ce site est sujet à des variations importantes. Ces résultats concordent avec ceux obtenus à partir des données du radar SAR d'ERS-1. Cependant, la faible résolution spatiale du capteur AVHRR nous laisse soupçonner quant à la représentativité des résultats dérivés de ce capteur. De plus, il est intéressant de signaler ici qu'un capteur optique ne mesure que la réflectance de la surface alors qu'un radar offre plus d'informations sur l'état du sol à cause de sa capacité de pénétration. En conséquence, la comparaison entre les résultats issus de ces différents types de données nous permette de dire que RVPN est instable temporellement. Toutefois, d'après les images acquises à différentes dates, le site maintient une bonne uniformité spatiale particulièrement du mois de juin au mois de septembre. Scott *et al.* (1996) ont indiqué également que l'uniformité spatiale de Railroad Valley Playa reste maintenue de la mi-saison de l'été à la fin de l'année.

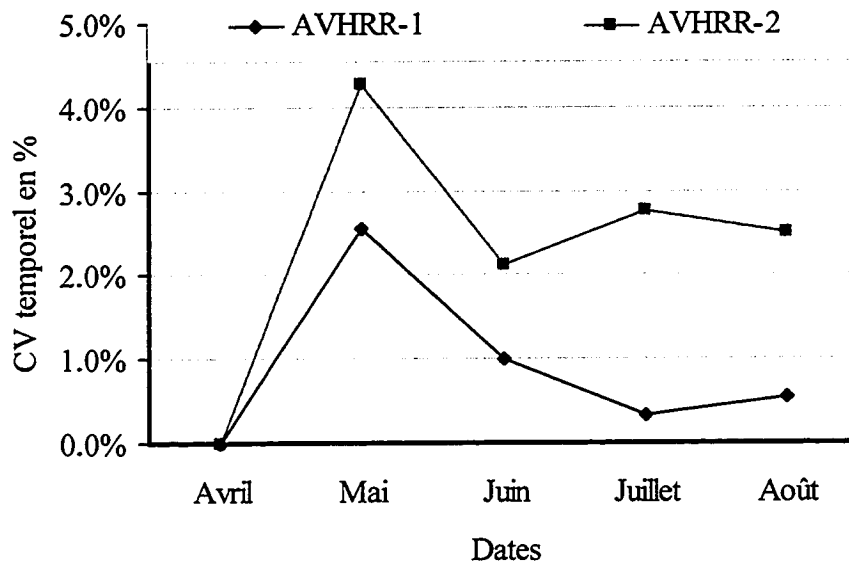


Figure 4.22: Coefficient de variation temporelle saisonnier dérivé des données AVHRR acquises sur Railroad Valley Playa du mois d'avril au mois d'août, durant la même année (1999).

4.2.2.4. Conclusions sur le site de Railroad Valley Playa :

→ En utilisant les données HRV, TM et AVHRR, La statistique de Getis et le coefficient de variation ont montré qu'un site de 6x6 km² de Railroad Valley Playa peut être retenu. Il se caractérise par une bonne uniformité spatiale dans le visible et l'infrarouge, un degré de brillance très élevé et une stabilité spectrale relativement bonne.

→ Les données HRV ont montré que Railroad Valley Playa est instable sur l'échelle saisonnière. Quant à l'échelle annuelle, les données disponibles ne permettent pas une bonne caractérisation. Il est donc important de reprendre la caractérisation de l'évolution temporelle de ce site en utilisant des données TM, HRV et AVHRR acquises dans les différentes saisons durant plusieurs années.

→ Contrairement au coefficient de variation, la statistique de Getis a permis de bien caractériser l'homogénéité spatiale du site Railroad Valley Playa dans tous les canaux des trois capteurs TM, HRV et AVHRR. Quant au CV, il a permis de mettre en évidence les hétérogénéités dispersées dans le *playa* de ce site particulièrement dans les canaux du moyen infrarouge. Indépendamment des résolutions spatiales, les deux statistiques utilisées ont montré pratiquement les mêmes résultats.

4.2.3. Lunar Lake Playa (LLPN)

4.2.3.1. Caractérisation spatiale

L'exploration de la zone la plus uniforme spatialement, dans Lunar Lake, est effectuée uniquement à l'aide des images HRV de SPOT à cause de la petite taille du site qui écarte la possibilité d'utiliser des données AVHRR de faibles résolution spatiale. Alors que sur l'image TM qu'on possède sur la région, le *playa* de Lunar Lake est couvert des nuages.

4.2.3.1.1. La méthode du coefficient de variation

Nous avons dérivé des images du coefficient de variation CV, de la même façon que pour Newell County Rangeland et Railroad Valley Playa. C'est à dire, calculé avec une fenêtre de 5x5 dans les trois canaux des images HRV de Lunar Lake. La figure 4.23 illustre le résultat obtenu à partir d'une image HRV acquise en mars 1998. D'après cette figure, nous remarquons que la variation du CV est très voisine pour les trois canaux du capteur HRV (visible et proche infrarouge). Entre autres, nous constatons que les valeurs du CV les plus élevées sont relevées sur les bords du *playa* avec des valeurs excédant 25 % notamment au sud-ouest du site. Toutefois, les valeurs du CV les plus faibles sont relevées dans le milieu du *playa* (des CV de l'ordre de 2 à 4 % dans les trois canaux). Cette faible variation indique une bonne homogénéité du site. Également, elle montre qu'il est dénué de la végétation (faible valeurs du CV dans la figure 4.23c). Ces constatations concordent avec les remarques de Shepard *et al.* (1993) qui ont indiqué que la surface du *playa* est très brillante dans son milieu. En outre, ils ont signalé la présence

des galets de basalte dispersés dans le sud de ce site, ce qui explique les valeurs élevées du CV dans cette zone.

4.2.3.1.2. La méthode de la statistique de Getis

La figure 4.24 représente un exemple des images de la statistique de Getis dérivées des données HRV (images acquises en mars 1997). Les images de cette figure révèlent des hétérogénéités visibles dans le site de Lunar Lake Playa. En effet, on peut distinguer clairement entre plusieurs groupements de pixels d'intensités différentes dans les trois canaux. Ainsi le nord et le sud-ouest du site se caractérisent par une grande brillance avec des valeurs de G_i^* élevées dans toutes les images de la figure 4.24 (couleurs jaune et rouge) et une uniformité spatiale relativement faible. Quant au nord-est du *playa*, il se montre moins brillant et hétérogène (couleurs bleu et jaune dans les images de la figure 4.24). Le principal facteur responsable de ce comportement est certainement la variation de l'humidité du sol. La topographie semble n'a pas d'effet dans cette région vue que le *playa* de Lunar Lake est parfaitement plat et dénué de la végétation. Les images de cette figure, nous montrent également que la statistique de Getis est presque identique de façon indépendante du canal utilisé.

Contrairement au coefficient de variation qui nous a présenté le *playa* de Lunar Lake comme étant un site homogène et relativement uniforme, la statistique de Getis a permis de montrer une nature hétérogène de ce site. Cette statistique s'est montrée très sensible à l'humidité de la surface très variable dans cet endroit. Toutefois, les deux méthodes se sont montrées relativement insensibles à la variation spectrale. Notons que les canaux utilisés sont limités au visible et au proche infrarouge (les canaux HRV de SPOT).

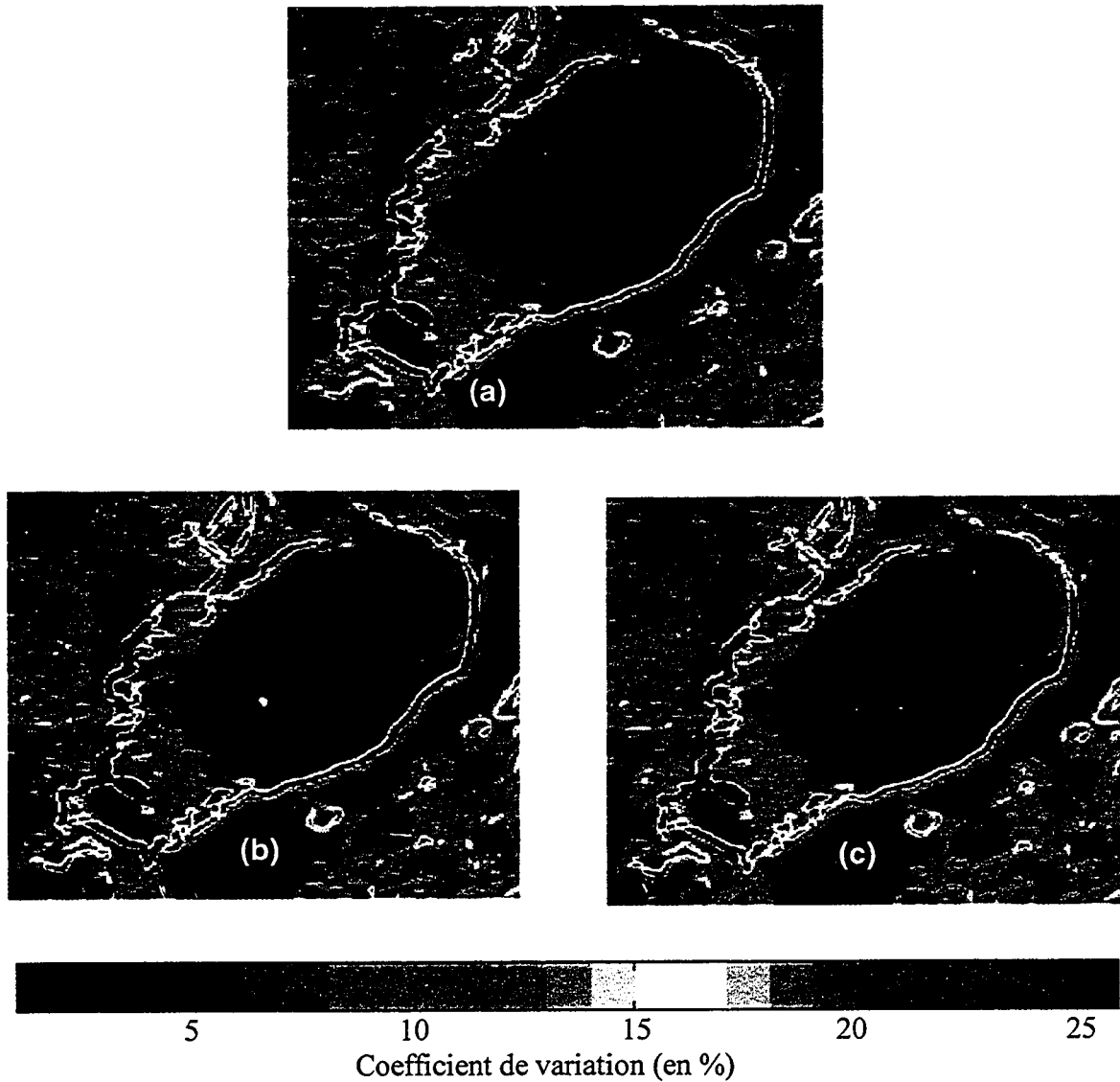


Figure 4.23: Images du coefficient de variation calculés avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV2: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur Lunar Lake Playa en mars 1997.

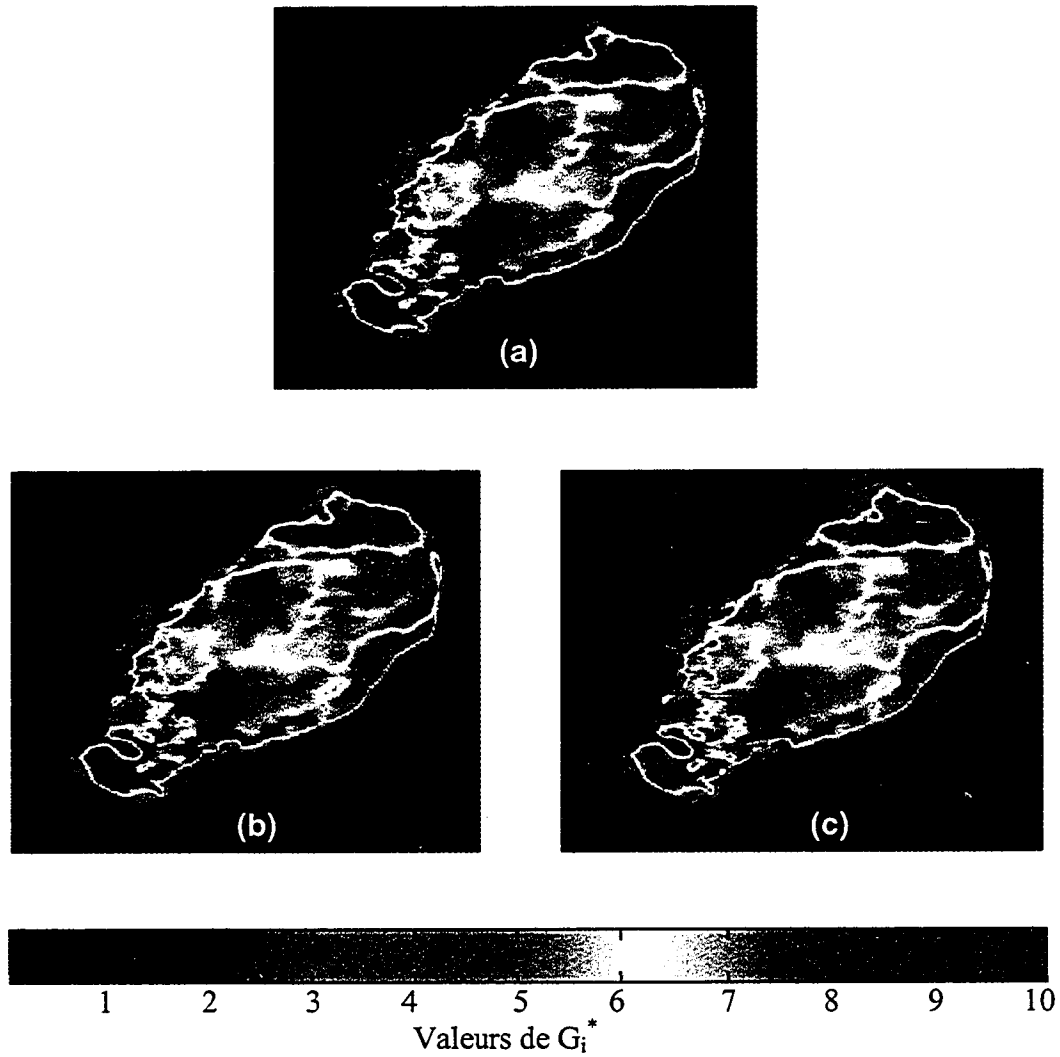


Figure 4.24: Images de la statistique de Getis calculée avec une fenêtre de 5x5 pixels dans les trois canaux (HRV1: (a), HRV2: (b) et HRV2: (c)) d'une image HRV de SPOT acquise sur Lunar Lake Playa en mars 1997.

4.2.3.2. Taille du site

Pour déterminer une taille convenable pour Lunar Lake Playa, nous avons calculé la MCV dans des fenêtres croissantes au milieu de l'emplacement de ce site (voir plus loin dans l'image de la figure 4.26). La figure 4.25 illustre comment la MCV augmente en fonction de la dimension de la taille du site dans tous les canaux HRV de SPOT. La variation de la MCV relativement élevée est celle du canal rouge comparativement aux canaux vert et proche infrarouge (figure 4.25). Ce comportement est probablement attribué à l'existence de quelques minéraux dans la surface de ce site notamment l'oxyde de fer fortement réfléchit dans ce canal. D'après cette figure on constate également que la MCV de tous les canaux dépasse la valeur de 3 % si la fenêtre atteint une taille de 1 km par 1 km, et la valeur de 4 % pour une fenêtre de 1,4 km par 1,4 km. D'après ces résultats, un site de 1x1 km² peut être considéré tout en gardant une MCV de l'ordre de 3 % dans les trois canaux HRV (carré dans l'image de la figure 4.26). Une taille plus grande entraînera des erreurs considérables dues aux variations des conditions de la surface ce qui concorde avec l'analyse de la statistique de Getis qui a révélé une hétérogénéité spatiale du site. Évidemment, avec une taille aussi petite, ce site ne peut être utilisé que pour l'étalonnage des capteurs satellitaires de haute résolution spatiale comme SPOT, Landsat ou Ikonos.

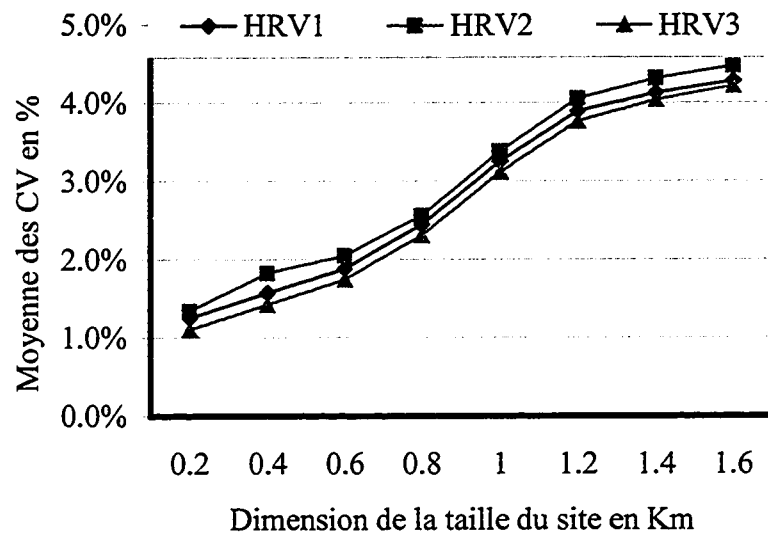


Figure 4.25: MCV calculée en fonction de la dimension de la fenêtre pour une image HRV acquise le 28 juin 1997.

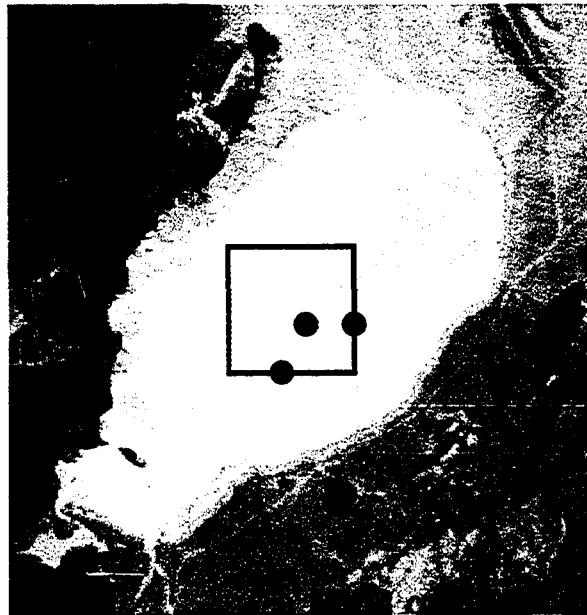


Figure 4.26: Le site 1x1 km² retenu à Lunar Lake Playa (Nevada).

4.2.3.3. Caractérisation temporelle

Les seules trois données HRV de SPOT qu'on a pu avoir pour une caractérisation multi-temporelle du site Lunar Lake Playa sont acquises en mars et juin 1997, et juin 1998. Pour entreprendre cette étude, nous avons calculé le coefficient de variation temporel du site Lunar Lake Playa, d'une part entre les deux mois de mars et de juin de la même année (1997), et d'autre part entre les mois de juin (1997) et juin (1998). Les figures 4.27 et 4.28 illustrent bien comment la surface de ce site a changé durant ces périodes dans les trois canaux HRV de SPOT. D'après la figure 4.27, on constate que la variation du CV dans les trois canaux est nettement élevée. Elle est de l'ordre de 30% dans le premier canal (vert) et de 27% dans les deux autres canaux (rouge et proche infrarouge). Ces résultats montrent que le site de Lunar Lake Playa souffre des changements de l'état de sa surface. Ces changements sont causés essentiellement par la variation de l'humidité du sol qui dépende des conditions atmosphériques très variables dans la région du site. La figure 4.28 indique également que ce site a subi une variation plus importante qui varie d'environ 22% dans le premier canal à plus de 42 % dans le troisième canal.

Pour mieux caractériser la variations temporelle de ce site, les figures 4.29 et 4.30 présentent des images du coefficient de variation et de la statistique de Getis dérivées du canal 2 (rouge) des trois images HRV de Lunar Lake Playa. Le comportement du site dans les canaux vert et proche infrarouge est quasiment le même que celui dans le canal rouge. D'après la figure 4.29, nous constatons que le CV a permis d'extraire les bordures du *playa* et les périmètres des zones qui ont subi des variations spatiales importantes. Cependant, le CV a montré que le site est resté généralement homogène entre les mois de mars et juin de l'année 1997. Toutefois, d'après la figure 4.30, la statistique de Getis a permis d'extraire, non seulement les périmètres, mais entièrement les zones affectées au milieu du site (figure 4.30). En outre, l'ensemble des images des deux figures nous montre les lieux qui ont subi des variations temporelles les plus importantes. En 1997, le nord et le sud-est du *playa* clairement affectés par l'humidité en mars (figures 4.29a, b et 4.30a, b), sont devenus relativement brillants et secs en juin (couleur jaune à rouge dans les figures 4.30a et b). Toutefois, la région du nord ouest qui était extrêmement brillante

(couleur rouge) et très uniforme en mars est devenue moins homogène en juin. Par ailleurs, la comparaison entre les deux images de la statistique de Getis (images (b) et (c) de la figure 4.30), nous montre clairement que la partie central du *playa* a subi une variation importante en juin 1998 comparativement à la même période de l'année 1997. La figure 4.30(c) nous montre que cette région souffre d'une forte humidité du sol probablement générée par la présence à la surface d'une flaque d'eau superficielle résultant d'une tempête des pluies juste avant la date d'acquisition de l'image. Les alentours de cette mare affichent un groupement des valeurs de G_i^* élevées indiquant une surface sèche et brillante pendant cette période.

D'après ces résultats, il est clair que le site de Lunar Lake Playa est susceptible à des variations temporelles nettes et significatives non seulement au niveau de sa brillance mais aussi au niveau de son homogénéité spatiale. En outre, à partir des données ERS-1, Teillet *et al.* (1995) ont indiqué que la surface de Lunar Lake Playa est sujette à des variations temporelles importantes dues principalement à l'humidification et au séchage. Aussi, on peut ajouter le facteur de la redistribution des composantes de sa surface entraînée par les vents fréquents dans la région du site. Même si l'humidité de la surface est un phénomène éphémère, qui dépend à la fois de l'intensité d'évaporation et des propriétés hydrodynamiques du sol (capacité du sol à diffuser son humidité), son effet doit être pris en considération lors de l'utilisation de ce site dans les opérations d'étalonnage.

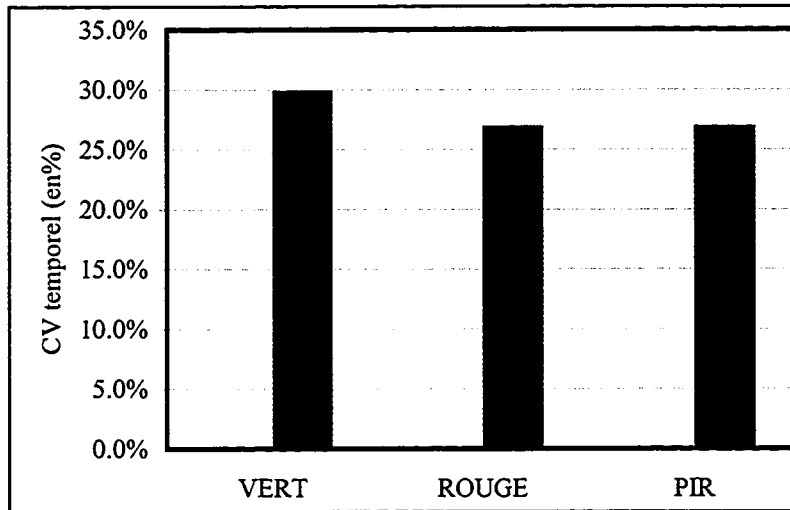


Figure 4.27: L'évolution temporelle des trois canaux HRV acquises sur le site Lunar Lake Playa du mois de juin par référence au mois de mars de l'année 1997.

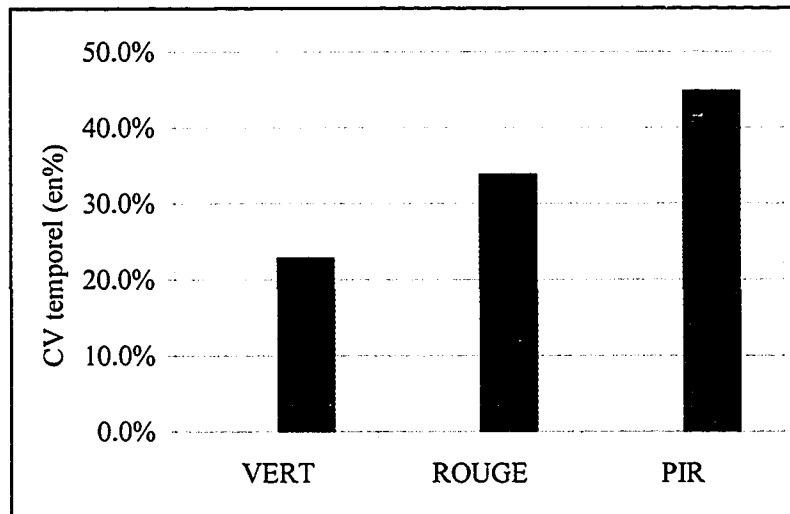


Figure 4.28: L'évolution temporelle des trois canaux HRV acquises sur le site Lunar Lake Playa du mois de juin 1998 par référence au mois de juin 1997.

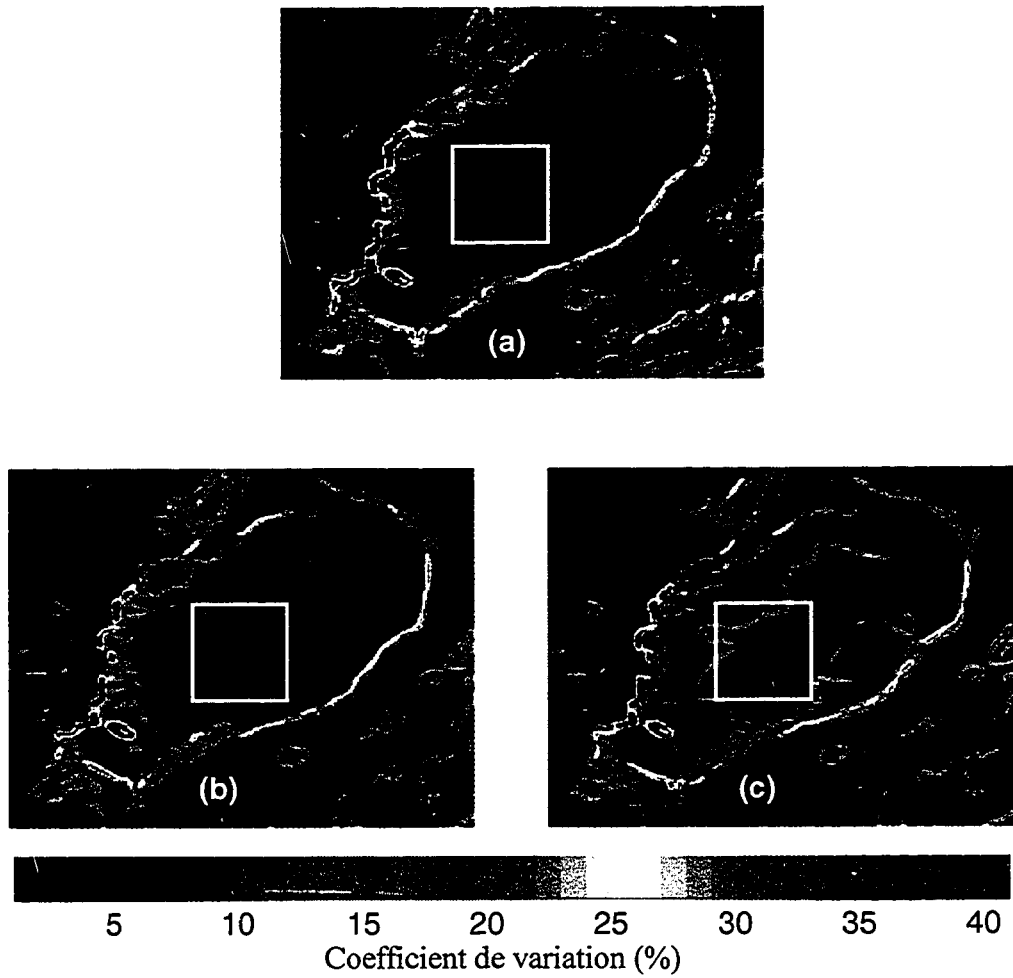


Figure 4.29: Images des coefficients de variation calculés avec une fenêtre 5x5 pixels dans le canal rouge de HRV ((a) mars 1997, (b) juin 1997 et (c) juin 1998).

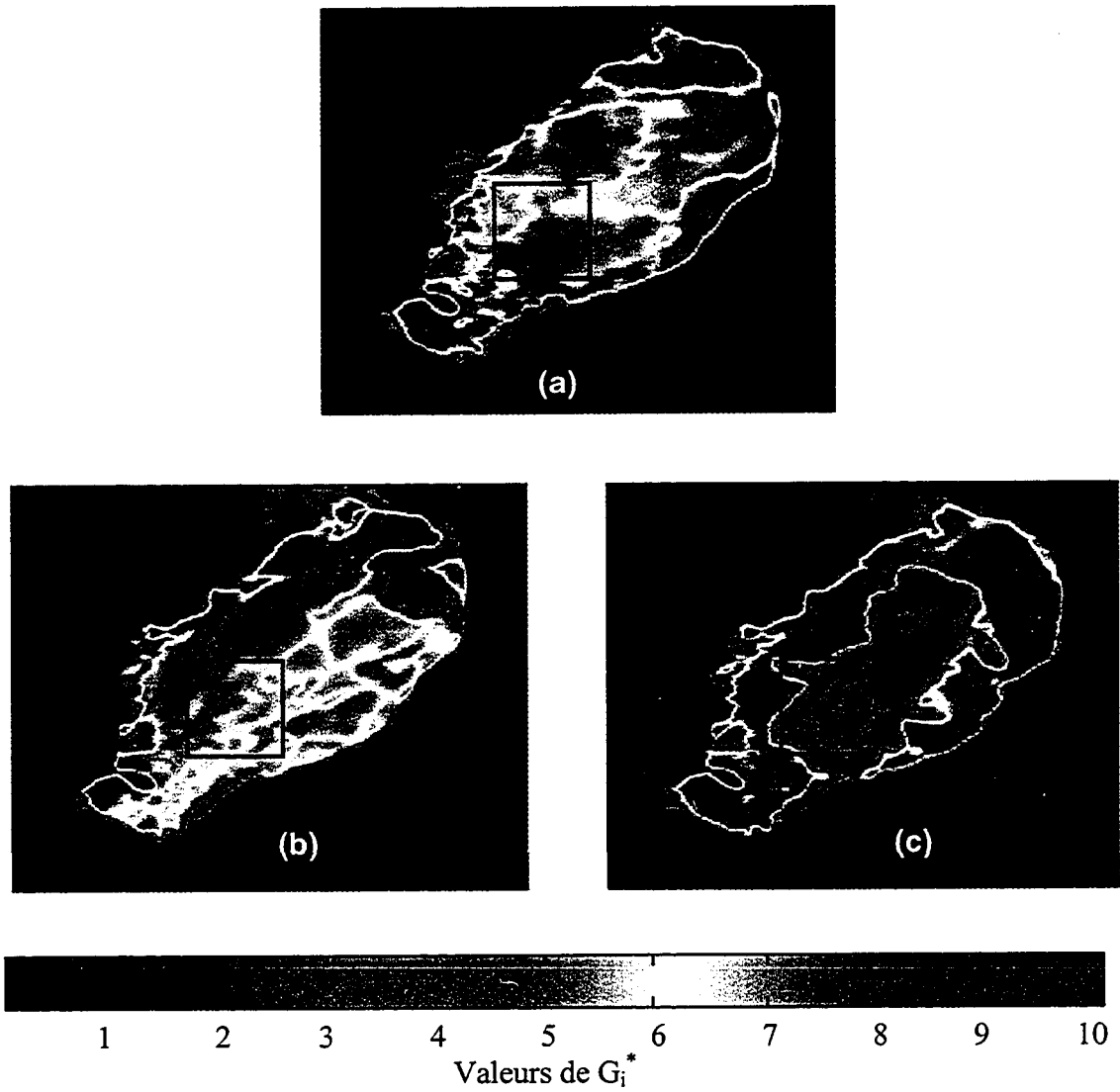


Figure 4.30: Images de la statistique de Getis avec une fenêtre 5x5 pixels dans le canal rouge de HRV ((a) mars 1997, (b) juin 1997 et (c) juin 1998).

4.2.3.4. Conclusions sur le site de Lunar Lake :

- Une taille de 1x1 km² se distingue dans le *playa* de Lunar Lake, d'après les données HRV, par sa bonne homogénéité spatiale et sa brillance très élevée. Malheureusement avec cette taille, ce site ne peut être utilisé dans les opérations d'étalonnage des capteurs à faible résolution spatiale comme AVHRR ou MODIS.
- En l'absence d'une quantité suffisante de données, la caractérisation de l'évolution temporelle du site a été réalisée à l'aide de trois images HRV seulement couvrant une durée d'une année. La statistique de Getis a révélé que le site subit des variations temporelles importantes.
- En considérant les données HRV de SPOT, la statistique de Getis a montré une excellente analyse des variations spatiales du site indépendamment du canal considéré.

4.5. Comparaison: Le site le plus approprié pour l'étalonnage

Uniformité spatiale et radiométrique

Il est clair que les trois sites d'étude sont sélectionnés, parmi d'autres, sur la base de leur uniformité spatiale. Toutefois, le niveau de cette uniformité varie en fonction de la nature de la surface, de sa composition minéralogique, des effets de la variation de leur l'humidité. Ainsi, à partir des canaux spectraux du visible et du proche et moyen infrarouge (données de TM, HRV et AVHRR), le site retenu de Railroad Valley Playa est le plus homogène comparativement à celui de Lunar Lake Playa et notamment celui de Newell County Rangeland. Ce dernier est assujéti à une variation phénologique de son couvert végétal qui affecte considérablement non seulement son uniformité spatiale, mais aussi sa stabilité spectrale. Quant à Railroad Valley Playa, les résultats ont montré que ce site se caractérise par une très bonne stabilité spectrale. Ceci est dû au dénuement de sa

surface du couvert végétal et des éléments de signatures spectrales différentes. Ce site se distingue aussi à l'encontre de Newell County Rangeland par un degré de brillance élevé ce qui minimisera d'avantage l'effet de la variabilité atmosphérique, principalement l'épaisseur optique des aérosols.

Taille

L'étendue de l'uniformité spatiale dans site agit directement sur la taille avec laquelle il peut être utilisé. Une grande taille minimise les effets de l'environnement et permet son utilisation pour l'étalonnage des capteurs de faible résolution spatiale. Ainsi, le site Newell County Rangeland considéré est le plus large avec une taille de $7 \times 7 \text{ km}^2$ suivi par Railroad Valley Playa avec une taille de $6 \times 6 \text{ km}^2$. Même-ci, d'après les résultats, ce dernier peut être utilisé avec une taille plus large, si nécessaire, tout en gardant une bonne uniformité. Évidemment, ces tailles permettent l'utilisation de ces deux sites dans des opérations d'étalonnage des capteurs à grandes empreintes au sol comme AVHRR ou MODIS. Cependant, le site retenu à Lunar Lake Playa, de taille $1 \times 1 \text{ km}^2$, ne peut être utilisé avec fiabilité que pour l'étalonnage des capteurs de haute résolution spatiale comme HRV de SPOT (20 m), TM et ETM+ de Landsat (30 m) et IKINOS (4 m).

Variations temporelles

D'autre part, les surfaces de ces sites subissent des variations temporelles contrôlées par leurs climats et dont le degré et les causes varient d'un site à l'autre. En effet, d'après les résultats obtenus à partir des données TM, Newell County Rangeland a subi des variations saisonnières importantes, notamment dans le domaines spectraux du proche et moyen infrarouge, causées principalement par l'évolution de son couvert végétal. Par contre, ce site a montré une stabilité relative durant la même saison d'une année à l'autre. Les images de AVHRR acquises à différents mois de l'année 1999 ont indiqué que Railroad Valley Playa se distingue par une bonne stabilité saisonnière. Tandis que les données HRV acquises au-dessus de ce site ont montré qu'il a subi des variations temporelles importantes. Ces variations sont causées par des changements de la structure

de la surface du site et par l'effet de la variation de l'humidité. Les mêmes données ont montré que Lunar Lake Playa subit aussi des variations saisonnières importante.

Conclusions

À la lumière de ces résultats, nous pouvons dire que Railroad Valley Playa est le plus proche, parmi les trois, d'un bon site d'étalonnage radiométrique des capteurs optiques. Il a l'avantage d'avoir une taille assez large tout en conservant une bonne uniformité spatiale. Il se distingue également par sa grande brillance et sa stabilité spectrale et temporelle relative. Sa surface a un comportement presque lambertien notamment pour une visée au Nadir. Ces avantages permettent d'augmenter la précision des opérations d'étalonnage effectuées sur ce site.

Conclusions et Recommandations

5.1. Conclusions

L'utilisation correcte des données de télédétection doit être précédée par plusieurs corrections où l'étalonnage radiométrique des capteurs occupe une étape capitale. Bien que la plupart des satellites transportent des systèmes d'étalonnage à bord, leur utilisation reste complexe et peu sûre du fait de leur vieillissement incontrôlé. Pour répondre à de telles préoccupations, des séries de campagnes de mesures s'organisent périodiquement pour évaluer la dégradation de l'étalonnage du capteur. Ces campagnes de mesures s'effectuent en utilisant un site terrestre au même moment du survol du satellite au-dessus du site considéré. Cependant, comme nous l'avons expliqué, ces sites doivent répondre à un certain nombre de critères dont l'emplacement et la taille, la stabilité de l'uniformité spatiale, la stabilité temporelle et spectrale.

Dans la littérature, nous avons soulevé les problèmes de l'uniformité de nombreux sites d'étalonnage localisés dans le monde, tels que White Sands au Nouveau-Mexique (USA), La Crau au sud de la France, Dunhuang dans la province de Gansu en Chine, Sonora au nord-ouest du Mexique, les sites désertiques de l'Afrique du Nord et de la péninsule arabe et les trois sites qui ont fait l'objet de cette étude. Bien entendu, le White Sands a la chance d'être le site le plus utilisé et le plus documenté à cause de sa bonne uniformité et de la bonne précision qu'il peut fournir dans les opérations d'étalonnage. Toutefois, la plupart de ces sites, y compris White Sands, souffrent des problèmes de l'uniformité spatio-temporelle. Ces problèmes sont causés par plusieurs facteurs, tels que l'humidité de surface, l'existence de la végétation ou des éléments de signatures spectrales différentes qui gênent la stabilité spectrale du site. De plus, la variation phénologique de la végétation affecte la stabilité temporelle de ces sites. On note aussi la topographie de la surface qui amplifie les effets de la BDRF. Finalement, la taille du site qui intensifie, si

elle est petite, l'effet de l'environnement et écarte la possibilité de son utilisation pour l'étalonnage des capteurs de faible résolution spatiale.

Cette thèse est consacrée à l'étude de l'uniformité des sites Newell County Rangeland (Alberta), Railroad Valley Playa et Lunar Lake Playa (Nevada). Les objectifs soulignés dans ce travail sont la caractérisation spatiale, spectrale et temporelle de chacun de ces sites ainsi que définir la taille et l'emplacement de la zone la plus stable et la plus utilisable de chacun de ces sites. Pour cela, nous avons développé une méthodologie basée sur deux statistiques: (1) le coefficient de variation qui constitue un outil classique déjà utilisé dans des travaux antérieurs, (2) et la statistique de Getis qui constitue l'originalité de cette thèse. En effet, pour la première fois cette statistique est utilisée pour une caractérisation des sites d'étalonnage. L'analyse des résultats tirés de ce travail a permis de déduire les conclusions suivantes:

- Nous avons localisé sur chaque site la zone la plus uniforme et la plus stable en considérant différentes résolutions spatiales et différentes bandes spectrales, et nous avons fixé leurs tailles les plus appropriées pour un étalonnage optimal des capteurs (les carrés tracés dans les figures 4.9, 4.21 et 4.26).
- Pour les analyses multitemporelles, le coefficient de variation a révélé que le site de Newell County Rangeland considéré est le moins stable à cause de l'évolution du couvert végétal. Ce facteur affecte, également, l'uniformité spectrale de ce site. D'un autre côté, le CV et la statistique de G_i^* ont montré que la surface des sites Lunar Lake Playa et Railroad Valley Playa subissent des variations non négligeables à cause de l'humidification et l'assèchement de leurs surfaces.
- Sur l'ensemble des données qu'on a utilisé dans cette étude, ce sont les données de HRV et particulièrement de TM qui sont avérées les plus efficaces à cause de leur richesse en information spectrale, visible proche et moyen infrarouge, et leurs hautes résolutions spatiales. Par contre, les images AVHRR n'ont pas permis de bien caractériser l'homogénéité spatiale des sites à cause de leur résolution spatiale qui dépasse 1 km, en plus de l'effet de la variation de l'angle avec lequel les sites sont visés

par ce capteur. En outre, les canaux du moyen infrarouge du TM ont apporté des informations importantes concernant la variation de l'humidité de la surface et l'évolution phénologique de la végétation dans les sites d'étude.

- Ce travail a montré une synergie entre les deux méthodes utilisées. D'une part, nous avons constaté un rôle éminent de la statistique de Getis dans l'analyse spatiale de l'uniformité des sites d'étalonnage. Elle a démontré un grand potentiel dans l'extraction des hétérogénéités dans une surface qui paraît homogène dans les images. Cette constatation est bien visible dans les sites sans végétation (Railroad Valley Playa et Lunar Lake Playa). G_i^* a montré également son indifférence aux inégalités entre les résolutions spatiales des images utilisées. Elle a donné pratiquement les mêmes résultats dans les canaux de HRV comparativement à leurs homologues de TM. D'autre part, le coefficient de variation a constitué un outil efficace pour évaluer la variation temporelle du site. Son utilisation nous a permis de déterminer le site le plus stable.

- À la lumière des résultats obtenus, nous constatons que la taille du site Railroad Valley Playa considéré ainsi que son homogénéité et sa stabilité spectrale et temporelle font de lui le site le plus proche, comparativement aux deux autres, à un bon site pour l'étalonnage et l'inter-étalonnage des capteurs satellitaires.

5.2. Recommandations

L'analyse des résultats obtenus de ce travail nous permet de dégager les deux recommandations suivantes.

- Une caractérisation représentative de chacun des sites d'étude nécessite de rassembler le plus d'images possible qui couvrent le site en question. Ces images doivent être bien distribuées à l'échelle temporelle, saisonnière et annuelle, notamment durant les périodes où le site est sollicité pour effectuer l'étalonnage des capteurs.

- Pour caractériser la BDRF, il faut effectuer des mesures au sol à différentes saisons et à différentes années. Le facteur de la BDRF est très important, des erreurs significatives peuvent être introduites si des valeurs angulaires incorrectes de la réflectance sont utilisées. Ainsi, pour l'inter-étalonnage de deux capteurs opérant avec des angles de visée différents, une correction associant la réflectance angulaire des l'un des deux capteurs avec l'autre est exigée.

Finalemment il est important de mentionner l'existence d'autres sites potentiels dans le monde qui nécessitent une caractérisation de leur uniformité radiométrique. En outre, Omari *et al.* (2000) ont rapporté les localisation et caractérisation de la plus part de ces sites (voir Annexe1).

Références bibliographiques

- Abel, P., Smith, G.R., Levin, R.H and Jacobowitz, H. (1988) Results from aircraft measurements over White Sands, New Mexico, to calibrate the visible channels of spacecraft instruments. *Proceeding of SPIE*, vol. 924, p. 208-214.
- Abel, P., Guenther, B., Galimore, R.N. and Cooper, J.W. (1993) Calibration results for NOAA-11 AVHRR channels 1 and 2 from congruent path aircraft observation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 10, p. 493 - 508.
- Anselin, L. (1995) Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, vol. 27(2), p. 93-115.
- Bannari, A., Teillet, P.M. and Richardson, G. (1999) Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection. *Journal canadien de télédétection*, vol. 25, no.1, p.45-59.
- Bannari, A. (1998) Étalonnage radiométrique des capteurs satellitaires optiques: analyse de différentes possibilités pour un petit satellite. SPAR Aérospatiale Limitée, Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec. Rapport interne, 130 pages.
- Bannari, A. Haboudane, D. et Bonne, F. (2000) Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures. *Journal Canadien de télédétection*, Vol. 26, No. 5, pp. 384-393.
- Begni, G., Dinguirard, M.C., Jackson, R.D. and Slater, P.N (1986) Absolute Calibration of the SPOT-1 HRV Cameras. In *Earth Remote Sensing Using the Landsat Thematic Mapper and SPOT Sensors Systems*. *Proceedings of SPIE*, vol. 660, p. 66-76.
- Biggar, S.F., Dinguirard, M.C., Gellman, D.I., Henry, P., Jackson, R.D., Moran, M.S., and Slater, P.N. (1991) Radiometric calibration for SPOT-2 HRV a comparaison of three methods. *Proceedings of SPIE*, vol.1493, p. 155-162.
- Biggar, S.F., Santer, R.P. and Slater, P.N. (1990) Irradiance-based calibration of imaging sensors. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, College Park, Maryland, p. 507-510.
- Biggar, S., Slater, P.N. and Gellman, D.I. (1994) Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0,4 to1,1 micron range. *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, p. 242-252.
- Cabot, F., Dedieu, G. and Maisongrande, P. (1994) Monitoring NOAA AVHRR and METEOSAT shortwave bands calibration and intercalibration over stable areas. *Proceedings of the 6th International Symposium on Physics Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Vald'Isere, France, CNES, Toulouse, p. 41- 46.
- Cierniewski, J. and Verbrugge, M. (1997) Inferring Soil Surface Roughness from Bidirectional Réflectance Data. *Int. Agrophysics*, vol. 11, p. 147-157.
- Cosnefroy, H., Leroy, M. and Briottet, X. (1996) Selection and Characterization of Saharan and Arabian Désert Sites for the Calibration of the Optical Satellite Sensors. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, p. 101-114.

- Cosnefroy, H., Briottet, X. and Leroy, M. (1993) Characterization of Désert Areas With METEOSAT-4 Data for the Calibration of the Optical Satellite Sensors. *Proceedings of SPIE*, vol. 1938, p. 203-210.
- Cosnefroy, H., Leroy, M., Briottet, X., Lecomte, P. and Santer, R. (1997) A field experiment in Saharan Algérie for the calibration of optical satellite sensors. *Int. J. of Remote Sensing*, vol. 18, no. 16, p. 3337-3359.
- Deering, D.W, Eck, T.F. and Otterman, J. (1989) Bidirectional reflectances of three soil surfaces and their characterization through model inversion. *Proceedings of IGARSS*, vol. 2, p. 670-673.
- Delphin, L., Briottet, X., Vermote, E. et Leroy, L. (1991) Caractérisation des sites désertiques africains pour l'étalonnage relatif des capteurs optiques spatiaux a grand champ. *Proceedings of the 5th International Colloquium. Physical Measurements and signatures in Remote Sensing*, Courcheval, France, p. 49-52.
- Derksen, C., Wulder, M., LeDrew, E. and Goodison, B. (1998) Associations between spatially autocorrelated patterns of SSM/I-derived prairie snow cover and atmospheric circulation. *Hydrological Processes*, vol. 12, p. 2307-2316.
- Dinguirard, M. and Slater, P.N. (1997) Optical Sensors Calibration. *Proceedings of the 7th International Symposium Physical Measurements and Signature in Remote Sensing*, Courcheval, France.
- Dinguirard, M. and Slater, P.N. (1999) Calibration of Space-Multispectral Imaging. *Remote Sensing of Environment*, vol. 68, p. 194-205.
- Fisher, P. (1997) The pixel: A snare and a delusion. *International Journal of remote sensing*, vol. 18, p. 679-685.
- Frouin, R. and Gautier, C. (1987) Calibration of NOAA-7 AVHRR, GOES-5 and GOES-6 VISSR/VAS Solar Channels. *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, p. 73-101.
- Frouin, R. and Simpson, J.J. (1995) Radiometric Calibration of GOES-7 VISSR Solar Channels During the GOES Pathfinder Benchmark Period. *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, p. 95-115.
- Getis, A. and Ord, J. (1992) The analysis of spatial association by distance statistics. *Geographical Analysis*, vol. 24, p. 189-206.
- Gordon, H.R. (1987) Calibration Requirements and Methodology for Remote Sensors Viewing the Ocean in the Visible. *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, p. 103-126.
- Goodchild, M. (1986) Spatial autocorrelation. *Concepts and techniques in modern Geography*, vol. 47 (Norwich: Geo Books), p. 3-6.
- Gu, X., Verbrugge, M. et Guyot, G. (1991) Inter-étalonnage de SPOT1-HRV, Landsat 5-TM et NOAA11-AVHRR dans les domaines du visible et du proche infra-rouge. *Proceedings of the 5th International Colloquium, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courcheval, France, p. 45-48.
- Gu, X., Guyot, G. et Verbrugge, M. (1992) Evaluation of the measurement errors in ground surface reflectance for satellite calibration. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, no. 14, p. 2531 - 2546.
- Gu, X., Guyot, G. et Verbrugge, M. (1990) Analyse de la variabilité spatiale d'un site-test: exemple de "La Crau" (France). *Photo-interpretation*, vol. 90, no.1, Fasc. 5, p. 40-51.
- Guether, B. (1987) Practical Aspects of Achieving Accurate Radiometric Field Measurements. *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, p. 131-143.

- Guyot, G. (1989) Les signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection spatiale, no. 5, Paradigme, Caen (France), 178 pages.
- Guzman, C.T., Palmer, J.M., Slater, P.N., Bruegge, C.J. and Miller, E.A. (1991) Requirements of a solar diffuser and measurements of some candidate materials. Proceedings of SPIE, vol. 1493, p. 120-131.
- Henry, P., Dinguirard, M. and Bodilis, M. (1993) SPOT calibration over desert areas. Proceedings of SPIE, vol. 1938, p. 67-76.
- Hovis, W.A. (1966) Infrared spectral reflectance of some common minerals. Applied Optics, vol.5, pp. 245-248.
- Jackson, R.D., Moran, M.S., Slater, P.N. and Biggar, S.F. (1987) Field Calibration of Reflectance Panels. Remote Sensing of Environment, vol. 22, p.145-158.
- Jackson, R.D., Teillet, P.M., Slater, P.N., Fedosejevs, G., Jasinski, M.F., Aase, J.K. and Moran, M.S. (1990) Bidirectional Measurements of Surface Reflectance for View Angle Corrections of Oblique Imagery. Remote Sensing of Environment, vol. 32, p.189-202.
- Kastner, C.J. and Slater, P.N. (1982) In-flight radiometric calibration of advanced remote sensing systems. Proceedings of SPIE, vol. 356, p.158-165.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouin, R., Grassl, H., Herman, B.M., King, M.D. and Teillet, P.M. (1997) Passive Remote Sensing of Tropospheric Aerosol and Atmospheric Correction for the Aerosol Effect. Journal of Geophysical Research, vol. 102, (D14), p. 16815-16830.
- Kaufman, Y.J. and Holben, B.N. (1993) Calibration of the AVHRR visible and near infra-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and Desert reflection. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, p. 21-52.
- Kaufman, Y.J., Kendall, J.D., Holben, B.N. and Meckler, Y. (1990) Inflight Calibration of the NOAA-AVHRR Visible and Near-IR Channels. Proceedings of IGARSS, p.511-514.
- Kieffer, H.H. and Widley, R.L. (1985) Absolute calibration of Landsat instruments using the Moon. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 51, no. 9, p.1391-1393.
- Kimes, D.S., Kirchner, J.A., Newcomb, W.W. (1983) Spectral Radiance Errors in Remote Sensing Ground Studies Due to Nearby Objects. Applied Optics, vol. 22, p. 8-12.
- Leroy, M.M. (1990) Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. In École d'été en télédétection spatiale: aspects physiques et modélisation, CEPADUES Ed, Toulouse, France, p.311-363.
- Markham, B.L. and Barker, J.L. (1985) Spectral Characteristics of the Landsat-4 MSS sensor. Landsat-4 Science Characterization Early Results, NASA conf. Pub. 2355, vol. I, p. 23-56.
- Markham, B.L., Irons, J.R., Deering, D.W., Halthore, R.N., Irish, R.R., Jackson, R.D., Moran, M.S., Biggar, S.F., Gellman, D.I., Grant, B.G. and Palmer, J.M. (1990) Radiometric Calibration of Aircraft and Satellite Sensors at White Sands, NM. Proceedings of IGARSS, p. 515-518.
- Meygret, A., Dinguirard, M. and Henry, P. (1997) Eleven years of experience and data in calibrating SPOT HRV Cameras. Proceedings of ISPRS Sensors and Mapping from Space, Hannover, p.1-11.
- Mitchell, R.M., O'Brien, D.M., Edwards, M., Elsum, C.C., Graetz, R.D. and Simpson, J.J. (1997) Selection and Preliminary Characterization of a Bright Calibration Site in the

- Strzelecki Desert, South Australia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 4, p. 342-353.
- Moran, M.S., Jackson, R.D., Clarke, T.R., Qi, J., Cabot, F., Thome, K.J. and Markham, B.L. (1995) Réflectance Factor Retrieval from Landsat TM and SPOT Data for Bright and Dark Target. *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, p. 218-230.
- Omari, K., Bannari, A., Fedosejevs, G. et Teillet, P.M. (2000) Caractérisation de différents sites tests d'étalonnage radiométrique des capteurs d'observation de la terre. Actes du 22^{ème} Congrès de la Société Canadienne de Télédétection, Victoria, Colombie Britannique, pp. 733 – 744.
- Omari, K., Bannari, A., Fedosejevs, G. et Teillet, P.M. (2001) Analyse de l'uniformité spatio-temporelle du site-test "Newell County Rangeland" en Alberta (Canada) pour l'étalonnage radiométrique des capteurs d'observation de la terre. Actes du 8^{ème} Symposium international des mesures et signatures en Télédétection, Aussois, France, pp. 195 – 200.
- Ord, J. and Getis, A. (1995) Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, vol. 27, p. 286-306.
- Price, J.C. (1987) Radiometric Calibration of satellite sensors in the visible and near-infrared: history and outlook. *Remote sensing of environment*, vol. 22, p. 3-9.
- Rao, C.R.N., and Chen, J. (1996) Post -launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Résolution Radiometer on the NOAA-14 spacecraft. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no.14, p. 2743-2747.
- Rao, C.R.N. and Chen, J. (1995) Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Résolution Radiometer on the NOAA -7,9 and 11 spacecraft. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, p. 1931-1942.
- Rondeaux, G., Steven, M.D., Clark, J.A. and Mackay, G. (1998) La Crau: a European test site for remote sensing validation. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 14, p. 2775-2788.
- Santer, R. and Roger, J.C. (1993) NOAA channels 1 and 2 calibration in the space software. *Proceedings of SPIE*, vol. 1938, p. 77-80.
- Santer, R., Gu, X.F., Guyot, G., Deuze, J.L., Devaux, C., Vermote, E. and Verbrugge, M. (1992) SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France). *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, p. 227-237.
- Scott, K.P., Thome, K.J. and Brownlee, M. (1996) Evaluation of the Railroad Valley Playa for Use in Vicarious Calibration. *Proceedings of SPIE Conference 2818*, Denver, Colorado, p.158-166.
- Shepard, M.K., Arvidson, R.E. and Guinness, E.A. (1991) Scattering behavior of Lunar Lake Playa determined from PARABOLA bidirectional reflectance data. *Geophysical research*, vol. 18, no. 12, p. 2241-2244.
- Shepard, M.K., Arvidson, R.E. and Guinness, E.A. (1993) Specular scattering on terrestrial Playa and implications for planetary surface studies. *Journal of Geophysical research*, vol. 98, no. E10, p. 707-718.
- Slater, P.N. (1984) A Review of Some Radiometric Calibration Problems and Methods. II^e Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, France (Les colloques de L'INRA, no. 23), p. 391-405.

- Slater, P.N., Biggar, S.F., Holm, R.A., Jackson, R.D., Mao, Y., Moran, M.S., Palmer, J.M. and Yuan, B. (1987) Reflectance-and Radiance-Based Methods for In-Flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors. *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, p. 11-37.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Thome, K.J., Gellman, D.I. and Spyak, P.R. (1996) Vicarious Radiometric Calibrations of EOS Sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 13, p. 349-359.
- Slater, P.N., Biggar, S.F. and Palmer, J.M. (1991) Ground-Reference Site and On-Board Methods for Sensors Absolute Calibration in the 0,4 to 2,5 micron Range.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Thome, K.J., Gellman, D.I. and Speech, P.N. (1994) The In-Flight Radiometric Calibration of ASTER by Reference to Well-Characterized Scenes. *Proceedings of the SPIE*, vol. 2317, p. 49-60.
- Smith, A.M., Major, D.I., McNeil, R.L., Willms, W.D. and Brisco, B. (1995) Complementarity of Radar and Visible-Infrared Sensors in Assessing Range land Condition. *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, p.173-180.
- Staylor, W.F. (1990) Degradation rates of the AVHRR visible channel for the 6, 7 and 9 spacecraft. *Journal of Atmospher and Ocean Technology*, vol. 7, p. 411-423.
- Tanré, D. (1982) Interaction rayonnement-aérosol, applications à la télédétection et au calcul du bilan radiatif . Thèse de doctorat d'état, Université des sciences et techniques de Lille, Lille, France, 258 pages.
- Teillet, P.M. (1985) Réflexion sur la correction radiométrique des images en télédétection. L'association québécoise de télédétection et gestion des ressources: L'aspect opérationnel, vol. V, p.571-581.
- Teillet, P.M. and Fedosejevs, G. (1986) Technical Tips Gleaned from the White Sands Field Work and Related Activities. Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Ontario, 14 pages.
- Teillet, P.M., Slater, P.N., Jackson, R.D., Fedosejevs, G. and Moran, M.S. (1987) Reflectance Measurements at White Sands, New Mexico, Using a Mobile Spectroscopy Laboratory. *Proceedings of the 11th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Waterloo, Ontario, p. 441-450.
- Teillet, P.M., Slater, P.N., Ding, Y., Santer, R.P., Jackson, R.D. and Moran, M.S. (1990) Three Methods for the Absolute Calibration of the NOAA AVHRR Sensors In-Fight. *Remote Sensing of Environment*, vol. 31, p. 105-120.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, R.P., O'Neill, N.T., Thome, K.J., Biggar, S.F., Ripley, H. and Meygret, A. (2001) Generalized Approach to the Vicarious Calibration of Multiple Earth Observation Sensors Using Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment* , vol. 77, p. 304 - 327.
- Teillet, P.M., Horler, D. and O'Neill, N.T. (1997) Calibration, Validation, and Quality Assurance in Remote Sensing: A New Paradigm. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23(4), p. 401 – 414.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G. and Gautier, R.P. (1998a) Operational Radiometric Calibration of Broadscale Satellite Sensors Using Hyperspectral Airborne Remote Sensing of Prairie Rangeland: First Trials. *Metrologia*, vol. 35, p. 639-641.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, R.P. and Schowengerdt, R.A. (1998b) Uniformity Characterization of Land Test Sites Used for Radiometric Calibration of Earth

- Observation Sensors. Proceedings of the Twentieth Canadian Symposium on Remote Sensing, Calgary, Alberta, p.1-4.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, D., D'Iorio, M.A., Rivard, B., Budkewitsch, P. and Brisco, B. (1995) An Initial Examination of Radar Imagery of Optical Radiometric Calibration Sites. Proceedings of the SPIE Europto Symposium on Advanced and Next-Generation Satellites, SPIE, vol. 2583, p.154-165.
- Teillet, P.M. (1994) Vegetation Index Monitoring: Radiometric Considerations. Remote Sensing in Canada, vol. 22, no. 1, pp. 8-9.
- Thome, K.J., Gellman, D.I., Parada, R.J., Biggar, S.F., Slater, P.N. and Moran, M.S. (1993) In-flight Radiometric calibration of Landsat-5 Thematic Mapper from 1984 to present. Proceedings of SPIE Conference, vol. 1938, Orlando, Florida, p. 126-131.
- Thome, K.J., Biggar, S.F., Gellman, D.I. and Slater, P.N. (1994) Absolute-Radiometric Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper and the Proposed Calibration of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, p. 2295-2297.
- Thome, K.J., Crowther, B.G. and Biggar, S.F. (1997) Réflectance-and Irradiance-based Calibration of Landsat-Thematic Mapper. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 23, no. 4, p. 309-317.
- Vane, G., Green, R.O., Chrien, T.G., Enmark, H.T., Hansen, E.G. and Porter, W.M. (1993) The airborne visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment, vol. 44, p. 127-143.
- Vermote, E. and Kaufman, Y.J. (1995) Absolute Calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. International Journal of Remote Sensing, vol. 16, no. 13, p. 2317-2340.
- Vermote, E., Santer, R., Deschamps, P.Y. and Herman, M. (1992) In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, no. 18, p. 3409-3429.
- Walraven, R.L. and Coulson, K.L. (1972) Measurements of the light properties of gypsum sand. Atmos. Sc., No. 7, University of California, Davis.
- Wheeler, R.J., Lecroy, S.R., Whitlock, C.H., Purgold, G.C. and Swanson, J.S. (1994) Surface characteristics for the Alkali flats and dunes regions at the White Sands Missile Range, NM. Remote Sensing of Environment, vol. 48, p. 181-190.
- Whitlock, C.H., LeCroy, S.R. and Wheeler, R.J. (1994) Narrowband Angular Réflectance Properties of the Alkali Flats at White Sands, New Mexico. Remote Sensing of Environment, vol. 50, p. 171-181.
- Whitlock, C.H., Purgold, G.C. and LeCroy, S.R. (1987) Surface Bidirectional Réflectance properties of Two South-Western Arizona deserts for wavelenghs between 0,4 and 2,2 microns, NASA TP 2643.
- Williamson, L.E. (1975) Satellite calibration data, Annual Data Report, 1974, Tech. Rep. ECOM-DR-75-1, Atmos. Sciences Lab., White Sands Missile Range, NM.
- Wu, D., Yin, Y., Wang, Z., Gu, X., Verbrugge, M. and Guyot, G. (1997) Radiometric Characterisation of Dunhuang Satellite Calibration Test Site (CHINA) and First Test Using SPOT Data. Seventh International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France.

- Wulder, M. and Boots, B. (2001) Local Spatial Autocorrelation Characteristics of Landsat TM Imagery of a Managed Forest Area, *Journal canadien de Télédétection*, Vol. 27, No. 1, pp. 67-75.
- Wulder, M. and Boots, B. (1998) Local spatial autocorrelation characteristics of remotely sensed imagery assessed with the Getis statistic. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19(11), p. 2223-2231.
- Wulder, M. (1998) Optical remote sensing techniques for assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography*, vol. 22, no. 4, p. 449-476.

**Caractérisation de différents sites tests
d'étalonnage radiométrique
des capteurs d'observation de la terre**

Actes du 22^{ième} Symposium canadien de Télédétection, Victoria,
Colombie Britannique, Canada, Août 21-25, 2000, pp.733-744

Caractérisation de différents sites tests d'étalonnage radiométrique des capteurs d'observation de la terre

K. Omari ¹, A. Bannari ¹, G. Fedosejevs ² et P.M. Teillet ²

¹ Laboratoire de Télédétection et de Géomatique, Département de géographie, Université d'Ottawa, C.P. 450, Succ. A, Ottawa (Ontario) K1N 6N5
Tél. (613) 562-5800 poste 1042, télécopieur : (613) 562-5145,
C.E : abannari@uottawa.ca

² Centre canadien de télédétection, 588, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0Y7
Tél. (613) 947-1251, télécopieur : (613) 947-1383

Résumé -- Dans la littérature, nous avons recensé plusieurs sites tests utilisés pour l'étalonnage direct des capteurs satellitaires et aéroportés, tels que : le site du désert de gypse à "White Sands" au Nouveau Mexique (USA), les sites "Railroad Valley Playa" et "Lunar Lake Playa" au Nevada (USA), le site "Rogers dry lake" en California (USA), le site de "La Crau" au sud de la France, le site "Newell County Rangeland" en Alberta au Canada, le site "Dunhuang" dans la province de Gansu en Chine, le site "Sonora" au nord-ouest du Mexique, le site "Tinga Tingana" au désert Strzelecki au sud l'Australie et le site "Uyuni Salt Flats" en Bolivie. Chacun de ces sites à ses propres caractéristiques et son uniformité radiométrique dépend de la variation de sa couleur et de sa brillance, de son humidité, de sa rugosité, de sa topographie, des effets atmosphériques, de la géométrie d'acquisition et de visée, de l'effet de l'environnement avoisinant. Dans cette communication nous caractérisons chacun des différents sites tests cités ci-dessus en fonction de sa stabilité temporelle, sa stabilité atmosphérique, sa stabilité spectrale et de son homogénéité spatiale en se basant sur une étude bibliographique.

1. Introduction

L'étalonnage des capteurs de télédétection spatiale et aéroportée est une étape fondamentale pour une validation rigoureuse des produits dérivés des données de télédétection. À cause de l'inaccessibilité des satellites d'observation de la terre, la méthode d'étalonnage directe basée sur un site terrestre avec vérité terrain est souvent considérée comme efficace et assure le meilleur compromis "précision-investissement" (Bannari *et al.*, 1999; Slater, 1984).

Elle est utilisée avec succès par la NASA et par le Centre National des Études Spatiales (CNES) pour l'étalonnage des capteurs optiques comme TM et ETM+ de Landsat, HRV de SPOT, AVHRR de NOAA, etc. (Slater *et al.*, 1987; Teillet *et al.*, 1999; Gu *et al.*, 1990). Elle présente l'avantage de reproduire les conditions réelles d'acquisition des données relatives aux images (Teillet, 1985). Sa précision dépend étroitement de la détermination précise de la réflectance moyenne du site d'étalonnage et de la précision des paramètres atmosphériques mesurés au moment de l'acquisition de l'image au-dessus du site. En effet, la réflectance moyenne de la surface d'un site d'étalonnage peut varier en fonction des caractéristiques et des conditions du site, tels que: la topographie, l'ombre, l'humidité, les propriétés optiques (variations de la couleur et de la brillance), l'effet bidirectionnel, les variations saisonnières de la végétation présente, les effets atmosphériques et l'effet de l'environnement avoisinant le site.

Dans la littérature, nous avons recensé plusieurs sites tests utilisés pour l'étalonnage direct des capteurs satellitaires et aéroportés, tels que : le site du désert de gypse à "White Sands" au Nouveau Mexique (USA), les sites "Railroad Valley Playa" et "Lunar Lake Playa" au Nevada (USA), le site "Rogers dry lake" en California (USA), le site de "La Crau" au sud de la France, le site "Newell County Rangeland" en Alberta au Canada, le site "Dunhuang" dans la province de Gansu en Chine, le site "Sonora" au nord-ouest du Mexique, le site "Tinga Tingana" au désert Strzelecki au sud l'Australie et le site "Uyuni Salt Flats" en Bolivie. Chacun des sites cités ci-dessus, à ses propres caractéristiques et son uniformité radiométrique dépend

de son homogénéité spatiale, de sa stabilité temporelle, atmosphérique et spectrale. Bien entendu, de tels sites, ne sont jamais choisis au hasard, pour être adéquats ils doivent satisfaire un certain nombre de critères que nous résumons comme suit (Slater, 1984; Leroy, 1990; Teillet *et al.*, 1997; Scott *et al.*, 1996):

- Bonne uniformité spatiale ce qui permet de minimiser le nombre de mesures au sol (un nombre limité de mesures avec une bonne répartition peut être représentatif de la totalité du site).
- Avoir un caractère lambertien afin d'éliminer ou de minimiser au maximum les effets bidirectionnels.
- Avoir des caractéristiques spectrales proches de celles d'un sol nu: stabilité spectrale.
- Avoir une réflectance élevée afin de minimiser la contribution atmosphérique au signal.
- Être le plus stable possible temporellement.
- Un taux de journées claires élevé, sans nuages (ou avec un très faible taux de couverture nuageuse) et un très faible taux des précipitations.
- Très faible variation de l'humidité de surface.
- Sans relief et sans végétation, pour éviter l'effet de l'ombre, minimiser l'effet d'illumination diffuse et de la BRDF.
- Le site doit être suffisamment large afin de minimiser l'effet de l'environnement et pour qu'il soit utilisé pour l'étalonnage de nombreux capteurs, y compris ceux qui présentent une faible résolution au sol.
- Le site doit être à haute altitude afin de réduire l'effet des aérosols atmosphériques et de la vapeur d'eau.
- Facilité de repérage sur les images satellitaires.
- Le site doit être accessible mais d'accès généralement limité à la circulation.

La réflectance d'une surface naturelle est souvent affectée par les variations de la couleur et de la brillance du sol, de son humidité, de sa rugosité, de sa topographie, des effets atmosphériques, de la géométrie d'acquisition et de visée, et de l'effet de l'environnement avoisinant (Price, 1987; Cierniewski et Verbrugge, 1997). En se basant sur une recherche bibliographique, nous caractériserons, dans cette communication, l'uniformité radiométrique de chacun des sites test en fonction de la présence du couvert végétal, des variations climatiques, des problèmes d'uniformité spatiale, du caractère lambertien, de la variation de l'humidité du sol, ainsi que de la stabilité spectrale et temporelle.

2. Caractérisation des différents sites d'étalonnage

2.1. White Sands (Nouveau Mexique, USA)

White Sands Missile Range (WSMR), situé dans le bassin de Tularosa dans le sud central du Nouveau

Mexique (32° 52' N, 106° 17' O), est le site le plus utilisé par la NASA pour l'étalonnage absolu des capteurs optiques (Markham *et al.*, 1990; Wheeler *et al.*, 1994). Il est localisé à une altitude de 1200 m environ par rapport au niveau moyen de la mer en couvrant une superficie d'environ 30 km de diamètre et limité par des chaînes de montagnes : "Sacramento" dans l'Est et le Nord, "San Andreas" dans l'Ouest et "Oregon" dans le Sud (Teillet et Fedosejevs, 1986; Wheeler *et al.*, 1994; Frouin et Simpson, 1995; Thome *et al.*, 1994). C'est une surface de sable gypseux où on sépare une zone de plaines et une zone de dunes. La première zone est relativement plate et uniforme avec une réflectance élevée (Thome *et al.*, 1993; Slater *et al.*, 1987; Teillet *et al.*, 1987). Toutefois, bien que la végétation est peu présente, les inondations saisonnières laissent souvent une lame d'eau au-dessous de la surface ce qui affecte cette réflectance. Il est difficile d'utiliser cette zone pour l'étalonnage des capteurs optiques de faible résolution spatiale puisque la partie non affectée par la variation de l'humidité et de la végétation occasionnelle est assez petite (Markham *et al.*, 1990; Frouin et Gautier, 1987, Teillet *et al.*, 1990; Wheeler *et al.*, 1994). Quant aux dunes, elles sont un peu plus brillantes, avec une végétation limitée (Markham *et al.*, 1990). Les problèmes principaux dans cette zone sont liés à la topographie des dunes qui change continuellement à cause des vents et des tourbillons très forts. Par conséquent, la réflectance de la surface change significativement notamment pour des forts angles zénithaux à cause de l'effet d'ombre (Frouin et Gautier 1987; Markham *et al.*, 1990; Whitlock *et al.*, 1994). Ces effets compliquent les problèmes bidirectionnels et laissent, par conséquent, cette région indésirable pour l'étalonnage par rapport à celle des plaines de gypse (Wheeler *et al.*, 1994).

2.2. La Crau (France)

Afin d'avoir l'indépendance en matière d'étalonnage radiométrique des capteurs satellitaires de la série SPOT, le CNES a sélectionné, parmi d'autres, le site de La Crau au sud de la France (Santer *et al.*, 1992). Il est d'une dimension de 400 m² (20 x 20 pixels de Spot) et est localisé dans le centre de La Crau sèche (60 Km²) au sud de la France à 50 km Nord-Ouest de Marseille (43° 50' N et 4° 87' E) et à 40 km au sud d'Avignon (Gu *et al.*, 1990). C'est une plaine parfaitement plate dont la surface est couverte de galets de dimensions relativement homogènes, entre lesquelles pousse une faible couverture végétale verte à la fin de l'hiver et en printemps mais qui devient sèche et sénescence en juillet (Gu *et al.*, 1990; Rondeaux *et al.*, 1998). Le climat de La Crau est de type méditerranéen, sec et ensoleillé pendant l'été mais il peut être frais et pluvieux en hiver

(le taux moyen des précipitations moyen est de 610 mm par année). D'après Santer *et al.* (1992), les propriétés optiques de ce site varient peu durant toute l'année. L'ensemble du site de La Crau sèche a été utilisé pour l'étalonnage et l'inter-étalonnage des capteurs HRV de Spot, TM de Landsat et AVHRR de NOAA (Gu *et al.*, 1991).

2.3. Railroad Valley Playa (Nevada, USA)

Railroad Valley Playa (RVPN) est sélectionné dernièrement comme un site potentiel pour l'étalonnage des capteurs optiques. Ce site est localisé approximativement à 300 miles au Nord de Las Vegas et à 100 miles à l'Est de Tonopah au centre du Nevada (38° 28' N et 115° 41' O) à une altitude de 1435 m au-dessus du niveau de la mer. Son climat est continental avec un taux de journées claires élevé et une variation importante des moyennes de précipitations (Teillet *et al.*, 1995). Ses dimensions sont approximativement de 10 x 10 km² avec une topographie qui varie de 1 à 2 mètres à travers la zone. La réflectance spectrale change dans le visible avec une incertitude relative de 5 à 10 %. Les inondations saisonnières sont responsables de tenir l'eau sur la surface, ce qui affecte la réflectance et la BRDF de ce site (même remarques pour le site LLPN). Cette région est caractérisée par un sol plat est très homogène et constitué de dépôts lacustres compacts riches en argile formant une surface relativement brillante avec un faible couvert végétal (Teillet *et al.*, 1999, 1998b; Scott *et al.*, 1996). Grâce à ses dimensions larges, ce site est bien adapté à l'étalonnage radiométrique des capteurs de faible résolution spatiale comme AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de NOAA, Végétation de SPOT-4, SeaWiFS (Sea viewing Wide Field-of-view Sensor), MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) de EOS, MERIS (Envisat Medium-Resolution Imaging Spectroradiometer) et GLI (Global Imager) de ADEOS-2 (Teillet *et al.*, 1997).

2.4. Lunar Lake Playa (Nevada, USA)

Lunar Lake Playa Nevada (LLPN) est situé à 20 km au sud-ouest de Railroad Valley playa (38° 23' N et 115° 59' O) à une altitude de 1750 m et couvre une surface totale de 2 x 4,5 km² (Teillet *et al.*, 1995). La région centrale de ce site est une surface lisse et homogène, caractérisée par son comportement presque lambertien, par sa brillance élevée (une réflectance supérieur à 0,5) et par son uniformité spatiale (Teillet *et al.*, 1995; Shepard *et al.*, 1991). La structure du sol de LLPN se constitue, comme celle de RVPN, de dépôts lacustres compacts riche en argile formant une surface lisse est homogène quand elle est humide mais qui devient rude

et composée des tuiles après son dessèchement. Les données multitemporelles du radar ERS-1 ont montré que la BRDF, au niveau de ce site, est affecté par les effets de l'humidité de sa surface causée par les inondations occasionnelles (Teillet *et al.*, 1995). Quant à la végétation, elle est moins influençant, elle se caractérise par sa rareté dans cette région (Teillet *et al.*, 1995). Ce site est bien convenable pour l'étalonnage des capteurs de hautes résolutions spatiales aéroportés et satellitaires comme HRV de Spot, TM de Landsat-5, ETM+ de Landsat-7, etc. (Van *et al.*, 1993; Teillet *et al.*, 1999). Malheureusement, à cause de sa petite taille, il ne peut pas être utilisé pour les capteurs satellitaires de faible résolution spatiale à cause de l'effet de l'environnement (Scott *et al.*, 1996; Teillet *et al.*, 1995).

2.5. Newell County Rangeland (NCRA) (Alberta, Canada)

Newell County Rangeland (NCRA) est sélectionné par les chercheurs du Centre Canadien de Télédétection (CCT) comme un site alternatif pour l'étalonnage des capteurs satellitaires et aéroportés (Teillet *et al.*, 1997; 1998 a). Ce site est localisé au nord-ouest de Medecine Hat en Alberta (50° 18' N et 111° 38' O) avec une dimension de 10 x 10 km² et à une altitude de 754 mètres par rapport au niveau moyen de la mer. Sa surface est très plate et uniforme, et constituée principalement de prairies (Teillet *et al.*, 1999; Teillet *et al.*, 1998a). La réflectance spectrale varie de 0,04 à 0,1 dans le visible avec une incertitude relative de 5 à 10 %. Le climat de cette région se caractérise par des faibles précipitations (une moyenne de 280 mm par année), un taux d'évaporation élevé et un taux de journées claires élevé avec des vents forts (Smith *et al.*, 1995). Il constitue avec ceux du Nevada (Railroad Valley Playa et Lunar Lake Playa) et celui de White Sands, les sites de référence pour les activités QUASAR (Assurance de qualité et référence de stabilité) (Teillet *et al.* 1997).

2.6. Dunhuang (Chine)

Depuis 1986, le Centre for Remote Sensing in Geology (CRSG) et le China Centre for Ressources Satellites Data and Application (CRESDA) ont piloté plusieurs projets pour la sélection d'un site d'étalonnage des capteurs optiques des satellites de la chine (Wu *et al.*, 1997). Le site "Dunhuang" situé dans la partie nord-ouest du désert de Gobi à 35 km de la ville de Dunhuang a été sélectionné. Il est d'une superficie de 400 x 400 m², situé au milieu d'une région désertique de 30 x 40 km², homogène et sans relief (40° 12' N, 94° 26' E). L'altitude de la partie nord du site est de 1250 m, celle du milieu est de 1160 m, alors que la partie du sud

est à 1105 m par rapport au niveau moyen de la mer. La surface alluviale du site est généralement de couleur grise, elle est formée par une mixture de graviers, de poussières et de sables, dont les dimensions varient entre 1 et 15 cm. Celles de grandes dimensions se trouvent à la périphérie du côté sud du site. Celui-ci est dénué de végétation au centre, mais elle est peu abondante dans ses bords. Le climat est aride continental avec un taux de journées claires élevé (112 par année, avec un maximum de jours claires dans la seconde moitié de l'année) et un faible taux de précipitations (34 mm par année, avec un maximum de précipitations en juillet). L'atmosphère est généralement sec avec un taux d'humidité moins de 60 % à chaque mois (Wu *et al.*, 1997). En outre, les activités humaines et industrielles relativement absentes dans la région de Dunhuang ce qui n'affecte pas la transmission atmosphérique au-dessus du site. D'ailleurs, Wu *et al.* (1997) présumant que les effets de la vapeur d'eau sont très limités et que l'épaisseur atmosphérique totale est d'environ 0,11 à 0,5 μm , et une épaisseur optique des aérosols inférieure à 0,08.

2.7. Tinga Tingana (Australie)

Tinga Tingana a été sélectionné parmi 5 autres sites identifiés sur le continent australien comme un site potentiel pour l'étalonnage radiométrique et pour fournir des informations sur les aérosols australiens (Mitchell *et al.*, 1997; O'Brien *et al.*, 1998). Ce site couvre une surface totale de 19 x 19 km^2 , il est situé dans le bord méridional d'une zone extensive des dunes d'une surface totale de 40.000 km^2 (28° 48' S ; 140° 10' E). La hauteur des dunes est moins de 10 m, elles sont alignées dans la direction S-N, sont distantes de 500 m approximativement, et sont constituées des sables siliceux de couleur pâle. Les crêtes des dunes sont mobiles et sont dénuées de végétation. Une couverture herbacée très clairsemée (<5%) permanente se développe sur les flancs des dunes. Cette couverture est complétée après chaque précipitation par une végétation supplémentaire (<10%) constituée principalement des 'forbs' et des herbes éphémères, particulièrement dans les zones d'inter dunes où l'eau s'accumule et où les sables sont modérément compacts. Ces inter-dunes contiennent également de grandes zones d'une brillance élevée. Elles sont constituées des sables fortement compacts connues sous le nom de "claypans", qui sont en grande partie dénuées de végétation. Les composantes de scène les plus significatives en terme de taille et de brillance dans le visible sont les crêtes des dunes, les "claypans" et les inter-dunes arénacées (Mitchell *et al.*, 1997; O'Brien *et al.*, 1998). Les données de AVHRR de NOAA-14, montrent une grande brillance de ce site (une réflectance de l'ordre

de 0,3 à 0,4). La comparaison de ces données sur une période couvrant une durée de 10 mois a montré que ce site est très stable temporellement et très homogène avec un coefficient de variation inférieur à 0,01 pour des échelles allant de 3x3 à 21x21 km^2 (Mitchell *et al.*, 1997). Le seul désavantage de ce site est lié aux effets de la BRDF causés notamment par la topographie des dunes (Mitchell *et al.*, 1997; O'Brien *et al.*, 1998). Les mesures photométriques ont montré que le ciel au-dessus de ce site est parfaitement clair avec une épaisseur optique des aérosols de l'ordre de 0,02 (Mitchell *et al.*, 1997).

2.8. Sonora (Mexique)

Le site de Sonora est localisé à l'extrême nord-ouest du Mexique (32° N, 114° O), c'est une surface désertique plate et large (> 50 km), située à une altitude d'environ 200 mètres et caractérisée par une végétation éparse mais très uniforme. Les conditions atmosphériques sont très favorables avec un ciel clair est presque toujours ensoleillé, un faible taux d'aérosols et un climat sec (Whitlock *et al.*, 1987). La grande faiblesse de ce site est l'effet de l'ombre causé par la présence d'une végétation arbustive et par la variation de l'humidité du sol qui peut réduire la réflectance de 50 % si on passe des conditions sèches à un taux d'humidité de 16 % (Whitlock *et al.*, 1987).

2.9. Salar d'Uyuni (Bolivie)

Le site de Salar de Uyuni est situé au sud-ouest de la Bolivie (20° 15' S, 67° 50' O) près de la ville d'Uyuni. Cette immense étendue salée aux allures de banquise est repérée à une altitude de 3660 mètres au-dessus du niveau de la mer et de 10 000 km^2 de large au cœur d'une région semi-aride, et constitue le plus grand playon de sel dans le monde (Rettig *et al.*, 1980). Le sol de ce site se constitue du chlorure de sodium, NaCl (sel de roche) sulfate de calcium, CaSO₄, et contient également le chlorure de lithium, LiCl, faisant de cette zone la réserve de lithium la plus importante de la planète. La profondeur du sel atteint 10 à 15 pieds au-dessous de la surface. Cette surface est très uniforme, plate, lisse et totalement blanche quand elle est sèche et se caractérise par une grande brillance (Price, 1987). Le climat de ce site est désertique avec un faible taux de précipitation (une moyenne pluviométrique annuelle d'environ 300 millimètres), un taux d'évaporation très élevé, et un ciel fréquemment clair avec un faible taux d'aérosols.

2.10. Rogers dry lake (Californie, USA)

Le lac sèche de Rogers est située sur le bord occidental du désert de Mojave à 100 milles au nord-est de Los Angeles, 90 milles au Nord-Ouest de San Bernardino et 80 milles au Sud-Est de Bakersfield en Californie. Ce site est localisé à proximité de la base d'Edwards air force (117° 53' O, 34° 53' N) à une altitude de 2300 pieds par rapport au niveau moyen de la mer. La surface de ce site, qui se déploie sur une superficie de plus de 44 milles carrés, est extrêmement plate à tel point qu'elle est employée comme une piste d'atterrissage des avions de haute performance (Jackson et al., 1990). Elle est totalement dénuée de végétation et constituée en partie d'argile pluviale déposée pendant la période pléistocène, quand la zone était un lac permanent. Cette argile est couverte par une couche mince alluviale lisse quand elle est humide et rigoureuse et dure lorsqu'elle est sèche. Le climat de cette région est typiquement désertique. Les précipitations annuelles, que reçoit ce site entre Novembre et Mars (les mois les plus pluvieux), sont environ quatre pouces. Le taux des journées claires peut atteindre une moyenne de 345 jours par année avec une faible humidité et des rares tempêtes de neige. Mais cette zone souffre des vents et des tempêtes de poussières très forts. Le comportement non lambertien de ce site est dû principalement à la rugosité de la surface (Jackson et al., 1990).

3. Étude comparative entre les différents sites

Il est bien évident que tous les sites présentés dans le cadre de cette étude sont sélectionnés parmi d'autres par les chercheurs afin de servir comme des sites d'étalonnage radiométrique des capteurs de télédétection. Toutefois, le problème de l'uniformité est bien fondamental, et chacun des sites montre des forces et des faiblesses, ce qui explique d'ailleurs l'existence de plusieurs sites. Comme nous avons discuté auparavant, les problèmes relatifs à un site d'étalonnage sont dus à la variation de l'humidité de sa surface qui affecte ses propriétés optiques, à la présence de la végétation qui cause des variations spectrales, au caractère non lambertien de la surface qui augmente les effets bidirectionnels intensifiés aussi par la topographie qui engendre des problèmes d'ombre, à l'instabilité atmosphérique qui engendre des variations temporelles importantes et finalement à sa taille, si elle est petite, elle peut augmenter l'effet de l'environnement et limiter son utilisation par les capteurs de faible résolution spatiale. À la lumière de cette étude bibliographique nous avons résumé dans le tableau 1 les caractéristiques des différents sites considérés dans cette étude, avantages et inconvénients.

Le tableau 1 révèle que tous les sites ont pratiquement un caractère non lambertien. Ils souffrent des effets

bidirectionnels à différents degrés en fonction de la rugosité et de l'humidité de la surface, du relief ainsi que de la végétation présente. Si nous considérons le site de White Sands (le plus documenté et le plus caractérisé), évidemment c'est la zone des plaines qui est exploitable et utilisable dans les opérations d'étalonnage. Contrairement à la zone des dunes qui cause plusieurs problèmes à cause de la topographie et l'ombre (Markham et al., 1990). Quant à la surface des plaines, elle a un comportement à peu près comme celui du site LLPN (Teillet et al., 1995). Elle est presque lambertienne notamment pour les capteurs opérant avec un angle d'observation au nadir. Alors qu'elle engendre une variation du facteur de réflectance d'environ 10 % pour des angles de visées inclinés (Abel et al., 1988). Par ailleurs, le coefficient de réflectance du site de La Crau varie d'environ 10 % entre une observation au nadir et une observation maximale de SPOT, $\pm 27^\circ$ (Santer et al., 1992). Ces variations sont causées par le caractère non lambertien de la surface et intensifiés par les ombres créées par les galets qui couvrent la surface du site et la végétation passablement présente dans cette région (Rondeaux et al., 1998).

Malgré la couleur claire et brillante du Tinga Tingana, la topographie des dunes dans ce site engendre des problèmes très importants de BRDF (O'Brien *et al.*, 1998). Quant au site désertique de Sonora, les effets bidirectionnels sont principalement causés par la présence d'une végétation arbustive et par son ombre (Whitlock et al., 1987). Par ailleurs, les investigations sur les sites RVPN (Teillet et al., 1995) et Dunhuang (Wu et al., 1997) ont montré que leurs surfaces sont non lambertiennes et qu'il faut prendre en considération les effets bidirectionnels lors de leur utilisation pour l'étalonnage des capteurs. Alors que le problème des effets de la BRDF n'est pas caractérisé dans la littérature pour les sites de Newell County et Salar d'Uyuni.

Comme nous l'avons indiqué auparavant une réflectance bien élevée permet de réduire l'influence des effets atmosphériques sur le signal et de minimiser l'impact des erreurs des mesures. Cependant, bien que les sites cités dans cette étude se caractérisent généralement par des réflectances supérieures à 0,1 dans toutes les longueurs d'ondes, leur degré de brillance varie pour différentes raisons. Bien entendu, la brillance de la surface du site est liée, entre autres, à son humidité, à la présence de la végétation et à l'ombre qui peut être causé à la fois par la topographie, la rugosité et la végétation. En outre, les précipitations et les tempêtes de neiges inondent certains sites (Lunar lake playa, Railroad Valley playa, Rogers dry lake et particulièrement Salar d'Uyuni) ce qui modifie les

propriétés optiques et les caractéristiques de leurs surfaces après dessèchement. D'ailleurs, comme résumé dans le tableau 1, à l'exception du site de Dunhuang, la variation de l'humidité de surface est un problème qui affecte tous les autres sites (Slater et al., 1987 ; Teillet et al., 1995 ; Jackson et al., 1990). Pour La Crau les variations climatiques entre l'été et l'hiver dans le bassin méditerranéen affectent l'humidité et les propriétés optiques de la surface du site en lui donnant une couleur relativement sombre, causée par la présence des lichens. Comparativement aux autres sites, la surface du site de Newell County en Alberta est moins brillante à cause de la variation phénologique du couvert, la présence d'une végétation sénescence locale ou dispersée et l'humidité qui reste présente à l'intérieur du couvert malgré le taux d'évaporation très élevé (Teillet et al., 1998a).

Par ailleurs, la stabilité temporelle d'un site est très importante pour l'étalonnage et le contrôle de la radiométrie des capteurs satellitaires à long terme. De plus un site parfaitement stable permet l'inter-étalonnage entre différents capteurs sans la nécessité d'un passage simultané au-dessus du site. La majorité des sites présent dans cette étude subissent des variations saisonnières en fonction de leurs climats et leur stabilité temporelle est contrôlée, entre autres, par la variabilité de l'humidité de leurs surfaces (Lunar lake playa, Railroad Valley playa, Rogers dry lake et White Sands) et la variation phénologique de la végétation (La Crau, Sonora et Newell County). Railroad Valley playa Lunar Lake playa subissent des variations temporelles importantes à cause des changements de la structure de leurs surfaces causés par le vent et par les inondations après les précipitations ou après la fonte des neiges. En outre, les données multitemporelles de ERS-1 acquises au-dessus de ces sites ont montré qu'ils subissent des variations temporelles importantes (Teillet et al., 1996). Néanmoins, les images de AVHRR acquises à différents mois de l'année et à différentes années ont indiqué que la stabilité de Railroad Valley est maintenue de la mi-saison de l'été à la fin de l'année (Scott et al., 1996). Notons ici que la bibliographie n'est pas assez riche en informations sur la variabilité temporelle des sites Rogers dry lake et Salar d'Uyuni et Tinga Tingana.

L'uniformité spatiale est un paramètre fondamental dans la sélection des sites d'étalonnage. Tous les sites cités dans cette communication sont pratiquement sélectionnés sur la base de l'uniformité spatiale. Toutefois, le site Sonora ne montre pas une excellente uniformité spatiale à cause de l'évolution de son couvert végétal éparse (Whitlock et al., 1987). Alors que dans le site de Tinga Tingana, l'uniformité spatiale est affectée

par l'existence de différentes composantes de la scènes : dunes et végétation (Mitchelle et al., 1997). Quant à White Sands l'uniformité spatiale n'est pas appliquée pour la totalité de sa surface (Markham et al., 1990). En effet, la zone de "Chuck Site" dans la région des plaines de gypse est caractérisée par une bonne uniformité en plus de sa réflectance élevée et de son caractère presque lambertien (Slater et al., 1987). C'est la zone la plus utilisée pour l'étalonnage des capteurs optiques de télédétection (Slater et al., 1996). Quant à La Crau, malgré un coefficient de variation inférieur à 2% dans les trois canaux de SPOT, sa surface n'est pas parfaitement uniforme et loin d'être lambertienne (Cierniewski et Verbrugge, 1997). D'après cette étude, nous pouvons dire que la zone des plaines de White Sands est bien adaptée pour l'étalonnage radiométrique des capteur que le site de La Crau.

L'analyse des images HRV de SPOT acquises au-dessus des sites de Newell County et de Railroad Valley playa montre un coefficient de variation inférieur ou égal à 3 % (Teillet et al., 1998b) se qui laisse croire à une bonne uniformité spatiale de ces deux sites. Toutefois, une faible valeur du coefficient de variation ne signifie pas une uniformité spatiale parfaite du site, car elle est la moyenne de plusieurs pixels dont l'uniformité est différente à cause de l'humidité ou par l'existence des éléments de signatures spectrales différentes (Teillet et al., 1998b). En général, le site de Railroad Valley Playa comme ceux du Rogers dry lake et Salar d'Uyuni, se caractérise par une bonne stabilité spectrale, sans relief, très faible présence de la végétation, une surface brillante et une taille suffisamment large pour l'étalonnage des capteurs de faible résolution spatiale. Le site de Lunar Lake Playa Nevada présente d'autres avantages par rapport au site Railroad Valley Playa (surface très homogène, très brillante et uniforme spatialement), malheureusement sa petite taille ne permet que l'étalonnage des capteurs de grande résolution spatiale (HRV, TM, ETM+ et Ikonos). D'après les premiers résultats obtenus sur le site de Dunhuang de la Chine, celui-ci présente des excellentes qualités, notamment: un climat aride avec un taux élevé des journées claires, une atmosphère sec et bien stable dans le temps, une bonne homogénéité spectrale et spatiale (un coefficient de variation inférieur à 3,3 % pour toutes les bandes de SPOT et les quatre premières bandes de TM), sans relief, sans végétation et faible taux de précipitation (Wu et al., 1997). Toutefois, il faut prendre en considération la correction des effets de la BRDF lors de l'utilisation de ce site pour l'étalonnage des capteurs optiques.

À la lumière de cette étude nous pouvons dire que tous les sites cités dans cette communication sont loin d'être des excellents sites d'étalonnage. Leurs degrés de satisfaction aux critères cités auparavant varient d'un site à l'autre. Bien entendu, il reste encore du travail à faire afin de bien localiser les zones d'une parfaite stabilité optique, spatiale, spectrale et temporelle pour augmenter la précision des opérations d'étalonnage et, par conséquent, extraire une information crédible à partir des données de télédétection.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada, le Centre canadien de télédétection et l'Université d'Ottawa pour leur support financier.

6. Références

- Abel, P., Smith, G.R., Levin, R.H. and Jacobowitz, H. (1988) Results from aircraft measurements over White Sands, New Mexico, to calibrate the visible channels of spacecraft instruments. *SPIE*, vol. 924, p. 208-214.
- Bannari, A., Teillet, P.M. et Richardson, G. (1999) Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection. *Journal canadien de télédétection*, vol. 25, no.1, p.45-59.
- Cierniewski, J. and Verbrugge, M. (1997) Inferring Soil Surface Roughness from Bidirectional Reflectance Data. *Int. Agrophysics*, vol. 11, p. 147-157.
- Frouin, R. and Gautier, C. (1987) Calibration of NOAA-7 AVHRR, GOES-5 and GOES-6 VISSR/VAS Solar Channels. *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, p. 73-101.
- Frouin, R. and Simpson, J.J (1995) Radiometric Calibration of GOES-7 VISSR Solar Channels During the GOES Pathfinder Benchmark Period. *Remote Sensing of Environment*, vol.52, p. 95-115.
- Gu, X., Verbrugge, M. et Guyot, G. (1991) Inter-étalonnage de SPOT1-HRV, Landsat 5-TM et NOAA11-AVHRR dans les domaines du visible et du proche infra-rouge. *Proceedings of the 5th International Colloquium, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courcheval, France, p. 45-48.
- Gu, X., Guyot, G., et verbrugge, M. (1990) Analyse de la variabilité spatiale d'un site-test: exemple de "La Crau" (France). *Photo-interpretation*, vol. 90, no.1, Fasc. 5, p. 40-51.
- Jackson, R.D., Teillet, P.M., Slater, P.N., Fedosejevs, G., Jasinski, M.F., Aase, J.K. and Moran, M.S. (1990) Bidirectional Measurements of Surface Reflectance for View Angle Corrections of Oblique Imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol. 32, p.189-202.
- Leroy, M.M. (1990) Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. In *Ecole d'été en télédétection spatiale: aspects physiques et modélisation*, CEPADUES Ed, Toulouse, France, p. 311-363.
- Markham, B.L., Irons, J.R., Deering, D.W., Halthore, R.N., Irish, R.R., Jackson, R.D., Moran, M.S., Biggar, S.F., Gellman, D.I., Grant, B.G. and Palmer, J.M (1990) Radiometric Calibration of Aircraft and Satellite Sensors at White Sands, NM. *IGARSS*, p. 515-518.
- Mitchell, R.M., O'Brien, D.M., Edwards, M., Elsum, C.C., Graetz, R.D., and Simpson, J.J. (1997) Selection and Preliminary Characterization of a Bright Calibration Site in the Strzelecki Desert, South Australia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 4, p.342-353.
- O'Brien, D. M., Mitchell, R.M., Edwards M., Elsum, C. C. (1998) Estimation of BRDF from AVHRR short-wave channels: tests over semiarid Australian sites, *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, p. 71-86.
- Price, J.C. (1987) Radiometric Calibration of satellite sensors in the visible and near-infrared: history and outlook. *Remote sensing of environment*, vol. 22, p. 3-9.
- Rettig, S. L., B. F. Jones, et F. Risacher, (1980) Geochemical evolution of brines in the Salar of Uyuni, Bolivia, *Chem. Geol.*, vol. 30, p. 57-79.
- Rondeaux, G., Steven, M.D., Clark, J.A. and Mackay, G. (1998) La Crau: a European test site for remote sensing validation. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, no.14, p. 2775-2788.
- Santer, R., Gu, X.F., Guyot, G., Deuze, J.L., Devaux, C., Vermote, E. and Verbrugge, M., (1992) SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France). *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, p. 227-237.
- Scott, K.P., Thome, K.J. and Brownlee, M. (1996) Evaluation of the Railroad Valley Playa for Use in Vicarious Calibration. *Proceedings of SPIE Conference 2818*, Denver, Colorado, p.158-166.
- Shepard, M.K., Arvidson, R.E. and Guinness, E.A. (1991) Scattering behavior of Lunar Lake Playa determined from PARABOLA bidirectional

- reflectance data. *Geophysical research*, vol. 18, no. 12, p. 2241-2244.
- Slater, P.N. (1984) A Review of Some Radiometric Calibration Problems and Methods. II Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, France (Les colloques de L'INRA, no. 23), p. 391-405.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Holà, R.A., Jackson, R.D., Mao, Y., Moran, M.S., Palmer, J.M. and Yuan, B. (1987) Reflectance-and Radiance-Based Methods for In-Flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors. *Remote Sensing of Environment*, vol.22, p.11-37.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Thome, K.J., Gellman, D.I. and Spyak, P.R. (1996) Vicarious Radiometric Calibrations of EOS Sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.13, p. 349-359.
- Smith, A.M., Major, D.I., McNeil, R.L., Willms, W.D. and Brisco, B. (1995) Complementarity of Radar and Visible-Infrared Sensors in Assessing Range land Condition. *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, p.173-180.
- Teillet, P.M. (1985) Réflexion sur la correction radiométrique des images en télédétection. L'association québécoise de télédétection et gestion des ressources: L'aspect opérationnel, vol. V, p.571-581.
- Teillet, P.M. and Fedosejevs, G. (1986) Technical Tips Gleaned from the White Sands Field Work and Related Activities. Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Ontario, 14 pages.
- Teillet, P.M., Slater, P.N., Jackson, R.D., Fedosejevs, G. and Moran, M.S. (1987). Reflectance Measurements at White Sands, New Mexico, Using a Mobile Spectroscopy Laboratory. *Proceedings of the 11 th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Waterloo, Ontario, p. 441-450.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, R.P., O'Neill, N.T., Thome, K.J., Biggar, S.F., Ripley, H. and Meygret, A. (2001) Generalized Approach to the Vicarious Calibration of Multiple Earth Observation Sensors Using Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 77, p. 304 - 327.
- Teillet, P.M., Slater, P.N., Ding, Y., Santer, R.P., Jackson, R.D. and Moran, M.S. (1990). Three Methods for the Absolute Calibration of the NOAA AVHRR Sensors In-Fight. *Remote Sensing of Environment*, vol.31, p.105-120.
- Teillet, P.M., Horler, D. and O'Neill, N.T. (1997) Calibration, Validation, and Quality Assurance in Remote Sensing: A New Paradigm. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23(4), p. 401- 414.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G. and Gautier, R.P. (1998a) Operational Radiometric Calibration of BroadScale Satellite Sensors Using Hyperspectral Airborne Remote Sensing of Prairie Rangeland: First Trials. *Metrologia*, vol 35, p. 639-641.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, R.P. and Schowengerdt, R.A. (1998b) Uniformity Characterization of Land Test Sites Used for Radiometric Calibration of Earth Observation Sensors. *Proceedings of the Twentieth Canadian Symposium on Remote Sensing*, Calgary, Alberta, p.1-4.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, D., D'Iorio, M.A., Rivard, B., Budkewitsch, P. and Brisco, B. (1995) An Initial Examination of Radar Imagery of Optical Radiometric Calibration Sites. *Proceedings of the SPIE Europto Symposium on Advanced and Next-Generation Satellites*, SPIE, vol. 2583, p.154-165.
- Thome, K.J., Gellman, D.I., Parada, R.J., Biggar, S.F., Slater, P.N. and Moran, M.S. (1993) In-flight Radiometric calibration of Landsat-5 Thematic Mapper from 1984 to present. *Proceedings of SPIE Conference*, vol.1938, Orlando, Florida, p.126-131.
- Thome, K.J., Biggar, S.F., Gellman, D.I. and Slater, P.N. (1994) Absolute-Radiometric Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper and the Proposed Calibration of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, p. 2295-2297.
- Vane, G., Green, R.O., Chrien, T.G., Enmark, H.T., Hansen, E.G. and Porter, W.M. (1993) The airborne visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, vol, 44, p. 127-143.
- Wheeler, R.J., Lecroy, S.R., Whitlock, C.H., Purgold, G.C. and Swanson, J.S. (1994) Surface characteristics for the Alkali flats and dunes regions at the White Sands Missile Range, NM. *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, p. 181-190.
- Whitlock, C.H., LeCroy, S.R. and Wheeler, R.J. (1994) Narrowband Angular Reflectance Properties of the Alkali Flats at White Sands, New Mexico. *Remote Sensing of Environment*, vol. 50, p. 171-181.
- Whitlock, C.H., Purgold, G.C. and LeCroy, S.R. (1987) Surface Bidirectional Reflectance properties of Two South-Western Arizona

- deserts for wavelenghs between 0,4 and 2,2 microns, NASA TP 2643.
- Wu, D., Yin, Y., Wang, Z., Gu, X., Verbrugghe, M. and Guyot, G. (1997) Radiometric Characterisation of Dunhuang Satellite Calibration Test Site (CHINA) and First Test Using SPOT Data. Seventh International Symposium on Physical Measurments and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France.

Tableau 1 : synthèse des caractéristiques des différents sites considérés dans cette étude

Site	Humidité	Brillance	Effet de la végétation	Effet de la BRDF	Effet du relief	Effet de l'Ombre	Taille	Effets atmosphériques	Caractère lambertien	Altitude
White Sands	⊕	⊕	○	○1 ⊕2	⊕1 ⊕2	⊕1 ⊕2	⊕	⊕	○1 ⊕2	⊕ ⊕
La Crau	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	○	○	○	⊕	⊕
RVPN	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
LLPN	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	○	⊕
Rogers Dry Lake	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Salar d'Uyuni	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	○	⊕	⊕
Tinga Tingana	○	⊕	○	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
NCRA	⊕	⊕	**	*	⊕	⊕	⊕	○	⊕	⊕
Dunhuang	⊕	○	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Sonora	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕

⊕ : pauvre et variable ⊕ : bon ○ : acceptable
 1 : réfère aux plaines 2 : réfère aux dunes X : non caractérisé

**ANALYSE DE L'UNIFORMITÉ SPATIO-
TEMPORELLE DU SITE-TEST "NEWELL COUNTY
RANGELAND" EN ALBERTA (CANADA) POUR
L'ÉTALONNAGE RADIOMÉTRIQUE DES CAPTEURS
d'OBSERVATION DE LA TERRE**

Actes du 8^{ème} Symposium international des mesures physiques et
signatures en Télédétection, Aussois, France, Janvier 8-12, 2001,
pp. 195 – 200

ANALYSE DE L'UNIFORMITÉ SPATIO-TEMPORELLE DU SITE-TEST "NEWELL COUNTY RANGELAND" EN ALBERTA (CANADA) POUR L'ÉTALONNAGE RADIOMÉTRIQUE DES CAPTEURS D'OBSERVATION DE LA TERRE

Khalid OMARI¹, Abdou BANNARI¹, Gunar FEDOSEJEVS² et Philippe TEILLET²

¹ *Laboratoire de Télédétection et de Géomatique de l'Environnement,
Département de géographie, Université d'Ottawa,
C.P. 450, Succ. A, Ottawa (Ontario) K1N 6N5*

² *Centre canadien de télédétection, 588, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0Y7*

ABSTRACT - *The goal of this study is to analyze the spatial and temporal radiometric uniformity of the Newell County Rangeland test site, Alberta, Canada, according to different spatial, spectral and temporal resolutions of the satellite sensors. It also aims at determining the most suitable size of the site for an optimal radiometric calibration of the sensors, as well as the geographical location of the most stable and most homogeneous area. The results show that an area of 7x7 km² is characterized by a coefficient of variation of less than 3 %. This area has a relative annual stability and could be used for operational radiometric calibration of several satellite optical sensors, including those with coarse spatial resolution, such as AVHRR and MODIS.*

RÉSUMÉ - *Le but de cette étude est d'analyser l'uniformité spatio-temporelle du site-test Newell County Rangeland en Alberta, Canada, en fonction de différentes résolutions spatiales, spectrales et temporelles. Elle vise aussi à déterminer la taille la plus appropriée du site pour un étalonnage optimal des capteurs, ainsi que la localisation géographique de la zone la plus stable et la plus homogène. Les résultats obtenus montrent qu'une zone de 7x7 km² se caractérise par un coefficient de variation de moins de 3 %. Cette zone possède une stabilité annuelle relative et pourrait être utilisée dans les opérations d'étalonnage radiométrique de plusieurs capteurs satellitaires, y compris ceux à faible résolution spatiale, comme AVHRR et MODIS.*

1 - INTRODUCTION

Depuis trois décennies, les images numériques de télédétection sont largement utilisées dans les domaines forestiers, agricoles, hydrologiques, géologiques, etc. Toutefois, l'utilisation des images brutes, sans étalonnage radiométrique du capteur et sans corrections atmosphériques, peut générer des erreurs dans l'évaluation des éléments biophysiques au sol, erreurs qui peuvent atteindre jusqu'à 50 %, d'où la nécessité de l'étalonnage du capteur et la standardisation des données avant toute opération de traitement d'image ou d'extraction de paramètres biophysiques et géophysiques [Bann 99]. Différentes méthodes sont utilisées pour l'étalonnage des capteurs optiques après le lancement: étalonnage à bord à l'aide d'une lampe, d'une sphère, d'un panneau de diffusion solaire ou d'un capteur solaire, étalonnage par visée de la lune, étalonnage sur sites terrestres avec vérité terrain, étalonnage sur sites terrestres sans vérité terrain, étalonnage inter-instruments et étalonnage inter-bandes [Ding 99]. À cause de l'inaccessibilité du satellite, la méthode d'étalonnage directe basée sur un site terrestre avec vérité terrain est souvent considérée comme efficace et assure le meilleur

compromis “précision-investissement” [Slat 87; Gu 90]. Elle est utilisée avec succès, entre autres, par la NASA et par le Centre national des études spatiales (CNES), France, pour l'étalonnage des capteurs optiques. Elle présente l'avantage de reproduire les conditions réelles d'acquisition des données relatives aux images. Sa précision dépend étroitement de la stabilité et de l'uniformité spatio-temporelle du site d'étalonnage, de la détermination précise de la réflectance moyenne du site et de la précision des paramètres atmosphériques mesurés au moment de l'acquisition de l'image au-dessus du site. Dans la littérature, plusieurs sites tests sont utilisés pour l'étalonnage direct des capteurs satellitaires et aéroportés, tels que: le site de “White Sands” au Nouveau-Mexique (États-Unis), “La Crau” au sud de la France, “Railroad Valley Playa” et “Lunar Lake Playa” au Nevada (États-Unis), “Dunhuang” dans la province de Gansu (Chine), “Désert de Sonora” (Mexique) et les sites désertiques de l'Afrique du Nord et de la péninsule Arabique. Dernièrement, le site “Newell County Rangeland” en Alberta (NCRA), Canada, a été sélectionné par les chercheurs du Centre canadien de télédétection comme un site alternatif pour l'étalonnage des capteurs satellitaires et aéroportés, y compris ceux qui présentent une faible résolution spatiale au sol [Teil 00]. Le but de la présente étude est d'analyser de l'uniformité spatio-temporelle du site-test NCRA en fonction de différentes résolutions spatiales, spectrales et temporelles. Elle vise aussi à déterminer la taille du site la plus appropriée pour un étalonnage optimal des capteurs, ainsi que la localisation géographique de la zone la plus stable, la plus homogène et, par conséquent, la plus convenable pour l'étalonnage. Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons exploité trois images multispectrales du capteur Haute résolution visible (HRV) de SPOT et sept images du capteur Thematic Mapper (TM) de Landsat-5.

2 - MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 - Site d'étude

Le site Newell County Rangeland en Alberta (NCRA) a été sélectionné par les chercheurs du Centre canadien de télédétection comme un site alternatif pour l'étalonnage des capteurs satellitaires et aéroportés [Teil 98a; Teil 00]. Il est localisé au nord-ouest de Medicine Hat en Alberta ($50^{\circ} 18' N$ et $111^{\circ} 38' O$) avec une dimension approximative de 10 km (E-O) par 10 km (N-S) et une altitude de 754 mètres par rapport au niveau moyen de la mer (Fig. 1). La surface de ce site est plate et uniforme, constituée principalement de prairies offrant une faible variation phénologique (figure 1). Le climat de cette région se caractérise par de faibles précipitations (une moyenne de 280 mm par année), un taux d'évaporation élevé (800 mm par année) et un taux de journées claires élevé, avec des vents forts [Smit 95].

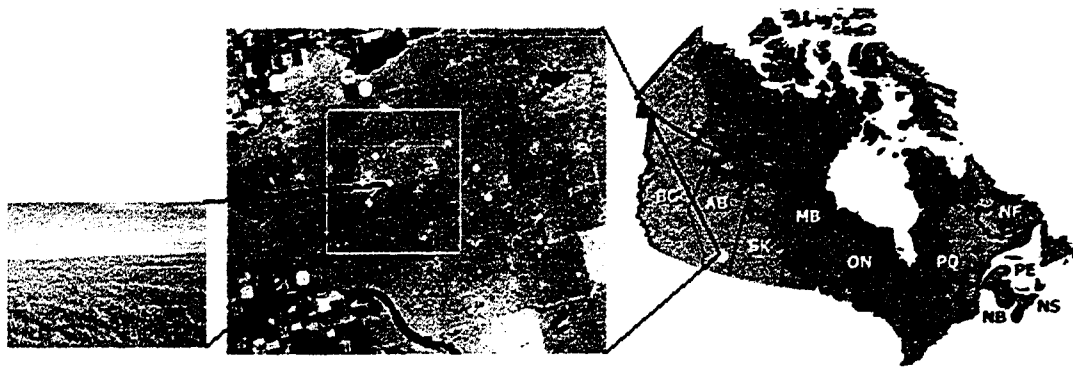


Fig. 1 : Localisation du site Newell County Rangeland en Alberta (Canada)

2.2 - Données images

La caractérisation de l'uniformité spatio-temporelle d'un site est facilitée par des données acquises par des capteurs de différentes résolutions spatiales et spectrales durant plusieurs années, avec une distribution régulière sur une échelle annuelle ou, au moins, sur l'échelle de la période pour laquelle le site est utilisable. Cependant, il est très difficile d'avoir une base de données qui répond à nos besoins d'une façon parfaite, à cause des contraintes des coûts très élevés des images et de la disponibilité des images acquises à des dates souhaitées. Parmi les images existantes dans la base de données du Centre canadien de télédétection et celle de l'Université d'Arizona aux États-Unis, nous avons sélectionné les images sans nuages et qui répondent le plus à nos objectifs. Les dix images utilisées dans le cadre de cette étude ont été acquises par les capteurs HRV de SPOT et TM de Landsat-5 au-dessus du site considéré, à différentes dates et sous des angles d'observation presque au nadir (Tableau 1).

Tableau 1: Liste des images acquises sur le site de Newell County Rangeland en Alberta

Satellite	Capteur	Bandes spectrales	Dates d'acquisition
SPOT	HRV	1, 2 et 3	4 octobre 1998
		1, 2 et 3	7 août 1998
		1, 2 et 3	27 juin 1994
Landsat-5	TM	1 à 5 et 7	20 août 1999
		1 à 5 et 7	04 octobre 1998
		1 à 5 et 7	08 août 1998
		1 à 5 et 7	27 avril 1998
		1 à 5 et 7	30 août 1997
		1 à 5 et 7	27 août 1996
		1 à 5 et 7	26 septembre 1995

2.3 - Coefficient de variation

Le coefficient de variation est un outil indispensable dans l'évaluation de l'uniformité d'un site, car il permet de déterminer le degré de la variabilité spatio-temporelle [Gu 90; Teil 98b]. Il est défini par le rapport de l'écart type (σ) à la moyenne (x). Le coefficient de variation a été utilisé pour caractériser l'uniformité radiométrique et l'évolution temporelle du site de La Crau, France, en exploitant des images du capteur HRV de SPOT [Gu 90]. D'après ces chercheurs, cette méthode a permis de choisir l'emplacement le plus homogène du site de La Crau avec un coefficient de variation d'environ 2 %. De plus, Teillet *et al.* [98b] ont calculé le coefficient de variation à partir des images HRV de SPOT acquises sur les sites de Railroad Valley Playa (Nevada) et NCRA. Les résultats obtenus ont montré que les zones les plus homogènes montrent un coefficient de variation de 2,5 % et 3 %, respectivement. Suite à ces travaux, nous considérerons donc qu'un site est homogène lorsque le coefficient de variation sera de 3 % ou moins.

3 - ANALYSE ET DISCUSSION

3.1. Caractérisation spatiale et spectrale du site

Le premier objectif de cette étude est de localiser la zone la plus homogène et la plus convenable pour l'emplacement d'un site d'étalonnage. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons dérivé des images du coefficient de variation à partir des images HRV et TM en considérant des fenêtres de 3x3, 5x5, 7x7 et 9x9. Notons qu'une fenêtre 5x5 a été retenue du fait qu'elle considère un voisinage relativement limité correspondant à 100x100 m² pour les images HRV et à 150x150 m² pour les images TM. Une petite fenêtre de 3x3 peut dissimuler la variabilité du pixel en question par rapport à son voisinage, alors qu'une grande fenêtre (7x7 et 9x9) peut amplement affecter la variabilité du pixel central en considérant ceux qui sont lointains. Après la fixation de la taille de la fenêtre des traitements, nous avons ouvert des fenêtres croissantes en calculant la moyenne du coefficient de variation (MCV) en considérant différents points à différents emplacements de la zone d'étude (les points blancs de la figure 1). Les résultats obtenus montrent qu'une zone de 7x7 km², limitée par le rectangle blanc sur l'image de la figure 1, se distingue des autres zones par un coefficient de variation inférieur à 3 %. En effet, la figure 2 illustre bien que à partir des données HRV et TM, la MCV ne dépasse pas les 3 % et reste presque constante au fur et à mesure que la taille du site augmente. La MCV ne dépasse pas la précision souhaiter, notamment dans les trois canaux du visible des deux capteurs (figures 2a et 2b). En outre, dans les canaux du proche et du moyen infrarouge de TM nous remarquons que la MCV est d'environ 2,5 % dans TM4 et TM5. Par contre, dans l'autre canal du moyen infrarouge (TM7), la MCV varie entre 3,9 % et 4,3 %. Ce comportement peut être expliqué par la nature de NCRA qui est constituée d'un couvert végétal homogène mais mixte : végétation vivante et sénescence. Cette constatation concorde avec les travaux de Teillet *et al.* [00] qui ont montré à partir de données hyperspectrales, acquises durant le mois d'août, que la réflectance moyenne du site NCRA ne reflète ni la signature pure d'une végétation photo-synthétiquement active totalement couvrante ni celle d'une végétation complètement sénescence. En effet, la bande TM7 est très sensible à la variation phénologique de la végétation, notamment au stade de la sénescence (cellulose et lignine), et aux propriétés des sols sous-jacents aux couverts, leurs constituants

minéralogiques et à leur état d'humidité. À la lumière de ces résultats préliminaires, nous pouvons dire que le site sélectionné, d'environ $7 \times 7 \text{ km}^2$ (figure 1), pourrait être utilisé dans les opérations d'étalonnage radiométrique de plusieurs capteurs satellitaires y, compris ceux à faible résolution spatiale comme AVHRR et MODIS.

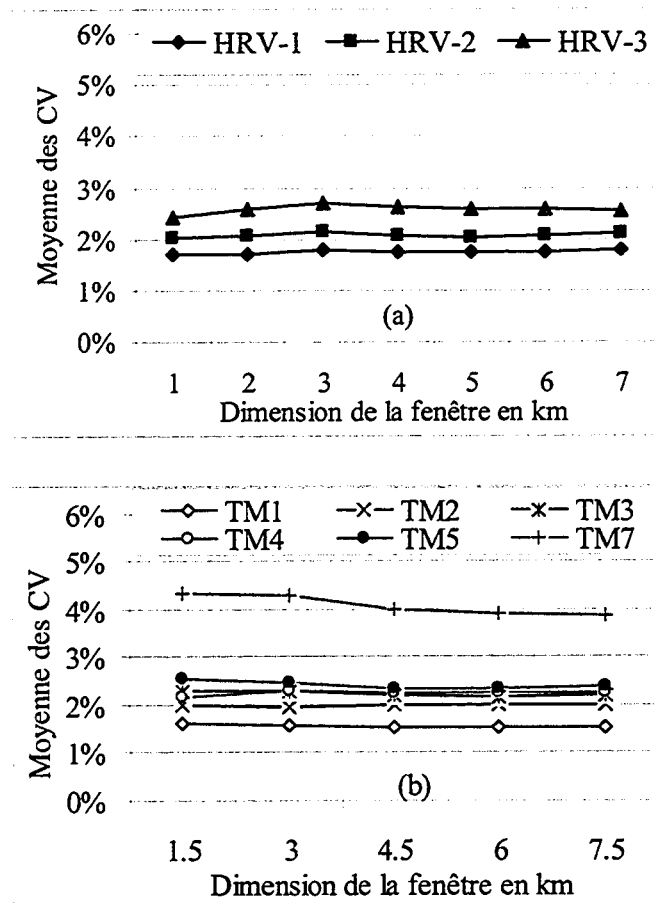


Fig. 2 : MCV calculée en fonction de la dimension de la fenêtre (a) pour une image HRV acquises le 7 août 1998 (b) pour une image TM acquise le 27 août 1996.

Par ailleurs, afin d'analyser l'impact de la différence des résolutions spatiales et spectrales sur l'uniformité spatio-temporelle du site NCRA, nous avons considéré deux autres images TM et HVR acquises durant la même journée, le 4 octobre 1998. La figure 3 permet une comparaison de la MCV calculée dans les 3 canaux de HRV et aussi dans leurs homologues de TM en fonction de la taille de la fenêtre. Nous remarquons que les différentes courbes restent monotones mais avec des faibles valeurs dans les canaux de HRV (moins de 3 %) par rapport à leurs homologues de TM (entre 3 et 4 %). Cette différence peut être expliquée par la non-coïncidence des bandes spectrales homologues entre capteurs (largeur des bandes) et aussi par la variation de la fonction de réponse spectrale (qui est une combinaison de la réponse typique du filtre et celle des détecteurs) entre les bandes spectrales homologues. L'effet de la géométrie d'acquisition peut lui aussi introduire des variations, étant donné que les deux capteurs ont des géométries de visées relativement différentes, bien qu'elles soient au nadir. Quant à la différence de la résolution spatiale entre les deux capteurs, elle peut introduire des faibles variations du fait que le coefficient de variation est calculé avec des fenêtres de résolutions spatiales différentes. Évidemment, à cause de cette différence, lors du traitement, le voisinage considéré par chaque pixel central n'est pas le même entre les deux images, ce qui permet de révéler certaines hétérogénéités locales. Si nous considérons maintenant les figures 2a et 2b issues de deux images acquises durant le même mois mais à des dates différentes, nous remarquons que la MCV ne dépasse pas les 3 % dans les trois canaux de HRV ainsi que dans leurs homologues de TM. Toutefois, il faut vraiment faire attention lors de l'analyse des résultats compte tenu du fait qu'une faible valeur de la MCV ne signifie pas automatiquement une uniformité spatiale parfaite du site, car elle est la moyenne de plusieurs pixels dont l'uniformité diffère à cause de l'existence de l'humidité ou des marécages au niveau du site.

3.2. Caractérisation temporelle : variations annuelle et saisonnière

Pour l'analyse du comportement multitemporel du site, nous avons utilisé une série de 5 images TM acquises entre 1995 et 1999 (Tableau 1) durant les mois d'août et septembre. Pour la mise en évidence de la variation temporelle du site, nous avons calculé la MCV par référence à l'année 1995. D'après la figure 4, nous remarquons que le site a subi une variation relativement faible durant 5 ans. En effet, le coefficient de variation temporel a évolué légèrement, mais il est resté sous la valeur de 5 % dans tous les canaux des images considérées, à l'exception de l'année 1998 où il augmente progressivement dans tous les canaux, particulièrement dans le canal du proche infrarouge (TM4) dont la valeur excède les 10 %. Malheureusement, nous ne disposons pas des données météorologiques sur la région pendant cette période pour expliquer correctement le comportement spectral du site durant cette année. Néanmoins, ces résultats nous permettent de conclure que, à l'exception de l'année 1998, le site est relativement stable durant la même saison d'une année à l'autre.

Fig. 3 : MCV en fonction de la taille de la fenêtre dans les trois canaux de HRV de SPOT et leurs homologues de TM de Landsat-5 (TM2, TM3 et TM4), images acquises le 4 octobre 1998.

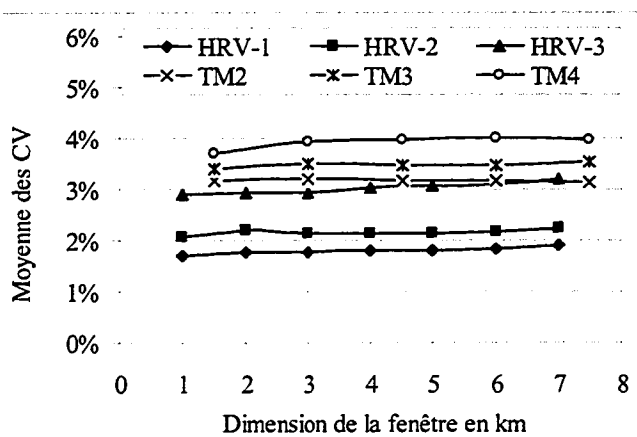


Fig. 4 : Coefficient de variation temporelle-annuelle durant 5 années (1995-1999), fréquence d'une image par année.

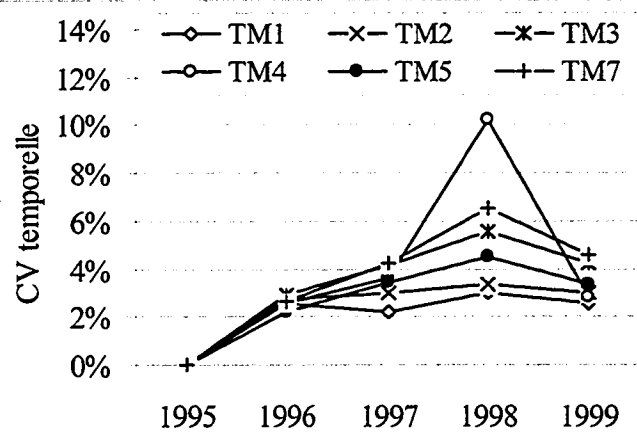
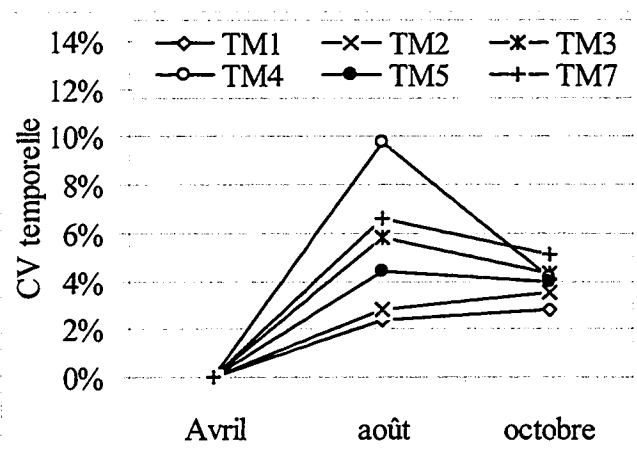


Fig. 5 : Coefficient de variation temporelle-saisonnier, d'avril à octobre, durant la même année (1998).



Par ailleurs, du fait que le site NCRA est constitué principalement d'une végétation homogène (prairies), une caractérisation de la variabilité saisonnière de ce site est d'une importance majeure. Les données que nous avons pu trouver pour faire cette analyse se constituent de trois images TM acquises en avril (printemps), août (été) et octobre (automne) de l'année 1998. La figure 5 illustre la variation du coefficient de variation (CV) saisonnier dans les six canaux de l'image. Nous constatons que, par rapport à la saison référence (avril), la valeur du CV n'a pas dépassé les 3 % dans les deux canaux du visible (TM1 et TM2) durant les saisons d'été et d'automne. Par contre, dans les 4 autres canaux (TM3, TM4, TM5 et TM7), qui se caractérisent par une grande sensibilité aux stades évolutifs des couverts végétaux, les valeurs du CV ont augmenté durant l'été (phase de la croissance maximale) et, par la suite, elles ont diminué au début de l'automne (commencement de la sénescence). En effet, durant l'été, le CV atteint une variation de 10 %, notamment dans le canal TM4 qui est le plus sensible à la biomasse. Notons que dans le canal TM7 (moyen infrarouge), le CV dépasse les 6 %. Quant au canal TM3 (rouge) sensible à la présence de la chlorophylle, le CV passe d'environ 6 % durant l'été à environ 4 % en automne. Toutefois, pour assurer un étalonnage adéquat à tous les canaux d'une image, il est souhaitable d'utiliser le site durant la même saison chaque année. Cependant, malgré la logique de l'analyse dégagée ci-dessus et bien que le site soit constitué principalement de couverts végétaux, il est difficile dans le contexte de cette étude de conclure rapidement sur le comportement saisonnier du site du fait que les données d'août 1998 montrent une forte variation du CV comparativement aux autres années (figure 4). Il est donc souhaitable de reprendre l'analyse du comportement saisonnier du site sur d'autres données en considérant les trois saisons (printemps, été et automne) durant plusieurs années.

4 – CONCLUSION

Dans cette communication, nous avons caractérisé l'uniformité spatio-temporelle du site-test NCRA en fonction de différentes résolutions spatiales, spectrales et temporelles en exploitant trois images HRV de SPOT et sept images TM de Landsat-5. Les résultats obtenus montrent qu'une zone de 7x7 km² se caractérise par un coefficient de variation de moins de 3 %. Cette zone montre une stabilité annuelle relative et pourrait être utilisée dans les opérations d'étalonnage radiométrique de plusieurs capteurs satellitaires, y compris ceux à faible résolution spatiale comme AVHRR et MODIS. Toutefois, à cause de la variabilité saisonnière relative du site et pour assurer un étalonnage adéquat à tous les canaux d'une image, il est souhaitable d'utiliser le site durant la même saison à chaque année.

Cependant, il serait préférable de reprendre l'analyse du comportement saisonnier du site sur d'autres données en considérant les différentes saisons durant plusieurs années. Finalement, il est très important de signaler ici qu'une faible valeur de la MCV ne signifie pas automatiquement une uniformité spatiale parfaite du site, car elle correspond à la moyenne de plusieurs pixels dont l'uniformité est différente à cause de l'existence de l'humidité ou de marécages au niveau du site. À ce sujet, nous comptons évaluer le potentiel de la statistique de Getis qui mesure la dépendance entre les pixels et examine

l'autocorrélation spatiale pour l'extraction de l'information concernant la structure spatiale de l'image.

5 - REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada et le Centre canadien de télédétection pour leur support financier, ainsi que l'Université d'Arizona pour les images.

6 - RÉFÉRENCES

- [Bann 99] Bannari, A., Teillet, P.M. et Richardson, G. (1999) "Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection". *Journal canadien de télédétection*, vol. 25, no. 1, pp. 45-59.
- [Ding 99] Dinguirard, M. and Slater, P.N. (1999) "Calibration of Space-Multispectral Imaging". *Remote Sensing of Environment*, vol. 68, pp. 194-205.
- [Gu 90] Gu, X., Guyot, G. et Verbrugge, M. (1990) "Analyse de la variabilité spatiale d'un site-test: exemple de "La Crau" (France)". *Photo-interprétation*, vol. 90, no.1, Fasc. 5, pp. 40-51.
- [Slat 87] Slater, P.N., Biggar, S.F., Holms, R.A., Jackson, R.D., Mao, Y., Moran, M.S., Palmer, J.M. and Yuan, B. (1987) "Reflectance and Radiance-Based Methods for In-Flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors". *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, pp. 11-37.
- [Smit 95] Smith, A.M., Major, D.I., McNeil, R.L., Willms, W.D. and Brisco, B. (1995) "Complementarity of Radar and Visible-Infrared Sensors in Assessing Rangeland Condition". *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, pp. 173-180.
- [Teil 01] Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gautier, R.P., O'Neill, N.T., Thome, K.J., Biggar, S.F., Ripley, H. and Meygret, A. (2001) "Generalized Approach to the Vicarious Calibration of Multiple Earth Observation Sensors Using Hyperspectral Data" *Remote Sensing of Environment*, vol. 77, p. 304 - 327.
- [Teil 98a] Teillet, P.M., Fedosejevs, G. and Gauthier, R.P. (1998a) "Operational Radiometric Calibration of Broadscale Satellite Sensors Using Hyperspectral Airborne Remote Sensing of Prairie Rangeland: First Trials". *Metrologica*, vol. 35, pp. 639-641.
- [Teil 98b] Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Gauthier, R.P. and Schowengerdt, R.A. (1998b) "Uniformity Characterization of Land Test Sites Used for Radiometric Calibration of Earth Observation Sensors". *Proceedings of the Twentieth Canadian Symposium on Remote Sensing, Calgary, Alberta*, pp. 1-4.

Programmes utilisés:

Après avoir transféré les canaux des images du format (pix) utilisés par le logiciel PCI à un autre format (tif) accepté par le logiciel Matlab. Nous avons développé et appliqué les programmes suivants:

Programme 1:

Ce programme définit une fenêtre dans une matrice (une image) :

```

function y = submat(x,dim,i,j)

%Ce programme nous donne la taille de la fenêtre qu'on veut
utiliser pour le calcul.
%x est la matrice qui représente l'image d'étude.
%dim indique le rayon de la fenêtre (par exemple pour une fenêtre
de 5x5 %on a comme dim une valeur de 2).
%i et j sont les coordonnées de l'élément(pixel)qui constitue le
centre de
%de la fenêtre choisie.

k=max(i-dim,1);
l=min(i+dim,size(x,1));
r=max(j-dim,1);
s=min(j+dim, size(x,2));

%Dans le cas ou le pixel se trouve au début ou à la fin d'une
colonne
%(ou d'une ligne)
%la fenêtre prend une taille qui prend en considération les limites
de %l'image.
%Par exemple si on a une matrice A=
%      3   5   3   5
%      6   7   1   6
%      2   4   7   3
%      2  19   3  10

% et qu'on veut obtenir une fenêtre de 3x3 centré sur le premier
pixel %(1,1)
%(de valeur 3)la fenêtre qu'on va avoir est:
%      3   5
%      6   7

%donc dans ce cas la fenêtre est de 2x2 seulement.
%Si l'on veut obtenir la fenêtre au centre c'est à dire à (2,2) (de
%valeur 7) on va avoir comme

```

```

% fenêtre :
%           y= 3   5   3
%           6   7   1
%           2   4   7

for m = k:l

% m parcourt toutes les colonnes (pixels) de la matrice qui
% représente l'image,

    for n = r:s
% m parcourt toutes les lignes (lines) de la matrice qui
% représente l'image.

        y(m-k+1, n-r+1)=x(m, n);
    end
end
end

```

Programme 2:

Ce programme calcule la statistique de Getis pour une fenêtre donnée :

```

function z = getis(y,dim,i,j,mn,st)

% Ce programme définit la formule mathématique de la statistique de
% Getis

W=(2*dim+1)^2;
S=submat(y,dim,i,j);
V=sum(S(:));
n=size(y,1)*size(y,2);
z = (V-W*mn)/(st*sqrt(W*(n-W)/(n-1)));

```

Programme 3:

Ce programme calcule la statistique de Getis avec une fenêtre donnée sur toute l'image.

```

function y = getmat(x,dim)

% Ce programme prend comme paramètres une matrice (x) (image) est
le
% dim qui est la taille de la fenêtre qu'on veut utiliser pour le
% calcul.

x=double(x);

```

```

mn=mean(x(:));
st=std(x(:));

for i=1:size(x,1);
    for j=1:size(x,2);
        y(i,j) = getis(x,dim,i,j,mn,st);
    end
end

```

Programme 4:

Ce programme calcule le coefficient de variation sur une fenêtre donnée(y):

```

function z = Cv(y)

mn = mean(y(:));
st = std(y(:));
if (mn~=0)
    if (st~=0)
        z = st/mn;
    else z=0;
    end
else
    z = 0;
end

```

Programme 5:

Ce programme calcule le coefficient de variation avec une fenêtre donnée sur toute l'image.

```

function y = cvmat(x,dim)

x=double(x);

for i=1:size(x,1);
    for j=1:size(x,2);
        y(i,j) = cv(submat(x,dim,i,j));
    end
end

```