

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique-Eau
(INRS-Eau)

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION.

Par
Ali El battay

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès science (M.Sc) en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury
et Examineur interne

Jean-Pierre Dedieu, université Joseph Fourier
(Grenoble, France)

Examineur Externe

Claude R. Duguay, université Laval
(Québec, Canada)

Examineur interne

Monique Bernier, INRS-Eau

Directeur de recherche

Jean-Pierre Fortin, INRS-Eau

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, M. Jean-Pierre Fortin, pour ses conseils et ses orientations, tant sur le plan scientifique que personnel, son ouverture d'esprit et son aide morale et financière tout au long du projet.

Je tiens à remercier également le professeur, Mme Monique Bernier, qui était toujours disponible pour m'aider. Son encadrement professionnel m'a été indispensable et ses qualités humaines faisaient en sorte que je me sentais tout le temps dans une atmosphère familiale.

Egalement un très grand MERCI à M. Yves Gauthier pour lequel des centaines de lignes ne suffiront jamais pour le remercier.

Pour toute l'équipe de télédétection, techniciens, secrétaires, stagiaires, assistants, professeur(e)s et étudiants, merci.

Un merci tout spécial à M. Abderahmane Yagouti, Suzanne Dussault et Alain Royer.

Finalement, je dédie le présent mémoire de maîtrise à mes très chers parents qui méritent beaucoup plus et dont les mots et les paroles ne suffiront jamais pour les remercier. En fait, je leur dédie un mémoire et ils m'ont dédié toute leur vie...

RÉSUMÉ

Cette recherche a pour objectif principal le suivi de l'évolution du couvert nival durant la période de fonte au sud du Québec en utilisant le capteur VEGETATION. En effet, ce capteur se caractérise par une bonne répétitivité temporelle, 24 heures, et un large champ de vue, 2500*2500 km. Il permet ainsi un bon suivi spatio-temporel du couvert nival durant la période de fonte. Cependant, la résolution spatiale du capteur VEGETATION n'est que d'1 km². Pour des fins de modélisation hydrologique et pour des bassins versants de petite ou moyenne taille, il est utile de savoir combien il y a de neige, en terme de pourcentage de surface, dans un pixel VEGETATION.

Dans cette étude l'estimation du couvert nival se base sur la combinaison d'une image VGT acquise durant la période de fonte, 11 avril 1999, avec deux autres images VGT, dites de références, acquises en période de couvert total de neige et en absence totale de neige, respectivement le 8 février et le 2 mai 1999. Ainsi, pour chacun des pixels VGT des indices spécifiques de neige (F et NDSI) sont obtenus. Parallèlement, pour chacun de ces pixels VGT, le pourcentage, en terme de surface, couvert de neige est extrait d'une image de haute résolution spatiale, capteur HRVIR de SPOT4, acquise aussi le 11 avril 1999. Les équations d'estimation du couvert nival relient les valeurs des indices de neige aux pourcentages de neige. Toutefois la répétitivité temporelle du capteur HRVIR étant de 26 jours, il est impossible de pouvoir compter sur ce capteur pour effectuer le suivi de la fonte de neige.

En constatant que le 11 avril 1999 il ne restait pas beaucoup de neige dans la région d'étude, nous avons refait les mêmes étapes en utilisant une image VGT du 2 avril 1999 et une autre de haute résolution spatiale, capteur HRV (SPOT2), du même jour. Ainsi, nous avons cartographié la distribution du couvert nival au sud du Québec pour les deux dates citées et aussi pour le 27 mars et le 5 avril 1999.

Un autre volet intéressant dans cette étude concerne l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol en utilisant les images VGT. En fait, la réflectance d'un pixel VGT est la combinaison de celles des éléments de surface qui le composent. En appliquant le modèle linéaire de composition des réflectances nous avons pu estimer à partir de l'image VGT du 11 avril 1999 les réflectances des classes d'occupation du sol issues de l'image de haute résolution spatiale.

Finalement, les images du 11 et du 2 avril 1999 utilisées dans le cadre de cette étude ne contiennent pas assez de neige pour pouvoir définir des relations satisfaisantes. Toutefois, nous avons déterminé les pourcentages de neige sur chaque pixel VEGETATION avec une précision tout à fait acceptable, 80% des pixels de la sous-image VGT du 11 avril sont estimés à $\pm 10\%$. La méthodologie que nous avons adoptée tout au long de cette étude peut être appliquée dans un contexte opérationnel moyennant quelques petits ajustements.


Étudiant


Directeur de recherche

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
1 INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE ET CONTEXTE DE LA RECHERCHE	1
1.2 PRÉSENTATION DU SUJET DE RECHERCHE	2
1.2.1 <i>Objectifs de l'étude</i>	2
1.2.2 <i>Problématique relative au sujet de recherche</i>	3
1.2.3 <i>Description de la procédure de recherche</i>	5
1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE	6
2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE À PARTIR D'IMAGES SIMULÉES	7
2.1 ESTIMATION DES RÉFLECTANCES DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL À PARTIR D'IMAGES VEGETATION	7
2.1.1 <i>Modèle linéaire de composition des réflectances</i>	7
2.1.2 <i>Critères pour l'évaluation des résultats</i>	14
2.1.3 <i>Sélection des groupes de pixels</i>	15
2.2 AJUSTEMENT DU POSITIONNEMENT DES LOCALISATIONS GÉOGRAPHIQUES DES IMAGES	18
2.2.1 <i>Erreurs de positionnement des localisations géographiques</i>	19

2.2.2	<i>Critères d'évaluation des résultats</i>	22
2.2.3	<i>La méthode exhaustive</i>	23
2.2.4	<i>La méthode heuristique</i>	24
2.3	ESTIMATION DU POURCENTAGE DU COUVERT NIVAL À PARTIR D'IMAGES VGT.....	26
2.3.1	<i>Modèle linéaire de composition des réflectances dans les cas d'un couvert partiel de neige</i>	26
2.3.2	<i>Indices de neige F et NDSI</i>	27
2.3.3	<i>Description de l'approche utilisée</i>	28
2.4	DISTRIBUTION DE LA NEIGE DANS UN PIXEL VGT SELON LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.....	29
3	APPLICATION DE LA MÉTHODE À DES IMAGES VGT	33
3.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE DES IMAGES VGT, HRVIR ET HRV.....	33
3.1.1	<i>Caractéristiques des capteurs VEGETATION, HRVIR, et HRV</i>	33
3.1.2	<i>Description des produits images</i>	35
3.2	CHOIX ET PRÉ TRAITEMENT DES IMAGES UTILISÉES.....	37
3.2.1	<i>Choix de la région</i>	37
3.2.2	<i>Choix d'images pour notre recherche</i>	38
3.3	PRÉ TRAITEMENTS APPLIQUÉS AUX IMAGES CHOISIES.....	49
3.3.1	<i>Corrections atmosphériques</i>	49
3.3.2	<i>Corrections géométriques</i>	52
3.3.3	<i>Classification des images HRVIR et HRV</i>	53
4	ESTIMATION DES RÉFLECTANCES DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL À PARTIR D'IMAGE VGT	63
4.1	ESTIMATION DES RÉFLECTANCES DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL À PARTIR DE L'IMAGE VGT SIMULÉE.....	63
4.1.1	<i>Détermination du nombre optimal de groupes de pixels</i>	67

4.1.2	<i>Paramètres influençant l'estimation des réflectances</i>	71
4.1.3	<i>Effet de la représentativité des classes sur l'estimation des réflectances</i>	71
4.1.4	<i>Effets de l'hétérogénéité et de la grandeur physique de la réflectance sur son estimation</i>	75
4.1.5	<i>Effets de l'erreur de co-localisation sur l'estimation des réflectances</i>	79
4.1.6	<i>Synthèse sur l'effet des différents paramètres étudiés sur l'estimations des réflectances</i>	81
4.2	ESTIMATION DES RÉFLECTANCES DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL, À PARTIR DE LA VRAIE IMAGE VGT	82
4.2.1	<i>Résultats de l'estimation des réflectances</i>	82
4.2.2	<i>Effet de l'estimation des réflectances sur le comportement spectral</i>	85
4.3	COMMENTAIRES ET DISCUSSIONS.....	87
4.4	CONCLUSION.....	88
5	AJUSTEMENT DU POSITIONNEMENT DES LOCALISATIONS GÉOGRAPHIQUES DES IMAGES	89
5.1	DEGRÉ DE PRÉCISION DE LA MÉTHODOLOGIE	89
5.2	RÉSULTATS DE L'AJUSTEMENT GÉOMÉTRIQUE.....	96
5.3	CONCLUSION.....	98
6	ESTIMATION DU POURCENTAGE DU COUVERT NIVAL À PARTIR D'IMAGES VEGETATION	99
6.1	DÉTERMINATION DES ÉQUATIONS D'ESTIMATION DU COUVERT NIVAL	103
6.1.1	<i>Détermination des équations d'estimation du couvert nival à partir des images du 11 avril, 1999</i>	103
6.1.2	<i>Détermination des équations d'estimation du couvert nival à partir des images du 2 avril, 1999</i>	105
6.2	CARTOGRAPHIE DU COUVERT NIVAL AU NIVEAU SOUS PIXEL POUR LA RÉGION DE SHERBROOKE	107
6.2.1	<i>Cartographie du couvert nival au niveau sous pixel pour le 11 avril 1999</i>	107
6.2.2	<i>Cartographie du couvert nival au niveau sous pixel pour le 2 avril 1999</i>	113

6.3	CARTOGRAPHIE DU COUVERT NIVAL AU NIVEAU SOUS PIXEL POUR LE SUD DU QUÉBEC	115
6.4	DISCUSSIONS ET CONCLUSION	125
7	DISTRIBUTION DE LA NEIGE DANS UN PIXEL VGT SELON LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.....	127
7.1	APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE À L'IMAGE DU 2 AVRIL.....	127
7.2	CONCLUSION.....	133
8	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	135
9.	BIBLIOGRAPHIE	139
	ANNEXE A	
	ANNEXE B	
	ANNEXE C	

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2.1 : Schématisation du modèle linéaire de composition des réflectances</i>	9
<i>Figure 2.2 : Méthodologie pour l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'images HRVIR et VEGETATION acquises simultanément.</i>	13
<i>Figure 2.3 : Choix des groupes de pixels pour l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol</i>	18
<i>Figure 2.4: Schéma de principe des erreurs de positionnement</i>	19
<i>Figure 2.5 : Diverses erreurs de positionnement des la localisations géographiques.</i>	21
<i>Figure 2.6 : Principe de base de la méthode heuristique</i>	25
<i>Figure 2.7: Signatures spectrales des classes d'occupation du sol</i>	29
<i>Figure 3.1: Image panchromatique HRV du 2 avril 1999, région de Sherbrooke</i>	41
<i>Figure 3.2: Image multispectrale HRVIR du 11 avril 1999, région de Sherbrooke</i>	41
<i>Figure 3.3: Images VGT avec couvert partiel de neige au-dessus du sud du Québec.</i>	43
<i>Figure 3.4: Images VGT avec couvert total de neige au-dessus du sud du Québec.</i>	45
<i>Figure 3.5: Images VGT sans couvert de neige au-dessus du sud du Québec.</i>	47
<i>Figure 3.6: Schéma de la prise de données par satellite (Bonn et Rochon, 1996).</i>	50
<i>Figure 3.7: Schéma de principe de la correction atmosphérique à l'aide du programme ATCOR</i>	51
<i>Figure 3.8: Classification de l'image HRVIR du 11 avril 1999</i>	55
<i>Figure 3.9: Classification [neige-(non neige)] de l'image HRV du 2 avril 1999</i>	59
<i>Figure 3.10: Classification de l'image HRV du 2 avril 1999</i>	61
<i>Figure 4.1: Schéma de principe d'un filtre moyen (50 x 50)</i>	65
<i>Figure 4.2: Image VGT du 11 avril 1999, simulée à partir de l'image HRVIR acquise simultanément</i>	65
<i>Figure 4.3 : Effet de la pondération de l'erreur relative moyenne par bande spectrale simulée en fonction des proportions des classes d'occupation du sol</i>	69
<i>Figure 4.4 : Comparaison des résultats de l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol, à partir de l'image VGT simulée (11 avril 1999), en utilisant un à dix groupes de pixels.</i>	70
<i>Figure 4.5 : Effet de la représentativité des classes d'occupation du sol sur l'erreur relative de l'estimation des réflectances (VGT simulée du 11 avril 1999).</i>	74
<i>Figure 4.6 : Effet de l'hétérogénéité des classes d'occupation du sol sur l'erreur relative de l'estimation des réflectances (calculée à partir de 5 groupes de pixels).</i>	76
<i>Figure 4.7 : Simulation de l'image VGT à partir d'une image HRVIR à réflectances fixes</i>	77
<i>Figure 4.8 : Estimation des réflectances à partir de l'image VGT simulée à l'aide de l'image HRVIR du 11 avril 1999 modifiée (les réflectances de chaque classe d'occupation du sol ont été fixées à la valeur de la moyenne)</i>	78

<i>Figure 4.9 : Estimation de réflectances des classes d'occupation du sol (pourcentage d'occupation $\geq 5\%$) en simulant des décalages géométriques fictifs entre l'image VGT simulée et la carte d'occupation du sol.</i>	80
<i>Figure 4.10 : Estimation de réflectances des classes d'occupation du sol en simulant un décalage géométrique fictif d'un kilomètre entre l'image VGT simulée et la carte d'occupation du sol.</i>	81
<i>Figure 4.11 : Comparaison des réflectances des classes d'occupation du sol estimées à partir de l'image VGT simulée et vraie du 11 avril 1999</i>	83
<i>Figure 4.12 : Signatures spectrales avec les réflectances vraies et estimées, des classes d'occupation du sol dont le pourcentage d'occupation dans l'image HRVIR du 11 avril 1999 est supérieur à 5%.</i>	85
<i>Figure 5.1: Résultats du positionnement géométrique par la méthode exhaustive et heuristique entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée pour la même date.</i>	91
<i>Figure 5.2: Cartographie de l'écart type moyen (équation 2.4) de la bande B2 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.</i>	93
<i>Figure 5.3: Cartographie de l'erreur relative moyenne (équation 2.5) de la bande B2 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.</i>	93
<i>Figure 5.4: Cartographie de l'écart type moyen (équation 2.4) de la bande B3 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.</i>	94
<i>Figure 5.5: Cartographie de l'erreur relative moyenne (équation 2.5) de la bande B3 simulée par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée</i>	94
<i>Figure 5.6: Cartographie de l'écart type moyen (équation 2.4) de la bande B4 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.</i>	95
<i>Figure 5.7: Cartographie de l'erreur relative moyenne (équation 2.5) de la bande B4 simulée par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.</i>	95
<i>Figure 5.8: Résultats du positionnement géométrique par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et les vraies images VGT acquises respectivement le 8 février, 11 avril, et 2 mai, 1999</i>	97
<i>Figure 6.1: Principales étapes de l'estimation du couvert nival au niveau sous-pixel.</i>	100
<i>Figure 6.2: Sous-images VEGETATION de la région de Sherbrooke</i>	101
<i>Figure 6.3: Pourcentage de neige à partir de l'image HRVIR en fonction des indices F et NDSI, pour le 11 avril 1999.</i>	104
<i>Figure 6.4: Pourcentage de neige à partir de l'image HRV en fonction des indices F et NDSI, pour le 2 avril 1999</i>	106
<i>Figure 6.5: Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour la région de Sherbrooke le 11 avril 1999</i>	110

<i>Figure 6.6: Cartographie dans la région de Sherbrooke de la différence entre les vrais pourcentages de neige et ceux estimés.</i>	111
<i>Figure 6.7: Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour la région de Sherbrooke le 02 avril 1999</i>	114
<i>Figure 6.8 : Variation du pourcentage de neige durant la période de fonte (27 mars~11 avril, 1999)</i>	116
<i>Figure 6.9: Images VGT en fausses couleurs. B2 dans le bleu. B3 dans le vert et B4 dans le rouge.</i>	117
<i>Figure 6.10: Images VGT en fausses couleurs. B2 dans le bleu. B3 dans le vert et B4 dans le rouge.</i>	119
<i>Figure 6.11 : Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour le sud du Québec</i>	121
<i>Figure 6.12: Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour le sud du Québec</i>	123
<i>Figure 7.1: Pourcentage couvert de neige dans les classes d'occupation du sol le 2 avril 1999.</i>	128
<i>Figure 7.2: Distribution du couvert nival suivant les classes d'occupation du sol</i>	130
<i>Figure 7.3: % de neige dans les forêts de feuillus et mixtes en fonction du % de neige dans les zones dégagées, Image HRV du 2 avril 1999.</i>	131
<i>Figure 7.4: % de neige dans les forêts de conifères, feuillus et mixtes en fonction du % de neige dans les zones dégagées, Image HRV du 2 avril 1999.</i>	131
<i>Figure 7.5: % de neige dans les forêts de conifères, feuillus et mixtes en fonction du % de neige total dans le pixel VGT équivalent. Image HRV du 2 avril 1999.</i>	132
<i>Figure 7.6: % de neige dans les zones dégagées en fonction du % de neige total dans le pixel VGT équivalent. Image HRV du 2 avril 1999.</i>	132

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 2.1 : Bandes spectrales des capteurs VGT et HRVIR à bord du satellite SPOT4</i>	8
<i>Tableau 3.1: Caractéristiques et comparaison des instruments VEGETATION, HRVIR et HRV</i>	30
<i>Tableau 3.2: Fichiers accompagnant une image VGT</i>	33
<i>Tableau 3.3: Coordonnées géographiques des images de haute résolution spatiale</i>	34
<i>Tableau 3.4: Images VEGETATION, HRVIR et HRV, acquises pour notre étude</i>	35
<i>Tableau 3.5: Résultats de la classification de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 Avril 1999</i>	47
<i>Tableau 3.6: Résultats de la classification de l'image HRV du 2 avril 1999</i>	48
<i>Tableau 4.1 : Effet de la pondération de l'erreur relative moyenne par bande en fonction de la proportion des classes d'occupation du sol (image VGT simulée du 11 avril 1999).</i>	54
<i>Tableau 4.2 : Résultats de l'estimation des réflectances de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 avril 1999 à partir de l'image VGT simulée.</i>	58
<i>Tableau 4.3: Proportions d'occupation du sol dans les dix meilleurs pixels pour chaque classe d'occupation du sol</i>	59
<i>Tableau 4.4: Résultats de l'estimation des réflectances de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 Avril 1999 à partir de l'image VGT de la même journée</i>	70
<i>Tableau 5.1: Erreurs de collocation estimées entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même date.</i>	75
<i>Tableau 5.2: Décalages géométriques estimés entre les vraies images VGT du 2 février, 11 avril et 2 mai et l'image HRVIR du 11 avril 1999</i>	82
<i>Tableau 6.1: Différences entre les vrais pourcentages de neiges et ceux estimés pour le 11 avril99</i>	94
<i>Tableau 6.2: Différences entre les vrais pourcentages de neige et ceux estimés pour le 2 avril 1999</i>	97
<i>Tableau 6.3 : Statistiques sur les pourcentages de neige estimés durant la période de fonte</i>	100

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 2.1 : Bandes spectrales des capteurs VGT et HRVIR à bord du satellite SPOT4</i>	8
<i>Tableau 3.1: Caractéristiques et comparaison des instruments VEGETATION, HRVIR et HRV</i>	30
<i>Tableau 3.2: Fichiers accompagnant une image VGT</i>	33
<i>Tableau 3.3: Coordonnées géographiques des images de haute résolution spatiale</i>	34
<i>Tableau 3.4: Images VEGETATION, HRVIR et HRV, acquises pour notre étude</i>	35
<i>Tableau 3.5: Résultats de la classification de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 Avril 1999</i>	47
<i>Tableau 3.6: Résultats de la classification de l'image HRV du 2 avril 1999</i>	48
<i>Tableau 4.1 : Effet de la pondération de l'erreur relative moyenne par bande en fonction de la proportion des classes d'occupation du sol (image VGT simulée du 11 avril 1999).</i>	54
<i>Tableau 4.2 : Résultats de l'estimation des réflectances de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 avril 1999 à partir de l'image VGT simulée.</i>	58
<i>Tableau 4.3: Proportions d'occupation du sol dans les dix meilleurs pixels pour chaque classe d'occupation du sol</i>	59
<i>Tableau 4.4: Résultats de l'estimation des réflectances de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 Avril 1999 à partir de l'image VGT de la même journée</i>	70
<i>Tableau 5.1: Erreurs de collocation estimées entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même date.</i>	75
<i>Tableau 5.2: Décalages géométriques estimés entre les vraies images VGT du 2 février, 11 avril et 2 mai et l'image HRVIR du 11 avril 1999</i>	82
<i>Tableau 6.1: Différences entre les vrais pourcentages de neiges et ceux estimés pour le 11 avril 1999</i>	94
<i>Tableau 6.2: Différences entre les vrais pourcentages de neige et ceux estimés pour le 2 avril 1999</i>	97
<i>Tableau 6.3 : Statistiques sur les pourcentages de neige estimés durant la période de fonte</i>	100

1 INTRODUCTION

1.1 Problématique générale et contexte de la recherche

Comportant une population de sept millions d'habitants, le Québec s'étend sur une superficie de 1,7 millions de kilomètres carrés, ce qui équivaut à titre de comparaison à plus de trois fois la superficie de la France. Près de 3% des réserves d'eaux douces renouvelables de la planète sont localisées au Québec. L'importance de l'eau dans cette région réside dans les faits suivants :

Le Québec a axé une partie importante de sa croissance et de son développement sur le secteur de l'énergie, en mettant en valeur et en exploitant les ressources hydrauliques disponibles sur son territoire. Les résultats obtenus sont spectaculaires. L'économie québécoise s'est en effet taillée une place de choix, à l'échelle mondiale, en matière de production et d'utilisation de l'électricité. Une activité industrielle intense a été rendue possible grâce à cette énergie abondante, exploitable à un coût de revient qui compte parmi les plus bas en Amérique du nord. Le potentiel économiquement exploitable hydroélectrique québécois demeure considérable (site Internet du ministère des ressources naturelles du Québec).

En tenant compte des faits avancés précédemment, il est de toute évidence qu'au Québec la ressource en eau est l'un des piliers de l'économie. L'optimisation de son utilisation, et ainsi la génération d'un profit économique maximal, ne peut être atteinte qu'à travers une gestion adéquate faisant appel au maximum d'informations relatives au cycle de l'eau.

Cependant, et comme il est connu de tous, au Québec l'hiver est assez rigoureux et les températures peuvent facilement descendre aux alentours de -30°C , et même plus! Durant la saison hivernale la nature solide de l'eau perturbe la dynamique de l'écoulement superficiel et aussi celle de l'infiltration souterraine. D'énormes quantités d'eau se trouvent ainsi accumulées sous forme de neige. Elles sont considérées par les économistes comme un capital énergétique en état de gel, tandis qu'en terme de sécurité elles constituent un risque potentiel de catastrophes naturelles. Au printemps, ces stocks d'eaux passent rapidement, de quelques jours à quelques semaines, de la phase solide à la phase liquide. Le rôle de la modélisation hydrologique se concrétise à ce stade par la simulation des différents scénarios possibles d'écoulement de ces quantités importantes d'eau dans les bassins versants. Cela constitue une contribution importante aux processus de gestion des ressources hydriques. Ceux-ci visent en premier lieu la sécurité des

personnes et l'intégrité de leurs biens. Deuxièmement, ils visent l'optimisation des rapports reliant la dynamique de l'eau à l'économie afin d'y augmenter le rendement.

1.2 Présentation du sujet de recherche

Cette étude intitulée «Estimation de la distribution spatiale du couvert nival au printemps dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION» représente une application qui concrétise l'interaction entre la télédétection spatiale et les sciences hydrologiques. En fait, la télédétection est définie officiellement comme étant l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets, par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (COMITAS, 1988). Les sciences hydrologiques recouvrent quant à elles, toute action ou toute recherche se rapportant à l'eau, au cycle de l'eau et à leurs applications (Roche, 1986). L'un de ses objectifs est la détermination des processus qui relient la précipitation à la quantité d'eau qui s'écoule en définitive dans le réseau hydrographique d'un bassin versant (Bonn, 1996). Le lien étroit qui relie les deux sciences réside dans le fait que la télédétection contribue à la détermination des caractéristiques d'une surface pour laquelle les mécanismes d'écoulement sont à modéliser. En fait, un modèle peut se définir comme suit :

Représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou au moins son comportement, afin d'en tirer toute conséquence concernant l'estimation de ses paramètres, son évolution, les prévisions de son exploitation etc... (Roche, 1986).

Dans le cas de notre sujet, plus la cartographie du couvert nival, sur une large étendue spatiale, est déterminée avec précision et est mise à jour avec une fréquence compatible à celle de la vitesse de la fonte printanière, plus l'estimation par les modèles hydrologiques de la quantité de neige qui fond est précise.

1.2.1 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'explorer la capacité du capteur VEGETATION (résolution spatiale de 1 Km²) pour estimer la distribution spatiale du couvert nival. Cette estimation est faite durant la période de fonte printanière dans le sud du Québec. Le choix du capteur VEGETATION se justifie par son large champ de vue qui permet une répétitivité temporelle de l'ordre du jour.

Il s'agit donc d'estimer, en termes de pourcentage de surface, combien il y a de neige au sein de chacun des pixels qui composent les images acquises par le capteur VEGETATION. Les résultats de cette estimation constituent des données de base pour les modèles hydrologiques pendant et après la période de fonte. En essayant d'atteindre l'objectif principal, les trois objectifs secondaires suivants se sont dégagés:

1. «L'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'images de type VEGETATION». Dans cette partie, nous avons essayé d'estimer les réflectances des classes d'occupation du sol à partir des réflectances des pixels de basse résolution. Ce genre d'application peut servir pour faire un suivi temporel de l'évolution des albédos et/ou des comportements spectraux des différentes classes d'occupation du sol.
2. «L'ajustement des erreurs de positionnement des localisations géographiques des images VEGETATION». Pendant leur acquisition, les images VEGETATION peuvent être sujettes à des erreurs de localisation géographique. Dans cette partie nous avons appliqué une méthode développée par Fortin *et al.*, (1998) pour estimer ces erreurs.
3. «La distribution sous pixel de la neige dans les images VEGETATION selon les classes d'occupation du sol». Un pixel VEGETATION est un pixel de basse résolution spatiale (1km^2), il peut donc couvrir plusieurs classes d'occupation du sol. Cette partie est consacrée à l'étude des relations qui existent entre le pourcentage des classes d'occupation du sol dans les pixels VGT et son contenu total en neige.

1.2.2 Problématique relative au sujet de recherche

La télédétection a toujours cherché à concilier deux objectifs opposés : voir le plus grand territoire possible avec la meilleure précision possible (Bonn et Rochon, 1993). Dans ses applications civiles ce compromis n'a pas pu être réalisé jusqu'à présent, et plus la limite de la résolution spatiale est fine plus la surface observée est petite. Ce qui implique une augmentation du temps qui s'écoule entre l'acquisition de deux images consécutives au-dessus d'une même région (répétitivité temporelle). Cependant, il existe des satellites avec possibilité de dépointage programmable des capteurs. Ce genre de capteurs peut générer des images d'une fine résolution spatiale avec une grande répétitivité temporelle. Par exemple, l'utilisation conjointe des deux capteurs (dépointables) de haute résolution HRVIR à bord de SPOT4 et HRV à bord de SPOT2 permet de réduire la répétitivité temporelle de 25 jours à seulement quelques jours. Toutefois, cela

n'est utile que pour des applications à une échelle locale dont la superficie ne dépasse pas 3600 km² (60x60 km). Cependant, dans plusieurs études l'utilisateur, en ayant recours à la télédétection spatiale, veut souvent couvrir le plus grand territoire possible.

Pour impliquer la télédétection dans l'étude des phénomènes régionaux à évolution temporelle rapide il est nécessaire d'avoir à la fois :

- Des images spatiales qui couvrent toute la zone géographique touchée par le phénomène étudié,
- La répétitivité temporelle d'acquisition de ces images doit s'ajuster adéquatement à la fréquence d'évolution du phénomène étudié.

La durée de ces phénomènes varie de quelques jours à quelques semaines et c'est le cas par exemple des feux de forêts, croissance des cultures, inondations et, dans le cas de notre étude l'évolution de la fonte du couvert nival. Il est évident alors que pour de telles études nous ne pouvons pas utiliser des images de haute résolution spatiale, puisque :

- Le champ de couverture spatiale est relativement petit, par exemple 60*60 km pour les capteur HRVIR de SPOT,
- Aussi, pour ce genre d'études les comportements spectraux étudiés se font principalement dans la partie visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique. Dans cette partie du spectre le couvert nuageux masque l'information spectrale recherchée. Ce phénomène est plus marquant s'il affecte des images spatiales dont le champ de couverture spatiale est restreint et dont la répétitivité temporelle est faible.

Le capteur VEGETATION est un capteur de basse résolution spatiale. Les images qu'il fournit sont d'une grande couverture spatiale (2500*2500 km), leur répétitivité temporelle est de l'ordre d'un jour et la résolution spatiale est relativement basse (pixels d'un km²). Nous avons préféré le capteur VEGETATION au capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) du satellite NOAA pour les trois raisons suivantes:

- Les pixels des images VEGETATION ont une taille fixe, 1 km², alors que la taille de ceux des images AVHRR augmente en s'éloignant du nadir, elle passe ainsi de 1 à 4 km (<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/globsys/avhrr.shtml>),

- Simultanément à l'acquisition des images VEGETATION, des images de haute résolution spatiale HRVIR peuvent être acquises. En fait, ces deux capteurs sont placés sur le même satellite, SPOT4,
- Le capteur AVHRR ne permet pas de différencier la neige des nuages, tandis qu'avec le capteur VEGETATION une telle application est réalisable grâce à ses bandes spectrales dans le visible et dans le moyen infrarouge.

En utilisant des images VEGETATION nous pouvons différencier directement les pixels avec neige des autres, et surtout de ceux avec nuages. Toutefois, cela reste insuffisant pour les modèles hydrologiques appliqués à des bassins versants de petite ou moyenne taille. Il faut chercher alors les informations au niveau sous-pixel. C'est-à-dire, il faut estimer combien il y a de neige en terme de surface dans les pixels d'un kilomètre carré de résolution. A noter que des études sur la cartographie du couvert nival à l'aide de capteurs de basse résolution spatiale ont été déjà réalisées, les résultats obtenus sont satisfaisants (Nolin *et al.*).

1.2.3 Description de la procédure de recherche

La procédure adoptée se base sur la méthodologie développée par Fortin *et al.*, (1998) dans leur étude intitulée «Utilisation des variables de surface au niveau sous-pixel comme données d'entrée aux modèles hydrologiques et climatiques ». À signaler que durant la période de leur étude, le satellite SPOT4 qui porte le capteur VEGETATION n'était pas encore en orbite. Les images de basse résolution spatiale ont été alors simulées à partir d'images du satellite américain LANDSAT TM (De Sève, 1996). Le présent sujet de recherche constitue donc la continuité logique de ces travaux. La méthodologie qui mène à l'estimation du pourcentage de neige au niveau sous pixel à partir d'images VEGETATION consiste premièrement à en extraire des indices spécifiques de neige. Ces derniers sont obtenus en combinant trois images VEGETATION respectivement prises durant la période de couvert total de neige (hiver), partiel (fonte printanière), et celle avec une absence totale de neige (printemps). Deuxièmement, les valeurs de ces indices sont comparées aux vrais pourcentages de neige équivalents à chacun des pixels de l'image VGT. Les vrais pourcentages sont déterminés à l'aide d'une carte de couverture de neige générée à partir d'une image de haute résolution spatiale (acquise simultanément à l'image VEGETATION pour laquelle l'estimation est faite). Le principe consiste alors à trouver des équations qui relient les indices calculés aux vrais pourcentages de neige. Ces équations sont par la suite appliquées à une

étendue spatiale plus vaste et/ou encore à d'autres images VEGETATION acquises durant la période de fonte. En effet, l'objectif est de faire le suivi de la superficie couverte par la neige dans chacun des pixels de basse résolution durant la période de fonte.

L'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir des images VEGETATION est basée sur une approche utilisant un modèle linéaire de composition des réflectances. Ce modèle conduit à la construction d'un système d'équations linéaires.

La précision des localisations géographiques des images par le capteur est faite sur la base de la précision des réflectances estimées. Le degré de superposabilité des images VEGETATION entre elles et par rapport à la carte d'occupation du sol, extraite de l'image haute résolution, est ainsi estimé.

Finalement, la distribution de la neige au niveau sous pixel dans les images VEGETATION, en fonction des classes d'occupation du sol, est faite seulement à partir de la carte d'occupation du sol.

1.3 Structure du mémoire

Le mémoire commence par un chapitre qui décrit en détails la méthodologie développée par Fortin *et al.*, (1998). Cette méthode ayant servi à réaliser nos objectifs de recherche. Par la suite, nous continuons avec le chapitre qui regroupe les différentes caractéristiques techniques des différents types d'images que nous avons utilisées. Ce même chapitre est consacré aussi à la description des images utilisées et aux critères de leur choix, ainsi qu'aux différents pré-traitements qu'on leurs a fait subir. Suit alors, une série de quatre chapitres consécutifs dans lesquels sont présentés et discutés les résultats relatifs à chaque objectif. Le mémoire se termine par des conclusions et recommandations.

A noter, tout au long du présent mémoire les termes "*vrai(s) pourcentage(s) de neige*" et "*vrai(s) réflectance(s)*" indiquent que ces valeurs sont utilisées comme référence et non pas qu'elles sont absolument vraies.

2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE À PARTIR D'IMAGES SIMULÉES

Ce chapitre est consacré à la description de l'approche méthodologique développée par Fortin *et al.*, (1998). En effet pour atteindre nos objectifs nous avons repris cette même méthodologie qui, rappelons le, a été développée sur des images VEGETATION simulées. Les principes de base qui ont servi au développement de cette méthodologie sont exposés tout au long du présent chapitre. Un volet théorique est évoqué à chaque fois qu'un nouveau concept est présenté. Dans les sections qui suivent nous présentons en détails les éléments de la méthodologie qui ont servi à :

- l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'une image VGT;
- les ajustements géométriques des images;
- l'estimation du couvert nival dans une image VGT, et;
- la distribution du couvert nival dans un pixel VGT selon les classes d'occupation du sol qu'il couvre.

2.1 Estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'images VEGETATION

2.1.1 Modèle linéaire de composition des réflectances

La méthode utilisée pour l'estimation des réflectances est basée sur le modèle linéaire de composition des réflectances [Shimabukuro et Smith 1991; Holben et Shimabukuro 1993; Cherchali 1995; Cherchali et Flouzat 1994; Marceau 1991; Puyou-Lacassies *et al.*1992]. Selon ce modèle, la réflectance d'une surface est la somme pondérée des réflectances des divers éléments de surface qui la composent. La pondération est faite en fonction de la proportion qu'occupe chacun de ces éléments par rapport à la surface totale.

La validité et le sens physique du modèle linéaire de composition des réflectances ont été démontrés par Cherchali (1995, section III-2). Dans notre étude, la réflectance considérée est celle d'un pixel VGT (1Km²). Les éléments de surface sont les classes d'occupation du sol issues de l'image de haute

résolution spatiale HRVIR (20 mètres). Notons ici brièvement que trois des quatre bandes spectrales du capteur VEGETATION sont identiques à celles du capteur HRVIR (tableau 2.1). Le modèle est présenté pour une bande spectrale donnée (VGT) par l'équation suivante :

$$R_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} r_j + \varepsilon_i \quad \text{avec} \quad 0 \leq r_j \leq 1 \quad \text{Équation 2.1}$$

R_i : Réflectance du pixel VGT i dans la bande spectrale considérée;

f_{ij} : Proportion de la surface du pixel VGT i qui est occupée par la classe d'occupation du sol j ;

r_j : Réflectance moyenne de la classe d'occupation du sol j dans la bande spectrale considérée;

ε_i : Terme d'erreur;

n : Nombre de classes d'occupation du sol à l'intérieur du pixel VGT i ;

L'équation 2.1 peut être schématisée par la figure suivante :

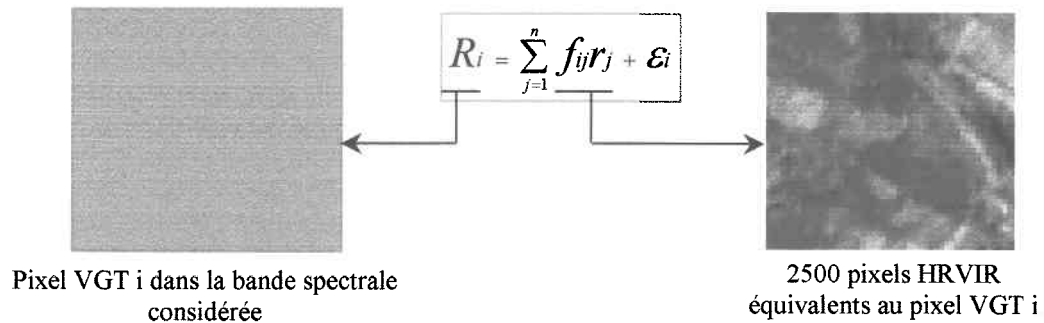


Figure 2.1 : Schématisation du modèle linéaire de composition des réflectances

Tableau 2.1 : Bandes spectrales des capteurs VGT et HRVIR à bord du satellite SPOT4

Bandes spectrales (μm)	VEGETATION	HRVIR
B0 (bleu)	0,43 - 0,47	◆◆◆
B1 (vert)	◆◆◆	0,50 - 0,59
B2 (rouge)	0,61 - 0,68	0,61 - 0,68
B3 (proche IR)	0,78 - 0,89	0,79 - 0,89
B4 (moyen IR)	1,58 - 1,75	1,58 - 1,75
Panchromatique*	◆◆◆	0,61 - 0,68*

◆◆◆ Bande spectrale inexistante dans ce genre de capteur

système d'équations en combinant plusieurs dates pour avoir autant de bandes spectrales que d'inconnus (Krediles et Grondona, 1995) Dans notre étude il était impossible de faire une telle application à cause des deux facteurs suivant :

- Le nombre des classes d'occupation du sol est plus grand que celui de bandes spectrales (quatre seulement)
- La vitesse d'évolution du couvert nival durant la période de fonte est très grande. Les proportions d'occupation du sol changent donc continuellement et ne sont pas fixes, ce qui limite la possibilité d'utiliser plusieurs dates.

La figure 2.2 regroupe les principales étapes de la méthodologie que nous avons suivie pour estimer les réflectances des classes d'occupation du sol à partir des images VGT. Dans cette figure le rectangle en gras damé est l'objectif final. Les rectangles représentent des entités telles que des images et des variables, alors que les losanges désignent des processus tels que des algorithmes. Finalement, les parties en pointillés sont utilisées ultérieurement dans la section 2.2.

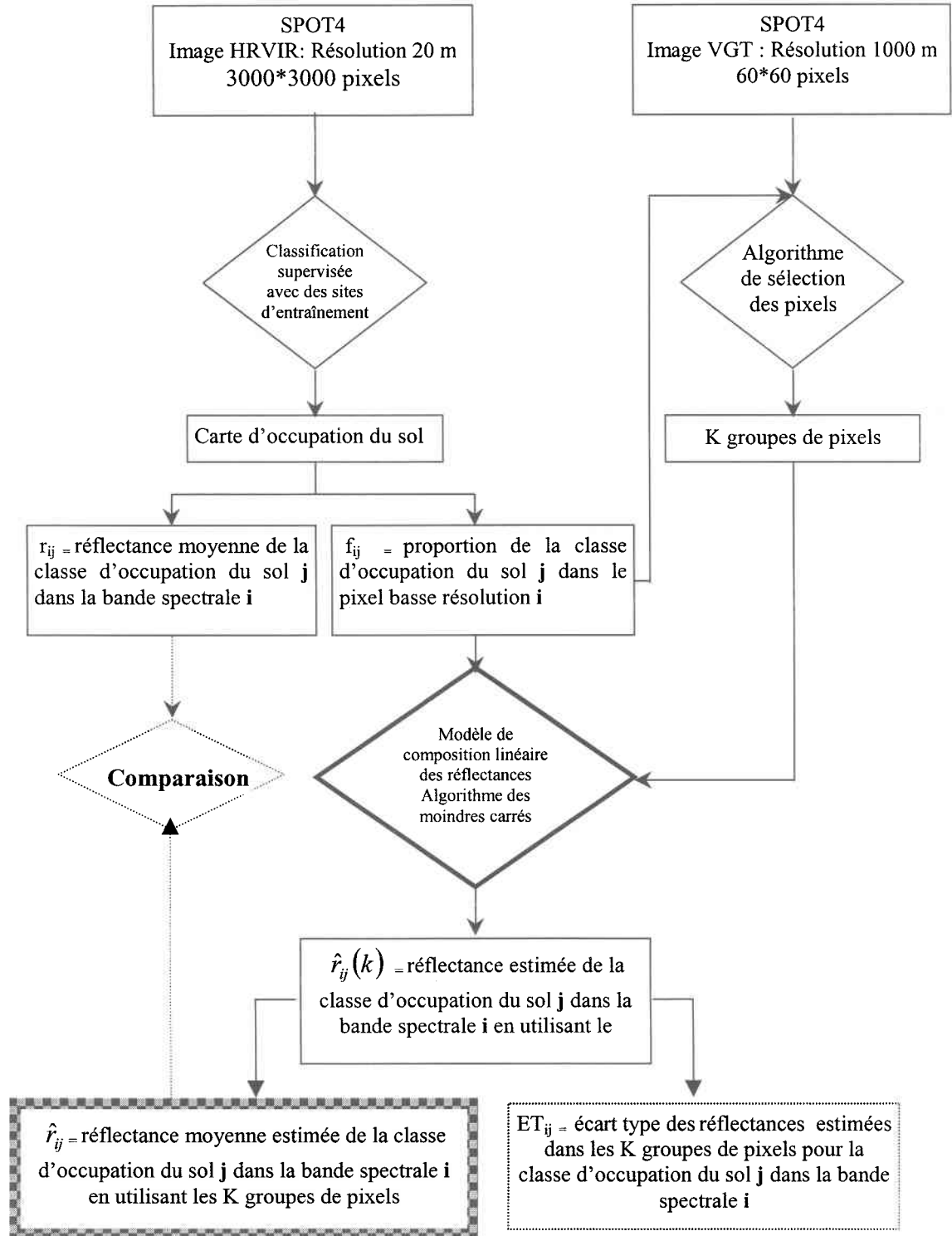


Figure 2.2 : Méthodologie pour l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'images HRVIR et VEGETATION acquises simultanément.

2.1.2 Critères pour l'évaluation des résultats

L'évaluation des résultats des estimations des réflectances des classes d'occupation du sol est faite à l'aide des critères (statistiques) suivants (Lapointe 1998):

- \hat{r}_{ij} : La réflectance estimée moyenne de la classe d'occupation du sol **j** dans la bande spectrale **i**.

Elle représente la moyenne arithmétique des réflectances [$\hat{r}_{ij}(k)$] estimées à partir de la résolution du système d'équations (en utilisant **K** groupes de pixels). \hat{r}_{ij} est définie par l'équation suivante :

$$\hat{r}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{r}_{ij}(k) \quad \text{Équation 2.2}$$

K : nombre des groupes de pixels utilisés séparément pour la résolution du système d'équations.

$\hat{r}_{ij}(k)$: la réflectance estimée de la classe d'occupation du sol **j**, dans la bande spectrale **i**, en utilisant le **k**-ième groupe de pixels.

- L'écart type ET_{ij} pour une classe d'occupation du sol **j** dans une bande spectrale **i** est calculé sur l'ensemble des réflectances $\hat{r}_{ij}(k)$. Il est défini par l'équation suivante :

$$ET_{ij} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\hat{r}_{ij}(k) - \hat{r}_{ij})^2} \quad \text{Équation 2.3}$$

- L'erreur relative ER_{ij} pour une classe d'occupation du sol **j** dans une bande spectrale **i** n'est utilisée que lorsque les vraies valeurs des réflectances sont connues. Elle est exprimée en terme de pourcentage et est définie par l'équation suivante:

$$ER_{ij} = \frac{1}{r_{ij}} \cdot |\hat{r}_{ij} - r_{ij}| \cdot 100 \quad \text{Équation 2.4}$$

r_{ij} : la vraie réflectance moyenne de la classe d'occupation du sol j dans la bande spectrale i .

2.1.3 Sélection des groupes de pixels

La sous-image VGT qui couvre la carte d'occupation du sol extraite de l'image HRVIR est constituée de 3600 pixels. La question qui se pose alors est la suivante : parmi ces 3600 pixels VGT lesquels sont utilisés pour la résolution des systèmes d'équations? Dans cette section nous avons essayé de répondre à cette question en donnant les critères que nous avons adoptés pour choisir ces groupes :

- Homogénéité : les groupes de pixels doivent être de la même qualité, et ils doivent mener à l'estimation de réflectances aussi fiables les unes que les autres;
- Représentativité : toutes les classes d'occupation du sol doivent être bien représentées dans chacun des groupes de pixels, i.e. : nous devons éviter d'avoir par exemple 10% de la classe j dans un groupe et seulement 1% dans l'autre;
- Distribution spatiale : pour tenir compte de la variabilité spatiale des réflectances des classes d'occupation du sol, il semble plus approprié d'avoir une bonne répartition spatiale des pixels à l'intérieur d'un groupe de pixels (Marceau 1991).

Avant de présenter la méthode de sélection de groupes de pixels qui a été adoptée, nous introduisons tout d'abord la notion du « meilleur pixel ». En effet, Le meilleur pixel VGT M_j^1 est celui dont la proportion d'occupation du sol de la classe j est maximale. Le deuxième meilleur pixel M_j^2 est celui dont la proportion de la classe j est inférieure à celle dans M_j^1 et est supérieure à celles des autres pixels. En suivant le même raisonnement, le m -ième meilleur pixel M_j^m de la classe j est celui qui en a la plus grande proportion d'occupation du sol mais après M_j^1 , M_j^2 M_j^{m-1} . Il se peut que, pour une classe d'occupation du sol, il existe plusieurs meilleurs pixels, dans ce cas un parmi eux est choisi aléatoirement.

Comme déjà cité, pour résoudre le système d'équation il faut que chaque groupe de pixels contienne au minimum le même nombre de pixels qu'il en couvre de classes d'occupation du sol. Par ailleurs, le processus d'estimation des réflectances peut se faire avec K groupes différents de pixels. Pour chaque classe d'occupation du sol nous déterminons les K meilleurs pixels. Si n est le nombre de ces classes nous obtenons les n vecteurs de meilleurs pixels suivants :

$$(M_1^1, M_1^2, \dots, M_1^K), (M_2^1, M_2^2, \dots, M_2^K), \dots, (M_n^1, M_n^2, \dots, M_n^K)$$

Au sein de chacun des n vecteurs nous effectuons une permutation aléatoire pour ainsi obtenir :

$$(M_1^{P1;1}, M_1^{P1;2}, \dots, M_1^{P1;K}), (M_2^{P2;1}, M_2^{P2;2}, \dots, M_2^{P2;K}), \dots, (M_n^{Pn;1}, M_n^{Pn;2}, \dots, M_n^{Pn;K})$$

Où $M_j^{Pv;i}$ est le meilleur pixel d'ordre k (avec $1 \leq k \leq K$) de la classe d'occupation du sol j , placé, après permutation, à la position i du vecteur v (avec $v \leq n$). Ainsi, $M_1^{P1;1}$ est le meilleur pixel d'ordre k (avec $1 \leq k \leq K$) de la première classe d'occupation du sol, et placé après permutation au premier rang du premier vecteur. De même, $M_2^{P2;K}$ est le meilleur pixel d'ordre k (avec $1 \leq k \leq K$) de la deuxième classe d'occupation du sol, et placé après permutation au deuxième rang du deuxième vecteur, et ainsi de suite....

Après permutation, un groupe de pixels est constitué alors des $2n$ pixels suivants:

- Les n pixels qui occupent le même rang dans tous les vecteurs permutés :

$$(M_1^{P1;i}, M_2^{P2;i}, \dots, M_n^{Pn;i})$$

- n pixels additifs choisis aléatoirement du restant des pixels de l'image VGT.

L'exemple suivant éclairci plus ces points :

Supposons qu'on veut estimer les réflectances de quatre classes d'occupation du sol A, B, C, et D. le système d'équations qui en découle est constitué d'au moins quatre équations. Supposons aussi qu'on veut faire ce calcul en triplet, c'est à dire avoir trois systèmes d'équations. La résolution de ces systèmes d'équations nécessite donc 3 groupes de pixels. Chacun des ces trois groupes doit comporter au minimum quatre pixels. La première étape est de déterminer les trois meilleur pixels pour chaque classe. Ils sont rangés dans quatre vecteurs soient :

$$(M_A^1, M_A^2, M_A^3), (M_B^1, M_B^2, M_B^3), (M_C^1, M_C^2, M_C^3), (M_D^1, M_D^2, M_D^3)$$

La seconde étape est d'effectuer une permutation aléatoire au sein de chaque vecteur. Une permutation acceptable peut se présenter sous la forme suivante :

$$(M_A^1, M_A^3, M_A^2), (M_B^3, M_B^2, M_B^1), (M_C^2, M_C^1, M_C^3), (M_D^3, M_D^1, M_D^2)$$

Les trois sous-groupes suivants de pixels sont ainsi obtenus :

- Groupe numéro 1 : $(M_A^1, M_B^3, M_C^2, M_D^3)$
- Groupe numéro 2 : $(M_A^3, M_B^2, M_C^2, M_D^2)$
- Groupe numéro 3 : $(M_A^2, M_B^1, M_C^3, M_D^2)$

À chacun des ces trois sous-groupes, quatre pixels aléatoires sont ajoutés et ainsi les systèmes d'équations sont générés.

En choisissant les meilleurs pixels nous nous sommes assurés que le critère de la représentativité est satisfait, tandis que le mélange aléatoire visait à satisfaire celui de l'homogénéité. Le critère de la distribution spatiale des pixels n'est pas important dans notre cas. En effet, la taille de l'image utilisée est seulement de 60x60 km, et les variations spatiales des réflectances des classes ne sont pas supposées être très importantes. L'ajout de pixels choisis aléatoirement aux combinaisons faites à partir des meilleurs groupes permet d'avoir des résultats plus stables et une bonne distribution spatiale des pixels (Fortin *et al.*, 1998).

Les réflectances estimées des classes d'occupation du sol sont stabilisées par la répétition plusieurs fois de l'essai d'estimation [une répétition de 10 fois est suffisante (Fortin *et al.*, 1998)]. À chaque répétition une nouvelle permutation des vecteurs de meilleurs pixels est opérée et d'autres pixels aléatoires sont sélectionnés.

La figure 2.3 résume les procédures de choix des groupes de pixels pour l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol, les parties en pointillés représentent les étapes répétées pour stabiliser l'estimation des réflectances.

Pratiquement, nous devons définir un nombre optimal des K groupes de pixels. Ce nombre optimal de groupes de pixels VGT nous permet d'obtenir la meilleure estimation des réflectances. Comme critère d'évaluation nous utilisons l'erreur relative moyenne dans une bande spectrale donnée, ERMB (équation 2.6, section 2.2). La première étape consiste donc à estimer les réflectances des classes d'occupation du sol en utilisant un nombre K des groupes de pixels. Pour chacun des groupes de pixels variant de 1 à K nous estimons (répétition de dix fois) les réflectances ce qui nous permet de déterminer l'ERMB. Le nombre optimal de groupes de pixel pour l'estimation des réflectances est celui qui donne la plus petite ERMB.

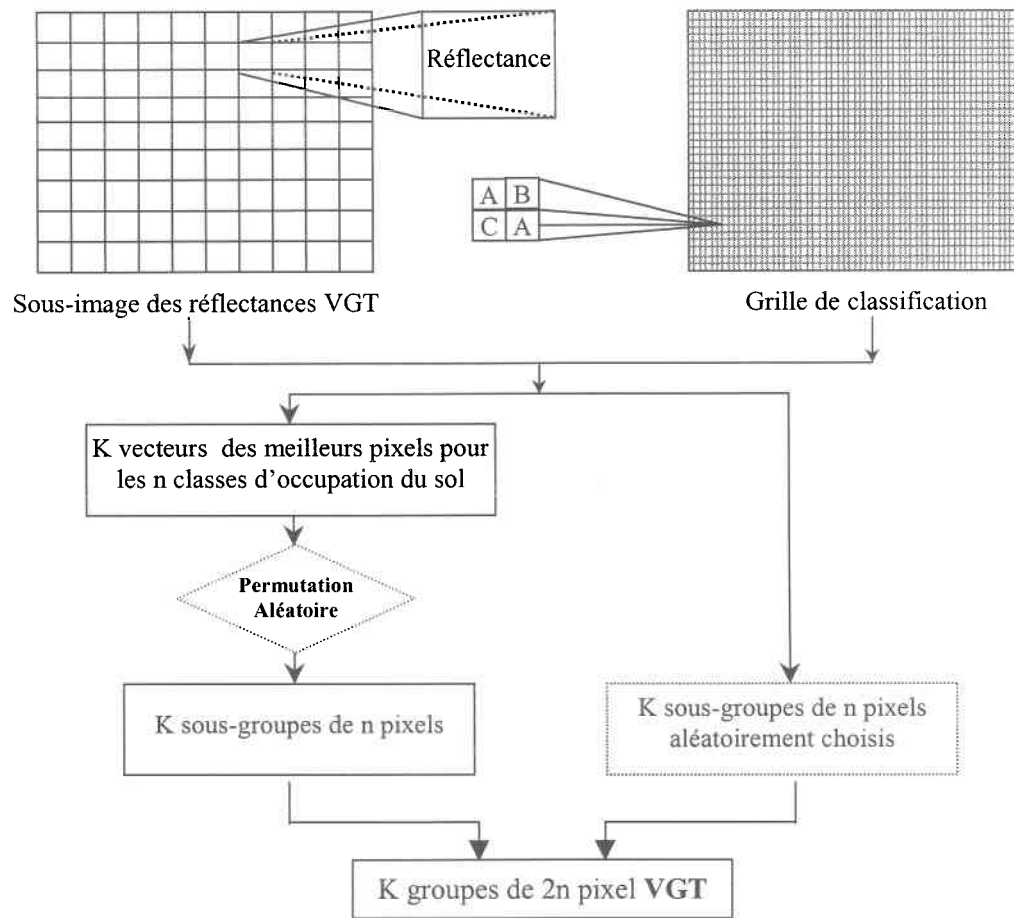


Figure 2.3 : Choix des groupes de pixels pour l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol.

2.2 Ajustement du positionnement des localisations géographiques des images

Dans cette section, nous présentons la méthodologie adoptée pour corriger les erreurs de localisations géographiques des images. Une description détaillée de ces erreurs est présentée ci-dessous. L'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol est à la base de cette méthode. En effet, en ayant un paramètre estimable (réflectance) qui relie la carte d'occupation du sol et les groupes des pixels issus de l'image VGT, nous pouvons faire un suivi de la qualité de son estimation.

2.2.1 Erreurs de positionnement des localisations géographiques

Dans ce qui suit, par erreur de positionnement de la localisation géographique nous désignons les diverses différences entre :

- les vraies positions géographiques des cibles au sol, et
- les positions géographiques des cibles qui leur sont attribuées dans les images.

En d'autres termes, à la place d'avoir l'information sur une cible X au sol, l'information réellement acquise est plutôt celle d'une cible Y plus au moins décalée de X (figure 2.4). Théoriquement toutes ces positions sont identiques mais pratiquement elles ne le sont pas. L'explication de ces erreurs est souvent liée au caractère non- parfait des instruments de prise de vue (capteurs), et des plates-formes (satellites), qui ne parcourt jamais exactement les mêmes orbites.



- Pixel Y acquis à la place de X dans la bande B0
- Groupe de Pixel y (20 mètres, haute résolution spatiale) acquis à la place de X (1000 mètres) dans la bande B1
- Pixel Y acquis à la place de X dans la bande B2
- Pixel Y acquis à la place de X dans la bande B3
- Pixel Y acquis à la place de X dans la bande B4

Figure 2.4: Schéma de principe des erreurs de positionnement

2.2.1.1 Erreur de positionnement multispectrale xS

L'erreur de positionnement multispectrale xS (figures 2.4 et 2.5) désigne la différence au sol en mètres entre les localisations des positions des pixels «Y» affectées aux vrais pixels «X» dans les bandes spectrales de la même image VGT (figure 2.4). Selon les estimations faites avant le lancement du satellite SPOT4, xS peut avoir une valeur allant de zéro jusqu'à 300 mètres. La moyenne de ces positions multispectrales est considérée comme la position de l'image VGT, elle est appelée **localisation moyenne multispectrale** de l'image VGT. Pour une image HRVIR, l'erreur dite de positionnement multispectrale est inférieure à la taille du pixel (20 mètres), elle est dite alors **localisation** de l'image HRVIR.

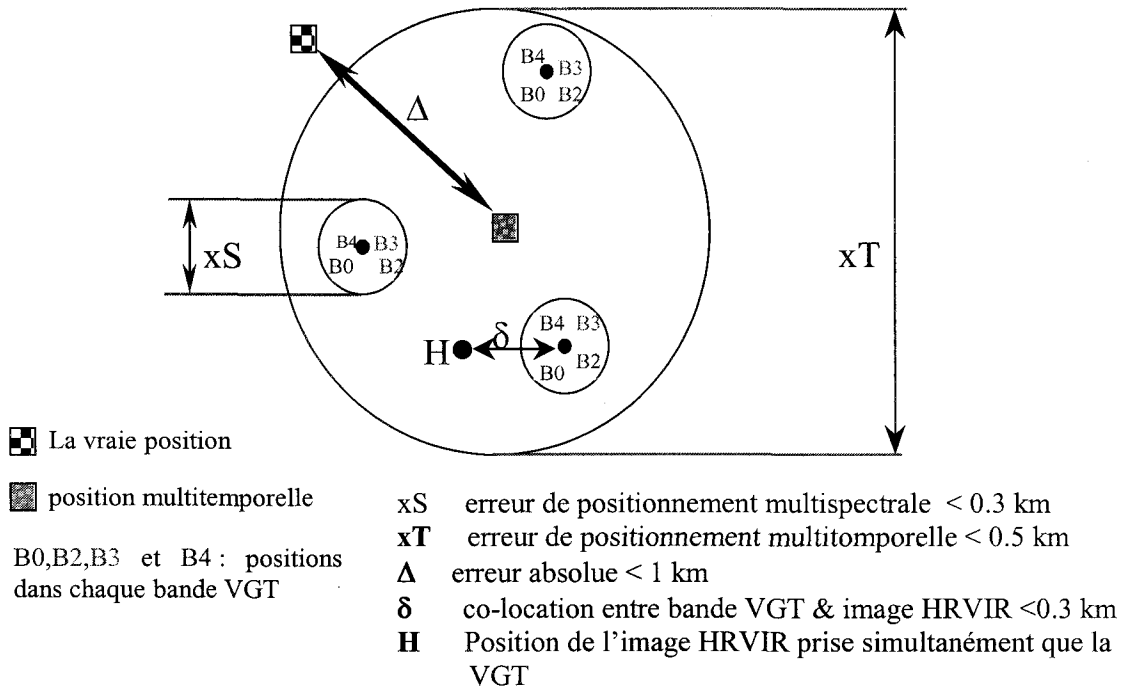


Figure 2.5 : Diverses erreurs de positionnement des la localisations géographiques.

2.2.1.2 Erreur de positionnement multitemporelle xT

L'erreur de positionnement multitemporelle xT , est la différence entre les localisations multispectrales moyennes de deux ou plusieurs images VGT prises à des dates différentes au-dessus de la même région (figure 2.5). Cette erreur peut atteindre, selon les estimations calculées

avant le lancement, une valeur de 500 mètres. Comme pour l'erreur de positionnement multispectrale, nous définissons la **localisation multitemporelle moyenne** d'un ensemble d'images VGT, comme étant la moyenne des localisations moyennes multispectrales des images de cet ensemble.

2.2.1.3 Erreur absolue Δ

L'erreur absolue Δ est la différence entre la localisation moyenne multitemporelle d'un ensemble d'image VGT et la vraie position de la cible au sol (figure 2.5). Les estimations indiquent que Δ peut atteindre une valeur maximale de 1000 mètres.

2.2.1.4 Erreur de co-localisation δ entre des images VEGETATION et HRVIR

Il a été déjà cité que les instruments de prise de vue VEGETATION et HRVIR, sont à bord du même satellite (SPOT4). De ce fait, une image VGT et une autre HRVIR, peuvent être prises simultanément au-dessus de la même région. L'erreur de positionnement entre la localisation moyenne multispectrale de l'image VGT et la localisation de l'image HRVIR est appelée l'erreur de co-localisation δ (figure 2.5), elle est estimée à une valeur maximale de 300 mètres.

2.2.2 Critères d'évaluation des résultats

Les méthodes que nous utilisons reposent sur les deux critères suivants :

- L'écart type moyen par bande (ETMB_i):

$$ETMB_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ET_{ij} \quad \text{Équation 2.5}$$

n : nombre de classes d'occupation du sol

ET_{ij} : écart type pour une classe d'occupation du sol j dans une bande spectrale i (voir équation 2.3)

- L'erreur relative moyenne par bande (ERMB_i):

$$ERMB_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ER_{ij} \quad \text{Équation 2.6}$$

ER_{ij} : erreur relative pour une classe d'occupation du sol j dans une bande spectrale i (voir équation 2.4)

L'écart type moyen par bande $ETMB_i$ peut être utilisé que les vraies valeurs des réflectances des classes d'occupation du sol sont connues ou non, tandis que l'erreur relative moyenne par bande $ERMB_i$ ne peut être utilisée que dans le premier cas. Nous distinguons deux méthodes pour l'estimation de la vraie position géographique :

- La méthode exhaustive
- La méthode heuristique

2.2.3 La méthode exhaustive

La méthode exhaustive se base sur un décalage, à pas constant, de la grille d'occupation du sol sur l'image des réflectances VGT. À chaque pas de déplacement, suivant les axes nord-sud et est-ouest, l'estimation des réflectances est opérée selon la procédure décrite dans la figure 2.2. Ainsi, des grilles sont formées en retenant à chaque point de décalage :

- La valeur calculée de l' $ETMB_i$;
- La valeur calculée de l' $ERMB_i$ (si nous avons les vraies valeurs de réflectances à la même date de l'image VGT).

Les bornes des intervalles de décalages sont déterminées en tenant compte des estimations en phase de pré-lancement de SPOT4. Les valeurs semblables de la grille formée par les valeurs d' $ETMB_i$ et d' $ERMB_i$ (s'il y a lieu) sont reliées entre elles pour former une cartographie des iso- $ETMB_i$ et iso- $ERMB_i$. La position la plus probable pour la superposition de l'image HRVIR avec la VGT est celle dont la valeur de l' $ETMB_i$ et/ou l' $ERMB_i$ est minimale. En effet, théoriquement plus des deux images sont superposables plus les réflectances estimées, à partir des K groupes différents de pixels, se rapprochent. Ce qui fait en sorte que les valeurs de l' $ETMB_i$ et l' $ERMB_i$ sont minimales. La précision de la méthode exhaustive est liée au pas de déplacement choisi et au décalage maximal permis. Cependant, à chaque pas de déplacement toutes les étapes de la procédure d'estimation des réflectances se répètent. Donc, plus le pas de déplacement est petit plus le temps de calcul est grand. Par exemple, 3721 calculs sont effectués pour générer une grille d' $ETMB_i$ ou d' $ERMB_i$ avec un décalage de 600 mètres dans les quatre directions et un pas de déplacement de 20 mètres, et seulement 169 calculs sont nécessaires pour le même décalage mais avec un pas de 100 mètres.

2.2.4 La méthode heuristique

Comme pour la méthode exhaustive, l'ETMB_i et, s'il y a lieu, l'ERMB_i, sont les deux critères pour la détermination de la position la plus probable entre une image HRVIR et une autre VGT. Cette fois-ci, le nombre de calculs est moins grand. La méthode heuristique repose sur le calcul de l'ETMB_i et l'ERMB_i dans l'espace d'un cercle dont le diamètre est le décalage maximal permis (figure 2.6). Si nous considérons le centre de ce cercle comme référence. Pour un décalage maximal de X mètres les estimations des réflectances sont faites, en premier, aux positions suivantes :

- Au centre du cercle,
- Aux points de coordonnées suivantes :
 - $X/2$ mètres nord, $X/2$ mètres est
 - $X/2$ mètres sud, $X/2$ mètres est
 - $X/2$ mètres sud, $X/2$ mètres ouest
 - $X/2$ mètres nord, $X/2$ mètres ouest.

Une fois que les calculs sont faits, la position où la valeur de l'ETMB_i (et/ou ERMB_i) est minimale est retenue comme étant le nouveau centre de recherche de la valeur minimale. Cette fois, les réflectances sont estimées aux positions se situant à un pas fixe du nouveau centre. Un nouveau centre est déterminé alors selon le même principe. Le calcul se répète jusqu'à ce que la différence entre les valeurs calculées au centre du cercle et à ses alentours atteigne un seuil minimal. C'est cette position qui est considérée alors comme celle la plus probable pour la superposition de l'image HRVIR avec la VGT. Toutefois cette méthode reste très vulnérable, puisqu'il y a un risque énorme de tomber sur un minimum local. La position de ce dernier est considérée comme la bonne alors qu'en réalité elle ne l'est point. En pratique, nous pouvons contourner ce problème en répétant plusieurs fois le processus heuristique en changeant à chaque fois le point de départ et/ou le pas de déplacement. Cependant, cela ne peut être une solution pratique que si les minimums locaux sont peu nombreux. Cette dernière information est totalement inconnue dans un contexte pratique.

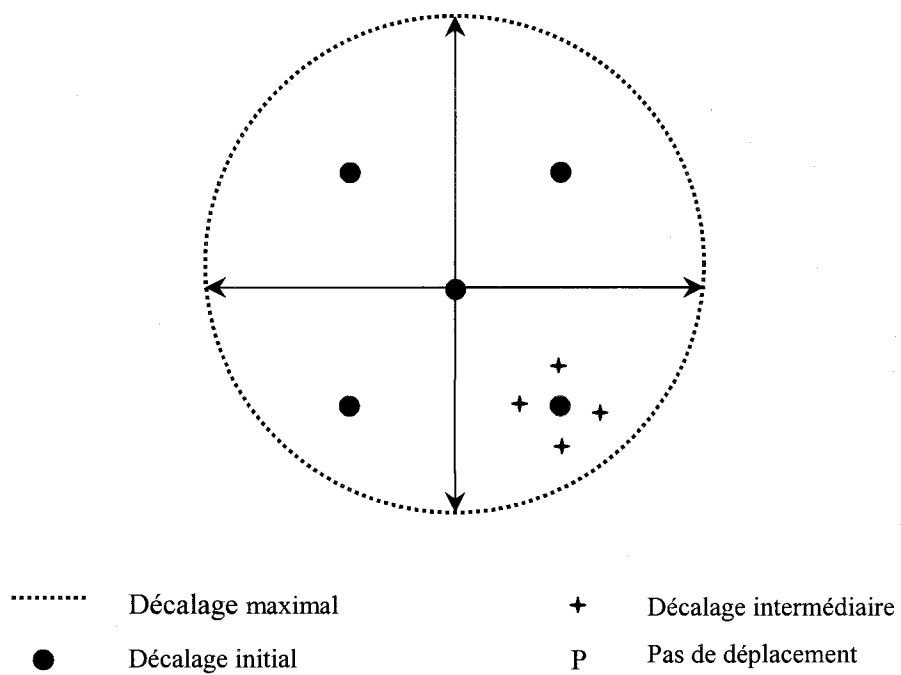


Figure 2.6 : Principe de base de la méthode heuristique

2.3 Estimation du pourcentage du couvert nival à partir d'images VGT

2.3.1 Modèle linéaire de composition des réflectances dans les cas d'un couvert partiel de neige

L'estimation du pourcentage du couvert nival à partir d'images VGT consiste en la détermination du pourcentage de la surface couverte de neige dans chacun des pixels VGT. Toutefois cette estimation ne donne pas une information sur la répartition de la neige à l'intérieur dudit pixel.

Le modèle linéaire de composition des réflectances en présence d'un couvert partiel de neige s'énonce comme suit :

$$R_i = R_{if} + \sum_{j=1}^n P_{ijs} (r_{js} - r_{jf}) + \varepsilon_i \quad \text{Équation 2.7}$$

$$\text{avec } R_{if} = \sum_{j=1}^n P_{ijf} R_{jf}$$

R_i : réflectance du pixel VGT i avec un couvert nival de 0 à 100%;

R_{if} : réflectance du pixel VGT i en absence totale de neige (automne);

r_{js} : réflectance de la classe d'occupation du sol j avec un couvert total de neige;

r_{jf} : réflectance de la classe d'occupation du sol j en absence totale de neige (automne);

P_{ijs} : pourcentage du pixel VGT i occupé par la classe d'occupation du sol j , avec un couvert total de neige;

P_{ijf} : pourcentage du pixel VGT i occupé par la classe d'occupation du sol j , avec une absence totale de neige (automne)

ε_i : terme d'erreur exprimant les erreurs de mesures et de variabilité de r .

n : nombre des classes d'occupation du sol.

2.3.2 Indices de neige F et NDSI

Dans chaque pixel VGT, les changements spectraux durant la période de fonte sont dus essentiellement aux changements des pourcentages de neige (équation 2.7).

En se basant sur l'effet distinctif de la neige sur les réflectances des classes d'occupation du sol par rapport aux conditions d'absence de la neige sur ces mêmes surfaces, les deux indices suivants ont été utilisés pour représenter cet effet :

➤ Le premier indice, appelé F, est une fraction. Il est défini par l'équation suivante :

$$F = (R_i - R_{if}) / (R_{is} - R_{if}) \quad \text{Équation 2.8}$$

$$\text{avec } R_{is} = \sum_{j=1}^n P_{ijs} r_{js} + \varepsilon_i$$

où :

R_{is} : réflectance du pixel VGT i avec un couvert total de neige;

r_{js} : réflectance de la classe d'occupation du sol j avec un couvert total de neige;

P_{ijs} : pourcentage du pixel VGT i occupé par la classe d'occupation du sol j, avec un couvert total de neige;

n : nombre des classes d'occupation du sol.

Évidemment, l'indice F prend une valeur de 1 si le couvert de neige est total, c'est à dire quand $R_i = R_{is}$. Au contraire F est nul dans le cas où $R_i = R_{if}$. Entre ces deux extrêmes, il varie de 0 et 1.

➤ Le deuxième indice utilisé est le NDSI (normalized difference snow index). Il est inspiré de l'indice de végétation NDVI et se base sur l'accentuation de la différence des réflectances d'un pixel VGT avec un couvert de neige partiel et en absence de neige. Cette accentuation se fait en divisant la différence de ces deux entités sur leur somme.

$$NDSI = (R_i - R_{if}) / (R_i + R_{if}) \quad \text{Équation 2.9}$$

2.3.3 Description de l'approche utilisée

La bande spectrale B2 est utilisée pour calculer les indices de neige F et NDSI. En effet, c'est la seule bande qui se trouve sur les capteurs VEGETATION et HRVIR (tableau 1.1) et qui permet une différenciation maximale du couvert de neige. La figure 2.7 montre que dans cette bande spectrale la réflectance de la neige est largement supérieure aux réflectances des autres classes d'occupation du sol. Il faut aussi noter que dans cette bande spectrale, les nuages ont un comportement spectral similaire à celui de la neige et ils peuvent être confondus avec de la neige.

Les premières étapes de l'approche utilisée, pour l'estimation du couvert nival à partir d'images VGT, consistent aux corrections atmosphériques afin d'éliminer l'effet induit par l'atmosphère et aussi aux corrections géométriques permettant de superposer les images. Les valeurs des indices F et NDSI pour chacun des pixels VGT sont déterminées à partir de trois images VGT. Ces dernières étant acquises respectivement avec un couvert total de neige, un couvert partiel de neige et sans couvert de neige. Au cours de la phase de développement de la méthodologie, les vrais pourcentages de neige sont extraits des cartes d'occupation du sol issues des images de haute résolution spatiale.

En utilisant les valeurs des indices de neige et les vrais pourcentages de neige tirés de la carte d'occupation du sol, les deux équations d'estimation du couvert nival suivantes ont été déterminées :

- Pourcentage de neige à partir de la carte d'occupation du sol = $f(\text{indice F})$;
- Pourcentage de neige à partir de la carte d'occupation du sol = $f(\text{NDSI})$;

Une fois qu'au moins l'une de ces deux équations est déterminée, nous l'appliquons à la même image VGT qui l'a générée. Cela sert à évaluer sa précision. Après cette phase de validation, l'estimation du couvert nival au niveau sous-pixel peut se faire sur d'autres sous-images VGT couvrant des zones plus larges que celle correspondant à l'image de haute résolution.

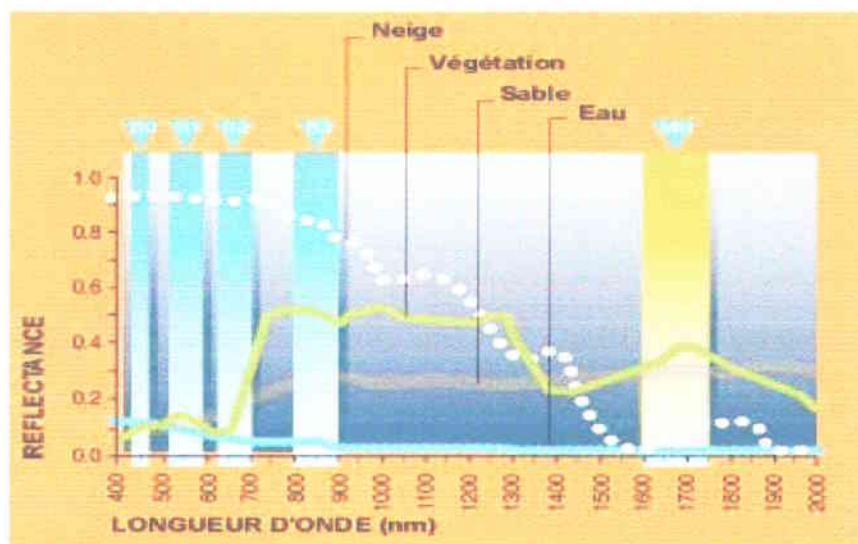


Figure 2.7: Signatures spectrales des classes d'occupation du sol

2.4 Distribution de la neige dans un pixel VGT selon les classes d'occupation du sol

Dans la section précédente (2.3) nous avons présenté la méthodologie adoptée pour l'estimation du pourcentage total de neige dans un pixel VGT. Il y était noté que la répartition spatiale du couvert nival ne pouvait être déterminée. Dans cette section, nous exposons la méthodologie utilisée pour avoir une information sur le couvert nival dans chacun des pixels VGT selon les classes qu'il couvre. Une telle estimation peut être utilisable comme donnée d'entrée pour les modèles hydrologiques. Elle sert essentiellement pour l'estimation de l'accumulation ou la fonte de neige dans un bassin versant. Forêts de conifères, de feuillus et terrains ouverts sont les trois classes principales d'occupation du sol pour lesquelles nous devons estimer le pourcentage, en terme de surface, de neige. En effet, ces trois classes sont celles largement utilisées dans le modélisation du couvert nival dans le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2000).

Pour cette fin, nous n'avons utilisé que des images de haute résolution spatiale. En effet, à partir de ces images nous avons extrait des grilles de classification. Dans ces dernières nous avons déterminé pour chaque surface équivalente à un pixel VGT les paramètres suivants :

- Pourcentage total de forêts de conifères avec et sans neige

- Pourcentage total de forêts de feuillus avec et sans neige

- Pourcentage total des zones ouvertes avec et sans neige

Par après, nous avons relié ces différents paramètres par des équations mathématiques. Ainsi on détermine le comportement de la fonte de neige par rapport aux trois classes d'occupation du sol ci-haut mentionnées. Ces équations obtenues permettent d'estimer, par exemple, combien il reste de neige dans chacune des trois classes d'occupation du sol quand le pixel VGT est couvert par un pourcentage donné de neige.

3 APPLICATION DE LA MÉTHODE À DES IMAGES VGT

Le présent chapitre est consacré à la description des produits images utilisés dans le cadre de la présente étude. Dans la première section, nous exposons les caractéristiques des instruments de prise de vue (capteurs) qui ont servi à l'acquisition des images, à savoir, les capteurs VEGETATION et HRVIR du satellite européen SPOT4, et le capteur HRV de SPOT2. Ainsi que les caractéristiques radiométriques et géométriques des images acquises à travers ces capteurs. La deuxième section est consacrée à la description de la région de notre recherche, les images choisies, et les critères de leur sélection. Finalement, dans la troisième section nous présentons les méthodes appliquées pour les corrections atmosphériques et géométriques, ainsi que les résultats des classifications des images de haute résolution spatiale.

3.1 Description générale des images VGT, HRVIR et HRV

3.1.1 Caractéristiques des capteurs VEGETATION, HRVIR, et HRV

3.1.1.1 Le capteur VEGETATION

Le programme européen VEGETATION a pour objectif principal le suivi à l'échelle planétaire du couvert végétal et des cultures. Son but est d'augmenter la précision et la fréquence de mise à jour des variables climatiques qui servent comme paramètres d'entrée aux divers modèles généraux de circulation de l'atmosphère (GCM). L'importance du suivi du couvert végétal vient du fait que sa dynamique est liée directement à la variation saisonnière et à long terme des variables climatiques. Le capteur VEGETATION est à la base du programme qui porte d'ailleurs le même nom. Son avantage principal est qu'il permet une couverture spatiale quasi quotidienne presque sur toutes les régions du globe (les régions non couvertes un jour le seront le lendemain). Ceci était rendu possible grâce à un large champ de vue allant jusqu'à 2250 km, et aussi à une orbite polaire que suit le satellite SPOT4 (plate-forme du capteur VEGETATION). Évidemment, une très bonne répétitivité temporelle ne peut être atteinte qu'avec une diminution de la résolution spatiale. Celle-ci est alors de l'ordre d'un kilomètre carré par pixel. Les différentes caractéristiques techniques du capteur VEGETATION sont présentées dans le tableau 3.1.

3.1.1.2 Les capteurs HRVIR et HRV

HRVIR est l'abréviation qui désigne **H**aute **R**ésolution **V**isible et **I**nfra**R**ouge. Placé aussi sur SPOT4, l'instrument HRVIR constitue un complément pour le capteur VEGETATION. En effet, inversement à ce dernier, la résolution spatiale avec HRVIR est très fine, 20 mètres pour le mode multispectral et 10 mètres pour le mode panchromatique. La répétitivité temporelle avec un angle de vue quasi vertical est de 26 jours. Ces deux types de capteurs possèdent exactement les mêmes bandes spectrales B2, B3 et B4, respectivement dans la partie rouge, proche infrarouge, et moyen infrarouge du spectre électromagnétique (tableau 3.1). Le capteur HRV (Haute Résolution Visible) placé à bord des satellites SPOT1 et 2, est l'ancienne version du capteur HRVIR. La différence entre ces deux capteurs réside en l'ajout d'une bande dans le moyen infrarouge (MIR) et le remplacement de la bande panchromatique (0.51-0.73 μm) par celle dans le rouge (0.61-0.68 μm) (tableau 3.1).

Tableau 3.1: Caractéristiques et comparaison des instruments VEGETATION, HRVIR et HRV

		Plate-Forme		
		SPOT4		SPOT2
Bandes spectrales (μm)		VEGETATION	HRVIR	HRV
	B0 (bleu)	0.43 – 0.47	◆◆◆	◆◆◆
	B1 (vert)	◆◆◆	0,50 - 0,59	0,50 - 0,59
	B2 (rouge)	0,61 - 0,68	0,61 - 0,68	0,61 - 0,68
	B3 (proche IR)	0,78 - 0,89	0,79 - 0,89	0,79 - 0,89
	B4 (moyen IR)	1,58 - 1,75	1,58 - 1,75	◆◆◆
	Panchromatique*	◆◆◆	0,61 - 0,68*	0.51 - 0.73*
Nombre de pixels par ligne		2250	3000	3000
Dimensions du pixel (mètres) en mode multispectral		1000 × 1000	20x20	20x20
Largeur de bande observée (km) (en visée verticale pour HRVIR)		2250	60	60
alignement HRVIR/VGT		0.3 des pixels VGT**		Ne s'applique pas
Fréquence de passage (jours)		1	26	26

* La taille du pixel dans ce cas est de 10 x 10 mètres et le nombre de pixels par ligne devient alors de 6000.

** Erreur de collocation (chapitre2, section 2.2.1.4).

◆◆◆ Bande spectrale inexistante dans ce genre de capteur.

3.1.2 Description des produits images

3.1.2.1 Images HRVIR et HRV

Les images de haute résolution spatiale utilisées dans le cadre de cette recherche provenaient de **Spotimage** sous format de Cédéroms. Un traitement dit de niveau A1 leur a été appliqué,

Les produits de niveau 1A sont avant tout destinés aux applications cartographiques et permettent d'effectuer des corrections géométriques plus fines, des restitutions stéréoscopiques, ou peuvent servir à des études radiométriques de précision. (site de Spotimage)

3.1.2.1.1 *Traitement radiométrique*

Le prétraitement de niveau 1A consiste à corriger, en appliquant un modèle linéaire, les différences de sensibilité entre les détecteurs des barrettes CCD. Les coefficients de calibration absolue incorporés dans les données auxiliaires permettent de convertir en luminance les valeurs numériques associées aux pixels. À ce stade aucune correction atmosphérique n'est appliquée, les valeurs de luminance obtenues désignent donc celles en provenance de l'atmosphère et de la surface terrestre.

3.1.2.1.2 *Traitement géométrique*

Au niveau A1, aucune correction géométrique n'est appliquée. Les images sont fournies selon leur propre géométrie qui dépend de plusieurs facteurs, angle d'acquisition du capteur, courbure de la terre..., et il s'agit donc de simples grilles de pixels. Cependant, des données auxiliaires (coordonnées du centre de la scène et ses quatre coins) sont fournies avec les images et permettent de les localiser au sol avec une précision supérieure à 500 mètres. D'autres données (annexe A) concernant les éphémérides, attitude d'acquisition, directions de visée... Pour entreprendre des corrections géométriques, des fichiers peuvent être lus directement de l'en-tête des Cédéroms.

De ce qui précède, il est évident que les images acquises par les capteurs HRVIR et HRV, doivent subir des corrections atmosphériques et géométriques. Ces corrections ont pour objectif d'affecter pour chacun des pixels :

- Une valeur de réflectance qui se réfère seulement à l'objet au sol
- Une localisation géographique suivant une projection cartographique connue.

3.1.2.2 Images VEGETATION

Les images de basse résolution spatiale VEGETATION provenaient également de Spotimage. Leur niveau de traitement est dit de type **P**. Ces images ont été récupérées à travers Internet en utilisant le protocole de transfert FTP.

3.1.2.2.1 *Traitement radiométrique*

De même que pour les produits A1, les images VEGETATION de type P ont subi une correction des différences de sensibilité radiométrique entre les détecteurs des barrettes CCD. Aucune correction des effets induits par l'atmosphère n'est appliquée (Site Internet VEGETATION). Cependant, des fichiers auxiliaires contenant, pour chacun des pixel, des informations sur les angles de prise de vue, les angles solaires, et l'état de l'atmosphère (vapeur d'eau, contenu en ozone, et aérosols troposphériques) sont livrés avec les images. Ces fichiers sont utilisés pour opérer des corrections de l'effet induit par l'atmosphère (tableau 3.2).

3.1.2.2.2 *Traitement géométrique*

À l'inverse des images de haute résolution spatiale HRVIR et HRV du type A1, les images VEGETATION du type P, sont déjà rééchantillonnées selon une projection cartographique. Cela facilite leur incorporation dans des analyses multitemporelles ou encore leur superposition avec des images de haute résolution. Les données concernant la projection cartographique se trouvent dans le fichier (Logical_file) livré avec chaque image (tableau 3.2).

Le tableau 3.2 regroupe tous les fichiers qui sont, nécessairement ou optionnellement, livrés avec une image VEGETATION du type P. Les fichiers qui apparaissent en gras dans le tableau contiennent des données sur des paramètres physiques (les angles de prise de vue, les angles solaires,...). L'extraction de ces paramètres à partir des valeurs numériques réellement stockées se fait directement en appliquant l'équation suivante :

$$V_P = a \times V_N + b \quad \text{Équation 3.1}$$

V_P est la valeur physique d'un paramètre donné

V_N est la valeur numérique du paramètre

a et **b** sont des coefficients.

Tableau 3.2: Fichiers accompagnant une image VGT

Nom du fichier	description	Comm.	Nombre de pixel échantillonnés	Nombre de bits
LOG	Logical volume file	(*)	-	-
RIG	Copyright file	(*)	-	-
PHY	Physical volume file	(*)	-	-
B0	B0 (Réflectance TOA ^a)	(*)	1×1	16
B2	B2 (Réflectance TOA ^a)	(*)	1×1	16
B3	B3 (Réflectance TOA ^a)	(*)	1×1	16
MIR	B4 (Réflectance TOA ^a)	(*)	1×1	16
SM	Status Map	optionnel	1×1	8
VZA	Grille de l'angle zénithal de vue	optionnel	8×8	8
SZA	Grille de l'angle zénithal solaire	optionnel	8×8	8
VAA	Grille de l'angle azimutal de vue	optionnel	8×8	8
SAA	Grille de l'angle azimutal solaire	optionnel	8×8	8
WVG	Grille de la vapeur d'eau	optionnel	100×100	8
OG	Grille d'ozone	optionnel	100×100	8
AG	Grille des aérosols troposphériques	optionnel	100×100	8
BO	1B HRVIR latitude plan	optionnel	1×1	32
BL	1B HRVIR longitude plan	optionnel	1×1	32
QL	Aperçu rapide	-	8×8	8

^a Cette réflectance est non corrigée des effets de l'atmosphère et c'est pourquoi elle est dite TOA (top of atmosphere).

(*) fichiers obligatoires formant l'image, à noter que les fichiers des bandes peuvent être obtenus séparément.

3.2 Choix et pré traitement des images utilisées

3.2.1 Choix de la région

L'objectif de notre étude est de fournir des données relatives à la cartographie du couvert nival dans le sud du Québec. Par sud du Québec, nous désignons le triangle formé par les villes de Trois-rivières, Sherbrooke, et Montréal. Cette région est la zone la plus peuplée et la plus dynamique de la province. En plus, plusieurs études ont été menées sur des bassins versants localisés dans cette zone. La méthodologie adoptée consiste à développer des équations d'estimation du couvert nival à partir d'images spatiales. Cela a nécessité l'utilisation conjointe

des images de haute et de basse résolution spatiale. De ce fait la taille de la région étudiée, pour le développement des dites équations, correspond à celle d'une image de haute résolution spatiale (Image SPOT: 60*60 km). La région de Sherbrooke (tableau 3.3) a été choisie à cette fin. Les justifications sont multiples et nous citons les trois principales :

- Existence pour cette région des résultats d'une étude similaire utilisant des images VGT simulées (Fortin *et al*,1998)
- Très bonne connaissance de la région et de sa diversification d'occupation du sol.
- Existence d'images LANDSAT TM couvrant cette région et géoréférencées.

Pour les images de basse résolution spatiale (VEGETATION), il n'y avait pas de contraintes de superficie. En effet, chaque image couvre toute la province de Québec, la région de Sherbrooke y est donc incluse. Le choix des images dépendait alors de l'état du couvert nuageux au-dessus de la région de Sherbrooke et du sud du Québec où l'application devait être étendue.

Tableau 3.3: Coordonnées géographiques des images de haute résolution spatiale

Image		Latitude (Nord)	Longitude (West)	Pixel n	Ligne n
HRVIR (SPOT4) 11 avril, 1999 mode multispectral	Centre de la scène	045 36'05''	071 46'11''	1500	1500
	Coin supérieur gauche	045 55'16''	072 02'36''	1	1
	Coin supérieur droit	045 48'04''	071 17'22''	3000	1
	Coin inférieur gauche	045 23'58''	072 14'44''	1	3000
	Coin inférieur droit	045 16'51''	071 29'54''	3000	3000
HRV (SPOT2) 02 avril, 1999 mode panchromatique	Centre de la scène	045 36'05''	071 48'12''	3000	3000
	Coin supérieur gauche	045 55'15''	072 04'37''	1	1
	Coin supérieur droit	045 48'04''	071 19'23''	6000	1
	Coin inférieur gauche	045 23'58''	072 16'45''	1	6000
	Coin inférieur droit	045 16'50''	071 31'55''	6000	6000

3.2.2 Choix d'images pour notre recherche

3.2.2.1 Image HRVIR, HRV et VEGETATION acquises pour cette recherche

Le tableau 3.4 regroupe toutes les images, de basse et de haute résolution spatiale, que nous avons acquises pour cette recherche. Les images de basse résolution VEGETATION s'étalent sur la période allant de janvier à mai 1999. Pour chacun des mois, nous avons acquis trois images en

moyenne. Cela permet d'avoir une bonne couverture temporelle pour suivre le passage d'un état de couvert total de neige à l'état opposé. Ces images couvrant tout le Québec, elles pourraient servir à d'éventuelles applications de la méthodologie au Nord du Québec (Baie James). Pour les images de haute résolution spatiale, le choix est restreint dans l'espace comme dans le temps. Cela veut dire qu'en plus de couvrir la région de la ville de Sherbrooke, elles devaient être acquises pendant la période où cette région est couverte partiellement de neige. Dans les cas des applications de télédétection dans les domaines du visible, proche et moyen infrarouge du spectre électromagnétique, les nuages constituent un écran naturel qui masque l'information au niveau du sol. Toutes les images choisies, qu'elles soient du type VGT, HRVIR ou encore HRV, devaient être le plus que possible exemptes de nuages.

Tableau 3.4: Images VEGETATION, HRVIR et HRV, acquises pour notre étude

Satellite	Capteur	Mois	Date	Identification du produit	
SPOT 4	V E G E T A T I O N	Janvier	29	19990129B056	
		Février	8	19990208E144	
			23	19990223E153	
		Mars	5	19990305E010	
			27	19990327E032	
		Avril	2	19990402E250	
			5	19990405E106	
			11	19990411E053	
		Mai	2	19990502E219	
			6	19990506E091	
			11	19990511E248	
			HRVIR	Avril	11	4 628-258 990411155433 1I/0
	SPOT-2	HRV	Avril	2	2 628-258 990402155555 2p/0

3.2.2.2 Images de haute résolution spatiale HRVIR et HRV

Les images de haute résolution spatiale ont été commandées à Spotimage avant le passage prévu du satellite SPOT4 à proximité de la région de Sherbrooke. Toutefois, il fallait tenir compte des trois facteurs suivants:

- Période pendant laquelle la région de Sherbrooke est partiellement couverte de neige
- Ciel dégagé et exempt de nuages.
- Orbite de passage du satellite favorable à l'acquisition d'images

Les deux seules images qui semblaient réunir le plus de ces conditions sont celles du :

- 2 avril 1999 : acquise avec le satellite SPOT2 en mode panchromatique (figure 3.1);
- 11 avril 1999 : acquise avec le satellite SPOT4 en mode multispectral (figure 3.2).

Dans l'image du 11 avril, le compromis n'était pas complètement réalisé puisqu'il y avait présence d'un couvert nuageux. Il faut préciser que nous n'avons pas vraiment le choix de la date exacte pour l'acquisition des images, **Spotimage** seule pouvait décider de cette date. Cela avait malheureusement comme conséquence l'impossibilité de faire une campagne de terrain pour valider les résultats de la classification de cette image. L'image panchromatique du 2 avril était disponible dans l'archive de **Spotimage** et puisqu'elle contenait plus de neige nous l'avons pris. Cependant, elle ne peut être utilisée toute seule pour générer une carte d'occupation du sol. En fait, en étant une image panchromatique elle ne fournit qu'une seule et unique valeur de réflectance pour chacun de ses pixels. Sa classification est faite en la superposant avec l'image multispectrale du 11 avril 1999.



Figure 3.1: Image panchromatique HRV du 2 avril 1999, région de Sherbrooke

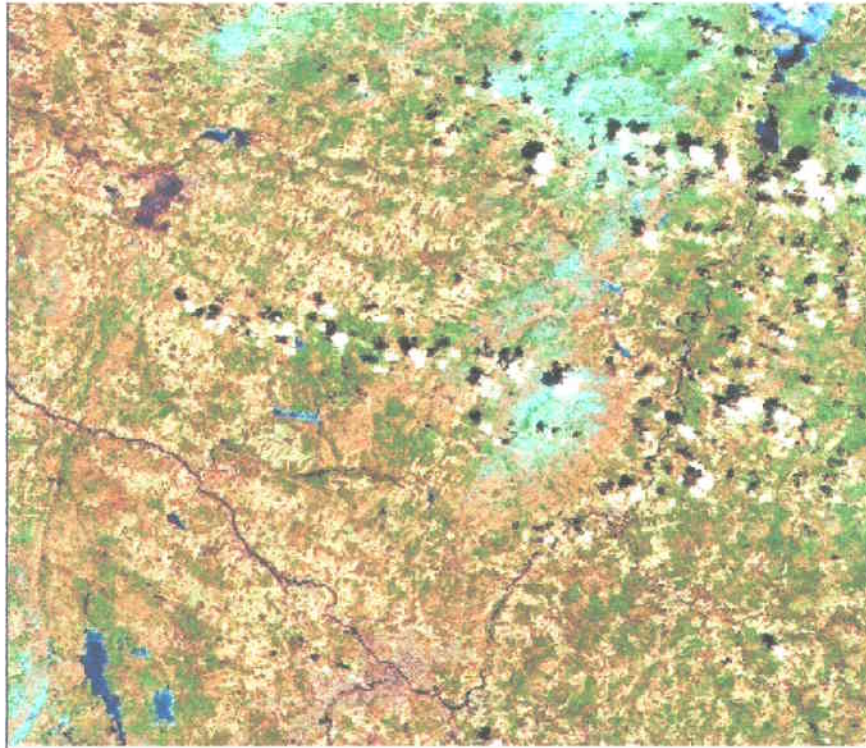


Figure 3.2: Image multispectrale HRVIR du 11 avril 1999, région de Sherbrooke

3.2.2.3 Images de basse résolution spatiale VEGETATION

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous avons besoin de trois catégories d'images VEGETATION de basse résolution spatiale de la région étudiée:

- Une image VGT sans neige qui servira comme référence,
- Une autre avec une couverture totale de neige qui servira aussi de référence, et
- Une ou plusieurs images VGT prises dans des conditions de couvert partiel de neige.

Pour les images prises durant la période du couvert partiel de neige (figure 3.3), évidemment nous avons pris celles acquises les mêmes jours que les images de haute résolution spatiale. C'est à dire, celles du 2 avril 1999 et du 11 avril 1999. En effet, pour pouvoir comparer l'estimation de la distribution du couvert nival extraite des indices de neige avec celle tirée des cartes d'occupation du sol, et établir les équations désirées, il fallait avoir des images de haute et de basse résolution spatiale acquises simultanément au-dessus de la même région. En plus de ces deux images VEGETATION, nous avons retenu deux autres pour l'application de la méthodologie. Ces deux images datent respectivement du 27 mars et du 5 avril 1999.

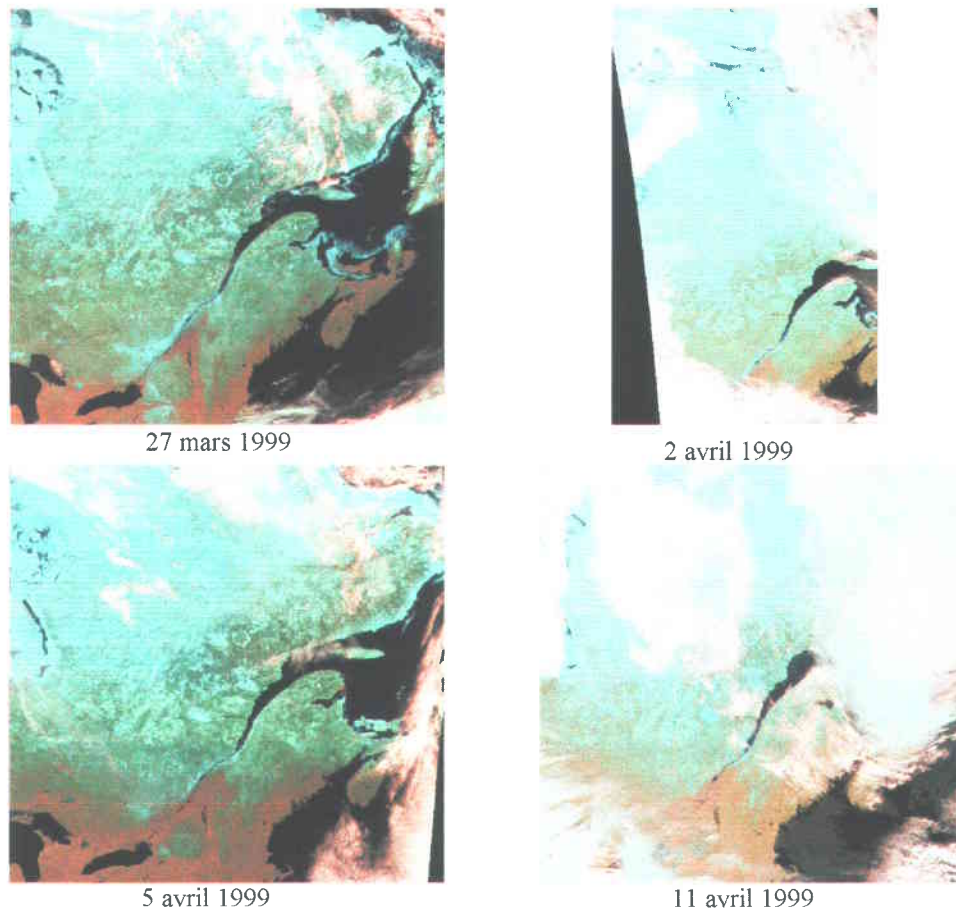


Figure 3.3: Images VGT avec couvert partiel de neige au-dessus du sud du Québec.

L'image qui a été choisie comme référence avec un couvert total de neige est celle du 8 février. Elle a été choisie parmi quatre images VGT, respectivement du 29 janvier, 8 février, 23 février et 5 mars, disponibles durant l'hiver 1999 (figure 3.4). En effet, l'image du 8 février apparaît comme celle où il y a la plus bonne répartition spatiale de la neige sur notre région d'étude. En plus, elle a exactement les mêmes paramètres de projection que l'image VGT du 11 avril 1999 (annexe A).

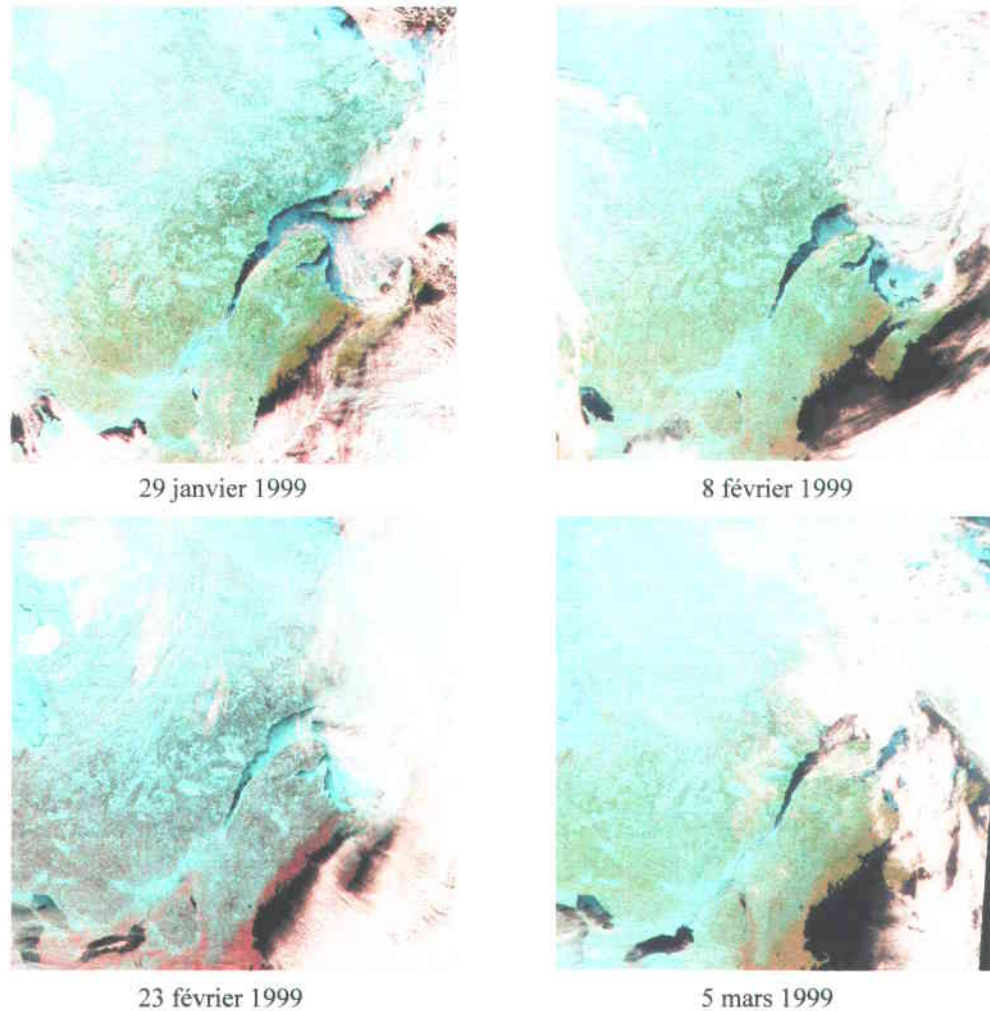


Figure 3.4: Images VGT avec couvert total de neige au-dessus du sud du Québec.

L'image considérée comme référence sous des conditions d'absence de neige a été retenue en tenant compte des deux facteurs suivant :

- Les changements de réflectance des classes d'occupation du sol, doivent être dus essentiellement à l'effet de la neige. En effet, les indices de neige, extraits des réflectances des

images VGT, doivent être liés à la neige et non pas à d'autres phénomènes, tels que la croissance de la végétation.

- Les variations saisonnières de l'angle zénithal solaire, du rayonnement incident, ne doivent pas influencer les variations des réflectances.

Une image d'automne s'ajuste parfaitement au premier critère. En effet, entre des images acquises en automne, en plein hiver ou en période de fonte printanière, il n'y a pas le phénomène de la croissance du couvert végétal. Cependant, les différences entre les angles zénithaux solaires d'automne d'une part, et ceux d'hiver et du printemps d'autre part, peuvent influencer négativement les indices de neige. Toutefois, l'angle zénithal solaire varie moins entre avril et mai qu'entre avril et novembre. Un compromis a été réalisé en prenant comme hypothèse que les comportements spectraux d'une image de printemps sont plus acceptables. Nous avons donc le choix entre trois images acquises au début du mois de mai 1999, respectivement les 2, 6 et 11 mai (figure 3.5). Celle du 06 mai a été écartée puisqu'elle était couverte de nuages dans le sud du Québec. Finalement, l'image VGT retenue est celle du 2 mai 1999, puisqu'elle présente moins de risque que l'image du 11 mai concernant le changement du comportement spectral de la végétation et qu'elle a exactement les mêmes paramètres de projections que celles du 11 avril et du 8 février.

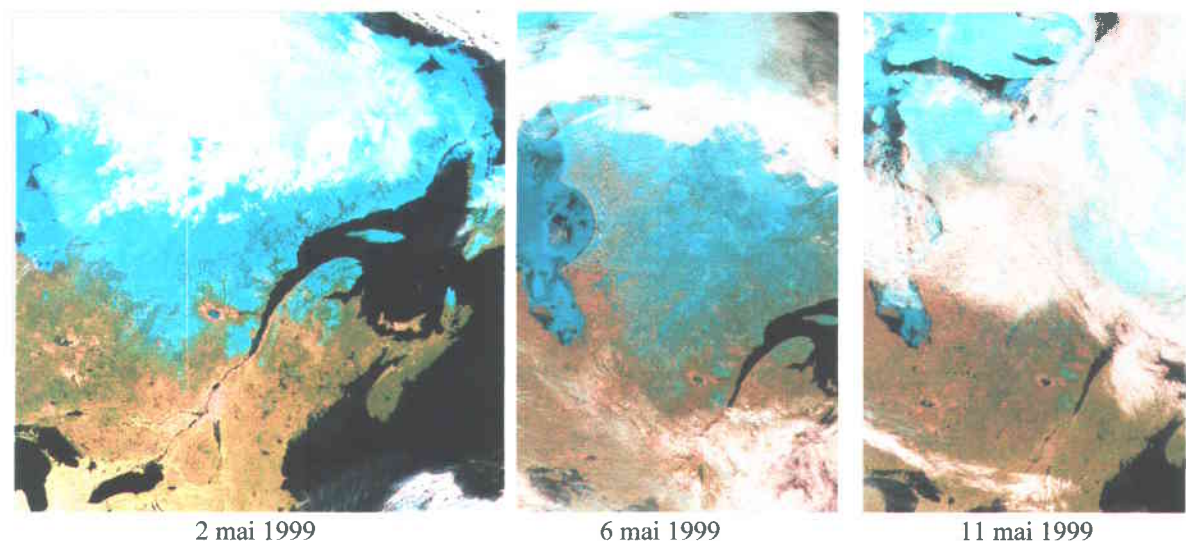


Figure 3.5: Images VGT sans couvert de neige au-dessus du sud du Québec.

3.3 Pré traitements appliqués aux images choisies

3.3.1 Corrections atmosphériques

L'atmosphère terrestre est l'obstacle naturel entre la surface de la terre et les capteurs à bord des satellites. En effet, le rayonnement solaire traverse deux fois l'atmosphère avant d'aboutir aux capteurs. L'exactitude de la luminance des différents objets au sol, perçus par les capteurs, dépend alors des perturbations induites par l'atmosphère au rayonnement en provenance de ces objets (figure 3.6). Dans le domaine visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique, le phénomène perturbateur prédominant est l'atténuation par absorption et diffusion (Bonn et Rochon, 1996). Il est causé principalement par l'absorption moléculaire due aux gaz, ainsi que par la diffusion et l'absorption causées par les molécules, la brume et les particules de poussières (Bernier, 1989). Comme le montre la figure 3.6 cela a pour effet de perturber le rayonnement réfléchi par un objet au sol, en lui ajoutant un rayonnement parasite et/ou en le diminuant. La diffusion moléculaire est due à l'absorption des photons par les atomes ou molécules et à la réémission par ces atomes ou molécules d'un rayonnement électromagnétique de même fréquence que celui incident (Bonn et Rochon, 1996). Dans le cas où la taille des molécules ou des particules est nettement plus inférieure à celle de la longueur d'onde, cette diffusion est dite de Rayleigh. Ce type de diffusion affecte des rayonnements de longueurs d'onde situés entre 0.2 à 0.8 μm , alors que lorsque les particules diffusantes comme les vapeurs et aérosols sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du rayonnement considéré, cette diffusion est dite de Mie (Bonn et Rochon, 1996).

L'atmosphère constitue donc un obstacle majeur à l'analyse des valeurs de réflectance des objets au sol, surtout quand les images acquises sont prises à des dates différentes et servent à des études multitemporelles. Pour ces cas, les changements de luminances entre deux dates au-dessus de la même région sont attribués à des changements au sol, alors que c'est les variations de l'effet de l'atmosphère qui en sont la cause. (Bonn et Rochon, 1996). Pour pouvoir analyser les données au sol il faut donc éliminer les effets induits par l'atmosphère. Plusieurs modèles de correction atmosphériques ont été développés, citons entre autres les modèles LOWTRAN-7 (Kneizyz *et al.*, 1983), 5S (Tanré *et al.*, 1990) et SMAC (Rahman et Dedieu, 1994)

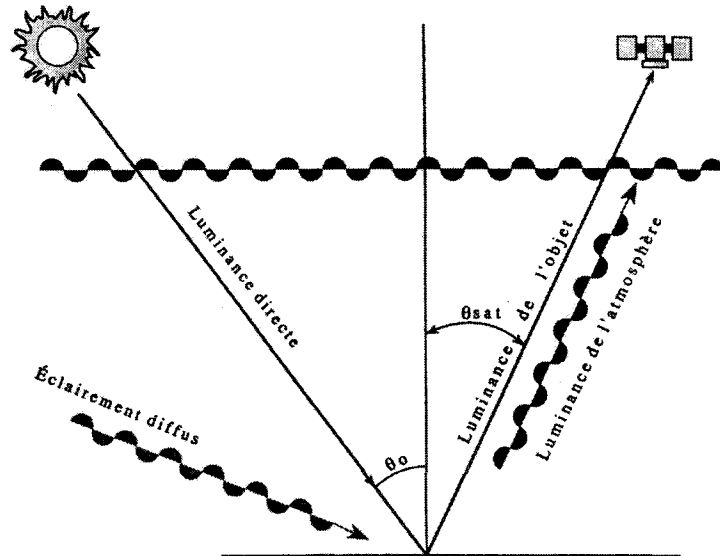


Figure 3.6: Schéma de la prise de données par satellite (Bonn et Rochon, 1996).

3.3.1.1 Images de haute résolution spatiale, HRVIR et HRV

Le programme de correction atmosphérique **ATCOR** est utilisé pour corriger les images de haute résolution spatiale, HRVIR et HRV. Ce programme, disponible dans le logiciel de traitement d'image PCI (version 6.3), a été développé par Richter (1990) et il se divise en plusieurs sous-programmes (figure 3.7). **ATCOR** est basé sur les modèles de correction atmosphérique LOWTRAN-7 (Kneizyz *et al.*, 1983) et SENSAT-3 (Richter, 1989). Ces modèles assument que les réflectances des cibles sont lambertiennes et que le relief est plat. L'avantage de l'utilisation du programme **ATCOR** est qu'il dispose d'un catalogue pour divers standards d'atmosphère et de types d'aérosols. Cela est très indispensable dans notre cas puisque nous ne disposons pas de données atmosphériques.

À noter que durant la période au cours de laquelle les images ont été traitées, le programme **ATCOR** [PCI version 6.3] ne supportait pas encore le satellite SPOT4, ni la bande panchromatique de SPOT2. Cependant, les bandes B1, B2 et B3 sont les mêmes pour les capteurs HRV de SPOT2 et HRVIR de SPOT4 (tableau 3.1). En fournissant les nouveaux coefficients de calibration absolue, nous avons pu faire la correction atmosphérique des trois premières bandes spectrales de l'image HRVIR de SPOT4.

Toutefois, nous n'avons pas réussi à corriger ni la quatrième bande spectrale de l'image HRVIR, ni l'image panchromatique HRV utilisée. Les valeurs de réflectances de cette dernière image n'ont servi que pour faire une classification [neige-(non neige)], en posant comme hypothèse que l'effet de l'atmosphère n'affectait pas cette classification de manière importante.

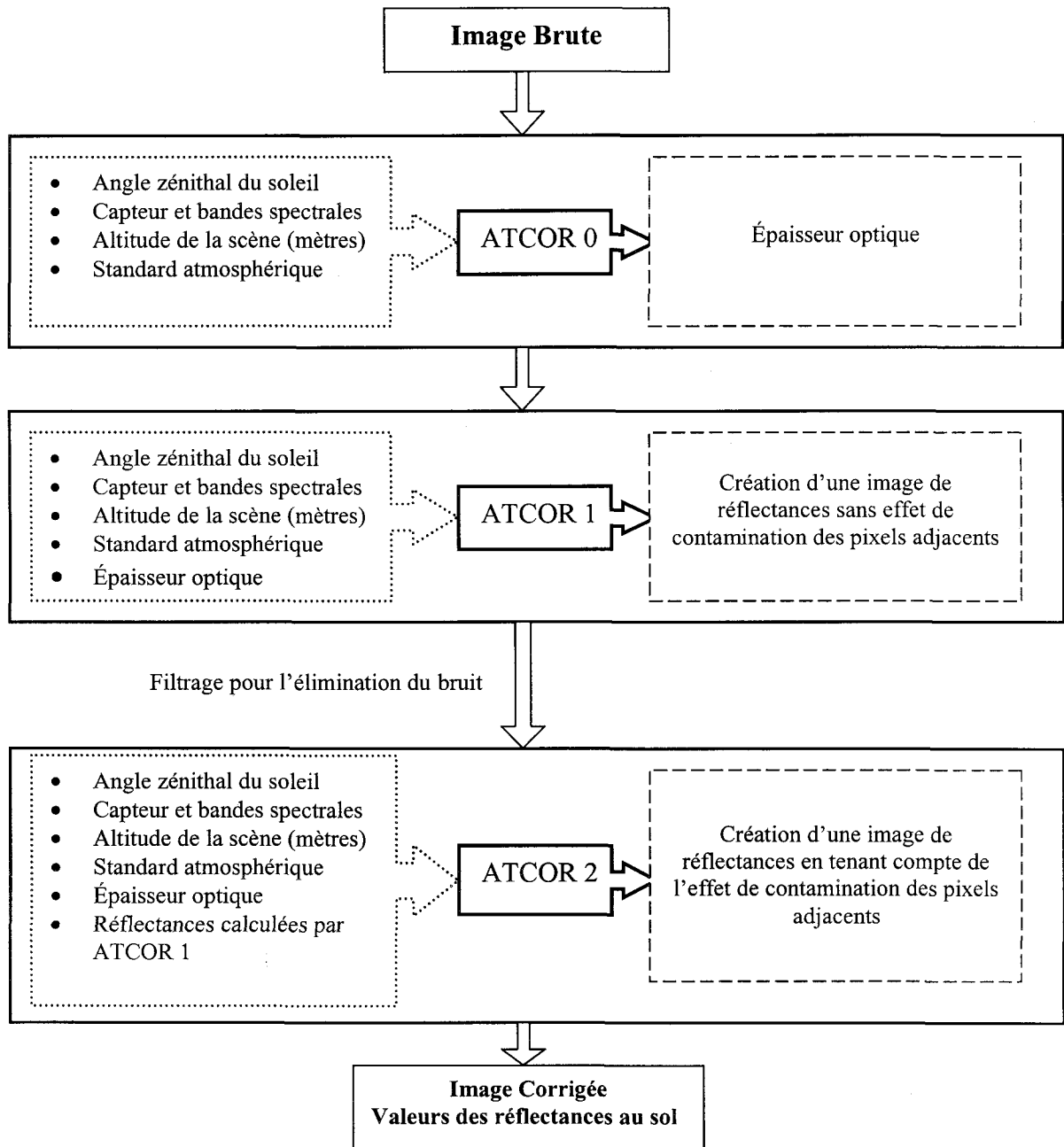


Figure 3.7: Schéma de principe de la correction atmosphérique à l'aide du programme ATCOR

3.3.1.2 Images de basse résolution spatiale VEGETATION

La correction atmosphérique des images de basse résolution spatiale VEGETATION a été faite avec la dernière version du programme SMAC (Rahman et Dedieu, 1994). Ce programme fait appel aux données auxiliaires fournies avec l'image VGT (tableau 3.2). Ces données concernent les angles, zénithaux et azimutaux, solaires et de la prise vue, ainsi que les grilles de vapeur d'eau,

d'ozone et d'aérosols troposphériques à 550 nm. En utilisant SMAC toutes les bandes spectrales des images VGT ont été corrigées.

Nous n'avons pas pu corriger les deux types d'images, VEGETATION et HRVIR, avec le même modèle de correction atmosphérique parce que :

- Le Modèle SMAC utilise, parmi ses paramètres d'entrée, la réflectance non-corrigée de l'effet de l'atmosphère. Pour les images VGT cette réflectance est obtenue en appliquant l'équation 3.1 sur les valeurs numériques du fichier correspondant à la bande spectrale. (Tableau 3.2).
- Pour l'image HRVIR, cette extraction des valeurs de réflectances n'a pu être faite qu'avec le programme ATCOR.

3.3.2 Corrections géométriques

3.3.2.1 Corrections géométriques apportées aux images de haute résolution spatiale HRVIR et HRV

Les images de haute résolution spatiale dont nous disposons ne suivent aucune projection cartographique (section 3.1.2.2.2). Afin de pouvoir les superposer, entre elles et avec les images VGT, il était nécessaire d'effectuer des corrections géométriques. Étant donné que les images VGT ont été projetées en [Albers Conical Equal-Area (ACEA)], les images de haute résolution spatiale devaient suivre cette même projection. En utilisant le programme **OrthoEngine** du logiciel de traitement d'image PCI (version 6.3) nous avons effectué les deux corrections géométriques, image à image, suivantes :

- Correction géométrique de l'image HRVIR du 11 avril 1999 en ACEA. Cette correction est faite en relevant des points de contrôles (GCP) sur une image LANDSAT TM, de la même région, géoréférencées en UTM (Universel Transverse Mercator). OrthoEngine transforme les coordonnées UTM en ACEA.
- Correction de l'image HRV du 2 avril 1999 en utilisant l'image HRVIR précédemment géoréférencée.

3.3.2.2 Correction des erreurs de positionnement des localisations géographiques

La correction des erreurs de positionnement, s'il y a lieu, est indispensable pour pouvoir ajuster les images VGT. En effet, et comme nous l'avons déjà expliqué (section 3.1.3), les informations sensées être de la même cible au sol risquent d'être décalées. L'estimation de ces décalages a été

faite en appliquant la méthodologie expliquée au chapitre 2 (section 2.2). La grille de classification a été générée de l'image HRVIR du 11 avril 1999. Les résultats de l'estimation des erreurs de positionnement des localisations géographiques sont présentés au chapitre 5.

3.3.3 Classification des images HRVIR et HRV

La classification des images de haute résolution spatiale consiste à attribuer à chaque pixel, dépendamment de son comportement spectral (figure 2.7), une classe d'occupation du sol. En effet, la signature spectrale d'un pixel est l'ensemble des valeurs de réflectance qui lui sont assignées dans les différentes bandes spectrales. La classification d'une image consiste donc à regrouper les pixels d'une image qui ont des signatures spectrales sensiblement semblables (PCI geomatics, 1997).

3.3.3.1 Classification de l'image HRVIR

L'image HRVIR du 11 avril 1999 a été classifiée à l'aide du programme **ImageWorks** du logiciel de traitement d'image **PCI** (version 6.3). Vu l'existence dans nos archives de deux images classifiées de la région de Sherbrooke, une classification supervisée avec sites d'entraînements a été adoptée. La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour la segmentation de l'espace spectral. Le tableau 3.5 regroupe les résultats de cette classification.

La classification de cette image était un peu difficile, et ce du fait que la qualité de l'image permettait une classification très détaillée. En fait, nous avons pu séparer plus de quarante-deux classes, cependant pour notre recherche nous n'avons besoin que d'une classification sommaire. A noter, que des nuages et leurs ombres occupent à peu près 6% de cette image, ils masquent malheureusement une partie de la zone centrale de l'image, là où le couvert partiel de neige persiste encore (figure 3.2). Dans cette image, les forêts de conifères et de feuillus constituent 55.4% de l'occupation du sol, les zones découvertes y occupent 37.1%, les eaux, nuages, ombres occupent les 7.5% qui restent. Le pourcentage total du couvert nival ne dépasse pas 10%. La figure 3.8 et le tableau 3.5 présentent les résultats de cette classification.

3.3.3.2 Classification de l'image HRV

L'image HRV du 2 avril 1999 est une image panchromatique. De ce fait, chacun de ses pixels est relié à une seule valeur de réflectance. D'où l'impossibilité d'extraire des signatures spectrales et de faire une classification comme celle réalisée avec l'image HRVIR. Cependant, vu que la neige se distingue très bien, dans ce domaine spectral, des autres classes d'occupation du sol, nous

avons séparé les pixels couverts de neige de ceux qui ne le sont pas. La figure 3.9 présente les résultats de cette classification.

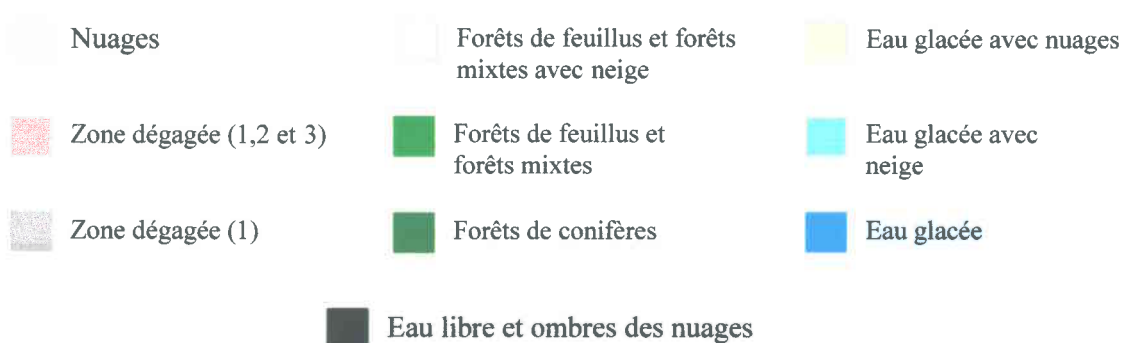
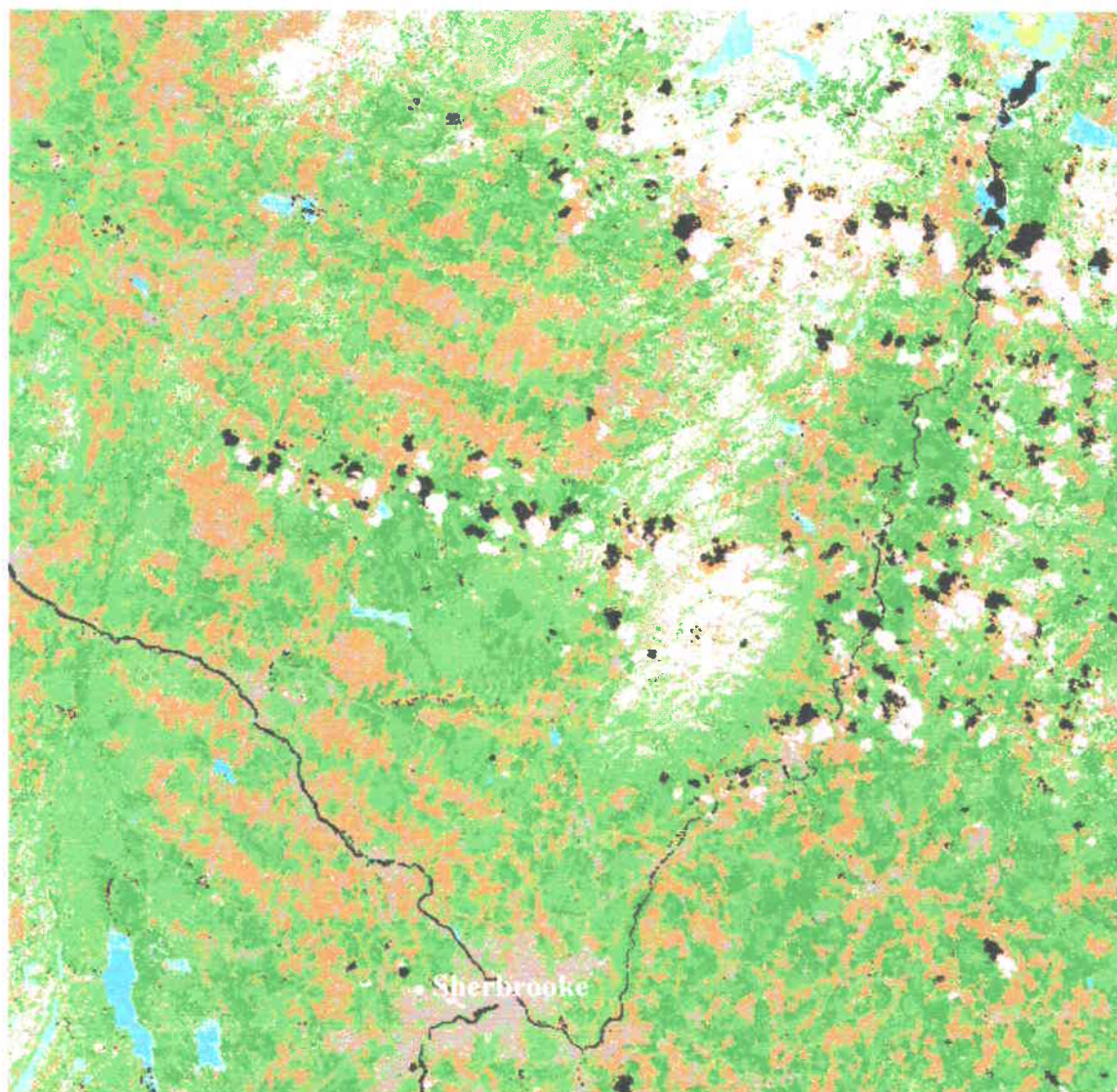


Figure 3.8: Classification de l'image HRVIR du 11 avril 1999

Tableau 3.5: Résultats de la classification de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 Avril 1999

Classes d'occupation du sol	Pourcentage dans l'image	Réflectance %											
		B1 HRVIR		B2 HRVIR		B3 HRVIR		B4 HRVIR					
		Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET				
Nuages	3.7	23.18	12.35	24.92	12.1	35.73	11.31	25.18	9.22				
Eau libres et Ombres des nuages	2.2	2.30	1.19	2.50	1.15	5.24	2.79	4.66	1.85				
Forêt mixte avec neige	3.7	11.47	5.01	13.33	4.74	22.32	3.47	13.02	3.17				
Forêt ouverte avec neige (1)	1.7	20.06	8.69	22.41	8.53	29.70	6.07	11.03	3.18				
Eau glacée	0.7	13.28	4.5	12.61	3.8	10.04	3.11	4.27	3.23				
Forêt de feuillus denses *	12.9	5.02	1.15	6.94	1.48	17.73	2.48	17.72	3.31				
Forêt de feuillus peu denses*	5.8	6.51	1.24	9.44	1.38	20.47	2.5	21.95	3.15				
Zone dégagée* (1)	12.9	7.69	2.8	9.72	2.78	18.82	3.85	16.40	3.72				
Zone dégagée* (2)	5.6	5.48	3.01	6.55	2.85	13.12	4.37	10.11	3.5				
Zone dégagée* (3)	7.9	7.59	1.69	10.32	1.89	24.04	3.07	20.00	3.31				
Zone dégagée* (4)	10.7	10.02	2.05	13.88	2.47	26.92	4.1	24.83	3.73				
Forêt de conifères*	16.1	3.91	1.47	4.36	1.41	18.66	2.44	10.00	2.23				
Forêt mixte*	11.8	5.62	2.22	6.70	2.15	20.79	3.02	13.30	3.77				
Eau glacée avec de la neige (1)	0.7	27.30	8.89	26.37	8.36	19.92	7.06	3.18	1.34				
Forêt ouverte avec neige	1.4	12.89	8.33	14.16	8.45	24.04	5.91	8.40	1.9				
Eau glacée et nuage	0.1	32.14	8.35	31.59	7.69	29.80	8.85	15.19	7.87				
Eau glacée avec de la neige (2)	0.1	44.39	8.69	43.96	7.61	35.76	6.58	3.06	1.01				
Forêt de conifères peu denses avec neige	2.0	10.63	4.82	11.53	4.56	24.25	3.79	9.07	2.03				

* Sans neige

Les classes d'occupation du sol en gras sont celles dont la surface dépasse 5%

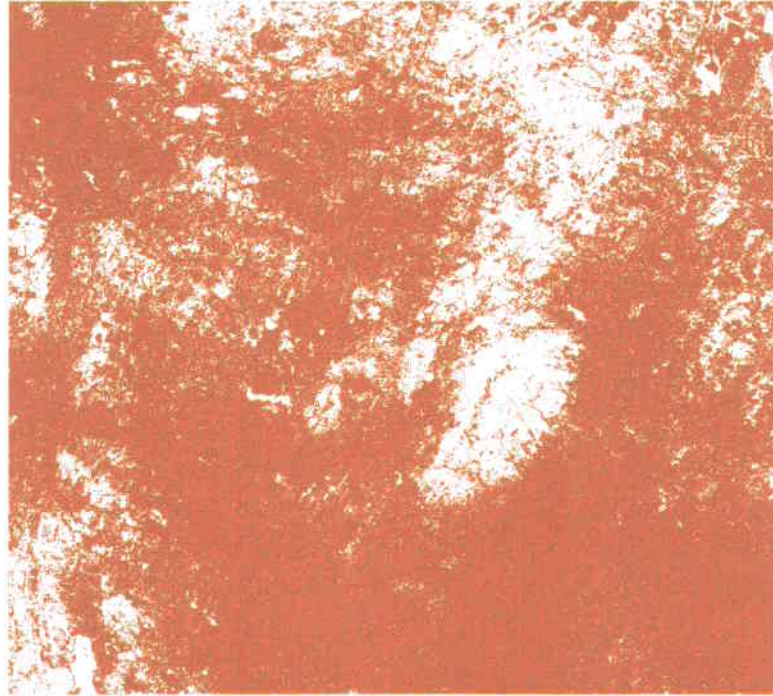


Figure 3.9: Classification [neige-(non neige)] de l'image HRV du 2 avril 1999

Le résultat de cette classification montre que le couvert nival occupe 25.07% de l'image et les zones non couvertes de neige 74.35% (0.56 % est hors de l'image).

Pour une classification plus poussée, nous avons superposé la classification de l'image HRVIR du 11 avril 1999 avec la classification neige-(non neige) réalisée sur l'image HRV. Les résultats sont montrés à la figure 3.10 et au tableau 3.6.

Tableau 3.6: Résultats de la classification de l'image HRV du 2 avril 1999

classes	pourcentages
Nulle : Nuages, ombres et les eaux	7.4
Forêt de feuillus et mixtes sans neige	24.03
Forêt de feuillus et mixtes avec neige	13.15
Zones découvertes sans neige	29.83
Zones découvertes avec neige	7.79
Conifères	17.77

On remarque que le pourcentage de neige total passe de 25.07%, avec la classification neige non-neige, à 20.94% en utilisant la classification superposée. Cela est dû tout simplement à l'existence de la classe nulle qui est issue de l'image HRVIR et ne peut être éliminée, ce qui fait que l'effet des nuages et leur ombres se répète dans l'image HRV même si cette dernière est exempte de nuages.

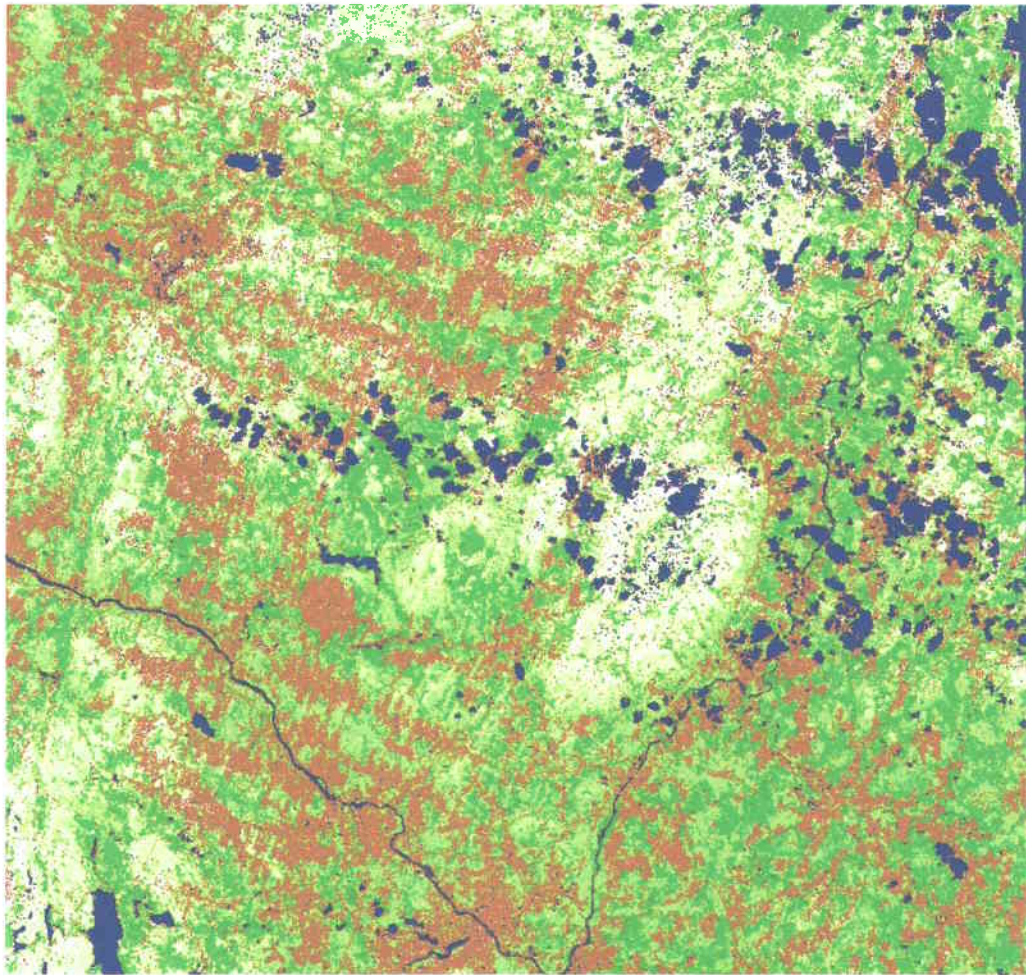


Figure 3.10: Classification de l'image HRV du 2 avril 1999

4 ESTIMATION DES RÉFLECTANCES DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL À PARTIR D'IMAGE VGT

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir de l'image VGT du 11 avril 1999. En effet, la réflectance d'un pixel VGT est représentative de l'ensemble des classes d'occupation du sol qu'il couvre. La méthodologie suivie pour cette estimation a été expliquée dans le chapitre 2 (section 2.1). Les deux informations indispensables pour cette estimation sont les suivantes :

- La réflectance des pixels VGT,
- La grille de classification haute résolution qui leur correspond.

Ce chapitre contient donc les résultats de l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol, le 11 avril 1999, dans la région de Sherbrooke. Cette estimation a été réalisée en utilisant conjointement une image VGT et une image HRVIR prises le même jour au-dessus de cette région. Dans un premier temps, pour essayer de contrôler les sources d'erreurs, nous avons simulé une image VGT à partir de l'image HRVIR du 11 avril. L'image simulée nous a servi pour:

- La détermination du nombre optimal de groupes de pixels VGT qui permettent une bonne estimation des réflectances.
- La détermination de l'effet de la précision de superposition des données VGT et HRVIR sur l'estimation des réflectances. Cela a été réalisé en simulant des décalages entre les réflectances issues de l'image VGT simulée et la grille de classification du sol (extraite de l'image HRVIR du 11 avril 1999).

Dans un deuxième temps, en tenant compte des résultats obtenus avec l'image VGT simulée, l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol a été faite directement de l'image VGT. Finalement, une section est consacrée à la discussion et aux commentaires sur les résultats.

4.1 Estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir de l'image VGT simulée

La simulation de l'image VGT à partir de l'image HRVIR, consistait à une dégradation spatiale de cette dernière. Il existe plusieurs manières pour faire cette dégradation, par exemple :

- L'utilisation de la fonction de transfert de la modulation (FTM) Justice *et al.*, (1989).
- L'utilisation d'un filtre moyen (figure 4.1), Cherchali (1995).

$r_{1;1}$	$r_{2;1}$	.....	$r_{49;1}$	$r_{50;1}$
$r_{1;2}$	$r_{2;2}$	.....	$r_{49;2}$	$r_{50;2}$
⋮	⋮	⋮	⋮
$r_{1;49}$	$r_{2;49}$	.....	$r_{49;49}$	$r_{50;49}$
$r_{1;50}$	$r_{2;50}$	.....	$r_{49;50}$	$r_{50;50}$

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^{50} \sum_{j=1}^{50} r_{i,j}}{2500}$$

Où

R : réflectance estimée d'un pixel VGT

i,j coordonnées des pixels VGT dans l'image VEGETATION

r : réflectance d'un pixel HRVIR

i,j coordonnées des pixels HRVIR au sein d'un pixel VGT.

Figure 4.1: Schéma de principe d'un filtre moyen (50 x 50)

Dans notre cas, nous avons utilisé la deuxième technique pour la simulation de l'image VGT à partir de l'image HRVIR du 11 avril 1999. L'image VGT simulée résultante est présentée à la figure 4.2. Sa taille est de 60×60 pixel.

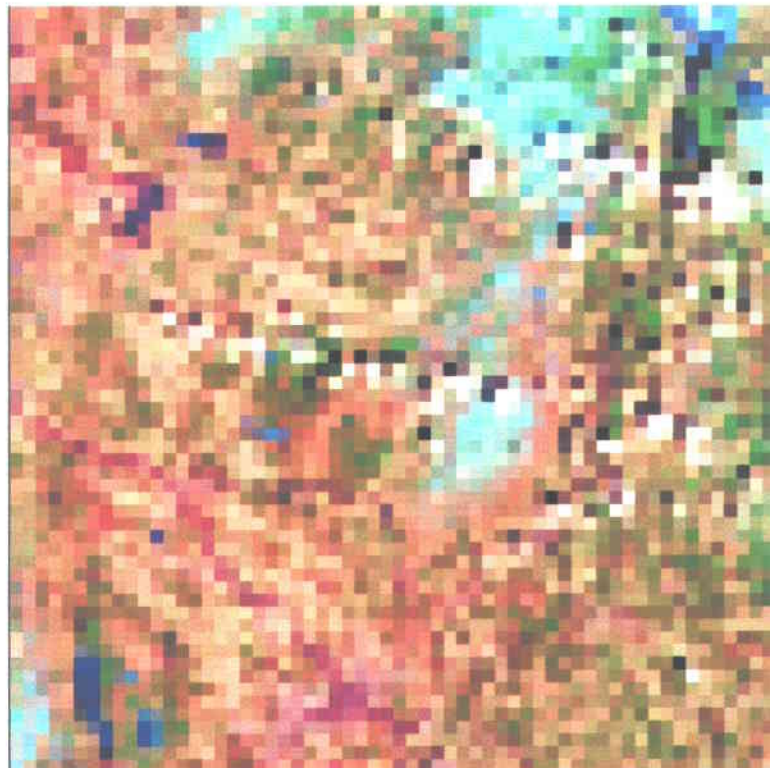


Figure 4.2: Image VGT du 11 avril 1999, simulée à partir de l'image HRVIR acquise simultanément

4.1.1 Détermination du nombre optimal de groupes de pixels

La détermination du nombre optimal de groupes de pixels vise la définition du nombre des groupes de pixels VGT permettant la meilleure estimation des réflectances. Comme critère d'évaluation nous avons utilisé l'erreur relative moyenne dans une bande spectrale donnée, ERMB (équation 2.5). La première étape consiste à estimer les réflectances des classes d'occupation du sol en utilisant d'un à dix groupes de pixel (tableau 4.1a, figure 4.3a et figure 4.4a). Cependant, il ne faut pas oublier que chacun de ces groupes est composé de $2n$ pixels VGT, n étant le nombre total de classes d'occupation du sol dans l'image HRVIR. La deuxième étape consiste à pondérer, pour chaque groupe de pixels, l'ERMB en fonction des proportions de surface qu'occupe chacune des classes d'occupation du sol. (tableau 4.1b, figure 4.3b et figure 4.4b). L'ERMB pondérée est définie par l'équation suivante :

$$ERMBP_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ER_{ij} \times p_j \quad \text{Équation 4.1}$$

où : $ER_{ij} = \frac{1}{r_{ij}} \cdot |\hat{r}_{ij} - r_{ij}| \cdot 100$

ER_{ij} : erreur relative dans la bande spectrale i de la classe d'occupation du sol j (équation 2.3);

p_j : proportion d'occupation du sol de la classe j dans l'ensemble de la grille de classification;

n : nombre total des classes d'occupation du sol.

Finalement, nous avons refait le calcul, mais cette fois, en n'utilisant que les classes d'occupation du sol dont la proportion de la superficie p_j est supérieure à 5% (tableau 4.1c, figure 4.3c et figure 4.4c).

Nous avons remarqué que le fait d'utiliser l' $ERMBP_i$ stabilise les résultats et en même temps diminue les erreurs. En effet, cela dépend des proportions d'occupation p_j de chaque classe dans l'image (figure 4.3c).

Ainsi, en n'utilisant que les ERMB leurs valeurs oscillaient entre 20% et 24% pour la bande B2 simulée, 11% à 15% pour la bande B3 simulée, et finalement de 20% à 22% pour la bande B4 simulée. L' $ERMBP_i$ donnait lieu à des valeurs moins élevées et moins oscillantes. Pour les trois bandes B2, B3 et B4 les résultats étaient respectivement de 20.12%, 10.10% et 13.94%.

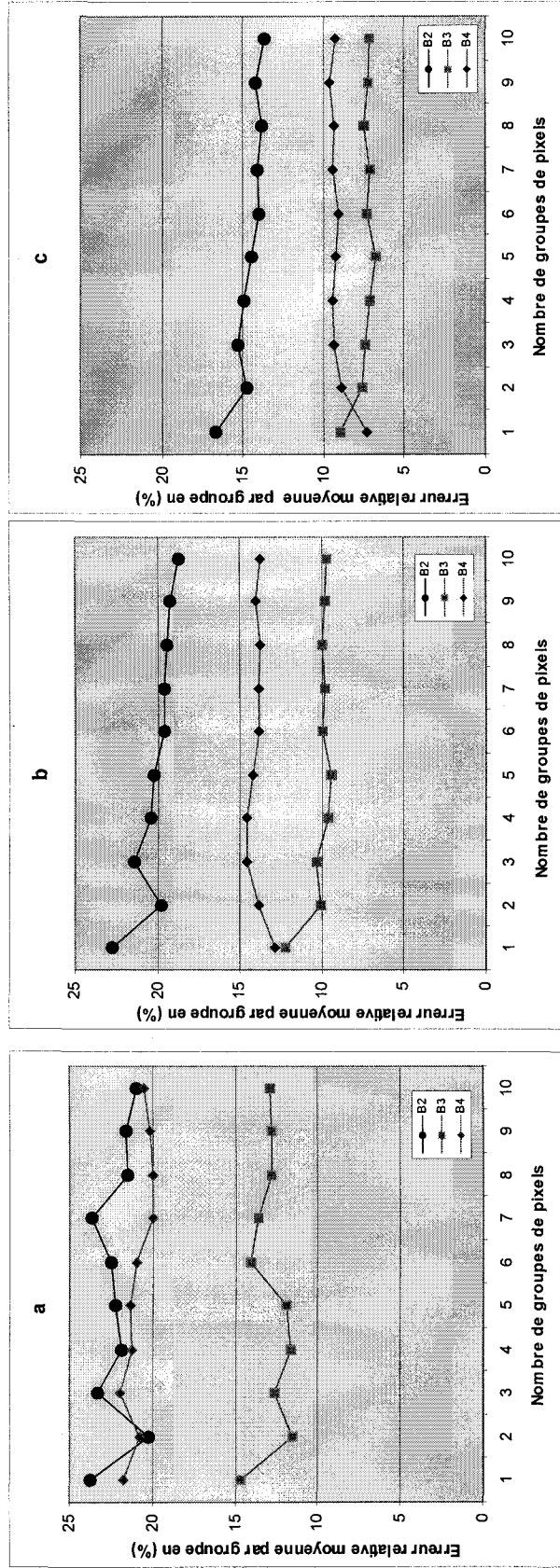
L' $ERMBP_i$ estimée en utilisant seulement les classes d'occupation du sol dont $p_j \geq 5\%$ donne lieu à des valeurs d'erreurs relatives plus stables et moins élevées. Elles ont ainsi été ramenées pour les mêmes trois bandes précédentes respectivement à 14.58%, 7.43% et 9.10%. Pour toutes les étapes qui vont suivre, le nombre optimal de groupes de pixels qui était ainsi retenu et utilisé est cinq, et ce, vu que les résultats obtenus sont constants quel que soit le nombre de groupes.

La figure 4.4 présente les résultats des estimations obtenues en utilisant d'un à dix groupes de pixels. Nous y constatons que, pour la majorité des classes d'occupation du sol, et en utilisant un à dix groupes de pixels, l'estimation des réflectances est relativement la même.

Tableau 4.1 : Effet de la pondération de l'erreur relative moyenne par bande en fonction de la proportion des classes d'occupation du sol (image VGT simulée du 11 avril 1999).

	Nombre de groupes de pixels										Moy- enne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a) ERMB sans pondération en fonction des proportions des classes d'occupation du sol											
B2 simulée	23.78	20.25	23.31	21.84	22.20	22.47	23.62	21.49	21.56	21.01	22.15
B3 simulée	14.71	11.57	12.59	11.65	11.92	14.06	13.65	12.77	12.81	12.91	12.86
B4 simulée	21.75	20.76	21.99	21.22	21.35	20.97	20.01	20.02	20.13	20.49	20.87
b) ERMB sans pondération en fonction des proportions des classes d'occupation du sol											
B2 simulée	22.73	19.77	21.37	20.43	20.27	19.58	19.65	19.41	19.27	18.73	20.12
B3 simulée	12.19	10.08	10.31	9.62	9.44	10.01	9.80	10.01	9.77	9.74	10.10
B4 simulée	12.90	13.86	14.57	14.60	14.21	13.82	13.86	13.79	14.01	13.80	13.94
c) ERMB sans pondération en fonction des proportions des classes d'occupation du sol pour les 8 classes dont la superficie est supérieure à 5%											
B2 simulée	16.70	14.74	15.30	14.90	14.50	13.97	14.06	13.87	14.15	13.63	14.58
B3 simulée	8.98	7.64	7.44	7.13	6.78	7.35	7.14	7.47	7.25	7.13	7.43
B4 simulée	7.31	8.86	9.38	9.43	9.29	9.10	9.45	9.35	9.59	9.22	9.10

ERMB : erreur relative moyenne par bande



a) Sans effet de pondération de l'ERMB en fonction du pourcentage d'occupation du sol des classes.
 b) Avec effet de pondération de l'ERMB en fonction du pourcentage d'occupation du sol des classes.
 c) Avec pondération en fonction des proportions des classes d'occupation du sol pour les 8 classes dont la superficie est supérieure à 5%.

Figure 4.3 : Effet de la pondération de l'erreur relative moyenne par bande spectrale simulée en fonction des proportions des classes d'occupation du sol

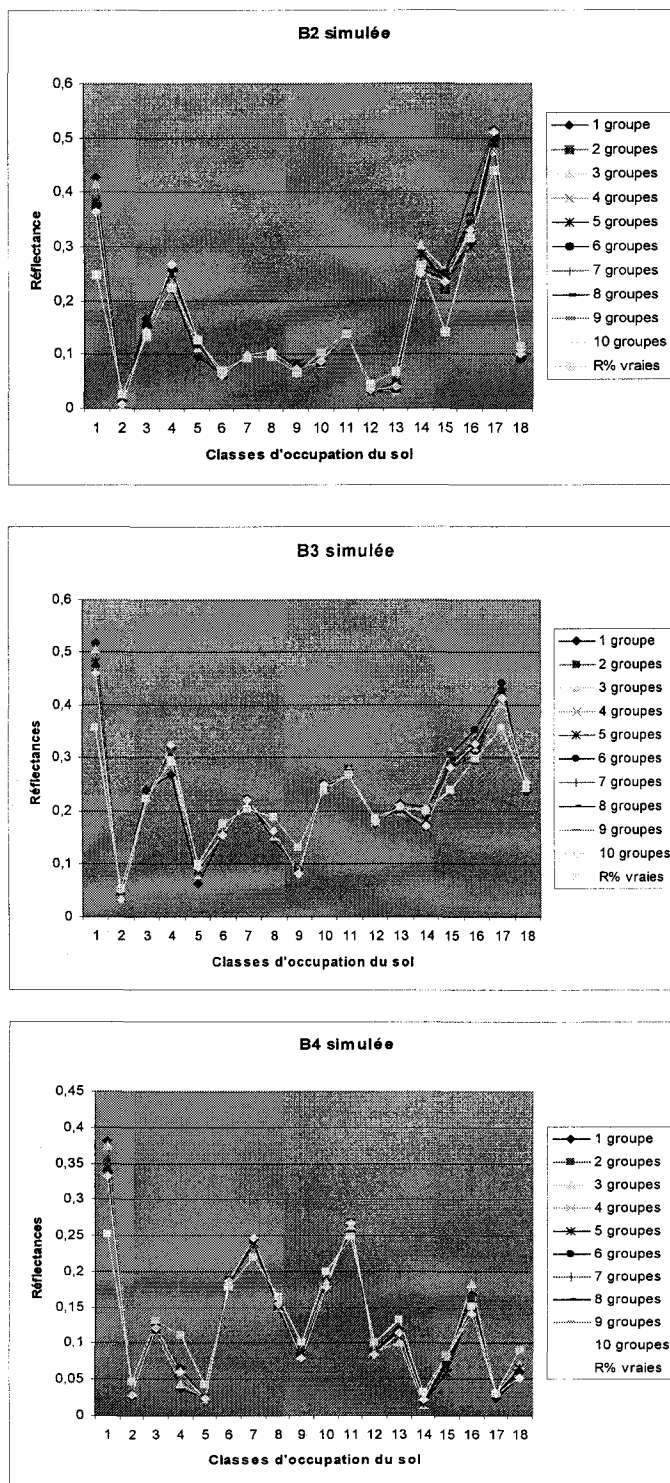


Figure 4.4 : Comparaison des résultats de l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol, à partir de l'image VGT simulée (11 avril 1999), en utilisant un à dix groupes de pixels.

4.1.2 Paramètres influençant l'estimation des réflectances

Dans cette partie, nous avons analysé l'effet des paramètres qui ont une relation avec les erreurs relatives sur l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol. Vu que notre image VGT est simulée, c'est sûr qu'il n'y a pas lieu à des erreurs de positionnement. Les questions dont nous cherchions les réponses sont les suivantes:

1. Est-ce que la représentativité en terme de superficie qu'occupe la classe dans l'image, influence l'estimation? Par représentativité nous entendons la superficie totale d'une classe dans l'image, et, aussi, la superficie qu'elle occupe dans chacun des $2n$ pixels qui servent à l'estimation. Donc, est-ce que les meilleurs pixels M_j^i de chaque classe d'occupation du sol, ont une influence sur les résultats?
2. Est-ce qu'il y a un effet de l'hétérogénéité (rapport de l'écart type sur la moyenne de la réflectance) de la réflectance des classes d'occupation du sol sur la qualité de l'estimation? En d'autres termes, supposons deux classes d'occupation du sol dont l'une est plus hétérogène que l'autre. Pour laquelle des deux l'estimation de la réflectance est la plus précise?
3. Est-ce que la qualité de l'estimation dépend de la grandeur physique de la vraie valeur de réflectance? En d'autres termes, s'il y a deux groupes de classes d'occupation du sol, l'un avec des valeurs élevées de réflectance et l'autre avec des basses. Est-ce que ce fait influence l'estimation?
4. Comment l'erreur de positionnement influence-t-elle, l'estimation des réflectances? Et à quel point le décalage entre l'image des réflectances (VGT) et la carte d'occupation du sol, altère-t-il la précision de l'estimation?

À noter que pour répondre à ces questions, nous avons utilisé les valeurs de réflectances estimées avec cinq groupes de pixels (tableau 4.2)

4.1.3 Effet de la représentativité des classes sur l'estimation des réflectances

Pour déterminer l'effet de la représentativité de la classe d'occupation du sol, sur l'estimation de sa réflectance, nous avons commencé par déterminer les dix meilleurs pixels M_j^i pour chaque classe d'occupation du sol (tableau 4.3). La moyenne de ces dix meilleurs pixels varie d'un minimum avoisinant 30% pour le cas des forêts ouvertes avec neige, jusqu'à un maximum de 83.29% pour les nuages. Par la suite, pour chaque classe d'occupation du sol, la moyenne de ses dix meilleurs pixels, le pourcentage total de l'image (%image), et l'erreur relative (calculée avec 5 groupes de pixels) par classe dans la bande spectrale considéré, ont été confrontés avec les autres classes d'occupation du sol (figure 4.5).

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec,
à l'aide du capteur VEGETATION

Tableau 4.2 : Résultats de l'estimation des réflectances de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 avril 1999 à partir de l'image VGT simulée.

Classes d'occupation du sol	Pourcentage d'occupation du sol	Réflectance											
		B2				B3				B4			
		HRVIR		simulée		HRVIR		simulée		HRVIR		simulée	
		Moyenne %	E-T	%		Moyenne %	E-T	%		Moyenne %	E-T	%	
1 Nuages	3.7	24.92	12.1	38.3	35.73	11.31	48.21	25.18	9.22	34.5			
2 Eaux libres et Ombres de nuages	2.2	2.50	1.15	0.77	5.24	2.79	3.62	4.66	1.85	2.86			
3 Forêt mixte avec neige	3.7	13.33	4.74	15.83	22.32	3.47	23.37	13.02	3.17	11.92			
4 Forêt ouverte avec neige (1)	1.7	22.41	8.53	25.02	29.70	6.07	30.86	11.03	3.18	6.26			
5 Eaux glacées	0.7	12.61	3.8	11.93	10.04	3.11	8.82	4.27	3.23	2.41			
6 Forêt de feuillus denses*	12.9	6.94	1.48	6.03	17.73	2.48	15.61	17.72	3.31	18.74			
7 Forêt de feuillus peu denses*	5.8	9.44	1.38	9.53	20.47	2.5	21.76	21.95	3.15	24.06			
8 Zone dégagée (1)*	12.9	9.72	2.78	10.45	18.82	3.85	15.77	16.40	3.72	15.11			
9 Zone dégagée (2)*	5.6	6.55	2.85	8.12	13.12	4.37	8.56	10.11	3.5	8.5			
10 Zone dégagée (3)*	7.9	10.32	1.89	8.49	24.04	3.07	24.58	20.00	3.31	17.68			
11 Zone dégagée (4)*	10.7	13.88	2.47	13.92	26.92	4.1	27.09	24.83	3.73	26.68			
12 Forêt de conifères*	16.1	4.36	1.41	3.41	18.66	2.44	18.36	10.00	2.23	8.34			
13 Forêt mixte*	11.8	6.70	2.15	3.69	20.79	3.02	20.34	13.30	3.77	11.38			
14 Eaux glacées avec de la neige (1)	0.7	26.37	8.36	28.64	19.92	7.06	18.26	3.18	1.34	1.63			
15 Forêt ouverte avec neige (2)	1.4	14.16	8.45	23.44	24.04	5.91	28.31	8.40	1.9	5.81			
16 Eaux glacées et nuage	0.1	31.59	7.69	29.88	29.80	8.85	30.55	15.19	7.87	15.33			
17 Eaux glacées avec de la neige (2)	0.1	43.96	7.61	49	35.76	6.58	42.69	3.06	1.01	2.91			
18 Forêt de conifères peu denses avec neige	2.0	11.53	4.56	9.61	24.25	3.79	24.35	9.07	2.03	6.54			

Les classes d'occupation du sol en gras ont un pourcentage d'occupation du sol $\geq 5\%$

E-T : écart-type

* Sans neige

Tableau 4.3: Proportions d'occupation du sol dans les dix meilleurs pixels pour chaque classe d'occupation du sol

Classes d'occupation du sol	% image	Max1	Max2	Max3	Max4	Max5	Max6	Max7	Max8	Max9	Max10	Moy- enne
1 Nuage	3.7	96.64	89.24	83.72	82.92	82.76	82.68	81.80	78.56	77.72	76.88	83.29
2 Eaux libres et Ombres de nuages	2.2	92.08	69.84	69.48	68.72	66.16	63.92	60.36	59.04	54.24	54.20	65.80
3 Forêt mixte avec neige	3.7	60.44	58.80	57.80	52.88	51.56	49.88	47.96	47.72	46.00	45.48	51.85
4 Forêt ouverte avec neige (1)	1.7	62.80	61.24	57.08	56.88	54.28	49.16	46.96	45.80	45.48	43.76	52.34
5 Eaux glacées	0.7	81.24	79.48	75.56	75.36	72.16	66.24	65.84	65.72	64.88	56.44	70.29
6 Forêt de feuillus denses*	12.9	86.24	70.48	68.76	65.96	65.16	65.16	63.44	59.48	59.28	58.56	66.25
7 Forêt de feuillus peu denses*	5.8	54.80	52.96	52.16	50.80	49.56	47.60	47.32	46.72	46.24	45.12	49.33
8 Zone dégagée (1)*	12.9	85.32	84.16	84.16	81.84	78.92	77.16	74.44	73.64	73.16	72.56	78.54
9 Zone dégagée (2)*	5.6	81.04	77.84	67.00	65.48	58.28	57.08	56.52	45.52	44.08	41.96	59.48
10 Zone dégagée (3)*	7.9	55.64	53.88	48.72	48.60	47.08	45.68	45.08	44.24	44.20	42.68	47.58
11 Zone dégagée (4)*	10.7	69.72	66.16	65.52	64.44	63.40	63.04	63.00	61.24	59.92	59.20	63.56
12 Forêt de conifères*	16.1	92.84	86.44	84.00	82.88	77.08	77.00	76.72	73.00	71.88	71.52	79.34
13 Forêt mixte*	11.8	47.84	46.24	45.16	43.72	43.72	43.60	43.08	42.28	41.00	40.16	43.68
14 Eaux glacées avec de la neige (1)	0.7	91.24	81.40	70.80	70.60	63.76	55.20	43.96	42.20	40.88	40.72	60.08
15 Forêt ouverte avec neige (2)	1.4	35.92	34.64	30.68	29.68	29.40	29.08	28.60	28.12	27.72	27.16	30.10
16 Eaux glacées et nuage	0.1	85.44	42.72	31.96	31.72	30.16	27.40	18.36	16.24	14.84	10.04	30.89
17 Eaux glacées avec de la neige (2)	0.1	42.72	38.92	29.36	28.68	24.04	23.08	21.80	20.96	19.36	18.52	26.74
18 Forêt de conifères peu denses avec neige	2.0	51.64	50.16	48.60	44.84	44.84	44.04	42.88	42.04	39.84	39.60	44.85

* Sans neige

Les classes en gras occupent chacune une superficie supérieure à 5% du total de l'image haute résolution du HRVIR du 11 avril 1999.

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec,
à l'aide du capteur VEGETATION

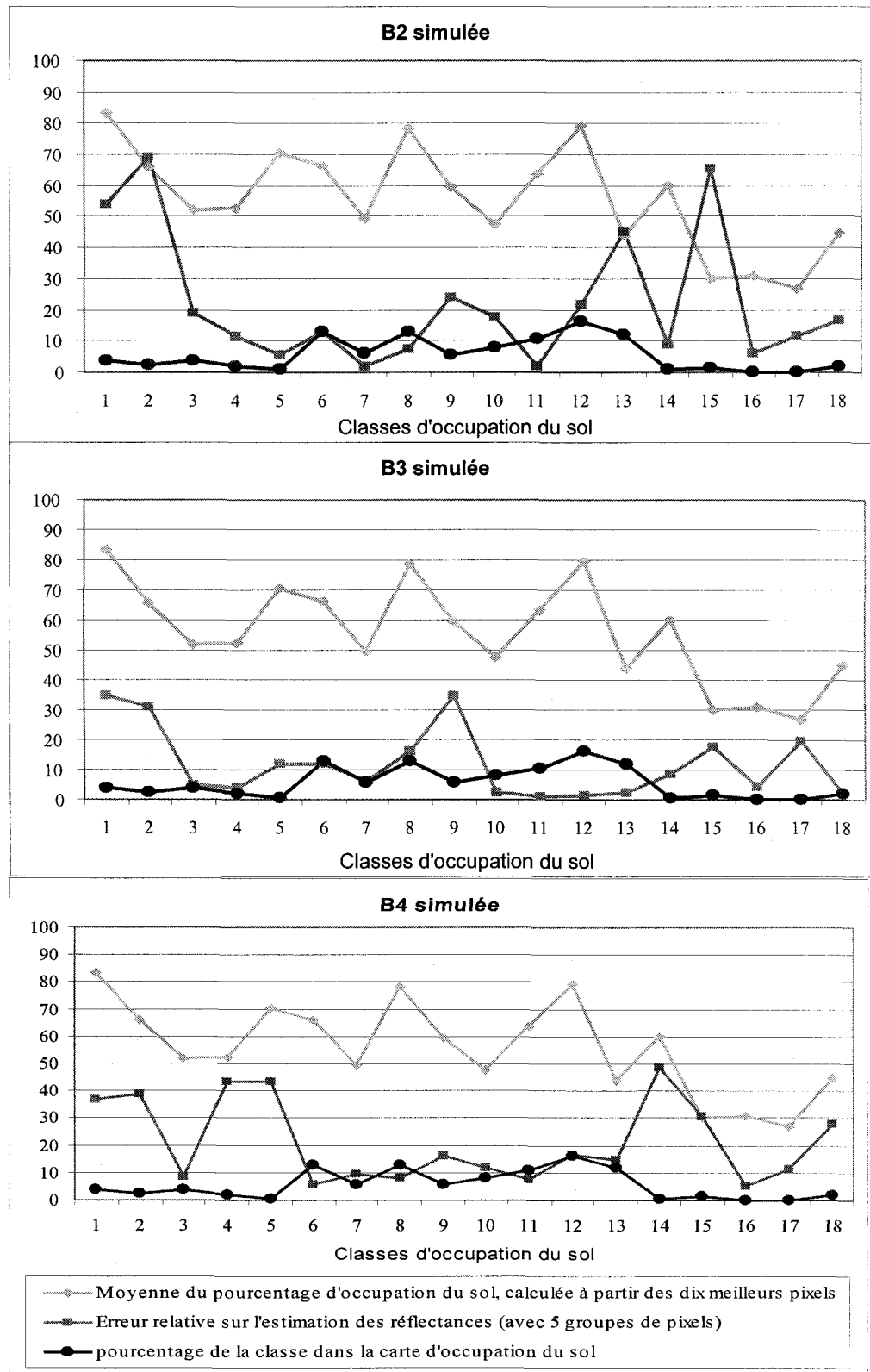


Figure 4.5 : Effet de la représentativité des classes d'occupation du sol sur l'erreur relative de l'estimation des réflectances (VGT simulée du 11 avril 1999).

De la figure précédente nous remarquons ce qui suit :

- Même si la moyenne des dix meilleurs pixels (tableau 4.3) est élevée, l'erreur relative sur l'estimation de la réflectance peut aussi être élevée. Cette constatation est évidente, dans les trois bandes simulées, pour les deux classes suivantes : nuages (class1), eaux libres et ombres de nuages (classe2). Pour ces deux cas, la moyenne des dix meilleurs pixel est respectivement de 83.29 et 65.80, l'erreur relative dans le bande B4 est respectivement de 38% et 39%. Cependant, le pourcentage total, en terme de surface, dans l'image est faible, respectivement, 3.7 % et 2.2%.
- Même si le pourcentage total de la classe d'occupation du sol dans l'image est relativement grand, cela ne signifie pas forcément que l'erreur est faible. Dans la bande B3 simulée, malgré que la classe 9 (zone dégagée 2) occupe 5.9% de l'image, elle a été estimée avec une erreur relative élevée : 35%. La classe 16 (Les eaux glacées avec nuages) a été estimée avec une erreur relative seulement de 4%, alors quelle n'occupe qu'une très faible proportion de la superficie totale de l'image (0.1%), et encore la moyenne des ses dix meilleurs pixels n'est que de 30.89% .

4.1.4 Effets de l'hétérogénéité et de la grandeur physique de la réflectance sur son estimation

Dans cette section, notre objectif était de déterminer l'effet de l'homogénéité (Vs hétérogénéité) des réflectances et de leur grandeur physique (petite valeur de réflectance Vs grande) sur l'estimation. L'homogénéité de la réflectance d'une classe signifie le rapport entre l'écart type et la moyenne de la vraie réflectance. Plus ce rapport est grand plus la classe est dite hétérogène et inversement, plus il est faible plus elle est dite homogène. Ainsi, nous avons tracé dans le même graphique (figure 4.6) et pour chaque bande spectrale simulée :

- La courbe du rapport de l'écart type et la réflectance moyenne de chaque classe, en fonction des classes d'occupation du sol, et
- La courbe de l'erreur relative sur l'estimation des réflectances (calculée avec 5 groupes de pixels) en fonction des classes d'occupation du sol.

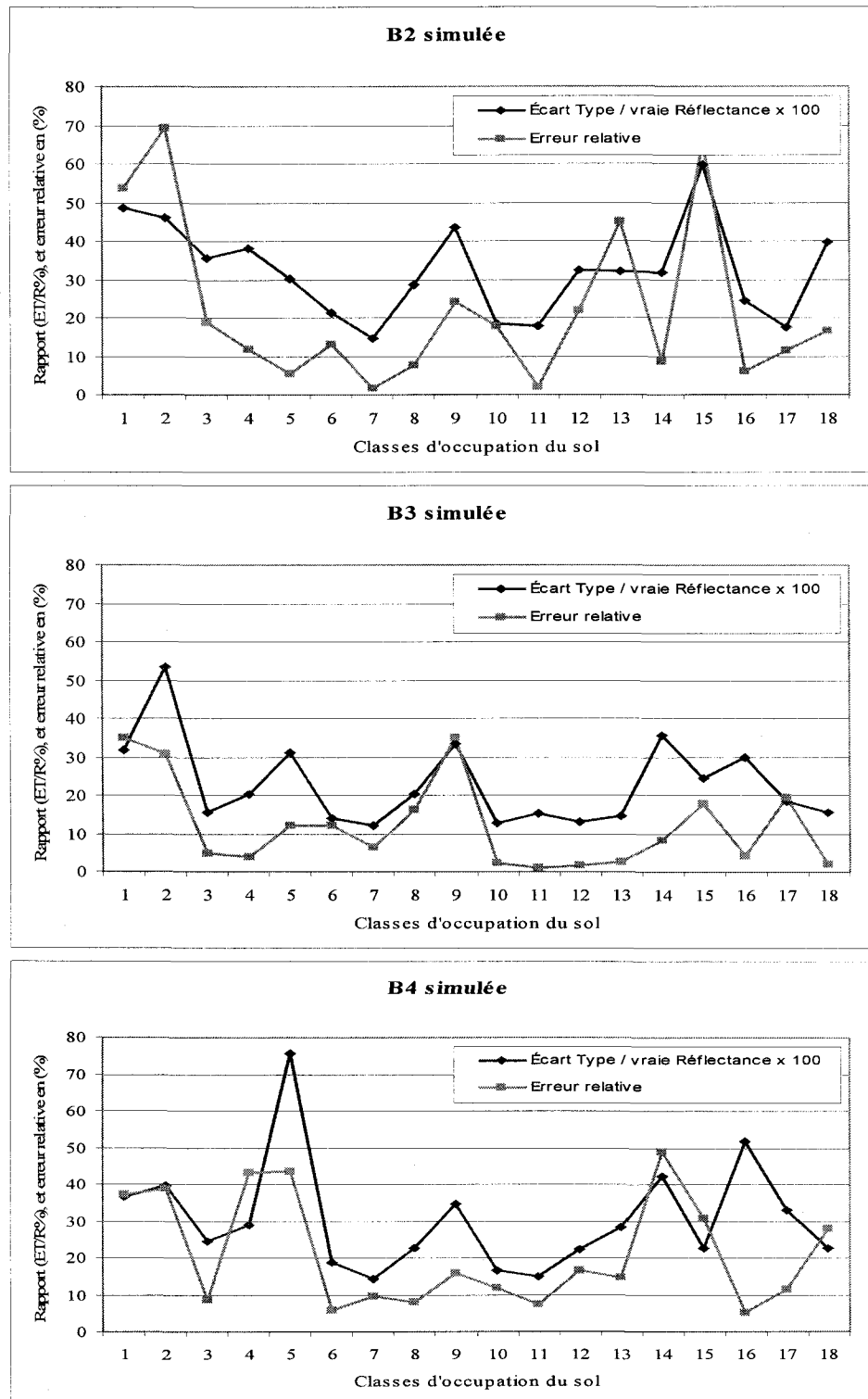


Figure 4.6 : Effet de l'hétérogénéité des classes d'occupation du sol sur l'erreur relative de l'estimation des réflectances (calculée à partir de 5 groupes de pixels).

Nous avons remarqué alors que les deux courbes ont les mêmes tendances de variabilité. Après un tel constat, il fallait vérifier le lien entre l'homogénéité de la réflectance et la précision de son estimation. En effet, pour mettre en évidence une telle relation nous avons décidé d'éliminer l'effet d'hétérogénéité. C'est ainsi que nous avons simulé une deuxième fois l'image VGT (figure 4.7) en fixant les valeurs de réflectance de l'image haute résolution HRVIR du 11 avril 1999. Cela signifie que pour chaque classe d'occupation du sol la réflectance n'est plus exprimée par une valeur moyenne et un écart type mais plutôt par une seule valeur (auparavant la moyenne). Dans ce cas pour toutes les valeurs de réflectances, l'hétérogénéité est nulle et l'homogénéité est parfaite.

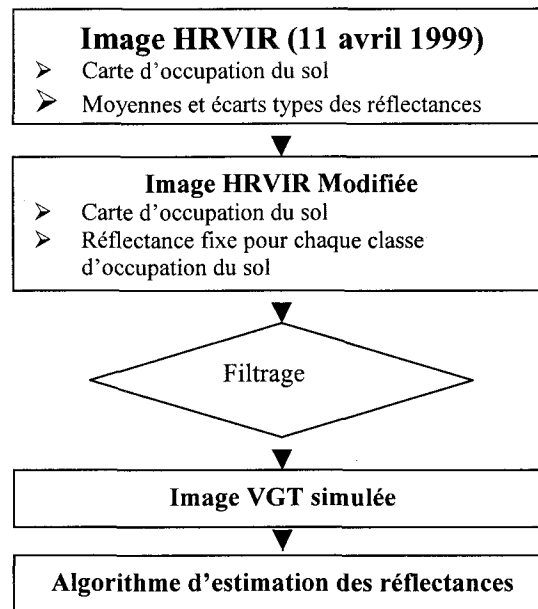


Figure 4.7 : Simulation de l'image VGT à partir d'une image HRVIR à réflectances fixes

Les résultats de l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol (figure 4.8), avec l'image VGT simulée à partir de l'image HRVIR à réflectances fixes, nous concrétisent l'effet de l'homogénéité des réflectances sur la qualité de l'estimation. En fait, l'élimination de l'effet de l'hétérogénéité a rendu l'estimation des réflectances parfaite. En plus, le fait que les valeurs des réflectances étaient grandes ou petites n'affecte pas d'une manière directe l'estimation des réflectances.

Dans la figure 4.8, l'utilisation d'un graphique à barres pour montrer l'exactitudes de l'estimation était incontournable. En fait l'utilisation d'un graphique à points ou encore à courbes aurait causé une superposition des points (ou courbes) et ainsi l'information recherchée aura été masquée.

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec,
à l'aide du capteur VEGETATION

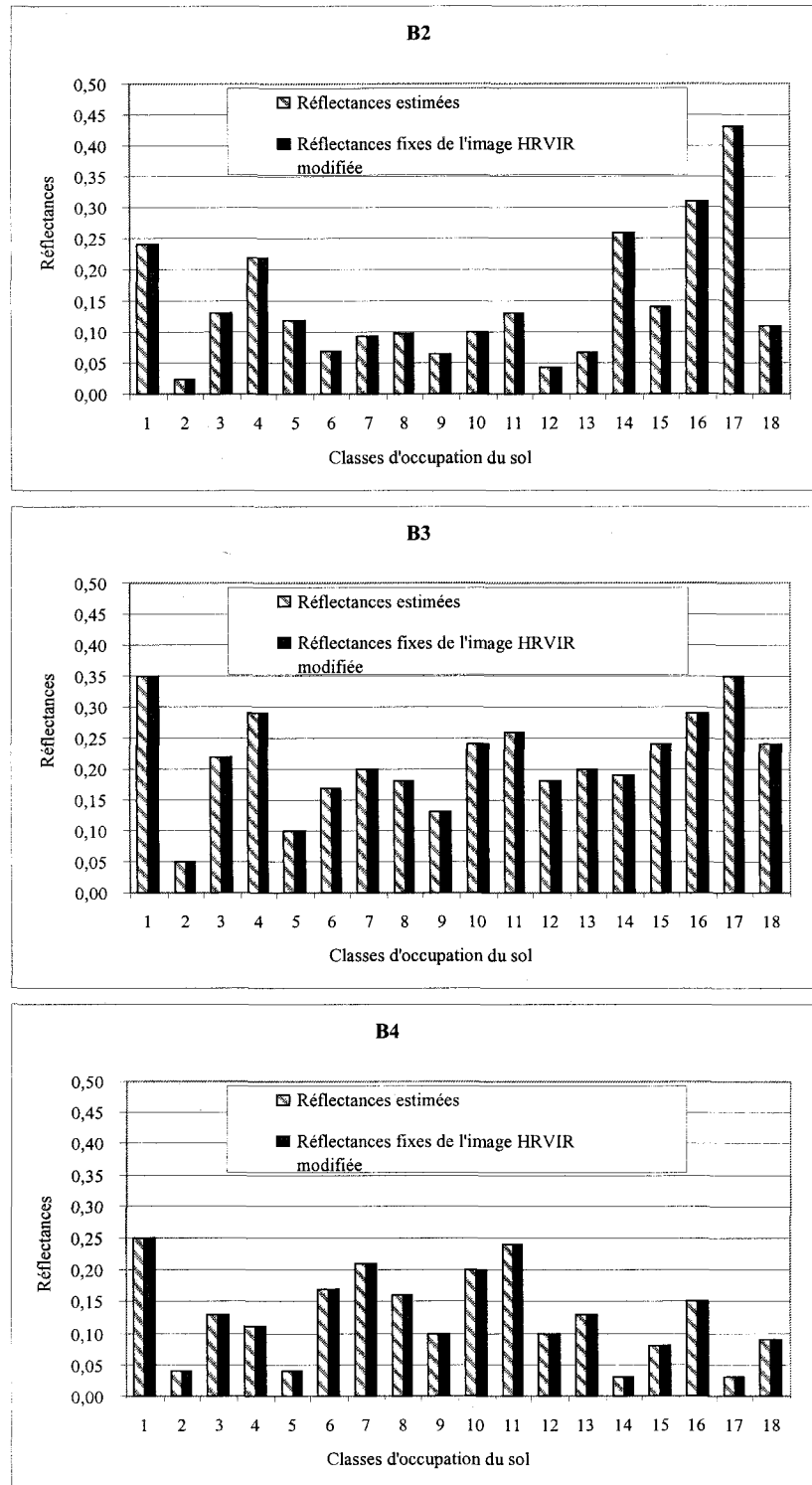


Figure 4.8 : Estimation des réflectances à partir de l'image VGT simulée à l'aide de l'image HRVIR du 11 avril 1999 modifiée (les réflectances de chaque classe d'occupation du sol ont été fixées à la valeur de la moyenne).

4.1.5 Effets de l'erreur de co-localisation sur l'estimation des réflectances

Comme nous l'avons exposé dans la section 2.2.1, entre une image HRVIR et une image VGT des erreurs de positionnement de la localisation géographique peuvent exister. Entre autres, nous avons cité les erreurs de collocation et celles les erreurs de positionnement multitemporel. Dans cette section, nous avons essayé de déterminer l'influence, si influence il y en a, de telles erreurs sur l'estimation des réflectances. Pour déterminer les effets des erreurs de positionnement sur l'estimation des classes d'occupation du sol, nous avons simulé des décalages fictifs de l'image VGT simulée à partir de l'image HRVIR, par rapport à la grille d'occupation du sol. À chaque décalage, l'algorithme d'estimation des réflectances était appliqué. Pour des fins de simplification de l'analyse des résultats, les classes d'occupation du sol qui ont été utilisées dans cette section sont celles dont le pourcentage dans l'image est supérieur à 5%. Les décalages que nous avons choisis sont les suivants :

- Décalage 1: 300 mètres Sud, 300 Est.
- Décalage 2 : 300 mètres Nord, 300 Ouest.
- Décalage 3 : 300 mètres Nord, 300 Est.
- Décalage 4 : 300 mètres Sud, 300 Ouest.

Nous avons remarqué (figure 4.9) que les erreurs relatives moyennes (ERMB) calculées ne permettent pas une nette distinction de l'estimation des réflectances sans et avec décalages. En d'autres termes, si le fait d'avoir des décalages doit théoriquement détériorer l'estimation des réflectances, ce que nous avons obtenu ne concordait pas forcément avec cette théorie. Parfois, nous avons même remarqué qu'avec les décalages l'erreur relative moyenne par classe diminue, ce qui signifie une amélioration de l'estimation. Ce dernier cas est très évident dans la bande B4 simulée (figure 4.9).

Pour voir jusqu'à quel point ces constatations étaient valides, un décalage supplémentaire d'un kilomètre Sud-Est a été appliqué en utilisant la bande B4. Cette fois-ci nous avons remarqué (figure 4.10) que l'estimation à partir de la position sans décalage est relativement meilleure que celle avec le décalage d'un kilomètre.

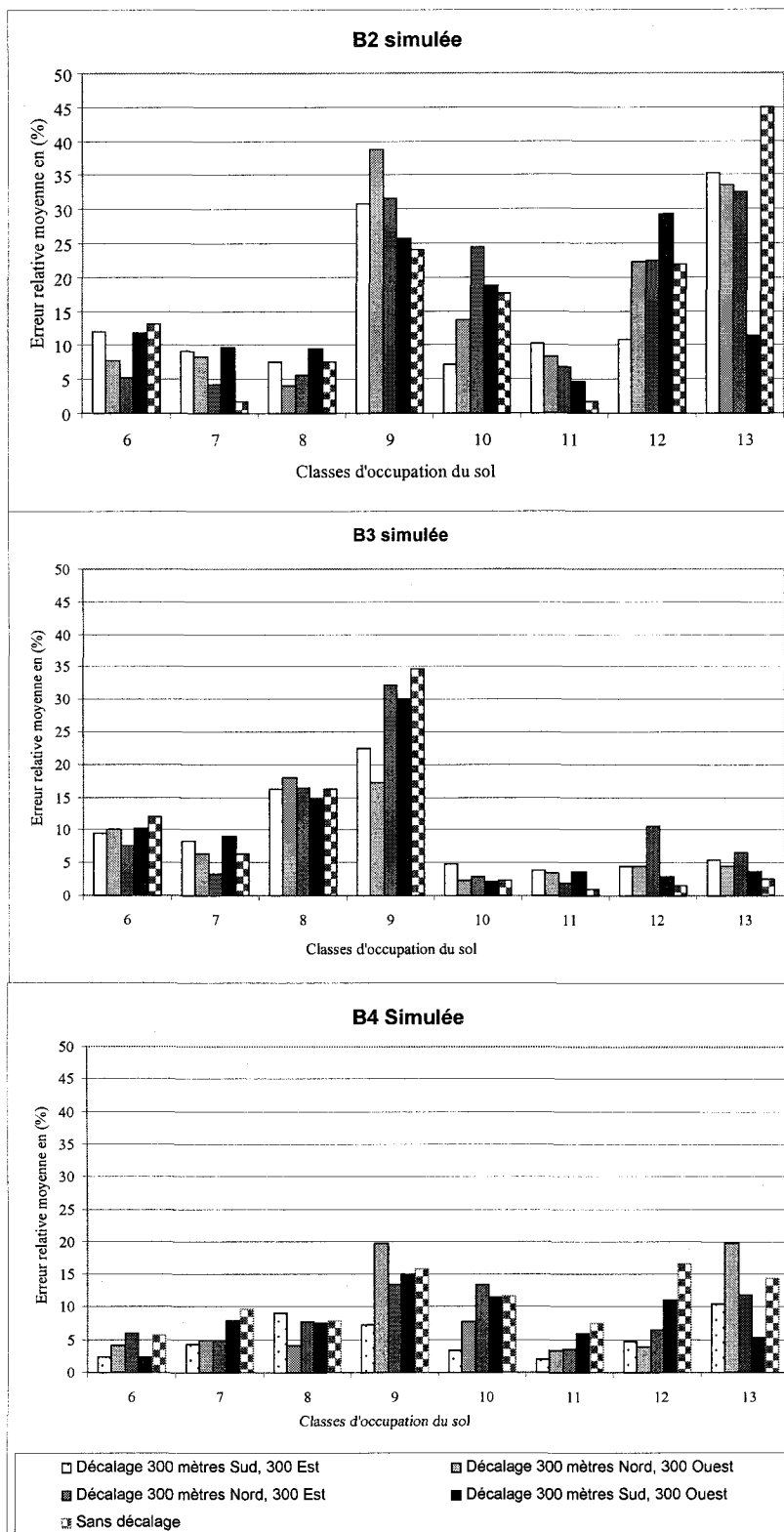


Figure 4.9 : Estimation de réflectances des classes d'occupation du sol (pourcentage d'occupation $\geq 5\%$) en simulant des décalages géométriques fictifs entre l'image VGT simulée et la carte d'occupation du sol.

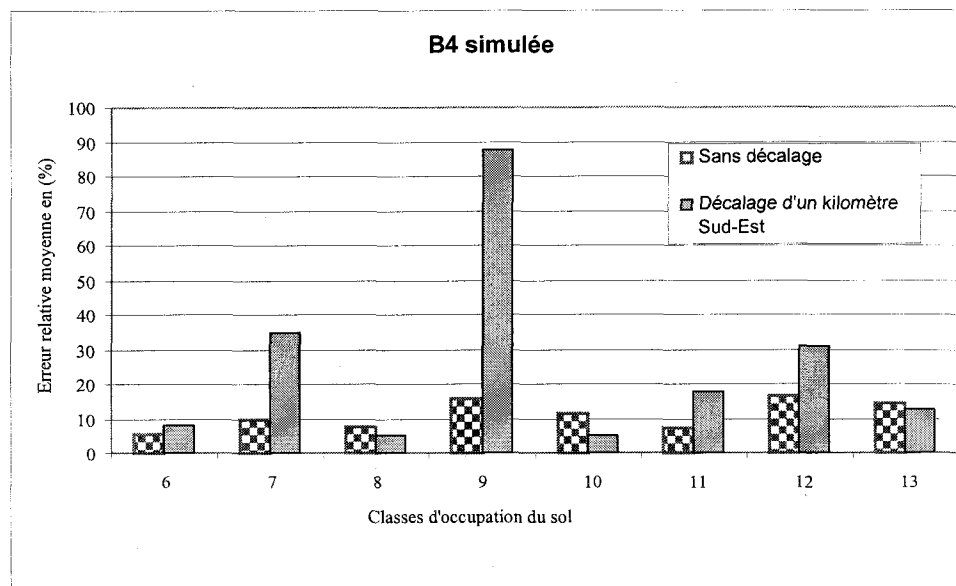


Figure 4.10 : Estimation de réflectances des classes d'occupation du sol en simulant un décalages géométrique fictif d'un kilomètre entre l'image VGT simulée et la carte d'occupation du sol.

4.1.6 Synthèse sur l'effet des différents paramètres étudiés sur l'estimations des réflectances

Dans les sections précédentes de ce chapitre, nous avons présenté les différents résultats obtenus avec l'image VGT simulée du 11 avril 1999.

4.1.6.1 Nombre optimal de groupe de pixel à utiliser

Nous avons constaté que pour choisir un nombre optimal de groupes, il est important de pondérer l'ERMB. Cette pondération se faisant en fonction des proportions de surfaces occupées par chaque classe d'occupation du sol est essentielle pour stabiliser les oscillations de la courbe $ERMB = f(\text{nombre de groupes de pixels})$. Pour notre cas, l'utilisation d'un nombre K de groupes de pixels variant de 1 à dix a généré des réflectances estimées relativement semblables pour chacune des classes d'occupation du sol. Pour garantir d'un côté, les critères présentés dans la section 2.1.3, c'est-à-dire, les critères d'homogénéité, de représentativité et de la distribution spatiale, et d'un autre côté, pour ne pas avoir des longs calculs sans grand profit, nous avons retenu un $K=5$ comme nombre de groupes de pixel optimal pour l'estimation des réflectances. Comme nous l'avons vu, c'est en utilisant ce nombre de groupes de pixels K que nous avons estimé toutes les réflectances des classes d'occupation du sol.

4.1.6.2 Effet de la représentativité et de l'hétérogénéité sur l'estimation des réflectances

Nous avons constaté que l'hétérogénéité des vraies réflectances des classes d'occupation du sol a une influence directe sur l'estimation des réflectances. En fait, plus une classe d'occupation du sol est hétérogène moins bonne est l'estimation de sa réflectance. L'inverse est vrai. Pour l'effet de la superficie qu'occupe chaque classe dans l'image HRVIR nous avons décidé de prendre celles dont cette proportion est supérieure à 5%. En fait, seules ces classes peuvent être considérées comme bien représentées dans l'image. Nous avons constaté aussi que l'effet de l'hétérogénéité se répercute sur l'estimation des réflectances dans les cas de présence de décalages géométriques. En fait, théoriquement, si l'image des réflectances VGT est décalée de la grille de classification haute résolution cela doit détériorer les estimations des réflectances. Cependant, nous avons pu remarquer cet effet en appliquant les décalages fictifs. Toutefois des décalages de positionnement à l'intérieur des limites prévues ne devraient pas affecter les estimations de manière importante.

4.2 Estimation des réflectances des classes d'occupation du sol, à partir de la vraie image VGT

4.2.1 Résultats de l'estimation des réflectances

L'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir de la vraie image (non simulée) VGT du 11 avril 1999 est faite à la lumière des résultats obtenus avec l'image VGT simulée. En effet, le nombre de groupes de pixels utilisés par l'algorithme d'estimation était fixé à cinq. La figure 4.11 regroupe les résultats de cette estimation et la comparaison avec ceux obtenus avec l'image VGT simulée. Nous remarquons que, sur les trois bandes spectrales dont les réflectances des classes du sol ont été estimées, les classes numérotées de 6 à 13 sont celles pour lesquelles les estimations sont relativement bonnes. Ces classes sont celles qui ont un pourcentage d'occupation du sol supérieur ou égale à 5%. Elles sont exprimées en gras dans le tableau 4.4. Nous remarquons donc qu'avec cinq groupes de pixels l'estimation des réflectances pour les classes numérotées de 6 à 13 était très acceptable. Nous remarquons aussi d'après la figure 4.11 qu'en utilisant :

- La vraie image VGT corrigée de l'effet de l'erreur de co-location.
- L'image VGT simulée, ou même
- La vraie image VGT sans correction de l'erreur de co-location.

Les valeurs estimées des réflectances, et toujours pour les huit classes numérotées de 6 à 13, sont très proches.

Estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'image VGT

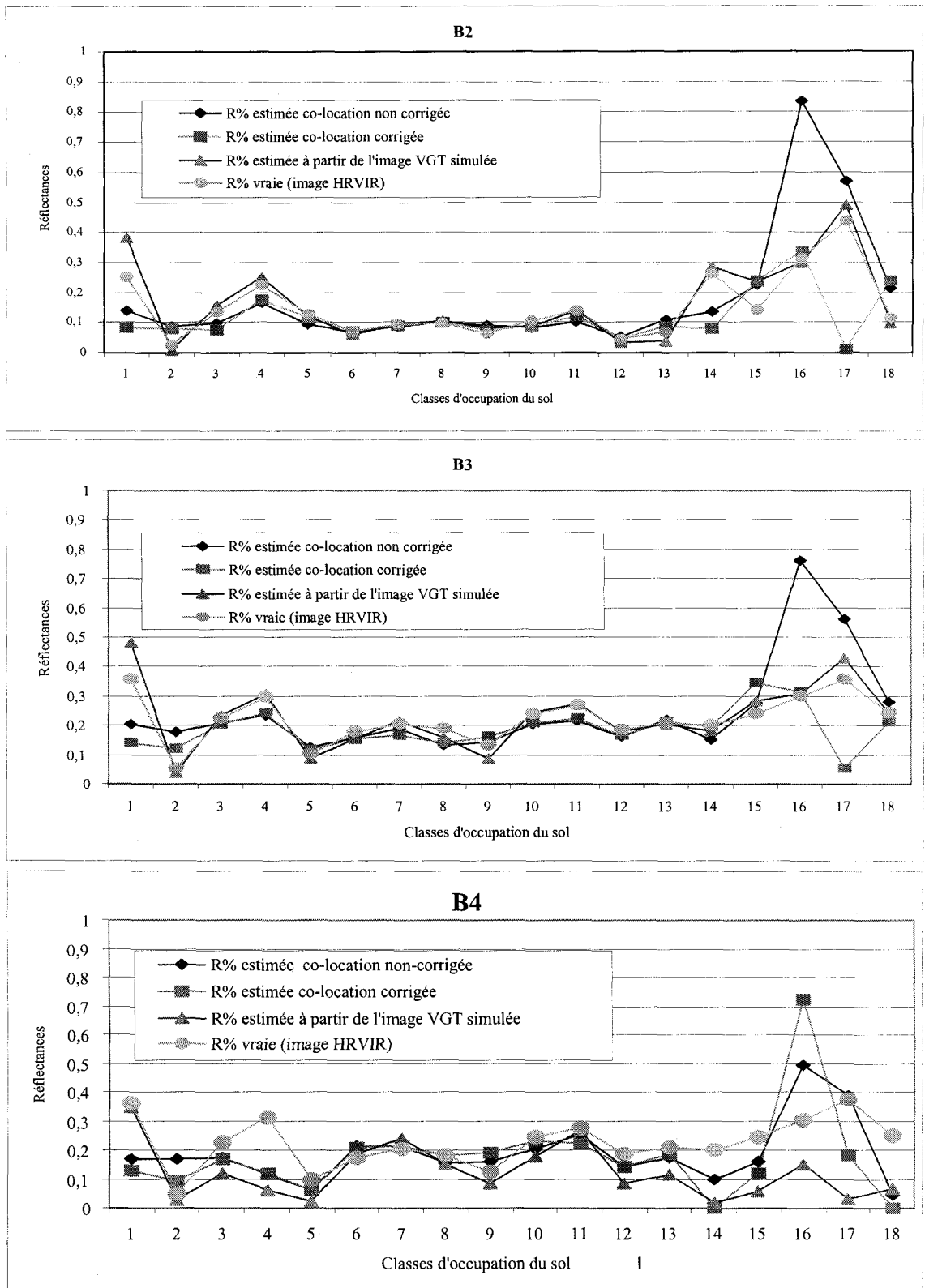


Figure 4.11 : Comparaison des réflectances des classes d'occupation du sol estimées à partir de l'image VGT simulée et vraie du 11 avril 1999

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec,
à l'aide du capteur VEGETATION

Tableau 4.4: Résultats de l'estimation des réflectances de l'image HRVIR de la région de Sherbrooke du 11 Avril 1999 à partir de l'image VGT de la même journée

Classes d'occupation du sol	Pourcentage D'occupation du sol	Réflectance												
		B2				B3				B4				
		HRVIR Moyenne %	E-T	%	VGT	HRVIR Moyenne %	E-T	%	VGT	HRVIR Moyenne %	E-T	%	VGT	
Nuages	3.7	24.92	12.1	8.15	35.73	11.31	14.14	25.18	9.22	12.71	14.14	25.18	9.22	12.71
Eaux libres et Ombres de nuages	2.2	2.50	1.15	7.73	5.24	2.79	12.06	4.66	1.85	9.43	12.06	4.66	1.85	9.43
Forêt mixte avec neige	3.7	13.33	4.74	7.67	22.32	3.47	20.27	13.02	3.17	17	20.27	13.02	3.17	17
Forêt ouverte avec neige (1)	1.7	22.41	8.53	17.50	29.70	6.07	24.27	11.03	3.18	12.14	24.27	11.03	3.18	12.14
Eaux glacées	0.7	12.61	3.8	11.67	10.04	3.11	11.92	4.27	3.23	6.03	11.92	4.27	3.23	6.03
Forêt de feuillus denses*	12.9	6.94	1.48	7.08	17.73	2.48	15.64	17.72	3.31	21.09	15.64	17.72	3.31	21.09
Forêt de feuillus peu denses*	5.8	9.44	1.38	8.88	20.47	2.5	16.57	21.95	3.15	21.43	16.57	21.95	3.15	21.43
Zone dégagée (1)*	12.9	9.72	2.78	9.96	18.82	3.85	13.96	16.40	3.72	18.12	13.96	16.40	3.72	18.12
Zone dégagée (2)*	5.6	6.55	2.85	7.67	13.12	4.37	16.16	10.11	3.5	19.15	16.16	10.11	3.5	19.15
Zone dégagée (3)*	7.9	10.32	1.89	8.57	24.04	3.07	20.87	20.00	3.31	23.21	20.87	20.00	3.31	23.21
Zone dégagée (4)*	10.7	13.88	2.47	12.06	26.92	4.1	22.17	24.83	3.73	22.01	22.17	24.83	3.73	22.01
Forêt de conifères*	16.1	4.36	1.41	4.59	18.66	2.44	16.77	10.00	2.23	14.05	16.77	10.00	2.23	14.05
Forêt mixte*	11.8	6.70	2.15	8.76	20.79	3.02	21.39	13.30	3.77	18.83	21.39	13.30	3.77	18.83
Eaux glacées avec de la neige (1)	0.7	26.37	8.36	7.75	19.92	7.06	19.77	3.18	1.34	0.17	19.77	3.18	1.34	0.17
Forêt ouverte avec neige (2)	1.4	14.16	8.45	24.15	24.04	5.91	34.39	8.40	1.9	12.06	34.39	8.40	1.9	12.06
Eaux glacées et nuage	0.1	31.59	7.69	33.89	29.80	8.85	31.51	15.19	7.87	72.26	31.51	15.19	7.87	72.26
Eaux glacées avec de la neige (2)	0.1	43.96	7.61	1.30	35.76	6.58	5.12	3.06	1.01	18.23	5.12	3.06	1.01	18.23
Forêt de conifères peu denses avec neige	2.0	11.53	4.56	23.93	24.25	3.79	21.13	9.07	2.03	0	21.13	9.07	2.03	0

Les classes d'occupation du sol en gras ont un pourcentage d'occupation du sol > 5%

Les valeurs en gras à l'intérieur du tableau, représentent les réflectances estimées qui appartiennent à l'intervalle moyenne de la vraie réflectance ± écart type.

* Sans neige

4.2.2 Effet de l'estimation des réflectances sur le comportement spectral

Nous avons essayé, dans cette section, d'étudier l'effet de l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol sur la signature spectrale de ces dernières. En fait, bien que l'estimation des réflectances, dans notre cas, vise l'estimation de l'évolution de l'albédo pouvant servir, à titre d'exemple, pour des calculs de bilan hydrologique, il était important de vérifier si le fait d'estimer les réflectances des classes d'occupation avait un impact sur leurs signatures spectrales. Une fois encore les classes d'occupation du sol dont la proportion dans l'image est supérieure à 5% (tableau 4.4) ont été étudiées. Les figures 4.12 A et B présentent les résultats de la comparaison des signatures spectrales issues des vraies valeurs et celles estimées des réflectances.

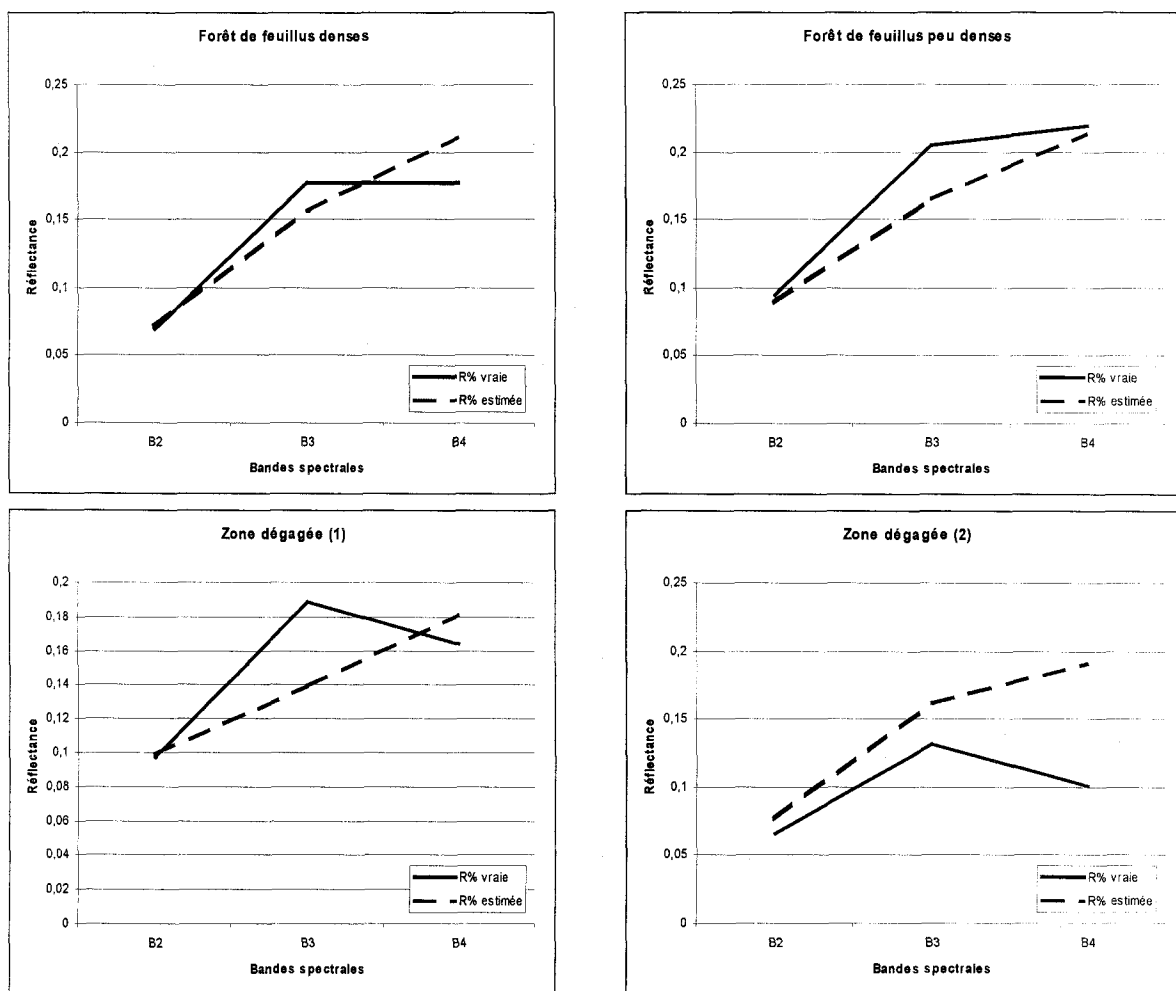


Figure 4.12A : Signatures spectrales avec les réflectances vraies et estimées, des classes d'occupation du sol dont le pourcentage d'occupation dans l'image HRVIR du 11 avril 1999 est supérieur à 5%.

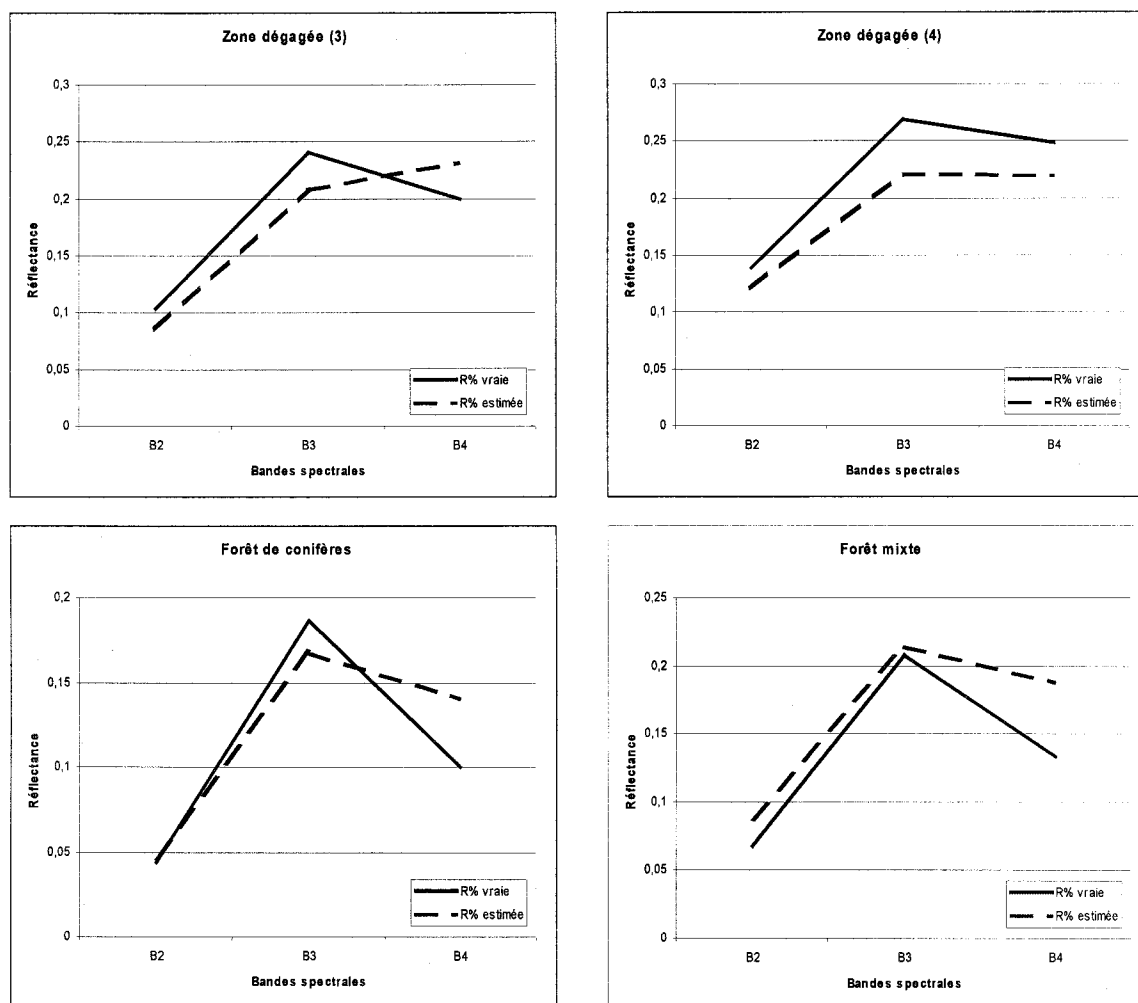


Figure 4.12B: Signatures spectrales avec les réflectances vraies et estimées, des classes d'occupation du sol dont le pourcentage d'occupation dans l'image HRVIR du 11 avril 1999 est supérieur à 5%.

Nous avons constaté de ces figures (4.12 A et B) que le comportement spectral suit la même tendance et à la même allure que celle du comportement spectral original issu des vraies réflectances. Cette constatation était valable pour l'augmentation des réflectances des huit classes spectrales étudiées en passant de la bande spectrale B2 vers la bande B3. Toutefois, en passant de la bande spectrale B3 vers la bande B4, seulement quatre signatures spectrales gardent la même tendance (classes de la figure 4.12B). Le passage de B3 vers B4 est sensiblement différent pour les deux premières classes de la figure 4.12A, il est complètement différent pour les deux classes restantes. Cela pourrait être expliqué par le fait que la bande spectrale «B4» qui a servi à l'estimation des réflectances n'était pas corrigée de l'effet de l'atmosphère (voir section 3.3.1.1).

4.3 Commentaires et discussions

Nous avons exposé dans ce chapitre les résultats obtenus pour l'estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'une image VGT. Nous avons vu que même avec l'image VGT simulée à partir de la vraie image HRVIR les estimations n'étaient pas identiques aux vraies valeurs de réflectances. En fait, après avoir analysé :

- La représentativité des classes d'occupation du sol, et
- L'homogénéité des vraies réflectances des classes d'occupation du sol,

nous avons pu constater que l'estimation des réflectances était surtout liée au deuxième facteur, c'est à dire que plus les vraies réflectances sont hétérogènes moins bonnes sont leurs estimations à partir d'images VGT. Il faut toutefois noter que, pour plusieurs classes d'intérêt dont la superficie dans l'image est plus grande que 5%, ces estimations sont normalement situées à l'intérieur de l'écart-type de la valeur moyenne de la vraie réflectance, ce qui est très acceptable.

Pour ce qui est de l'effet de la superposition de l'image VGT (image des réflectances) avec la grille de classification du sol (issue de l'image HRVIR) nous avons constaté que :

- L'estimation des réflectances en simulant des décalages géométriques fictifs, entre l'image VGT simulée et la grille de classification, n'a pas permis d'avoir des résultats trop distincts. Une fois encore l'effet de l'hétérogénéité des vraies réflectances est impliqué.

À la lumière des résultats obtenus avec l'image VGT simulée, nous avons procédé à l'estimation des réflectances à partir de la vraie image VGT du 11 avril 1999. D'après la figure 4.11 et le tableau 4.4 nous avons remarqué que ces estimations étaient très bonnes pour les classes d'occupation du sol dont la superficie totale, dans la grille de classification du sol, était supérieure à 5%. Cependant, il ne faut pas oublier les faits suivants :

- La bande spectrale B4 a été corrigée de l'effet induit par l'atmosphère dans l'image VGT du 11 avril 1999.
- Pour l'image HRVIR aucune correction atmosphérique n'a été appliquée à la bande spectrale B4. Les valeurs de références des réflectances sont tirées de cette image.

Les signatures spectrales des classes d'occupation du sol étudiées, dont le pourcentage dans l'image est supérieur à 5%, n'étaient pas trop altérées. En fait, la tendance ascendante, des valeurs des réflectances, lors du passage de la bande spectrale B2 vers B3 a été préservée après

l'estimation. Dans le cas du passage de la bande B3 vers la B4, bien que les comportements spectraux étaient dans bien des cas semblables, le fait que la bande B4 ait été corrigée atmosphériquement dans une image et pas dans l'autre nous a empêché de conclure.

4.4 Conclusion

Pour le premier objectif secondaire « Estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'image VGT » nos conclusions sont présentées dans les lignes qui suivent.

Le modèle linéaire de composition des réflectances (équation 3.1) [Shimabukuro et Smith 1991; Holben et Shimabukuro 1993; Cherchali 1995; Cherchali et Flouzat 1994; Marceau 1991; Puyou-Lacassies *et al.*, 1992] est représentatif de la réalité de la réflectance. L'hétérogénéité au sein d'une classe d'occupation du sol détériore l'estimation de sa réflectance. Pour contourner ce problème l'utilisation d'une grille d'occupation du sol dont les classes sont raffinées et peu hétérogènes présente une solution. Cependant le compromis à réaliser réside dans le fait que plus la classification est raffinée plus le nombre de classes d'occupation du sol augmente et moins bonne serait la représentativité de chacune d'entre elles. Dans la pratique, une grille de classification peut inclure facilement plus d'une vingtaine de classes d'occupation du sol. Dans notre cas, nous avons initialement 43 classes d'occupation du sol que nous avons regroupé en 18 (en se basant sur les signatures spectrales). L'estimation des réflectances était très acceptable mais seulement pour des classes d'occupation du sol relativement peu hétérogènes et bien représentées (superficie $\geq 5\%$). Il ne faut pas oublier cependant que l'image VGT et l'image HRVIR, n'ont pas été corrigées de la même manière de l'effet de l'atmosphère, cette dernière ayant servi à générer les vraies valeurs de réflectances. En fait, tandis que la première était corrigée par le module SMAC (Rahman et Dedieu, 1994), la deuxième était corrigée en utilisant le modèle ATCOR basé sur LOWTRAN-7 (Kneizys *et al.*, 1983) et SENSAT-3 (Richter, 1989). Ce dernier étant disponible sur le logiciel de traitement d'images PCI 6.3 ne supportait pas encore la bande B4 du satellite Spot4. Hors, quand il s'agit d'études se reliant directement aux réflectances, il est recommandé d'utiliser le même modèle de correction atmosphérique pour toutes les images utilisées. Cela aura pour effet de minimiser les sources d'erreurs. Nous concluons donc avec le fait que les réflectances estimées pour les classes d'occupation du sol d'intérêt étaient très acceptables. Cela est vrai dans la mesure où nous tenons compte des faits ci-haut avancés, et aussi du fait que la méthodologie utilisée pourrait être optimisée en fonction de l'hétérogénéité des réflectances des diverses classes d'occupation du sol.

5 AJUSTEMENT DU POSITIONNEMENT DES LOCALISATIONS GÉOGRAPHIQUES DES IMAGES

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des ajustements de positionnement des localisations géographiques. Comme pour le chapitre précédent, la méthodologie présentée dans le chapitre 2 section 2.2 est testée premièrement en utilisant l'image VGT simulée. Cela est nécessaire pour vérifier le degré maximal de précision que nous pouvons atteindre. Ainsi, dans un premier temps, nous avons essayé de positionner l'image VGT simulée du 11 avril 1999 par rapport de l'image HRVIR du même jour. Dans un second temps, la méthodologie a été appliquée, respectivement aux images VGT des 8 février, 11 avril et 2 mai 1999, en utilisant toujours la grille de classification issue de l'image HRVIR du 11 avril 1999 comme référence.

5.1 Degré de précision de la méthodologie

Ce test consiste tout simplement à essayer de trouver le décalage entre l'image VGT simulée à partir de l'image HRVIR du 11 avril 1999 et cette dernière, tout en sachant que ce décalage est théoriquement égale à zéro, puisque les deux images sont en parfaite superposition géométrique. Le but du test est donc de vérifier à quel degré nous pouvons, avec les outils dont nous disposons, affirmer ce fait.

Les résultats que nous avons obtenus avec la méthode exhaustive (figures de 5.2 à 5.7) et heuristique sont regroupés dans le tableau 5.1. Le décalage maximal simulé était de 300 mètres pour les deux méthodes, et ce dans les quatre directions. Les pas de déplacement sont fixés à 50 et 30 mètres, respectivement pour la méthode exhaustive et heuristique.

Tableau 5.1: Erreurs de collocation estimées entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même date.

	B2 simulée			B3 simulée			B4 simulée			
	exhaustive		heuris -tique	exhaustive		heuris -tique	exhaustive		heuris -tique	
	ERMB	ETMB		ERMB	ETMB		ERMB	ETMB		
Décalage Nord(+)-Sud(-) (mètres)	-200	-160	150	-160	-170	210	+225	+215	0	0
Décalage Est(+)-Ouest(-) (mètres)	-150	0	-150	-50	0	-120	-250	+200	-10	-60

ERMB (équation 3.6): erreur relative moyenne par bande; ETMB (équation 3.5): écart type moyen par bande.

Nous avons remarqué que, pour la méthode exhaustive :

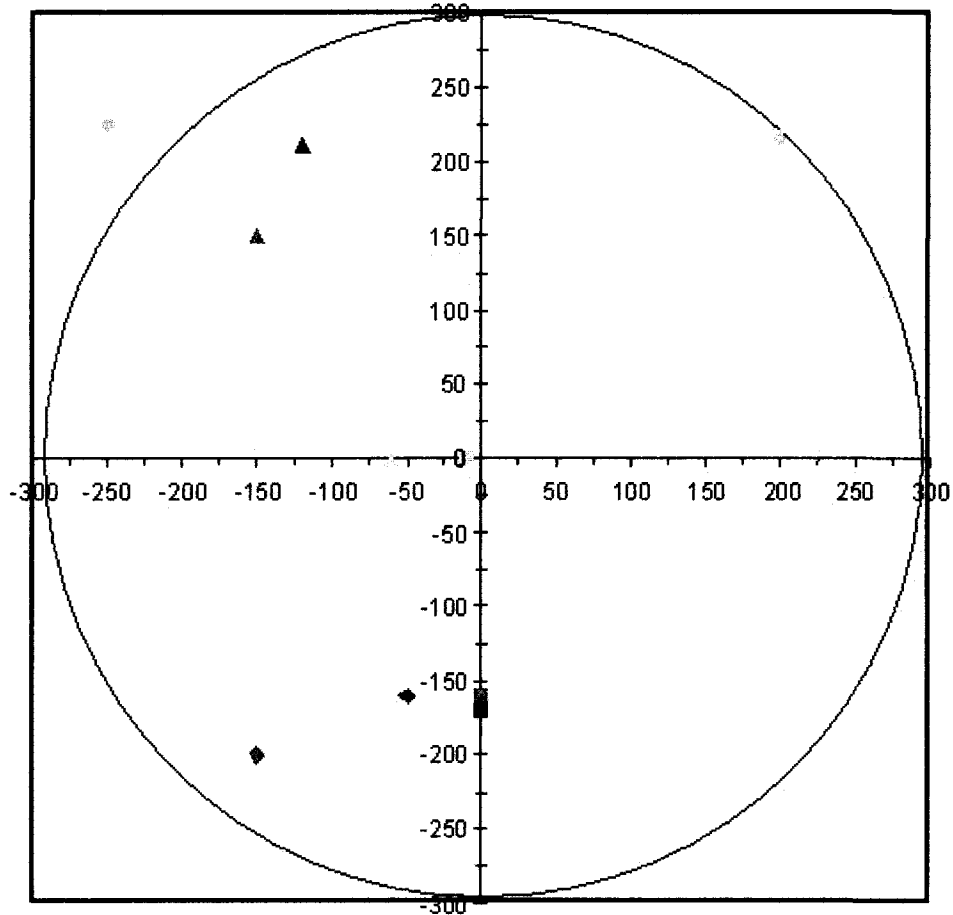
- Les résultats obtenus avec la cartographie de l'écart type moyen par bande (ETMB) sont plus précis que ceux obtenus en utilisant l'erreur relative moyenne par bande (ERMB). Ceci était constaté pour les trois bandes spectrales utilisées et cette différence est plus nette sur l'axe de décalage Est-Ouest que sur l'axe Nord-Sud.
- L'erreur de positionnement est beaucoup plus importante sur l'axe Nord-Sud que sur l'axe Est-Ouest. En effet, sur le premier axe, elle est de 160, 170 et 0 mètres respectivement pour les bandes B2, B3 et B4, tandis que pour le second elle n'est que de 0, 0 et 10 respectivement pour les mêmes trois bandes spectrales (en utilisant l'ETMB).

La comparaison des deux méthodes utilisées (heuristique vs exhaustive) consistait en la comparaison des résultats obtenus en utilisant la cartographie de l'ETMB avec chacune des deux méthodes. Nous avons remarqué alors que :

- Sur l'axe Nord-Sud : pour les bandes spectrales B2 et B3 les résultats obtenus sont opposés. En effet, avec la méthode exhaustive les décalages étaient respectivement de 160 et 170 dans la direction du sud. Les résultats obtenus avec la méthode heuristique, toujours pour les bandes B2 et B3, sont respectivement de 150 et 210 mètres, mais cette fois-ci c'est plutôt dans la direction du nord.
- Sur l'axe Est-Ouest : la méthode exhaustive donne les résultats les plus proches de la vraie position. En fait, les décalages obtenus ne sont que de 0, 0 et 10 mètres (ouest) respectivement pour les bandes B2, B3 et B4. Les résultats obtenus avec la méthode heuristique pour les mêmes trois bandes sont respectivement de 150, 120 et 60 mètres dans la direction de l'ouest.
- Avec les deux méthodes le décalage le plus proche de la vraie position est celui obtenu avec la bande B4. Une fois encore, avec la méthode exhaustive le résultat est beaucoup plus proche qu'avec la méthode heuristique.

Les résultats obtenus nous indiquent que pour estimer les erreurs de positionnement, la meilleure façon est celle utilisant la cartographie de l'écart type moyen par bande. Cependant, nous constatons très bien que la précision dépend de la bande utilisée (figure 5.1). En fait, dans la bande spectrale B4 la localisation a été la meilleure, alors que dans les bandes B2 et B3 nous avons eu une erreur de positionnement sur l'axe Nord-Sud supérieure à 150 mètres. Cependant, il ne faut pas omettre le fait que dans l'image HRVIR la bande spectrale B4 n'a pas subi de

correction atmosphérique. Ce fait nous a poussé à considérer plus les bandes spectrales B2 et B3 dans le cas de l'utilisation des vraies images VGT.



Formes :

- ◆ erreur relative moyenne par bande
- écart type moyen par bande
- ▲ méthode heuristique

- Limite de la méthode exhaustive
- Limite de la méthode heuristique

Couleurs :

- Rouge : B2
- Bleu : B3
- Verte : B4

Figure 5.1: Résultats du positionnement géométrique par la méthode exhaustive et heuristique entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée pour la même date.

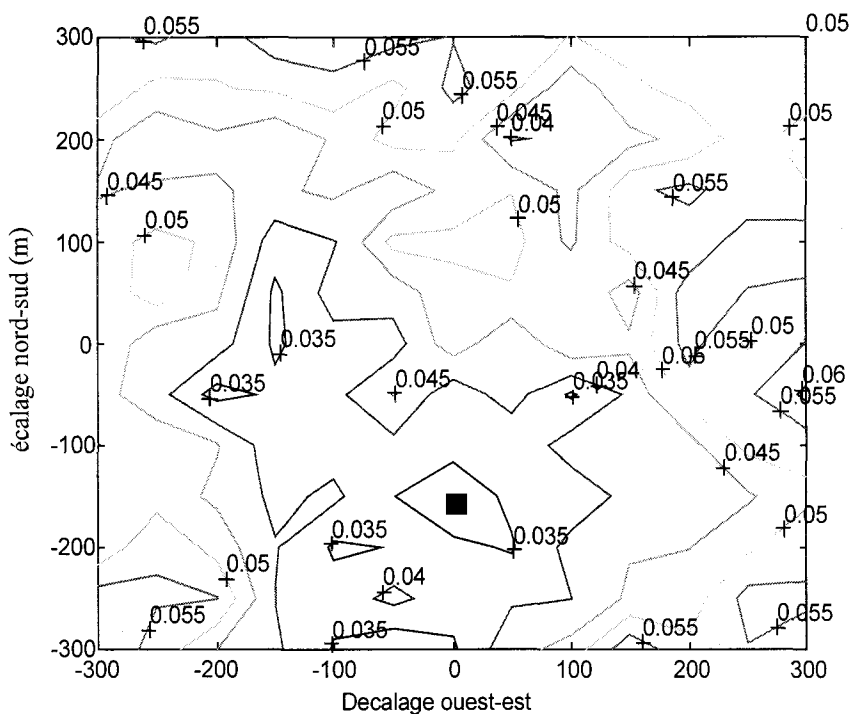


Figure 5.2: Cartographie de l'écart type moyen (équation 2.4) de la bande B2 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.

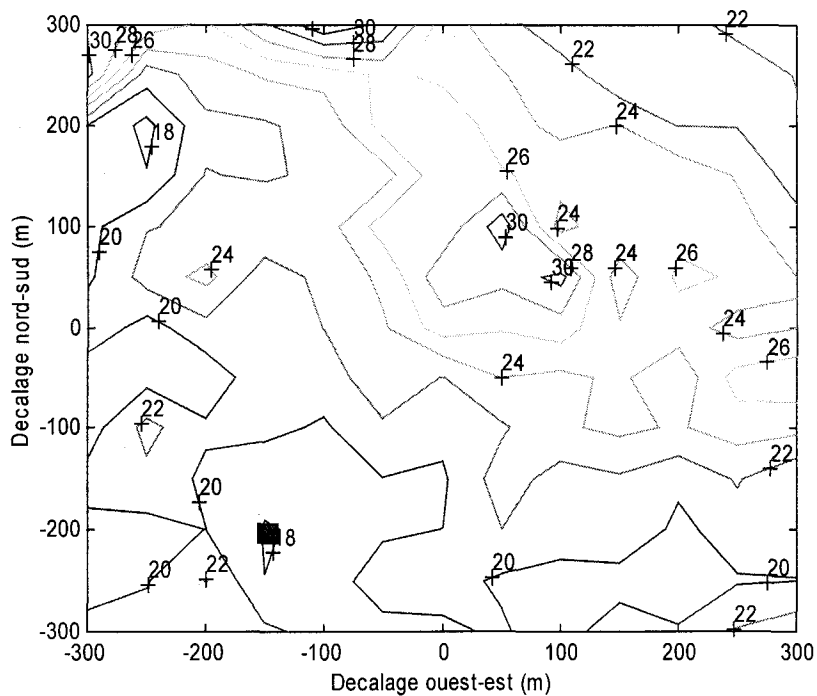


Figure 5.3: Cartographie de l'erreur relative moyenne (équation 2.5) de la bande B2 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.

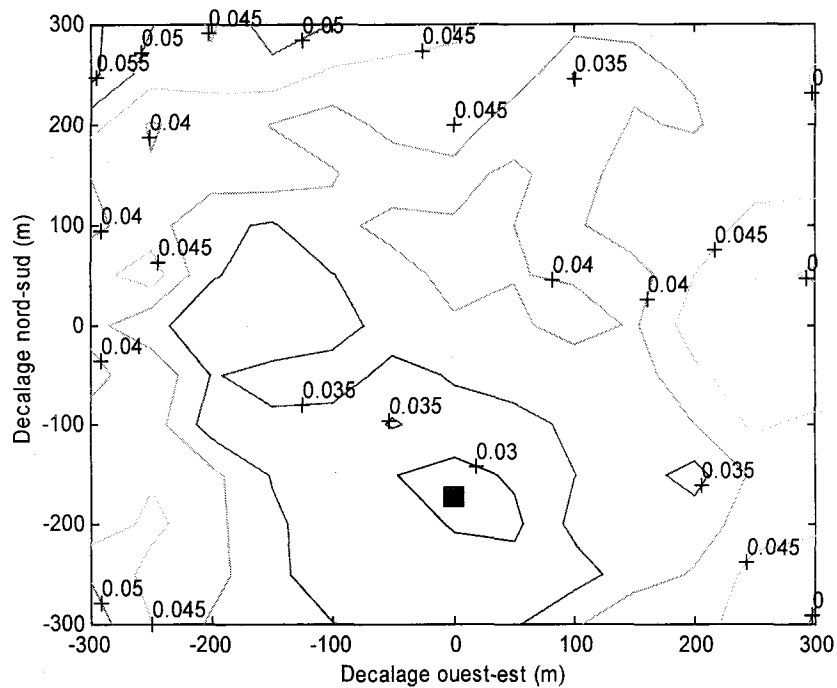


Figure 5.4: Cartographie de l'écart type moyen (équation 2.4) de la bande B3 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.

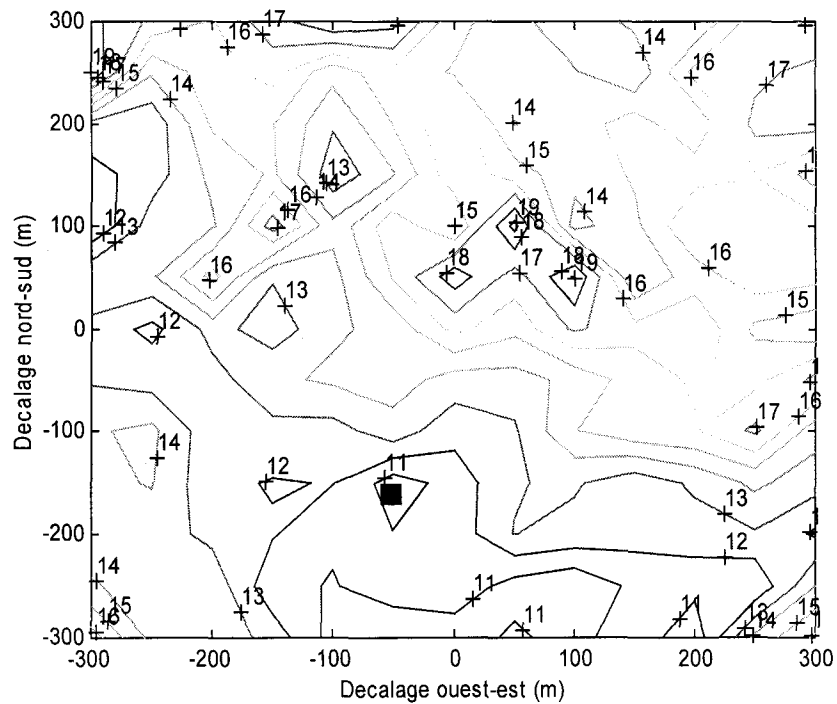


Figure 5.5: Cartographie de l'erreur relative moyenne (équation 2.5) de la bande B3 simulée par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée

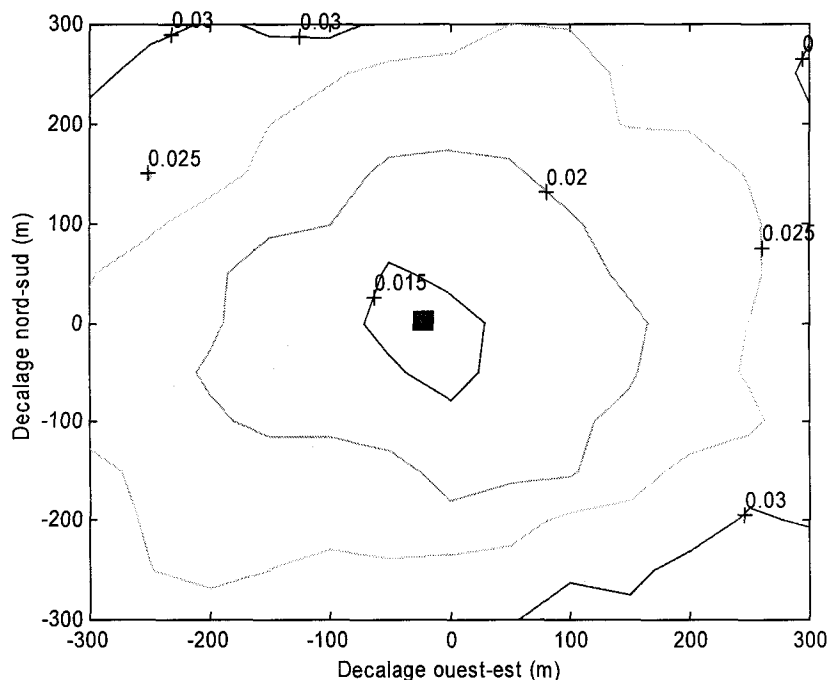


Figure 5.6: Cartographie de l'écart type moyen (équation 2.4) de la bande B4 (simulée) par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.

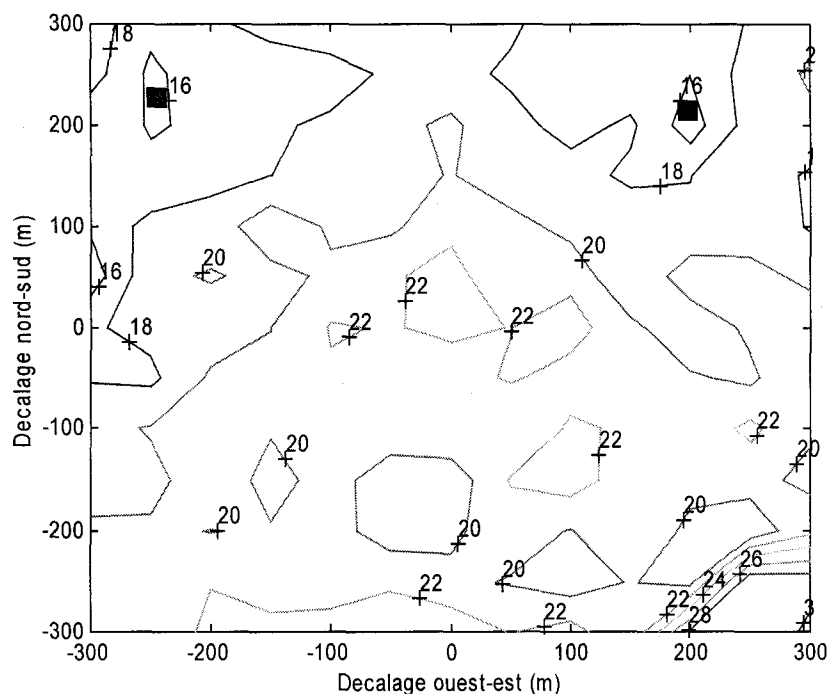


Figure 5.7: Cartographie de l'erreur relative moyenne (équation 2.5) de la bande B4 simulée par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et l'image VGT simulée de la même journée.

5.2 Résultats de l'ajustement géométrique

Après avoir testé les méthodologies de l'ajustement du positionnement géométrique, en utilisant l'image VGT simulée du 11 avril 1999, nous avons procédé à l'ajustement des vraies images VGT. Évidemment, la méthodologie retenue est celle dite exhaustive en se basant sur la cartographie de l'écart type moyen par bande, ETMB. Vu le grand temps de calcul que prend cette méthode nous sommes contraints de choisir des images VGT représentatives de l'ensemble des autres. En effet, bien que nous avons six images VGT nous avons appliqué la méthodologie d'ajustement sur les trois images VGT les plus importantes, à savoir :

- L'image VGT qui sert de référence avec couvert total de neige,
- L'image VGT qui sert de référence en absence totale de neige, et
- Une image VGT avec couvert partiel de neige.

Les deux premières images correspondent respectivement à celles du 08 février et du 02 mai 1999. L'image avec couvert partiel de neige utilisée est celle du 11 avril 1999. Bien qu'il existe plusieurs autres images VGT du même genre (couvert partiel de neige) prises respectivement les 27 mars, 2 et 5 avril 1999, le choix de l'image VGT du 11 avril est justifié par le fait qu'elle a été acquise simultanément à l'image de haute résolution spatiale, image HRVIR du 11 avril 1999, ayant généré la grille d'occupation du sol.

Les résultats de l'application de la méthode (exhaustive) d'ajustement sur les trois images VGT retenues sont présentés au tableau 5.2 et à la figure 5.8. Nous constatons que les écarts entre les localisations moyennes multispectrales des trois images étudiées (2 février, 11 avril et 2 mai, 1999) n'excèdent pas 200 mètres. Cela nous a poussé à considérer que les six images VEGETATION que nous utilisons sont superposables. Les résultats de la cartographie de l'écart type moyen par bande, pour les trois images VGT, sont regroupés dans l'annexe B. Dans un premier temps, la cartographie de l'ETMB est appliquée, pour les trois bandes spectrales B2, B3 et B4, avec un décalage maximal de 600 mètres dans les quatre directions et un pas de déplacement de 100 mètres. Nous avons remarqué alors que les valeurs minimales de l'écart type se regroupaient dans la zone sud-est, ce qui nous a mené à faire un zoom sur cette région avec un décalage de 50 mètres. Il est à noter aussi que, pour plusieurs bandes spectrales, la cartographie de l'écart type donnait lieu à plusieurs minimums. Le critère adopté alors pour choisir une valeur de localisation est que l'erreur de positionnement multispectral est au maximum de 300 mètres. Cela signifie qu'il fallait analyser en même temps, pour chaque image VGT, les résultats des cartographies de l'ETMB pour les trois bandes spectrales.

Tableau 5.2: Décalages géométriques estimés entre les vraies images VGT du 2 février, 11 avril et 2 mai et l'image HRVIR du 11 avril 1999

Image VGT	Bande spectrale	Décalage par rapport à l'image HRVIR		Décalage* par rapport à l'image HRVIR (m)
		Sur l'axe Est-Ouest : X(m)	Sur l'axe Nord-Sud : Y(m)	
8 février 1999	B2	210	-350	364
	B3	240	-320	260
	B4	250	-350	212.2
11 avril 1999	B2	100	-350	408.2
	B3	0	-260	400
	B4	120	-175	430.1
2 mai 1999	B2	150	-175	230.5
	B3	200	-280	344.1
	B4	300	-240	384.2

* Décalage par rapport à l'image HRVIR (m) = $\sqrt{(X)^2 + (Y)^2}$

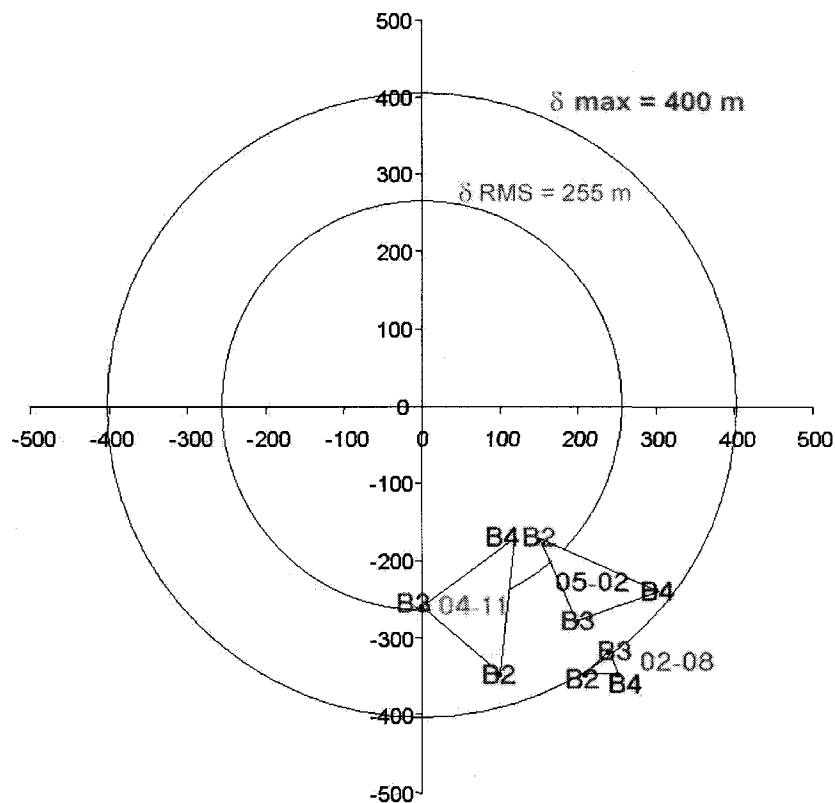


Figure 5.8: Résultats du positionnement géométrique par la méthode exhaustive entre l'image HRVIR du 11 avril 1999 et les vraies images VGT acquises respectivement le 8 février, 11 avril, et 2 mai, 1999

5.3 Conclusion

Pour l'ajustement du positionnement des localisations géographiques des images, les conclusions sont faites à la lumière de ceux du chapitre précédent et de ceux obtenus en appliquant les deux méthodes d'ajustement sur la vraie image VGT et celle simulé.

Dans la conclusion du chapitre précédent, nous avons exposé les facteurs qui influencent l'estimation des réflectances. Les deux méthodes d'ajustement sont donc directement affectées par la qualité de l'estimation des réflectances. Nous avons aussi remarqué que la méthode exhaustive en utilisant l'ETMB était la plus appropriée pour l'ajustement des images. Rappelons que le calcul de l'ETMB se fait à partir des réflectances estimées de toutes les classes d'occupation du sol. En donnant à toutes ces classes le même poids au sein de l'ETMB nous induisons une erreur. En effet, nous avons vu dans la section 4.1.5 que la simulation des décalages fictifs en utilisant l'image VGT simulée, donne parfois des réflectances estimées meilleures que celles obtenues sans décalage! Ceci était obtenu avec les classes d'occupation du sol qui présentaient le plus de facteurs positifs (superficie $\geq 5\%$, faible hétérogénéité). Ce que nous venons d'avancer ne signifie pas que notre méthodologie d'ajustement n'est pas applicable dans un contexte opérationnel, mais plutôt qu'il faut envisager des mesures pour limiter le rôle des classes non importantes (très hétérogènes ou qui occupent une petite superficie dans l'image). Choisir des classes représentatives et peu hétérogènes peut constituer la solution, mais ça reste à développer et aussi à tester.

6 ESTIMATION DU POURCENTAGE DU COUVERT NIVAL À PARTIR D'IMAGES VEGETATION

Nous rappelons que l'ultime objectif de notre recherche est de pouvoir faire l'estimation de la distribution spatiale du couvert nival au sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION. Nous rappelons aussi que la méthodologie adoptée (chapitre 2 section 2.3) consistait essentiellement aux étapes suivantes :

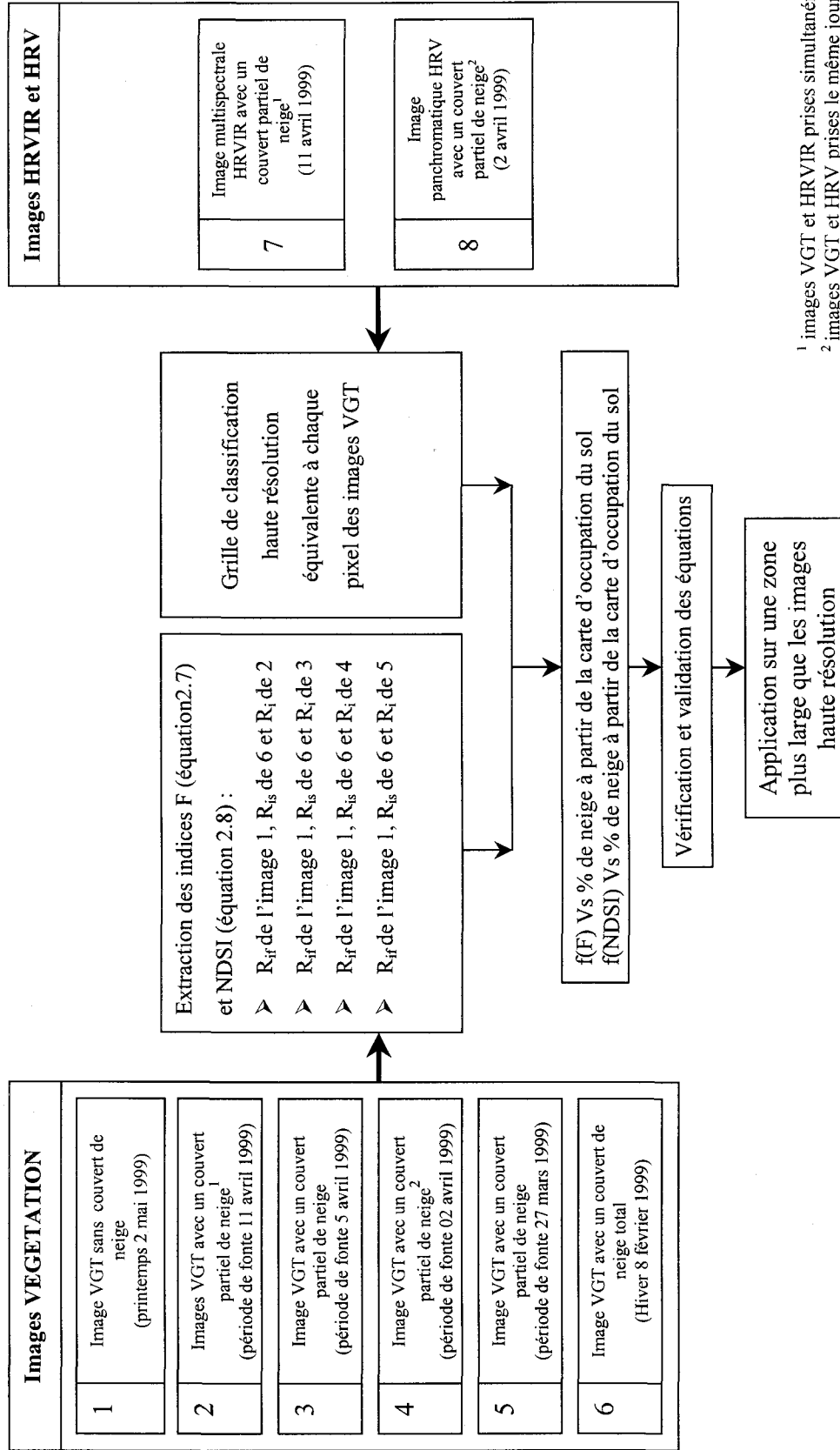
- Extraire l'indice de neige F (équation 2.8) et l'indice NDSI (équation 2.9) à partir d'images de basse résolution spatiale VEGETATION. Ces dernières images étaient respectivement acquises durant des périodes de couvert de neige total, partiel et absent, au-dessus de la région de Sherbrooke et dans tout le sud du Québec.
- Établir des équations qui relient les deux indices de neige, F et NDSI, aux vrais pourcentages de neige, ces derniers étant déterminés à partir des cartes de couverture de neige issues des images de haute résolution spatiale HRV et HRVIR (respectivement du 2 et 11 avril 1999).
- Estimer le pourcentage de couverture de neige au niveau sous-pixel, à partir des images VGT, en appliquant les équations d'estimation du couvert nival obtenues, et l'extension de cette application:
 1. Pour des dates où il n'y a pas de cartes de couverture de neige (issues des images de haute résolution) et dont seules les images VGT étaient disponibles.
 2. Dans tout le sud du Québec plutôt que sur la région de Sherbrooke.

Le présent chapitre est consacré à la présentation des résultats de cette troisième étape. D'abord, nous exposons les résultats de la détermination des équations d'estimation du couvert nival à partir de couples d'images de basse et de haute résolution spatiale:

- 1^{er} couple: Sous-image VGT du 11 avril 1999 (région de Sherbrooke)/image HRVIR du même jour (même région).
- 2^{ème} couple: Sous-image VGT du 2 avril 1999 (région de Sherbrooke)/image HRV du même jour (même région).

Deuxièmement, les résultats de la validation de la précision de ces équations sont présentés. Finalement, nous présentons les résultats de l'extension spatiale et temporelle de l'estimation du couvert de neige. La figure 6.1 identifie les différentes étapes et les dates d'acquisition des sous-images utilisées dans ce chapitre. Ces dernières sont présentées à la figure 6.2.

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival au printemps dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION



¹ images VGT et HRVIR prises simultanément
² images VGT et HRV prises le même jour

Figure 6.1: Principales étapes de l'estimation du couvert nival au niveau sous-pixel.

6.1 Détermination des équations d'estimation du couvert nival

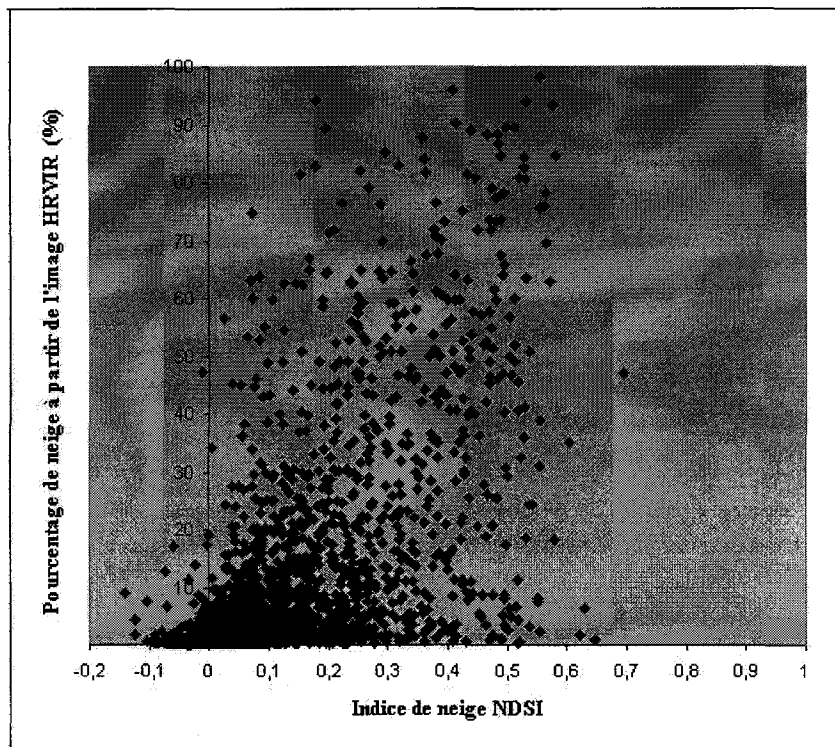
Les images VGT utilisées sont géométriquement superposables. La détermination des équations d'estimation du couvert nival consiste alors aux deux opérations suivantes:

- Extraction des indices de neige à partir des images VGT.
- À partir d'une carte de couverture de neige (haute résolution spatiale): déterminer pour chacun des pixels VGT son vrai pourcentage de couverture de neige (surface)

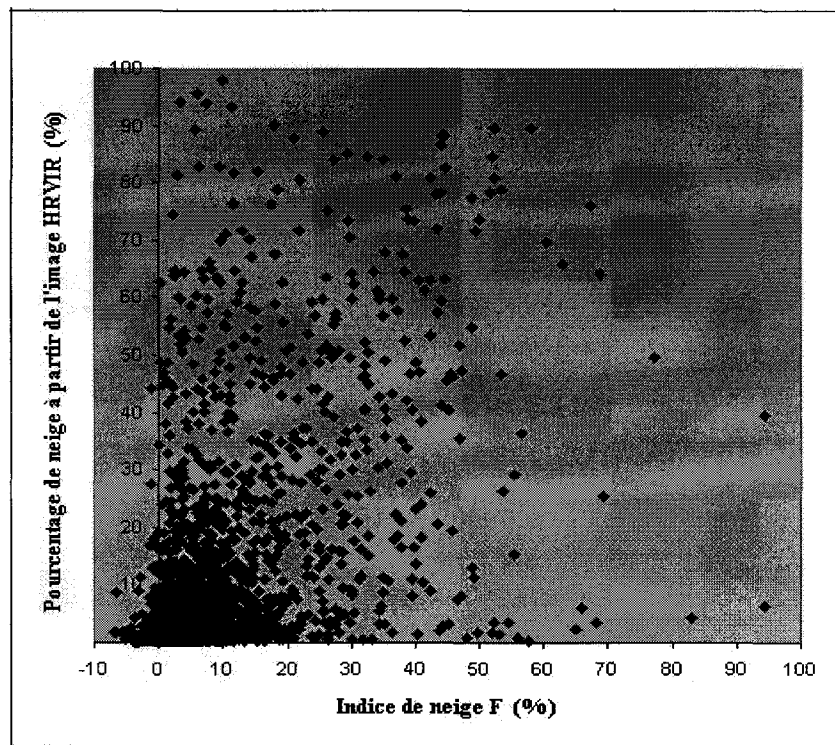
6.1.1 Détermination des équations d'estimation du couvert nival à partir des images du 11 avril, 1999

La première étape consiste à extraire les indices de neige F (équation 2.8) et NDSI (équation 2.9) pour l'image VGT du 11 avril 1999. Les images du 8 février et du 2 mai 1999 ont servi comme images de référence, respectivement, pour un couvert total de neige et une absence totale de neige. À noter, seules les sous-images VGT (figure 6.2a, e et f) qui couvrent la même zone que l'image HRVIR (Région de Sherbrooke) peuvent être utilisées. Nous remarquons à la figure 6.2 que les teintes d'une sous-images VGT, prises durant la fonte de neige, sont différentes de celles d'une autre. Cela est dû essentiellement au rehaussement appliqué à chacune d'entre elles.

Pour chacun des pixels VGT, le vrai pourcentage de neige qu'il contient est déterminé à partir de la carte de couverture de neige (figure 3.8) issue de l'image HRVIR du 11 avril 1999. Cette détermination est réalisée en calculant pour chaque carré de 50*50 pixels de cette carte, qui se superposent avec un pixel VGT, le rapport des pixels avec neige sur le nombre total de pixels (2500). La figure 6.3 représente le pourcentage de neige équivalent pour chacun des pixels VGT (sous-image du 11 avril 1999) calculé à partir de la carte de couverture de neige (image HRVIR) en fonction des indices F et NDSI. Il est évident qu'aucune relation ne relie dans ce cas les vrais pourcentages de neige aux indices de neige (F et NDSI). Nous remarquons aussi qu'il y a même des valeurs négatives pour les deux indices. Cela s'explique par la présence de pixels VGT dont la valeur de réflectance durant la période de fonte est moins élevée que celle observée en absence du couvert nival. Nous constatons aussi que la plupart des pixels ont un vrai pourcentage de neige inférieur à 20%, ce qui donne un nuage de points très condensé ne permettant pas de déterminer une relation significative. Finalement, nous rappelons que seulement 10% de l'image HRVIR était classifié comme étant couverte de neige (Tableau 3.5).



a) Pourcentage de neige à partir de l'image HRVIR en fonction de l'indice de neige NDSI (équation 2.9)



b) Pourcentage de neige à partir de l'image HRVIR en fonction de l'indice F (équation 2.8)

Figure 6.3: Pourcentage de neige à partir de l'image HRVIR en fonction des indices F et NDSI, pour le 11 avril 1999.

6.1.2 Détermination des équations d'estimation du couvert nival à partir des images du 2 avril, 1999

Les mêmes étapes que pour la section précédente sont refaites, mais cette fois-ci en utilisant le couple d'images du 2 avril 1999. Les vrais pourcentages de neige sont déterminés à partir de la carte de couverture de neige (figure 3.9) issue de l'image HRV du 2 avril 1999. Les sous-images VGT qui ont servi à l'extraction des indices de neige sont présentées dans les figures 6.2a, c et f.

À la figure 6.4 nous présentons les vrais pourcentages de neige, issus de l'image HRV, en fonction des indices F et NDSI. Nous remarquons qu'il y a beaucoup plus de pixels dont le vrai pourcentage de neige est supérieur à 20%. Cependant pour la majorité des pixels ces pourcentages de neige sont inférieurs à 40% voir même 30%. Toutefois, une relation linéaire se distingue dans le cas de l'utilisation du NDSI, avec une absence de valeurs négatives. Nous avons pu alors dégager, en utilisant une régression linéaire, l'équation suivante reliant le vrai pourcentage de neige à l'indice NDSI :

$$VPN = (147.96 \times NDSI) - 22.028 \quad \text{Équation 6.1}$$

$$R^2 = 0.66$$

Où :

VPN : Vrai pourcentage de neige

NDSI : Indice normalisé de la différence de neige (équation 2.9)

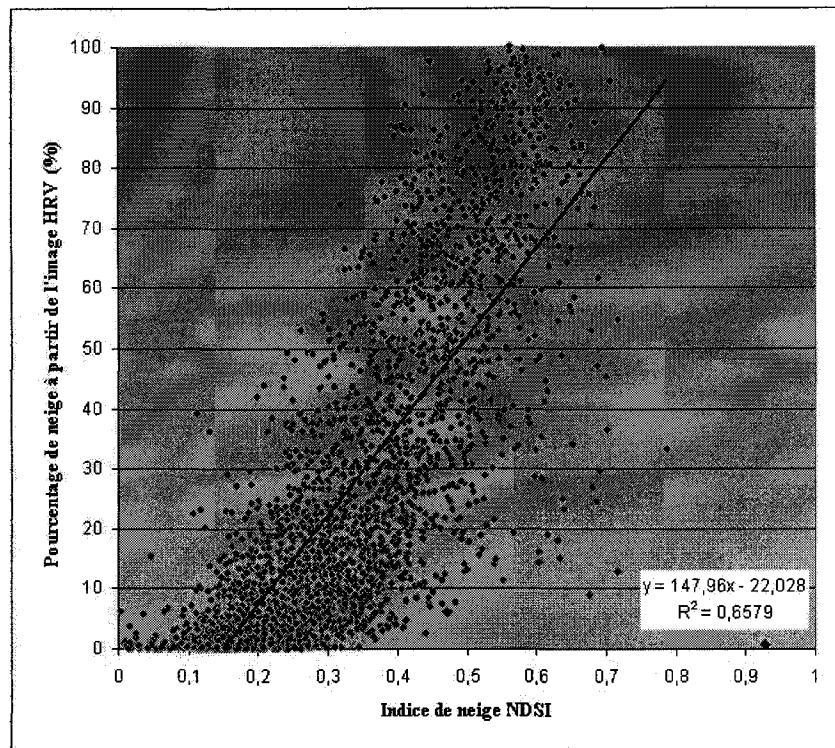
R^2 : Coefficient de détermination

Nous remarquons cependant que pour une variation allant de 0%, absence de neige dans le pixel VGT, jusqu'à 100% du vrai pourcentage de neige, le NDSI varie de 0 à un maximum se situant aux alentours de 0.7. L'équation (6.2) d'estimation du couvert nival, par le NDSI, obtenue par Fortin *et al.*, (1998) est la suivante :

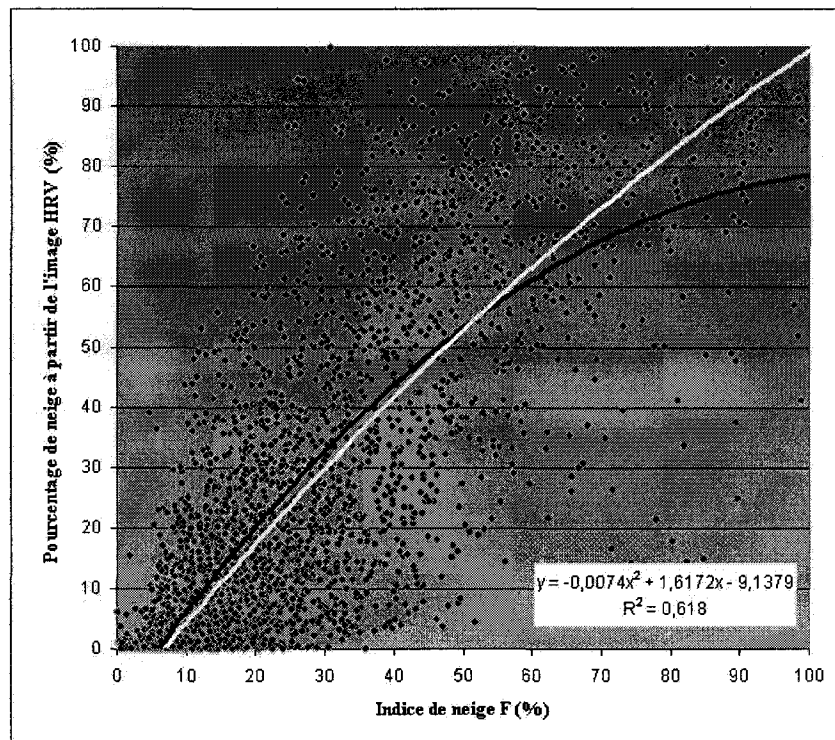
$$VPN = (175 \times NDSI) + 11.39 \quad \text{Équation 6.2}$$

$$R^2 = 0.84$$

Dans cette équation le NDSI varie de 0 à 0.5 quand le vrai pourcentage de neige varie de 11% à 100%. De ce fait, nous ne pouvons pas utiliser l'équation 6.1 pour d'autres images VGT ou pour une zone plus large. En fait, rien ne nous garanti que pour d'autres images VGT le NDSI ne dépassera pas la valeur 0.7.



a) Pourcentage de neige à partir de l'image HRV en fonction de l'indice de neige NDSI (équation 2.9)



b) Pourcentage de neige à partir de l'image HRV en fonction de l'indice F (équation 2.8)

Figure 6.4: Pourcentage de neige à partir de l'image HRV en fonction des indices F et NDSI, pour le 2 avril 1999

La relation qui relie le vrai pourcentage de neige à l'indice F est moins évidente que celle le reliant à l'indice NDSI. Toutefois, bien que les pixels soient toujours condensés, ils sont mieux repartis. Ainsi, pour une variation du vrai pourcentage de neige allant de zéro à 100% l'indice F suit aussi la même variation. L'équation qui découle de cette relation est la suivante (noir dans la figure 6.4b):

$$VPN = (-0.0074 \times F^2) + (1.6172 \times F) - 9.1379 \quad R^2=0.618 \quad \text{Équation 6.3}$$

Où :

VPN: Vrai pourcentage de neige

F: Indice de neige (équation 2.8)

R²: Coefficient de détermination

L'équation 6.3 n'atteint qu'un maximum de 80% du vrai pourcentage de neige. En comparant avec la relation obtenue par Fortin *et al* (1998) (annexe C) nous avons modifié l'équation 6.3 de manière à se rendre au 100% du vrai pourcentage de neige. En fait, théoriquement quand un pixel VGT est totalement couvert de neige l'indice F prend la valeur 1. Inversement, quand il est exempt de neige, F prend la valeur zéro. La nouvelle équation proposée permet une variation de l'indice F allant de 6.6% jusqu'à 100% lorsque le vrai pourcentage de neige varie de 0% à 100%. Cette équation se présente alors comme suit (courbe blanche sur la figure 6.4b):

$$VPN = (-0.0031 \times F^2) + (1.394 \times F) - 9.1278 \quad \text{Équation 6.4}$$

Dans les sections qui suivent, nous utilisons l'équation 6.4 pour la cartographie du couvert nival au niveau sous-pixel dans les images VGT.

6.2 Cartographie du couvert nival au niveau sous pixel pour la région de Sherbrooke

Le fait que les images utilisées soient prises durant la fin de la période de fonte nous a empêché d'extraire de très bonnes équations d'estimation du couvert nival (reliant les indices F et NDSI aux vrais pourcentages de neige). Toutefois, nous avons pu estimer le couvert nival au niveau sous-pixel à l'aide de l'équation 6.4. Cette section est consacrée donc aux résultats de la cartographie au niveau sous pixel du couvert nival pour la région de Sherbrooke.

6.2.1 Cartographie du couvert nival au niveau sous pixel pour le 11 avril 1999

L'image de la figure 6.5a représente les vrais pourcentages de neige, issus de l'image HRVIR du 11 avril 1999, équivalents aux pixels de la sous-image VGT de la région de Sherbrooke (figure

6.2e). Visuellement, nous distinguons que la majorité des pixels où il y avait encore de la neige se concentrent dans la partie Nord-Est de cette image. Rappelons que l'image de la figure 6.5a a été obtenue en calculant la proportion des pixels de haute résolution qui contiennent de la neige par rapport au total des 2500 pixels (haute résolution) équivalents à un seul pixel VGT.

L'image de la figure 6.5b, représente les valeurs de l'indice F calculées suivant l'équation 6.5 :

$$F_{11\text{ avril }1999} = (R_i - R_{if}) / (R_{is} - R_{if}) \quad \text{Équation 6.5}$$

R_i : réflectance du pixel VGT i avec un couvert nival de 0 à 100% issue de la sous-image VGT du 11 avril 1999 (figure 6.2e)

R_{if} : réflectance du pixel VGT i en absence totale de neige, sous-image VGT du 2 mai 1999 figure 6.2f)

R_{is} : réflectance du pixel VGT i avec un couvert total de neige, sous-image VGT du 8 février 1999 (figure 6.2a)

À noter que pour l'indice F les valeurs négatives ou dépassant 1 ont été remplacées respectivement par zéro et 1. En fait, si l'indice F est négatif pour un pixel cela signifie que l'entité $(R_i - R_{if})$ dans l'équation 6.5 est négative. Évidemment, cette entité ne peut être négative que si $R_i \leq R_{if}$ ce qui signifie que ce pixel est exempt de neige. Inversement, si l'indice F est plus grand que un, cela signifie que $(R_i - R_{if}) \geq (R_i - R_{is})$ et donc $R_i \geq R_{is}$ d'où l'assignation de la valeur de ces pixels à un. La figure 6.5c représente l'image des pourcentages de neige estimés à travers l'application de l'équation 6.4, en utilisant comme valeurs de l'indice F celles de la figure 6.5b, pour la sous-image VGT du 11 avril 1999. Cette image reproduit la même distribution spatiale du couvert nival que l'image figure 6.5a. Cependant, nous avons remarqué la présence de deux régions (voir les flèches dans les figures 6.5b et c) qui apparaissent en noir (exemptes de neige) dans la figure 6.5a alors qu'elles sont claires dans la figure 6.5c ! Ce phénomène est dû à la présence de nuages dans la sous-image VGT du 11 avril 1999 (figure 6.2e). En effet, les nuages ont une réflectance similaire à celle de la neige dans le domaine visible du spectre électromagnétique. De ce fait, le paramètre R_i de l'équation 6.5 est maximisé et affecte ainsi à l'indice F une valeur qui ne reflète pas sa réalité. Pour mieux visualiser les différences entre les vrais pourcentages de neige et ceux estimés, nous avons effectué une soustraction entre les sous-images de la figure 6.5a et c. Les résultats de cette soustraction sont présentés dans le tableau 6.1 et la figure 6.6a.

Tableau 6.1: Différences entre les vrais pourcentages de neiges et ceux estimés pour le 11 avril99

	Bonne estimation	Sous estimation	Sur estimation	Sous et Sur estimation
	+/- 10%	10% à 25%	10% à 25%	>25%
% de l'image	80.6%	9.1%	2.8%	7.5%

Nous remarquons que 92.5% des pixels ont des pourcentages de neige estimés à $\pm 25\%$ des vrais pourcentages déterminés à partir de l'image HRVIR. Les 7.5% pixels de l'image qui restent sont soit en sur estimation, soit en sous estimation supérieure à 25% par rapport aux vrais pourcentages de neige. À noter qu'avec l'application d'un filtre pour les nuages, utilisant la bande B4, les surestimations dues à l'effet de ces derniers peuvent être évitées.

Estimation de la distribution spatiale du couvert nival au printemps dans le sud du Québec,
à l'aide du capteur VEGETATION

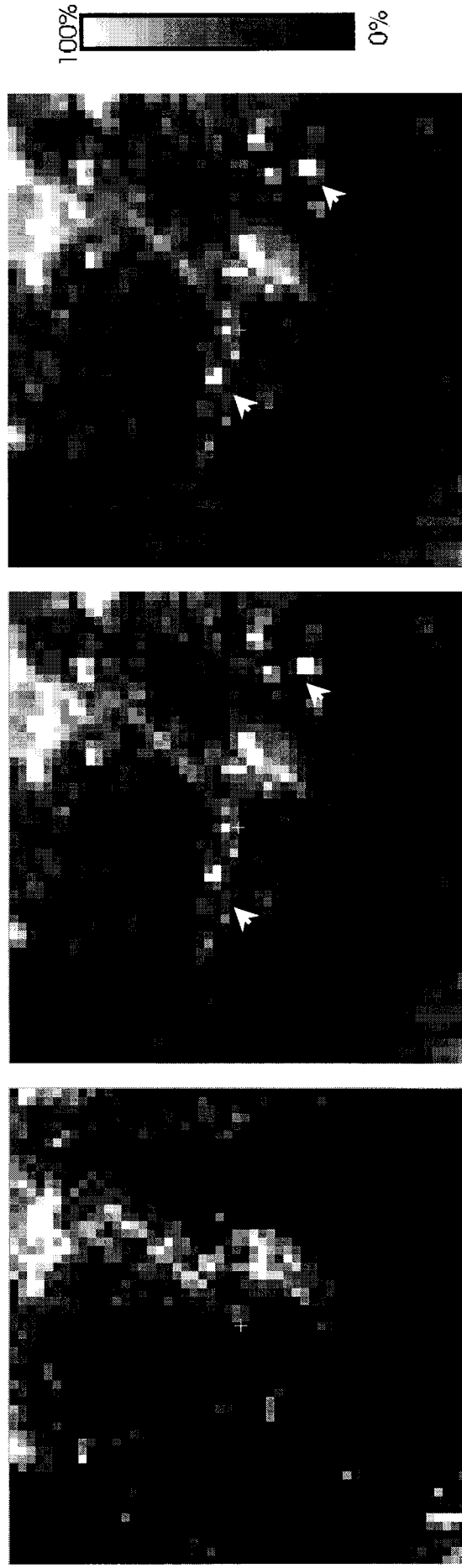
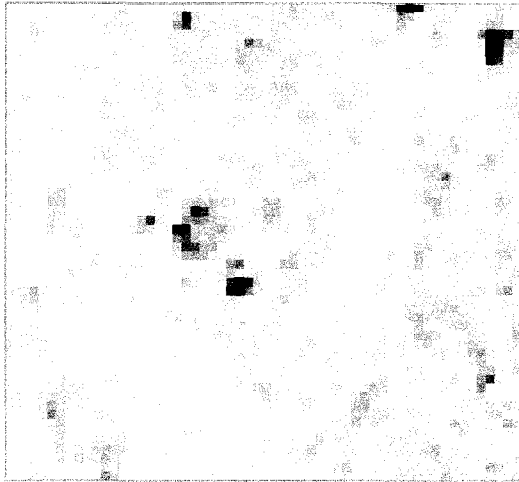
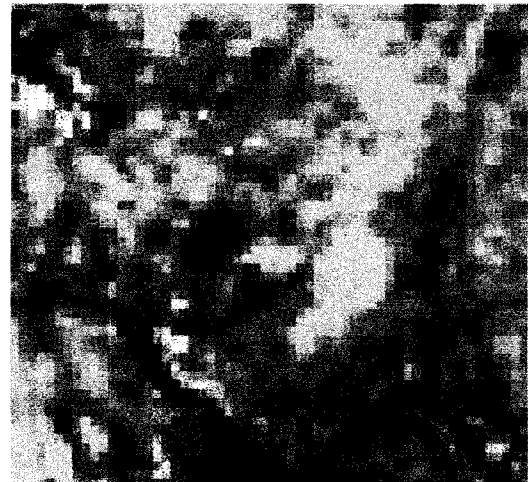


Figure 6.5: Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour la région de Sherbrooke le 11 avril, 1999



a) 8 février 1999



b) 27 mars 1999



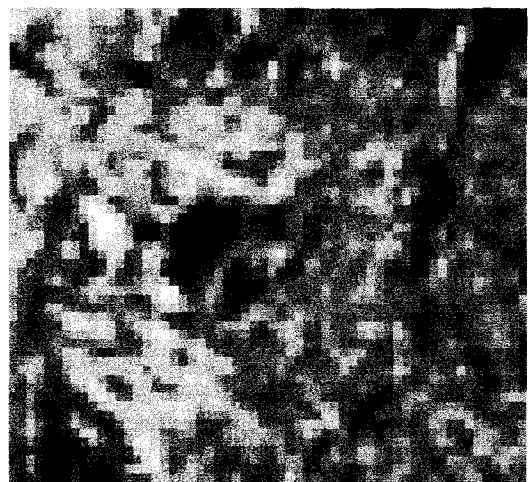
c) 2 avril 1999



d) 5 avril 1999

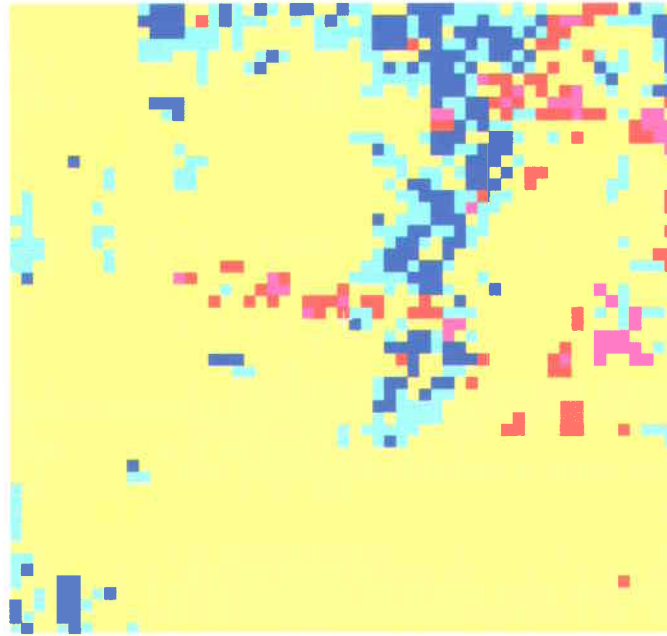


e) 11 avril 1999

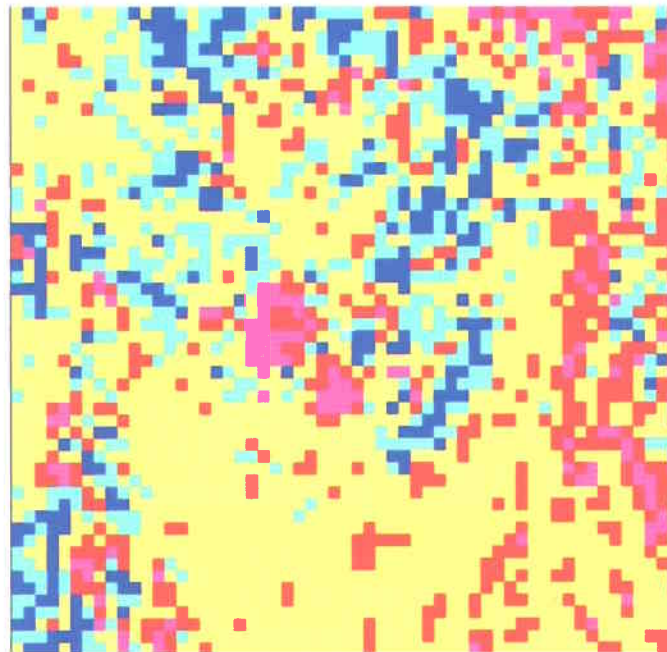


f) 2 mai 1999

Figure 6.2: Sous-images VEGETATION de la région de Sherbrooke



a) Image du 11 avril.1999 (image c – image a. figure 6.5)



b) Image du 02 avril.1999 (image c – image a . figure 6.5)

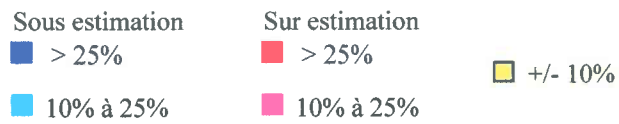


Figure 6.6: Cartographie dans la région de Sherbrooke de la différence entre les vrais pourcentages de neige et ceux estimés.

6.2.2 Cartographie du couvert nival au niveau sous pixel pour le 2 avril 1999

Pour la sous-image VGT du 2 avril 1999, nous avons refait les étapes décrites dans la section précédente. La carte de couverture de neige de cette date a permis de déterminer les vrais pourcentages de neige équivalents pour les pixels de l'image VGT (figure 6.7a). L'indice F a été extrait en appliquant l'équation suivante :

$$F_{02\text{ avril }1999} = (R_i - R_{if}) / (R_{is} - R_{if}) \quad \text{Équation 6.6}$$

R_i : réflectance du pixel VGT i avec un couvert nival de 0 à 100% issue de la sous-image VGT du 2 avril 1999 (figure 6.2c)

R_{if} : réflectance du pixel VGT i en absence totale de neige, sous-image VGT du 2 mai (figure 6.2f)

R_{is} : réflectance du pixel VGT i avec un couvert total de neige, sous-image VGT du 8 février 1999 (figure 6.2a)

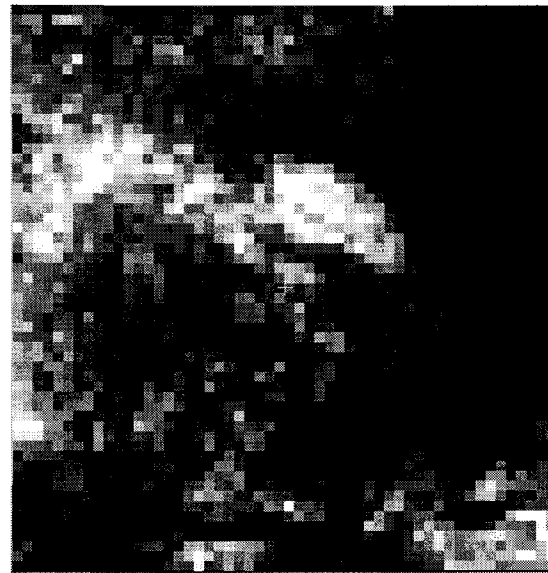
La figure 6.7c représente les résultats de l'estimation du couvert nival au niveau sous pixel, calculés à partir de l'application de l'équation 6.4 à l'image des indices F (figure 6.7b), pour la sous-image VGT du 2 avril 1999. L'image des vrais pourcentages de neige (figure 6.7a), issue de l'image HRV du 2 avril 1999, et celle de ceux estimés (figure 6.7c) représentent la même répartition du couvert nival. La soustraction effectuée entre ces deux images nous donne une idée de la précision des estimations, la figure 6.6b et le tableau 6.2 représentent les résultats de cette soustraction.

Tableau 6.2: Différences entre les vrais pourcentages de neige et ceux estimés pour le 2 avril 1999

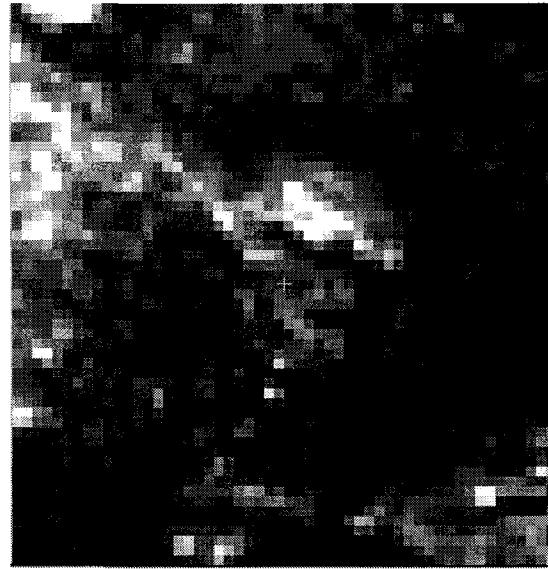
	Bonne estimation	Sous estimation	Sur estimation	Sous et Sur estimation
	+/- 10%	10% à 25%	10% à 25%	>25%
% de l'image	55.9%	14.6%	16%	13.5%

Les pourcentages de neige estimés à $\pm 25\%$ des vrais pourcentages totalisent 86.5% des pixels de la sous-image VGT du 02 avril 1999. Tandis que les 13.5% restants sont en sous ou en sur estimation supérieure à 25% en pourcentage de neige. Les résultats obtenus pour la cartographie de la distribution du couvert nival au niveau sous-pixel sont assez bons. En effet, 92.5% des pixels de la sous-image VGT du 11 avril 1999, région de Sherbrooke, ont été estimés à $\pm 25\%$ du vrai pourcentage de neige, ce pourcentage était de 86.5% pour la sous-image VGT du 2 avril 1999.

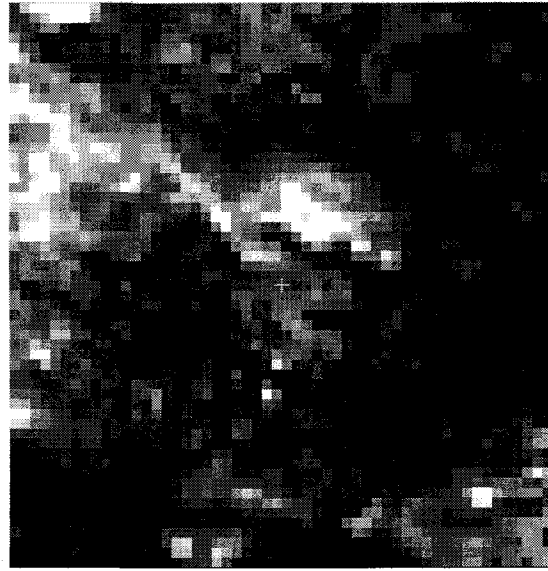
Estimation de la distribution spatiale du couvert nival au printemps dans le sud du Québec,
à l'aide du capteur VEGETATION



a) Vrai pourcentage de neige à partir de l'image HRV



b) Indice F calculé à partir des bandes B2



c) Pourcentage de neige estimé à partir du F
 $\%neige = -0.0031 \times F^2 + 1.394 \times F - 9.1278$

Figure 6.7: Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour la région de Sherbrooke le 02 avril. 1999

6.3 Cartographie du couvert nival au niveau sous pixel pour le sud du Québec

Après avoir vérifié la précision de l'équation d'estimation du couvert nival (équation 6.4) à partir de l'indice F, il est envisageable de l'appliquer pour tout le sud du Québec et pour d'autres dates. Nous présentons dans cette section les résultats obtenus en appliquant l'équation 6.4 sur des sous-images VGT qui couvrent tout le sud du Québec, respectivement les 27 mars, 2, 5 et 11 avril 1999 (figures 6.9 et 6.10). Ces sous-images ont comme coin supérieur gauche le point dont les coordonnées géographiques sont (74W ;47N), et le point (70W ;44N) comme étant le coin inférieur droit. Cet espace géographique couvre la ville de Trois-Rivières située au Nord-Ouest des sous-images, tout juste à l'Est du lac Saint-Pierre. L'île de Montréal est facilement repérable dans la partie Sud-Ouest des sous-images. La région de Sherbrooke étudiée précédemment est plus au centre de l'image (carré gris dans les figures 6.9 et 6.10) elle est située juste au Nord du lac Memphremagog et à l'Est du lac Mégantic. Nous distinguons aussi, au Sud-Ouest des sous-images, le lac Champlain chevauchant la frontière avec les États-Unis d'Amérique. Pour les sous-images VGT du 2 et du 11 avril 1999, des zones ont été masquées par les nuages.

Les résultats de ces estimations de la distribution spatiale du couvert nival au niveau sous-pixel, dans le sud du Québec, sont présentés dans les figures 6.11 et 6.12. Nous distinguons nettement, à travers ces quatre images, l'évolution de la fonte printanière du couvert nival. En fait, plus le temps avançait, plus la neige fondait et ne persistait que dans les régions plus au nord et dans les montagnes dans le sud. Le tableau 6.3 et la figure 6.8, nous indiquent qu'en passant du 27 mars au 11 avril 1999, le pourcentage de pixels dont le pourcentage de neige est entre zéro et 5% a un comportement inverse à celui des pixels dont le pourcentage en neige est entre 95% et 100%. À noter que pour les images du 2 et du 11 avril 1999 les pourcentages de neige ont été calculés seulement pour les pixels exempts de nuages. Nous remarquons une anomalie dans la cartographie du couvert nival pour la sous-image VGT du 11 avril 1999. En effet, bien que, dans cette image, il n'y avait pas de neige dans la zone sud-ouest (cercle bleu en pointillés, figure 6.10b) le pourcentage sous-pixel obtenu en utilisant l'équation 6.4 donne des valeurs entre 95% et 100% (figure 6.12b). Une fois encore, la présence de nuages est mise en cause. En effet, les valeurs de l'indice F calculées dans cette région sont trop élevées et s'expliquent par la présence d'un voile nuageux (cercle en pointillés, figure 6.10b). Ce voile nuageux se comporte en terme de réflectance, dans la bande B2, comme la neige, ce qui a mené à une surestimation de la neige au niveau sous pixel dans cette région. L'utilisation de la bande B4 pour masquer ce voile nuageux n'est pas possible, puisque ce dernier est semi-transparent.

Tableau 6.3 : Statistiques sur les pourcentages de neige estimés durant la période de fonte

Pourcentage de neige	mars-27	02-avr	05-avr	11-avr
	Pourcentage de l'image			
0% à 5%	9.00%	12.39%	36.53%	50.63%
5% à 20%	6.25%	10.73%	7.31%	9.07%
20% à 35%	5.05%	9.44%	6.56%	6.47%
35% à 50%	5.04%	10.44%	7.34%	6.02%
50% à 65%	5.39%	11.54%	9.90%	6.24%
65% à 80%	8.21%	11.74%	12.06%	6.70%
80% à 95%	14.12%	11.25%	10.27%	6.56%
95% à 100%	46.94%	22.47%	10.04%	8.31%
Nuages	0%	24.23*%	0%	3.91*%

* pourcentage calculé sur l'ensemble des pixels de l'image, alors que les pourcentages de neige sont calculés par rapport au nombre de pixels sans neige de l'image.

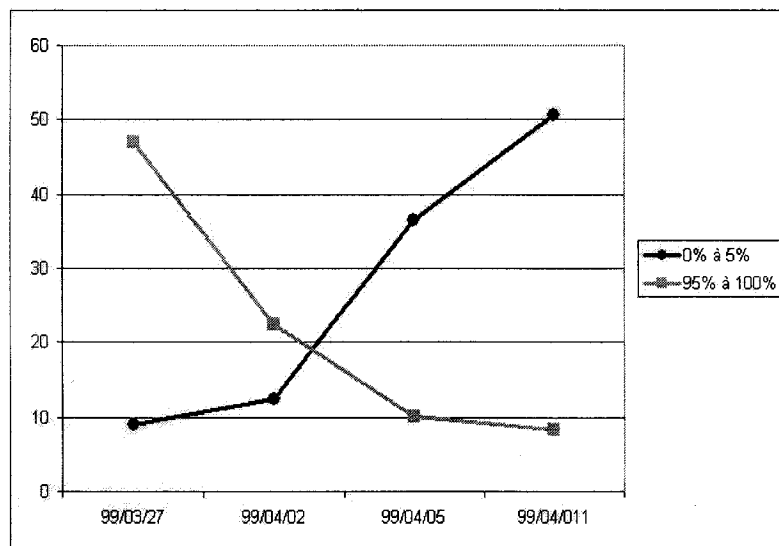
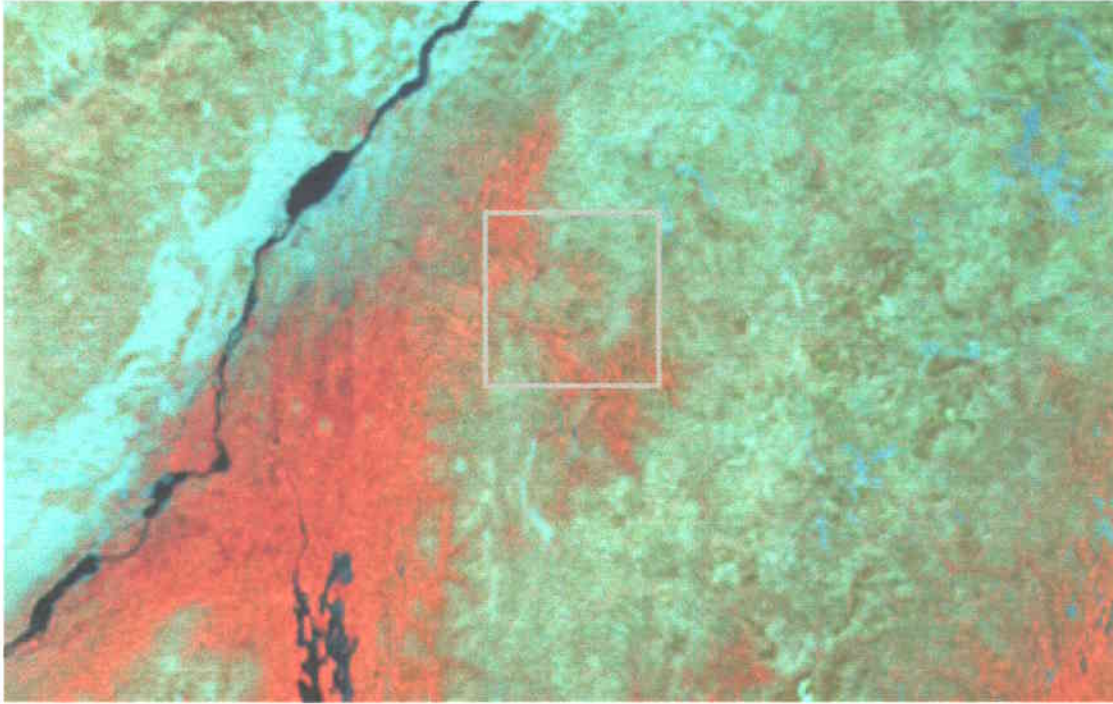
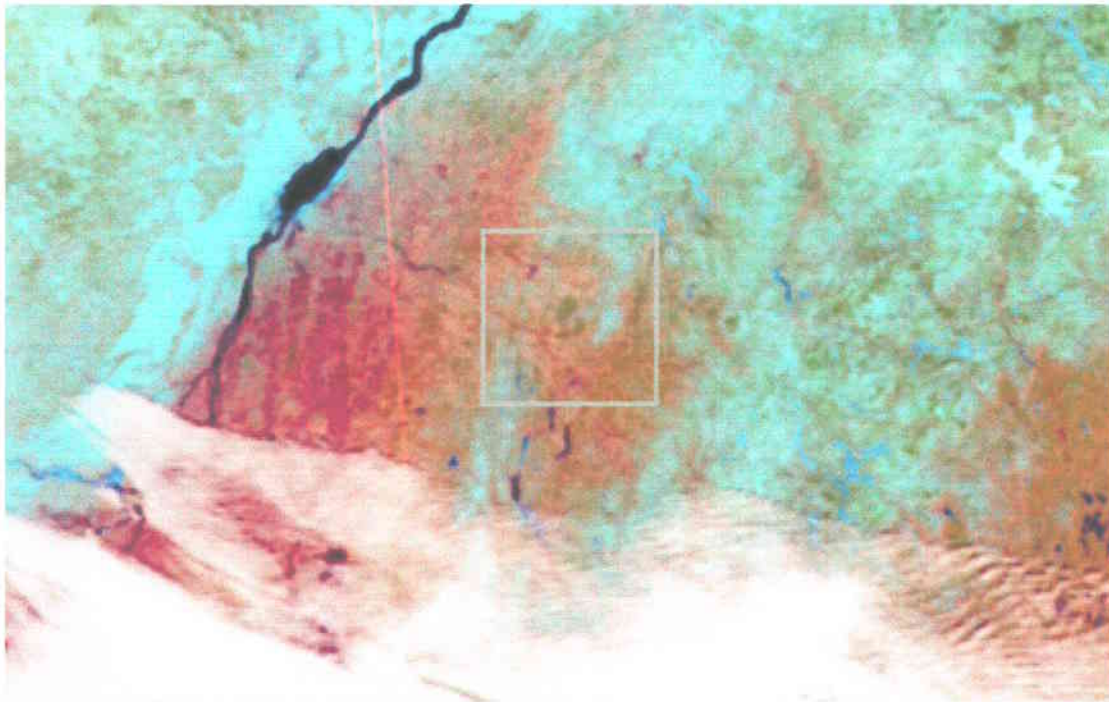


Figure 6.8 : Variation du pourcentage de neige durant la période de fonte (27 mars~11 avril, 1999)

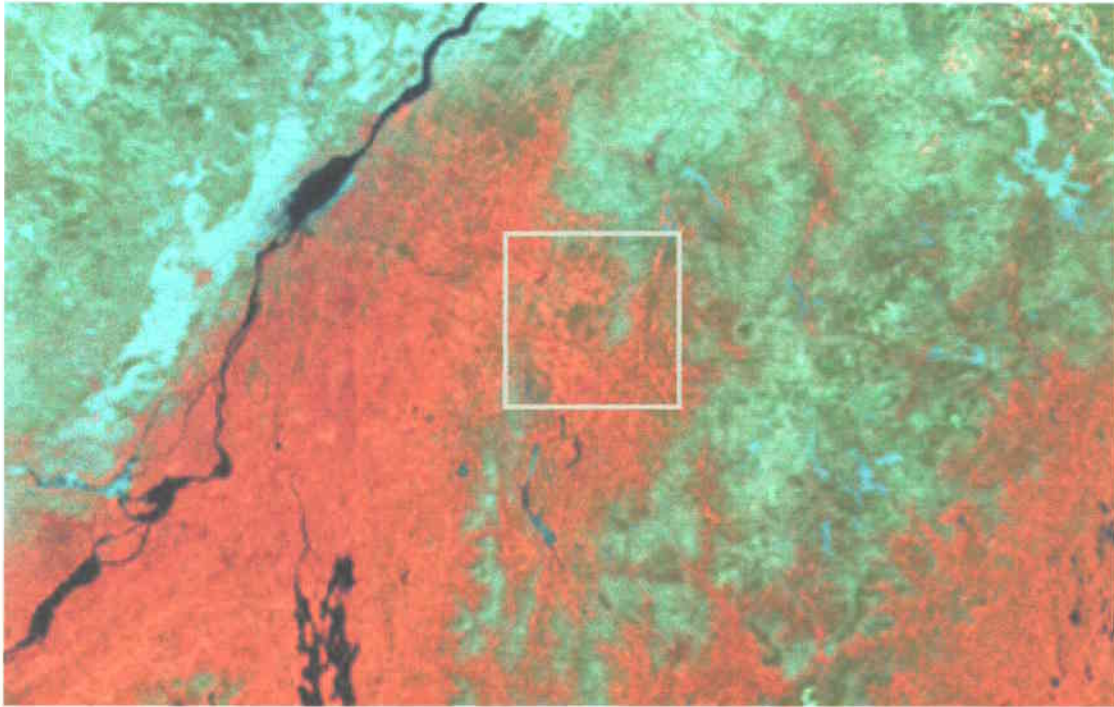


a) Sud du Québec le 27 mars 1999

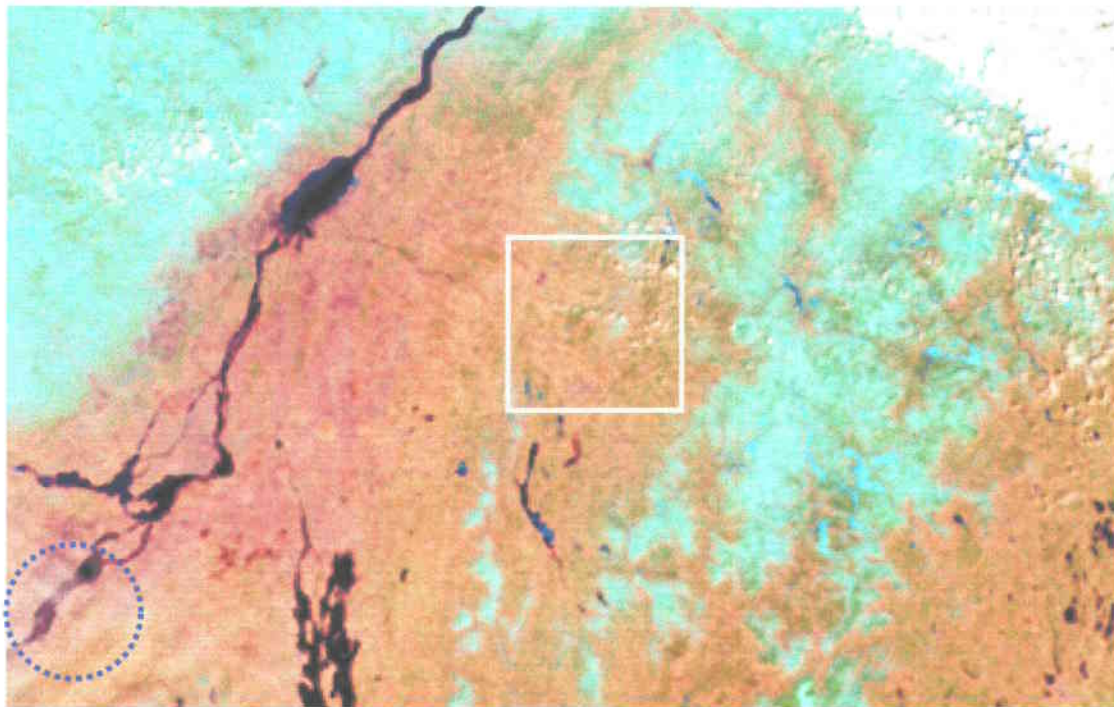


b) Sud du Québec le 2 avril 1999

Figure 6.9: Images VGT en fausses couleurs. B2 dans le bleu. B3 dans le vert et B4 dans le rouge.

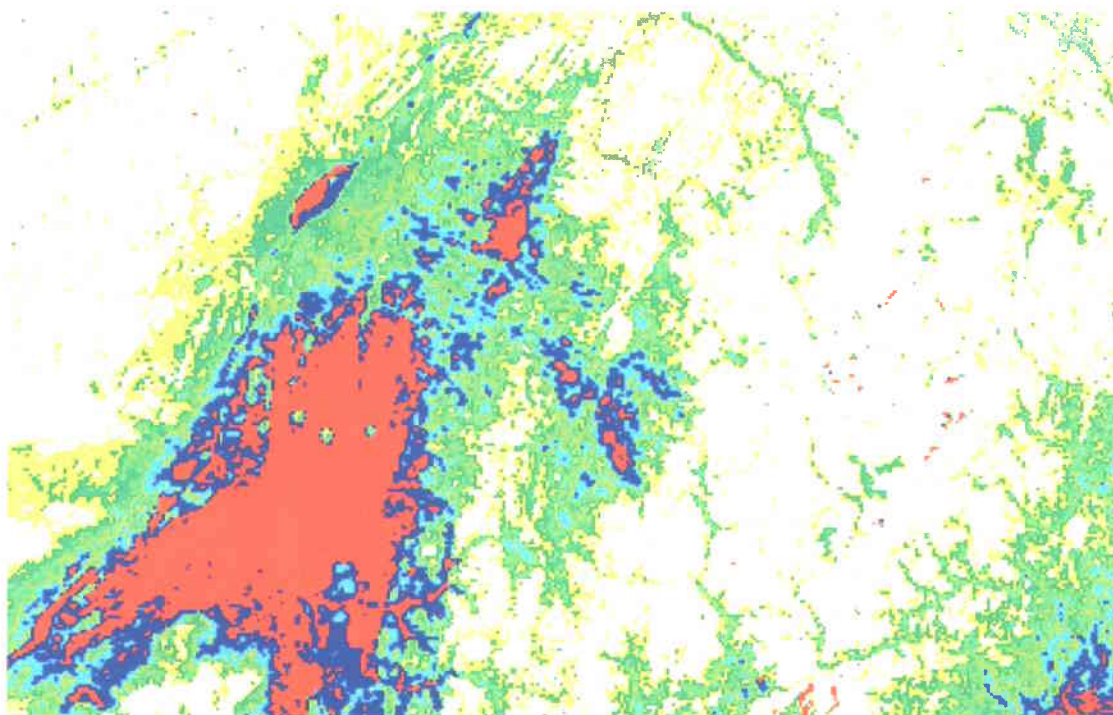


a) Sud du Québec le 5 avril 1999

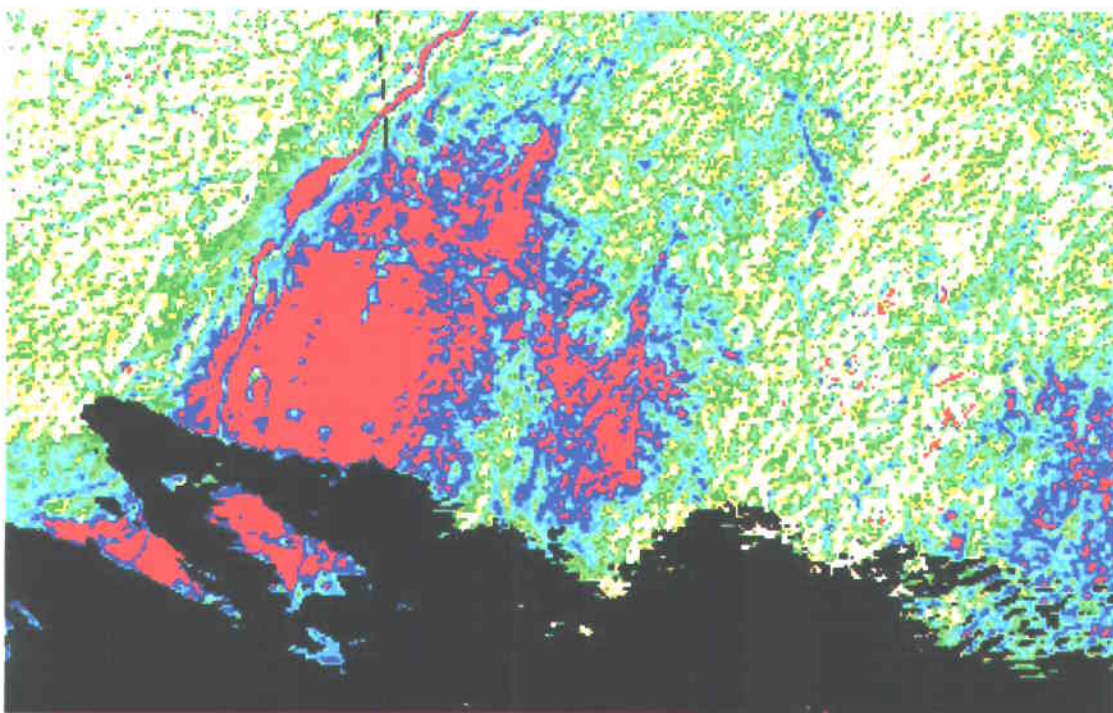


a) Sud du Québec le 11 avril 1999

Figure 6.10: Images VGT en fausses couleurs. B2 dans le bleu. B3 dans le vert et B4 dans le rouge.



a) Sud du Québec le 27 mars.1999



b) Sud du Québec le 02 avril.1999

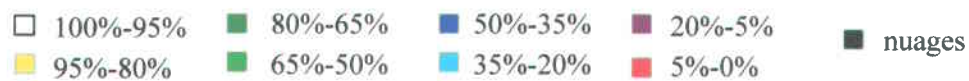
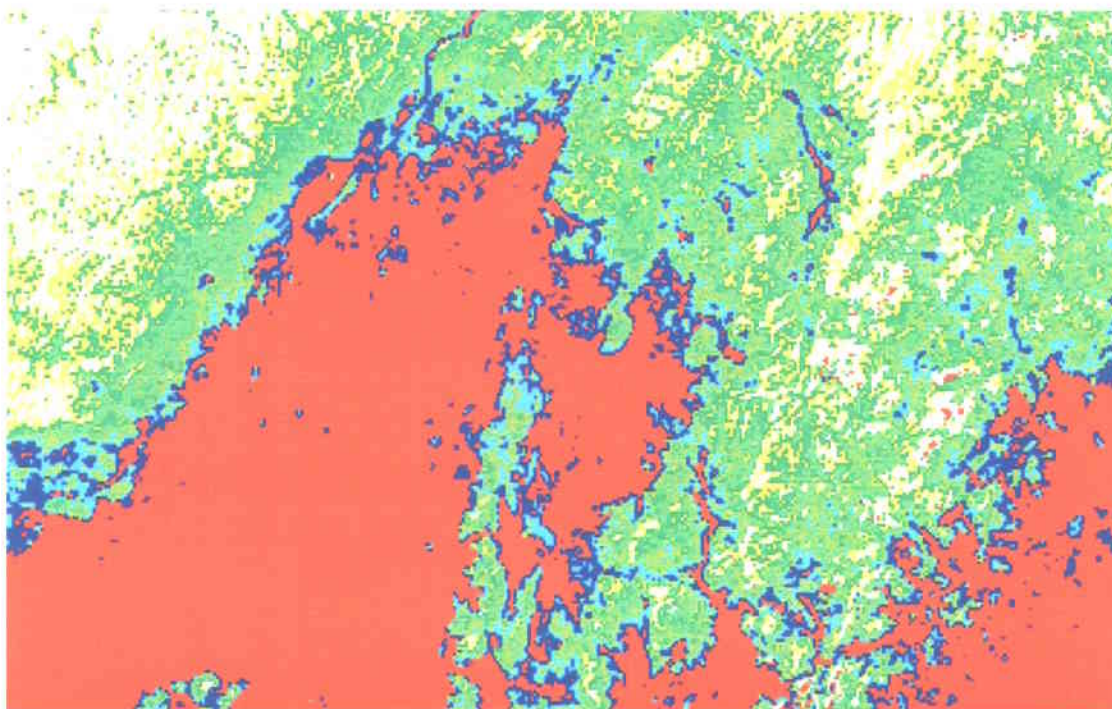
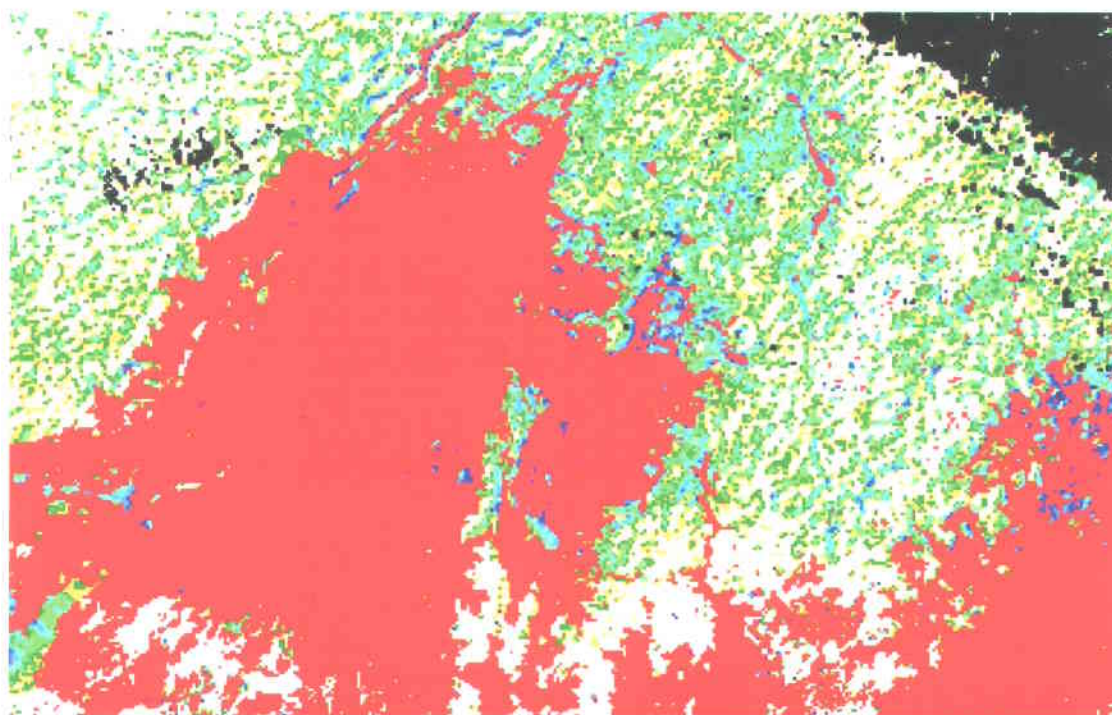


Figure 6.11 : Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour le sud du Québec



a) Sud du Québec le 05 avril.1999



b) Sud du Québec le 11 avril.1999



Figure 6.12: Estimation de la distribution sous-pixels de la neige pour le sud du Québec

6.4 Discussions et Conclusion

L'objectif principal de notre étude était de pouvoir estimer la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION. Dans le chapitre 6 nous avons exposé les résultats obtenus pour cette estimation. Nous avons constaté aussi que les couplets d'images [haute/basse] résolution spatiale disponibles, n'étaient pas trop adéquats pour notre étude. En fait, dans les images de haute résolution spatiale que nous avons utilisées, il ne restait que 10% et 25% de la surface de la région de Sherbrooke qui était couverte de neige, respectivement pour le 2 et le 11 avril 1999. En fait, ces pourcentages relativement faibles en neige ne nous permettaient pas d'extraire des équations d'estimation du couvert nival, se basant sur l'indice F ou NDSI. En plus, la neige était mal répartie dans les différentes classes d'occupation du sol, en fait, il n'y avait plus de couvert nival au-dessus des zones dégagées de l'image HRVIR du 11 avril 1999. Comparativement à l'image HRVIR simulée utilisée par Fortin *et al.*, (1998) il y avait peu de neige dans nos images, puisque dans leur image le couvert nival couvrait 68% de la région étudiée.

En tenant compte de tous les faits ci-haut relatés, et en dépit de leurs répercussions sur le bon déroulement de notre étude, nous avons réussi à déterminer une équation d'estimation du couvert nival (équation 6.4), reliant l'indice F d'un pixel VGT à son vrai pourcentage en neige, qui nous a permis d'atteindre l'objectif principal. Par exemple, en utilisant l'équation 6.4, dans 80.6% des pixels VGT de l'image VGT du 11 avril (région de Sherbrooke) l'estimation du contenu sous-pixel en neige a été faite à $\pm 10\%$ du vrai pourcentage. Cela signifie que si X% est le vrai pourcentage de neige dans un pixel VGT, déterminé à partir de la grille de classification haute résolution, le pourcentage de neige estimé en utilisant l'équation 6.4 était situé dans l'intervalle $[X\%-10; X\%+10]$ et ce pour 80.6% des pixels de l'image. Une étude a été menée parallèlement à la nôtre pour déterminer la précision de notre équation (Mathieu, 2000). Parmi une vingtaine d'équations polynomiales, du deuxième degré, toutes semblables à notre équation 6.4, cependant de courbures différentes, l'équation 6.4 était parmi celles qui donnaient les meilleurs résultats. Finalement, les résultats exposés dans le chapitre 6 sont très encourageants et nous poussent à raffiner la méthodologie. Cette dernière, en tenant compte de nos résultats et ceux obtenus par Fortin *et al.*, (1998), a fait ses preuves et peut être utilisée pour le suivi de l'évolution du couvert nival au niveau sous-pixel. Toutefois, il faut extraire une vraie équation d'estimation du couvert nival à partir d'un couplet d'images [haute/basse] résolution spatiale prises à un moment opportun du printemps. Ce dernier sera plus vers la mi-printemps où le couvert nival persiste partiellement

au-dessus des diverses classes d'occupation du sol. En conclusion générale, « l'estimation la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION » est possible et est en mesure de générer une cartographie du couvert nival pouvant être utilisée comme source de données dans les modèles hydrologique et/ou climatiques.

7 DISTRIBUTION DE LA NEIGE DANS UN PIXEL VGT SELON LES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL

7.1 Application de la méthodologie à l'image du 2 avril

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus, pour le troisième et dernier des objectifs secondaires de notre étude. Rappelons-le, pour cet objectif nous avons essayé de définir les liens existant entre le pourcentage de neige dans un pixel VGT et la nature des classes d'occupation du sol qu'il couvre. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux trois familles des classes d'occupation du sol suivantes :

- Zones dégagées : avec et sans neige.
- Forêts de feuillus et forêts mixtes : avec et sans neige.
- Conifères : avec et sans neige.

Dans cette partie de notre étude nous n'utilisons que les grilles de classification du sol issues des images HRVIR et HRV. En effet, pour chacun des pixels VGT nous définissons sa proportion couverte de neige et encore dans quelles classes d'occupation du sol cette neige se trouvait.

Normalement, cette étude devait principalement se faire en utilisant l'image HRVIR du 11 avril 1999. Cependant, dans la dite image, il ne restait que 10% de superficie de couvert de neige à cette date et, en sus, il ne restait plus de neige dans les zones dégagées (tableau 3.5). L'image HRV du 2 avril 1999 présente alors la seule autre alternative pour réaliser cette étude. Sa superposition avec la grille de classification issue de l'image du 11 avril 1999 a permis d'extraire une carte de couvert de neige selon les classes nommées plus haut. Dans cette carte 20.94% du terrain est couvert de neige (tableau 3.6). À la figure 7.1, les pourcentages exprimés signifient la proportion couverte ou non de neige d'une classe par rapport à la superficie totale qu'occupe cette classe dans l'image.

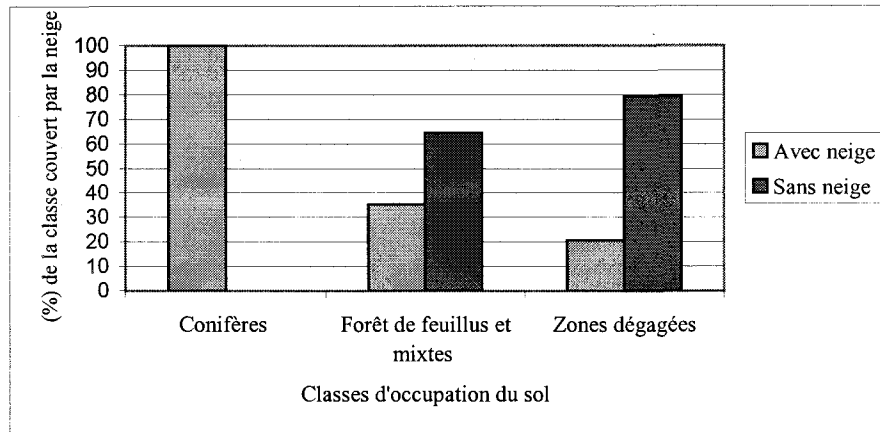


Figure 7.1: Pourcentage couvert de neige dans les classes d'occupation du sol le 2 avril 1999. Nous remarquons que le 2 avril 1999 la neige était présente dans 100% des forêts de conifères, 35.37% des forêts des feuillus et forêts mixtes et 20.71% des zones dégagées. Inversement, la neige est absente dans 64.63% des forêts de feuillus et forêts mixtes et dans 79.29% des zones dégagées.

À ce stade, nous avons déjà distingué le fait que la neige fond plus rapidement dans les zones dégagées que dans les forêts en général, et qu'elle fond plus vite dans les forêts de feuillus et mixtes que dans les forêts de conifères. Pour concrétiser le lien entre la surface couverte de neige et les classes d'occupation du sol qui l'occupent, nous avons tracé les courbes des figures 7.3, 4, 5 et 6. L'obtention de ces courbes s'est fait en déterminant pour chaque surface équivalente à un pixel VGT les pourcentages suivants (figure 7.2):

- Pourcentage de la surface des zones dégagées couverte de neige
- Pourcentage de la surface des forêts de feuillus et mixtes couverte de neige.
- Pourcentage de la surface des forêts de conifères couverte de neige.
- Pourcentage de la surface des zones dégagées non couverte de neige
- Pourcentage de la surface des forêts de feuillus et mixtes non couverte de neige.
- Pourcentage de la surface des forêts de conifères non couverte de neige.

Ces pourcentages ont été obtenus en appliquant les équations suivantes:

$$\%NC_i = \sum PC_i N / \sum PC_i$$

$$\%SNC_i = 1 - \%NC_i$$

$\%NC_i$: pourcentage de neige dans la classe d'occupation du sol i sur une superficie équivalente à un pixel VGT;

$PC_i N$: pixels de la classe d'occupation du sol i avec neige sur une superficie équivalente à un pixel VGT;

PC_i : pixels totaux de classes d'occupation du sol i sur une superficie équivalente à un pixel VGT;

$\%SNC_i$: pourcentage sans neige dans la classe d'occupation du sol i sur une superficie équivalente à un pixel VGT.

Nous avons extrait de ces pourcentages les courbes suivantes:

1. %neige dans les forêts de feuillus et mixtes = $f(\%$ neige dans les zones dégagées) (figure 7.3)
2. %neige dans les forêts de conifères, feuillus et mixtes = $f(\%$ neige dans les zones dégagées) (figure 7.4)
3. %neige dans les forêts de conifères, feuillus et mixtes = $f(\%$ neige total dans le pixel VGT équivalent) (figure 7.5)
4. %neige dans les zones dégagées = $f(\%$ neige total dans le pixel VGT équivalent) (figure 7.6)

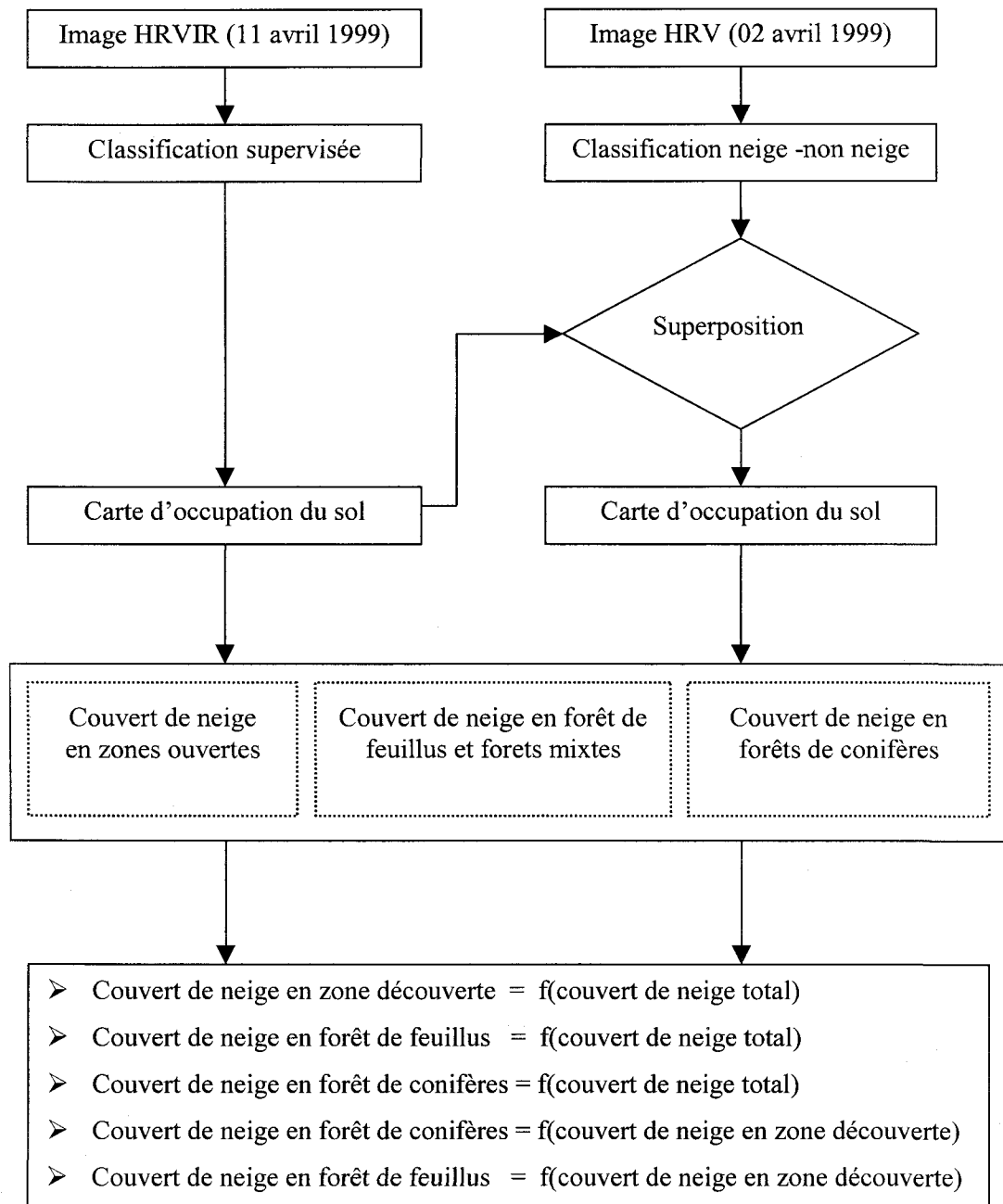


Figure 7.2: Distribution du couvert nival suivant les classes d'occupation du sol

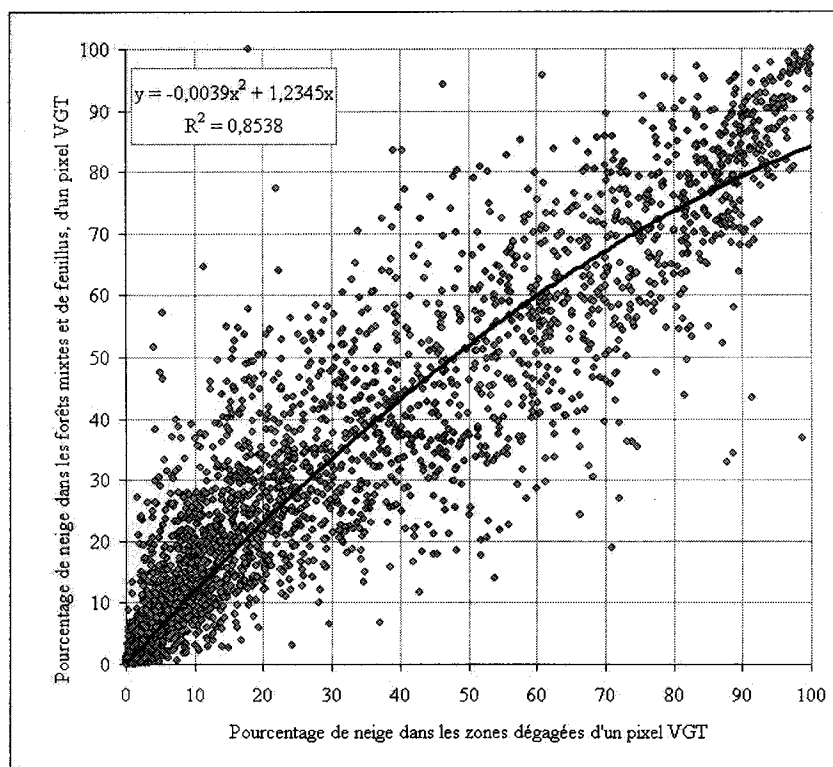


Figure 7.3: % de neige dans les forêts de feuillus et mixtes en fonction du % de neige dans les zones dégagées, Image HRV du 2 avril 1999.

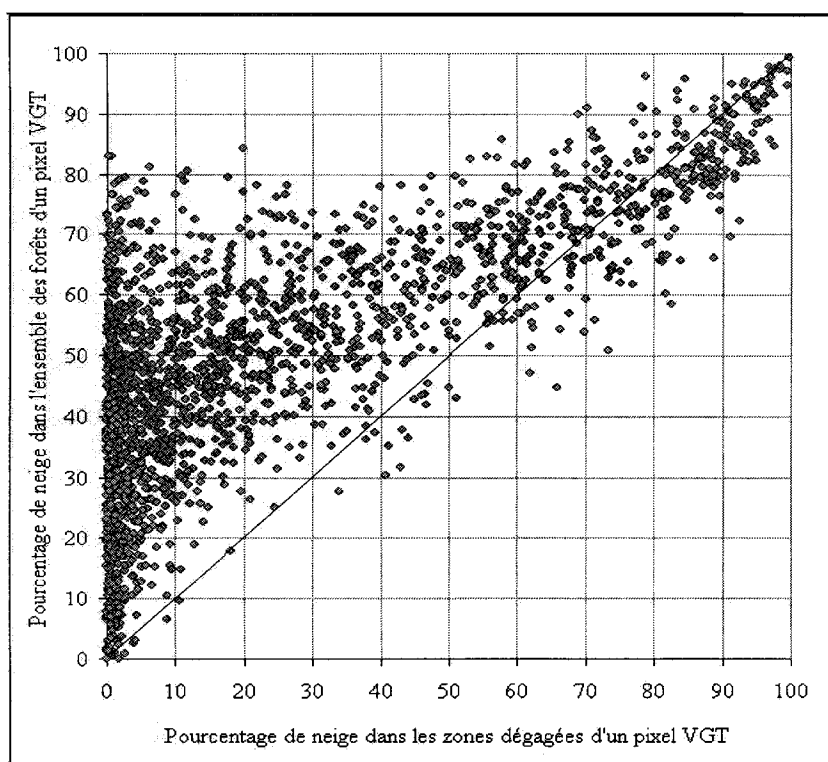


Figure 7.4: % de neige dans les forêts de conifères, feuillus et mixtes en fonction du % de neige dans les zones dégagées, Image HRV du 2 avril 1999.

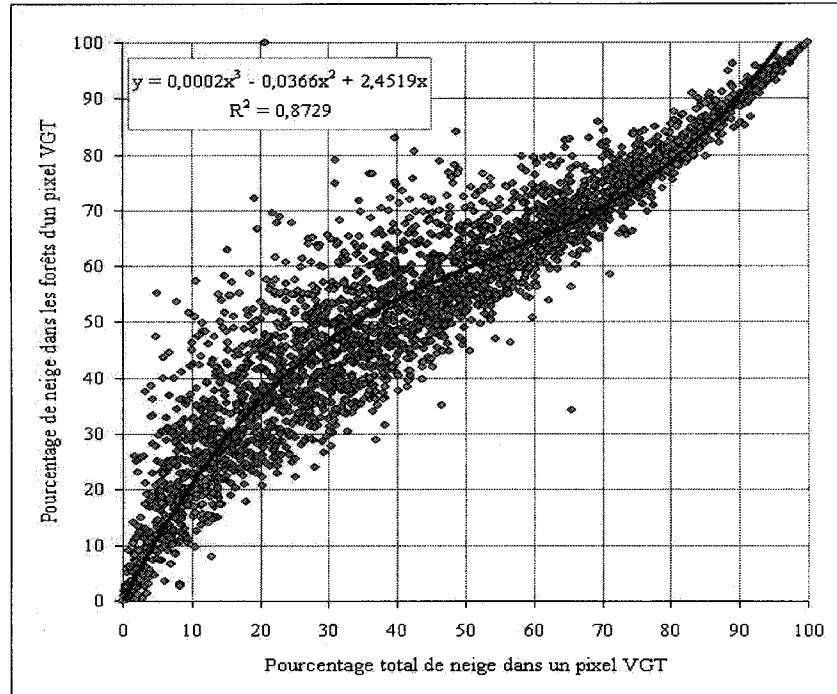


Figure 7.5: % de neige dans les forêts de conifères, feuillus et mixtes en fonction du % de neige total dans le pixel VGT équivalent. Image HRV du 2 avril 1999.

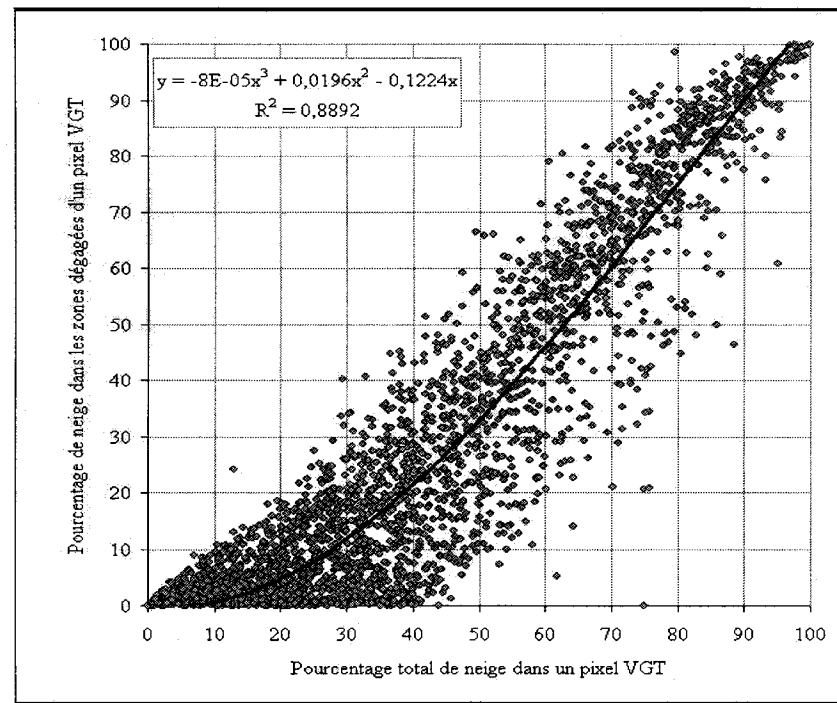


Figure 7.6: % de neige dans les zones dégagées en fonction du % de neige total dans le pixel VGT équivalent. Image HRV du 2 avril 1999.

7.2 Conclusion

Les figures 7.3 à 7.6 affirment le fait que la neige fond plus vite dans les zones dégagées que dans les zones forestières. En effet, dans la figure 7.4 nous remarquons que ce fait est très évident et ce pour la majorité des pixels. Cependant, dans les pixels où il y avait plus de 70% de couverture de neige sur les surfaces couvertes par des forêts ou qui sont dégagées la répartition est plus identique. Des figures 7.5 et 7.6 nous remarquons que lorsqu'un pixel VGT est couvert d'un pourcentage X de neige (avec $X \leq 70\%$) :

- La proportion de surface des zones dégagées couverte de neige est inférieure à X , tandis que,
- La proportion de surface des forêts couverte de neige est supérieure ou égale à X

Pour les pixels où il restait encore plus que 70% de la surface qui est couverte de neige, les proportions de surfaces couvertes encore de neige pour les forêts et les zones dégagées sont relativement égales.

Les équations obtenues peuvent être utilisées pour l'estimation de la répartition de la neige dans les pixels VGT. En effet, dans le chapitre précédent nous avons exposé les résultats de l'estimation du pourcentage de neige dans les pixels. Cependant, nous n'avions aucune idée sur la répartition spatiale de la neige au sein de ceux-ci. En utilisant ces équations dans des applications futures, l'estimation de cette répartition peut être possible.

8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de notre étude était de pouvoir estimer la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec, à l'aide du capteur VEGETATION. Dans le chapitre 6 nous avons exposé les résultats obtenus pour cette estimation. Nous avons constaté aussi que les couplets d'images [haute/basse] résolution spatiale disponibles n'étaient pas assez adéquats pour notre étude. En fait, dans les images de haute résolution spatiale, que nous avons utilisé, il ne restait que 10% et 25% de la surface de la région de Sherbrooke qui était couverte de neige, respectivement pour le 02 et le 11 avril 1999. Ces pourcentages relativement faibles en neige ne nous permettaient pas d'extraire des équations d'estimation du couvert nival, se basant sur l'indice F ou NDSI, concluantes. En plus, la neige était mal répartie dans les différentes classes d'occupation du sol. En effet, il n'y avait plus de couvert nival au-dessus des zones dégagées de l'image HRVIR du 11 avril 1999. Comparativement à l'image HRVIR simulée utilisée par Fortin *et al.*, (1998) il y avait peu de neige dans nos images, puisque dans leur image le couvert nival couvrait 68% de la région étudiée. En tenant compte de tous les faits ci-haut relatés, et en dépit de leurs répercussions sur le bon déroulement de notre étude, nous avons réussi à déterminer une équation d'estimation du couvert nival (équation 6.4), reliant l'indice F d'un pixel VGT à son vrai pourcentage en neige, qui nous a permis d'atteindre l'objectif principal. Par exemple, en utilisant l'équation 6.4, dans 80.6% des pixels VGT de l'image VGT du 11 avril (région de Sherbrooke) l'estimation du contenu sous-pixel en neige a été faite à $\pm 10\%$ du vrai pourcentage. Cela signifie que si X% est le vrai pourcentage de neige dans un pixel VGT est déterminé à partir de la grille de classification haute résolution, le pourcentage de neige estimé en utilisant l'équation 6.4 était situé dans l'intervalle $[X\%-10; X\%+10]$ et ce pour 80.6% des pixels de l'image. Une étude a été menée parallèlement à la nôtre pour déterminer la précision de notre équation (Mathieu 2000). Il s'est avéré d'après cette étude que parmi une vingtaine d'équations d'estimation du couvert nival l'équation 6.4 est parmi celles qui donnent les meilleurs résultats. Finalement, les résultats exposés dans le chapitre 6 sont très encourageants et nous poussent à raffiner ultérieurement la méthodologie. Cette dernière peut être utilisée pour le suivi de l'évolution du couvert nival au niveau sous-pixel dans le sud du Québec. Toutefois, il faut extraire une vraie équation d'estimation du couvert nival à partir d'un couplet d'images [haute/basse] résolution spatiale prises à un moment opportun du printemps. Ce dernier sera plus vers la mi-printemps où le couvert nival persiste partiellement au-dessus des diverses classes d'occupation du sol. En conclusion générale, « l'estimation la distribution spatiale du couvert nival dans le sud du Québec,

à l'aide du capteur VEGETATION » est possible et est en mesure de générer une cartographie du couvert nival pouvant être utilisée comme source de données dans les modèles hydrologique et/ou climatiques.

Concernant le premier objectif secondaire « Estimation des réflectances des classes d'occupation du sol à partir d'image VGT » nos conclusions sont présentées dans les lignes qui suivent. Le modèle linéaire de composition des réflectances (équation 2.1) [Shimabukuro et Smith 1991; Holben et Shimabukuro 1993; Cherchali 1995; Cherchali et Flouzat 1994; Marceau 1991; Puyou-Lacassies *et al.* 1992] est représentatif de la réalité. L'hétérogénéité au sein d'une classe d'occupation du sol détériore l'estimation de sa réflectance. Pour contourner ce problème, l'utilisation d'une grille d'occupation du sol dont les classes sont raffinées et peu hétérogènes présente une solution. Cependant, le compromis à réaliser réside dans le fait que plus la classification est raffinée plus le nombre de classes d'occupation du sol augmente et moins bonne serait la représentativité de chacune d'entre elles. Dans la pratique, une grille de classification pouvant inclure facilement plus d'une vingtaine de classes d'occupation du sol. Dans notre cas, nous avons initialement plus que 40 classes d'occupation du sol que nous avons regroupées en 18 (en se basant sur les signatures spectrales). L'estimation des réflectances était très acceptable mais seulement pour des classes d'occupation du sol relativement peu hétérogènes et bien représentées (superficie $\geq 5\%$). Cependant, il ne faut pas oublier que l'image des réflectances VGT et l'image HRVIR, à partir de laquelle les vraies valeurs de réflectance ont été issues, n'ont pas été corrigées de la même manière de l'effet induit par l'atmosphère. En fait, tandis que la première était corrigée par le module SMAC (Rahman et Dedieu, 1994), la deuxième était corrigée en utilisant le modèle ATCOR basé sur LOWTRAN-7 (Kneizys *et al.*, 1983) et SENSAT-3 (Richter, 1989). Ce dernier étant disponible sur le logiciel de traitement d'images PCI 6.3 ne supportait pas encore la bande B4. Hors, quand il s'agit d'études se reliant directement aux réflectances, il est recommandé d'utiliser le même procédé de correction atmosphérique pour toutes les images utilisées. Cela aura pour effet de minimiser les sources d'erreurs. Comme pour l'objectif principal, nous concluons avec le fait que les réflectances estimées pour les classes d'occupation du sol d'intérêt étaient très acceptables, en tenant compte les faits ci-haut avancés, et que la méthodologie utilisée devrait être optimisée en fonction de l'hétérogénéité des réflectances des diverses classes d'occupation du sol.

Pour ce qui est de l'ajustement du positionnement des localisations géographiques des images nous avons conclu ce qui suit. Les méthodes exhaustive et heuristique se basent sur l'estimation

des réflectances. Or, dans le paragraphe précédant, nous avons exposé les facteurs qui influencent cette estimation et de ce fait les deux méthodes d'ajustement sont directement affectées. En fait, dans le chapitre 5 nous avons remarqué que la méthode exhaustive utilisant l'ETMB était la plus appropriée pour l'ajustement des images. Rappelons que le calcul de l'ETMB se fait à partir des réflectances estimées de toutes les classes d'occupation du sol. En donnant à toutes ces classes le même poids au sein de l'ETMP nous induisons une erreur. En effet, nous avons vu dans la section 5.1.5 que la simulation des décalages fictifs, en utilisant l'image VGT simulée, donne parfois des réflectances estimées meilleures que celles obtenues sans décalage. Ceci était obtenu avec les classes d'occupation du sol qui présentaient les plus de facteurs positifs. Ce qui nous venons d'avancer ne signifie pas que notre méthodologie d'ajustement n'est pas applicable dans un contexte opérationnel, mais plutôt qu'il faut envisager des mesures pour limiter le rôle des classes non importantes (très hétérogène ou qui occupe une petite superficie dans l'image). Choisir des classes représentatives et peu hétérogènes peut constituer la solution, mais cela reste à prouver.

Pour la distribution de la neige dans un pixel VGT selon les classes d'occupation du sol, nous avons observé que les zones dégagées sont les premières où la fonte de neige se complète. Nous avons pu établir des équations de distribution de neige dans un pixel VGT selon les classes d'occupation du sol (forêts de feuillus et mixtes, zones dégagées). Toutefois, de meilleurs résultats peuvent être obtenus avec une image haute résolution où le pourcentage total de neige est plus important. Il faut noter aussi que le suivi de la distribution de la neige dans un pixel VGT selon les classes d'occupation du sol qu'il couvre ne peut être que temporel. Son extension dans l'espace nécessite la connaissance de la carte d'occupation du sol pour chacun des pixels VGT.

Comme recommandations à des études similaires à la nôtre, nous présentons ce qui suit :

1. Choisir des couples d'images [VEGETATION / HRVIR] où le pourcentage total de neige dans l'image haute résolution est plus grand que 20% et préférablement 30% ou même 40%. Cela va permettre d'extraire les équations d'estimation du couvert nival, avec une meilleure précision.
2. Pour l'estimation des réflectances, il faut s'assurer que les corrections atmosphériques sont faites de la même manière pour les couples d'images [VEGETATION / HRVIR] utilisés. En plus, les classes d'occupation du sol devraient être le plus homogènes possible, et elles devraient aussi être bien représentées en termes de superficie.

3. La localisation du positionnement géographique des images peut mieux se faire si la méthode exhaustive est utilisée avec les classes d'occupation du sol les plus homogènes et les mieux présentées en superficie.

4. Les équations de distribution de neige dans un pixel VGT selon les classes d'occupation du sol peuvent être améliorées avec une carte de couverture de neige dont le pourcentage de neige est plus grand que 20% et préférablement 30% ou même 40%.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Bernier, M. 1989. Estimation de l'albédo de la neige, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, 29 p.
- Bonn, F. et G. Rochon. 1993. Précis de télédétections : principes et méthodes Vol 1, presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.
- Bonn F. 1996 Précis de télédétection : Applications thématiques Vol 2, Presse de l'Université du Québec/AUPELF, 633 p.
- Cherchali, S. 1995. Contribution à la résolution du problème du pixel mixte en vue de l'amélioration de l'estimation de la productivité primaire nette en zone sahélienne (couplage haute et basse résolution spatiale). Thèse de Doctorat, Université Paul-Sabatier, 232 p.
- Cherchali, S. et G. Flouzat 1994. The robustness of linear mixture modelling using low spatial resolution data. EUROPTO94, SPIE.
- COMITAS (Commission ministérielle de la terminologie de la télédétection aérospatiale). 1988. *Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale*. Bulletin de la SFPT. No 112, 63 p.
- De Sève, D., 1996, Simulations d'images HRVIR et VGT à l'aide d'une image LANDSAT-TM, Rapport de projet, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, 34p.
- Fortin, J. P., Bernier, M., Lapointe, S., Gauthier, Y., De Sève, D et Beaudoin, S. 1998. Estimation of surface variable at the sub-pixel level for use as input to climate and hydrological models, Rapport de recherche No R-483, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, 73p.
- Fortin, J. P., Bernier, M., El battay, A et Y. Gauthier, 2000. Estimation of surface variable at the sub-pixel level for use as input to climate and hydrological models, Rapport de recherche No R-564, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, 59 p.



- Holben, B.H. et Y.E. Shimabukuro. 1993. Linear mixing model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors. *International journal of Remote sensing*, Vol.14, No.11, pp. 2231-2240.
- Kerdiles, H. et M.O. Grondona. 1995. NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in the Argentinean Pampa. *International journal of Remote sensing*, Vol.16, No.7, pp.1303-1325.
- Kneizyz, F.X., Shettle, E.P., Abreu, L.W., Chetwynd, J.H., Anderson, G.P., Gallery, W.O., Selby, J.E.A et S.A. Glough. 1983. Guide to LOWTRAN-7. AFGL-TR-88-0177, Air-Force Geophysics Laboratory, Bedford, Massachusetts, U.S.A.
- Lapointe, S., Fortin, J.P. et Bernier, M. 1997. Estimation des réflectances sous-pixels des différentes classes d'occupation du sol, Rapport No I-142, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, 43p.
- Marceau, P. 1991. Approche méthodologique de l'extraction d'information sous-pixels : Application à l'hydrologie. Examen doctoral, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Sainte-Foy.
- Mathieu, C. 2000. Estimation du pourcentage de neige au sol sur chacun des pixels composant une image VGT pour les bassins versants des rivières St-Maurice & Gatineau, Rapport de stage de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Sainte-Foy.
- Nolin, W.A., Dozier, J et L.A.K Mertes 1993. Mapping alpine snow using a spectral mixture modeling technique. *Annals of Glaciology*, Vol.17, pp. 121-124.
- Novo, E.M.et Y.E. Shimabukuro 1997. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. *International journal of Remote sensing*, Vol.18, No.3, pp.633-670.
- Données caractéristiques pour le capteur AVHRR. Site Internet officiel du satellite NOAA, National Data Center NGDC, visité en novembre 2000.
<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/globsys/avhrr.shtml>
- Puyou-Lacassies, P., Gay, M et D. Peccoud 1992. Interest of complementary data of coarse and high resolution for agroclimatic crop monitoring. Dans : *Proceeding of the ISY conference*, Munich, March 30-April 4, 835-840.

- Roche, M.F. 1986. *Dictionnaire français d'hydrologie de surface*. Masson, paris, 288p.
- Rahman, H., G. Dedieu, 1994. SMAC : a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in solar spectrum, *International journal of Remote sensing*, Vol.11, No.1, pp.159-166.
- Richter, R. 1990. A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat Tm image, *International journal of Remote sensing*, Vol.18, No.3, pp.633-670.
- Richter, R. 1989. Model SENSAT-3 DLR-IB 552/06 89, German Aerospace Research Establishment, Wessling, F.R. Germany.
- Shimabukuro, Y.E., et J.A. Smith. 1991. The least square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.29, No.1, pp.16-20.
- Shimabukuro, Y.E., Carvalho, V.C. et B.F.T. Rudoff. 1997. NOAA-AVHRR data processing for the mapping of vegetation cover. *International journal of Remote sensing*, Vol.18, No.3, pp.671-677.
- Site Internet du ministère des ressources naturelles du Québec. Visiter en juin 2000. <http://www.mrn.gouv.qc.ca>
- Site Internet de Spotimage. Visiter en juin 2000. Données caractéristiques sur les capteurs HRVIR et HRV. <http://www.spotimage.com>
- Site Internet VEGETATION. Visité en juin 2000. *VEGETATION user guide*. Programme VEGETATION, <http://sirius-ci.cst.cnes.fr:8080/>
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcette, J.J., Perbos, J. et P.Y. Deschamps 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in solar spectrum : The 5S code. *International journal of Remote sensing*, Vol.11, No.3, pp.659-668.

ANNEXE A

Caractéristiques des images VEGETATION, HRVIR et HRV

Caractéristiques des images VEGETATION utilisées

donnée	2 mai 1999	11 avril 1999	5 avril 1999	2 avril 1999	27 mars 1999	8 février 1999
PRODUCT_ID	VIKRN 19990502E219	VIKRN 19990411E053	VIKRN 19990405E106	VIKRN 19990402E250	VIKRN 19990327E032	VIKRN 19990208E14
BAND REF	B3	B3	B3	B3	B3	B3
QUICK_LOOK_BAND	B3	B3	B3	B3	B3	B3
MAP_PROJ_NAME	AC_US_01_IKM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_IKM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_IKM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_IKM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_IKM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_IKM nom provisoirement egal au code Albers
MAP_PROJ_FAMILY	Albers	Albers	Albers	Albers	Albers	Albers
MAP_PROJ_CODE	AC_US_01_IKM	AC_US_01_IKM	AC_US_01_IKM	AC_US_01_IKM	AC_US_01_IKM	AC_US_01_IKM
MAP_PROJ_UNIT	METERS	METERS	METERS	METERS	METERS	METERS
MAP_PROJ_RESOLUTION	1000	1000	1000	1000	1000	1000
GEODETTIC SYST NAME	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927
GEODETTIC SYST CODE	NAS	NAS	NAS	NAS	NAS	NAS
HORIZ DATUM	North American 1927	North American 1927	North American 1927	North American 1927	North American 1927	North American 1927
MERIDIAN_NAME	GREENWICH	GREENWICH	GREENWICH	GREENWICH	GREENWICH	GREENWICH
MERIDIAN_ORIGIN	+000.000	+000.000	+000.000	+000.000	+000.000	+000.000
SPHEROID_NAME	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866
SPHEROID_SEMI_MAJ_AXIS	6378206.400	6378206.400	6378206.400	6378206.400	6378206.400	6378206.400
SPHEROID_SEMI_MIN_AXIS	6356583.800	6356583.800	6356583.800	6356583.800	6356583.800	6356583.800
PROJ_LAT_ORIGIN	+23.000000	+23.000000	+23.000000	+23.000000	+23.000000	+23.000000
PROJ_LONG_ORIGIN	-096.000000	-096.000000	-096.000000	-096.000000	-096.000000	-096.000000
PROJ_STD_PARALLEL_1	+29.500000	+29.500000	+29.500000	+29.500000	+29.500000	+29.500000
PROJ_STD_PARALLEL_2	+045.500000	+045.500000	+045.500000	+045.500000	+045.500000	+045.500000
PROJ_X_ORIGIN	0	0	0	0	0	0
PROJ_Y_ORIGIN	0	0	0	0	0	0
CARTO_UPPER_LEFT_X	1025000	1025000	1025000	973000	1025000	1025000
CARTO_UPPER_LEFT_Y	4195000	4195000	4195000	4833000	4195000	4195000
CARTO_UPPER_RIGHT_X	2860000	2860000	2718000	2444000	2860000	2860000
CARTO_UPPER_RIGHT_Y	4195000	4195000	4195000	4833000	4195000	4195000
CARTO_LOWER_RIGHT_X	2860000	2860000	2718000	2444000	2860000	2860000
CARTO_LOWER_RIGHT_Y	2321000	2321000	2321000	2431000	2321000	2321000
CARTO_LOWER_LEFT_X	1025000	1025000	1025000	973000	1025000	1025000
CARTO_LOWER_LEFT_Y	2321000	2321000	2321000	2431000	2321000	2321000
CARTO_CENTER_X	1942500.0	1942500.0	1871500.0	1708500.0	1942500.0	1942500.0
CARTO_CENTER_Y	3258000.0	3258000.0	3258000.0	3632000.0	3258000.0	3258000.0
CARTO_HEIGHT	1874000	1874000	1874000	2402000	1874000	1874000
CARTO_WIDTH	1835000	1835000	1693000	1471000	1835000	1835000

Caractéristiques des images VEGETATION non utilisées

donnée	11 mai 1999	6 mai 1999	5 mars 1999	23 février 1999	29 janvier 1999
PRODUCT ID	VIKRN 19990511E248	VIKRN 19990506E091	VIKRN 19990305E010	VIKRN 19990223E153	VIKRN 19990129E056
BAND REF	B3	B3	B3	B3	B3
QUICK LOOK BAND	B3	B3	B3	B3	B3
MAP_PROJ_NAME	AC_US_01_1KM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_1KM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_1KM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_1KM nom provisoirement egal au code Albers	AC_US_01_1KM nom provisoirement egal au code Albers
MAP_PROJ_FAMILY	Albers	Albers	Albers	Albers	Albers
MAP_PROJ_CODE	AC_US_01_1KM	AC_US_01_1KM	AC_US_01_1KM	AC_US_01_1KM	AC_US_01_1KM
MAP_PROJ_UNIT	METERS	METERS	METERS	METERS	METERS
MAP_PROJ_RESOLUTION	1000	1000	1000	1000	1000
GEODETTIC SYST_NAME	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927	NORTH AMERICAN 1927
GEODETTIC SYST_CODE	NAS	NAS	NAS	NAS	NAS
HORIZ DATUM	North American 1927 GREENWICH	North American 1927 GREENWICH	North American 1927 GREENWICH	North American 1927 GREENWICH	North American 1927 GREENWICH
MERIDIAN ORIGIN	+000.000	+000.000	+000.000	+000.000	+000.000
SPHEROID NAME	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866	CLARKE 1866
SPHEROID SEMI_MAJ_AXIS	6378206.400	6378206.400	6378206.400	6378206.400	6378206.400
SPHEROID SEMI_MIN_AXIS	6356583.800	6356583.800	6356583.800	6356583.800	6356583.800
PROJ_LAT_ORIGIN	+23.000000	+23.000000	+23.000000	+23.000000	+23.000000
PROJ_LONG_ORIGIN	-096.000000	-096.000000	-096.000000	-096.000000	-096.000000
PROJ STD PARALLEL 1	+29.500000	+29.500000	+29.500000	+29.500000	+29.500000
PROJ STD PARALLEL 2	+045.500000	+045.500000	+045.500000	+045.500000	+045.500000
PROJ_X_ORIGIN	0	0	0	0	0
PROJ_Y_ORIGIN	0	0	0	0	0
CARTO UPPER LEFT X	893000	893000	1025000	1025000	1025000
CARTO UPPER LEFT Y	4833000	4833000	4195000	4195000	4195000
CARTO UPPER RIGHT X	2444000	2444000	2718000	2860000	2860000
CARTO UPPER RIGHT Y	4833000	4833000	4195000	4195000	4195000
CARTO LOWER RIGHT X	2444000	2444000	2778000	2860000	2860000
CARTO LOWER RIGHT Y	2431000	2431000	2321000	2321000	2321000
CARTO LOWER LEFT X	893000	893000	1025000	1025000	1025000
CARTO LOWER LEFT Y	2431000	2431000	2321000	2321000	2321000
CARTO CENTER X	1668500.0	1668500.0	1901500.0	1942500.0	1942500.0
CARTO CENTER Y	3632000.0	3632000.0	3258000.0	3258000.0	3258000.0
CARTO HEIGHT	2402000	2402000	1874000	1874000	1874000
CARTO WIDTH	1551000	1551000	1753000	1835000	1835000

Caractéristiques des images VEGETATION non utilisées (suite)

donnée	11 mai 1999	6 mai 1999	5 mars 1999	23 février 1999	29 janvier 1999
GEO_UPPER_LEFT_LAT	+067.404944	+067.404944	+060.503321	+060.503321	+060.503321
GEO_UPPER_LEFT_LONG	-079.514086	-079.514086	-079.189500	-079.189500	-079.189500
GEO_UPPER_RIGHT_LAT	+062.258167	+062.258167	+055.197621	+054.855959	+054.855959
GEO_UPPER_RIGHT_LONG	-053.501266	-053.501266	-053.124637	-052.030123	-052.030123
GEO_LOWER_RIGHT_LAT	+041.391362	+041.391362	+039.489298	+039.235083	+039.235083
GEO_LOWER_RIGHT_LONG	-066.055243	-066.055243	-062.728455	-061.827812	-061.827812
GEO_LOWER_LEFT_LAT	+044.392577	+044.392577	+043.265309	+043.265309	+043.265309
GEO_LOWER_LEFT_LONG	-084.734824	-084.734824	-083.273161	-083.273161	-083.273161
IMAGE_UPPER_LEFT_I	I	I	I	I	I
IMAGE_UPPER_LEFT_J	I	I	I	I	I
IMAGE_UPPER_RIGHT_I	I	I	I	I	I
IMAGE_UPPER_RIGHT_J	1552	1552	1754	1836	1836
IMAGE_LOWER_RIGHT_I	2403	2403	1875	1875	1875
IMAGE_LOWER_RIGHT_J	1552	1552	1754	1836	1836
IMAGE_LOWER_LEFT_I	2403	2403	1875	1875	1875
IMAGE_LOWER_LEFT_J	I	I	I	I	I
IMAGE_CENTER_I	1202.0	1202.0	938.0	938.0	938.0
IMAGE_CENTER_J	776.5	776.5	877.5	918.5	918.5
GEOM_CHAR_REF	V1_G_000_1998_03_30_05.PCI	V1_G_000_1998_03_30_05.PCI	V1_G_000_1998_03_30_05.PCI	V1_G_000_1998_03_30_05.PCI	V1_G_000_1998_03_30_05.PCI
GEOM_BAND_REF	B3	B3	B3	B3	B3
DEM_REF	dtm_vgt_system_proj	dtm_vgt_system_proj	dtm_vgt_system_proj	dtm_vgt_system_proj	dtm_vgt_system_proj
DEM_DATE	19971205	19971205	19971205	19971205	19971205
USE_GCP	Y	Y	N	N	N
GEOM_QUALITY_FLAG	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD
RADIOM_EQUAL_REF	V1_E_035_1999_04_29_03.PCI	V1_E_035_1999_04_29_03.PCI	V1_E_030_1999_02_23_02.PCI	V1_E_029_1999_02_15_02.PCI	V1_E_028_1999_01_28_01.PCI
RADIOM_ABS_CAL_REF	V1_A_000_1999_05_01_02.PCI	V1_A_000_1999_05_01_02.PCI	V1_A_000_1999_03_01_01.PCI	V1_A_000_1998_12_01_01.PCI	V1_A_000_1998_12_01_01.PCI
ORBIT_NUMBER	344	273	131	338	3
GROUND_TRACK_NUMBER	308	309	311	313	318
SEGM_REFERENCE	V119990511248	V119990506091	V119990305010	V11999023153	V119990129056
SEGM_FIRST_DATE	19990511	19990506	19990305	19990223	19990129
SEGM_FIRST_TIME	161031	160640	155925	155139	153440
SEGM_LAST_DATE	19990511	19990506	19990305	19990223	19990129
SEGM_LAST_TIME	162321	161939	161235	160449	154530
CLOUD_COVER_REF	CTIV_CLOUD_COVER_V1.0	CTIV_CLOUD_COVER_V1.0	CTIV_CLOUD_COVER_V1.0	CTIV_CLOUD_COVER_V1.0	CTIV_CLOUD_COVER_V1.0
SNOW_COVER_REF	CTIV_SNOW_ICE_COVER_V1.0	CTIV_SNOW_ICE_COVER_V1.0	CTIV_SNOW_ICE_COVER_V1.0	CTIV_SNOW_ICE_COVER_V1.0	CTIV_SNOW_ICE_COVER_V1.0
PRODUCTION_DATE	19990618	19990618	19990618	19990618	19990618



Work order : 9906091101
 Volume ID : 7003027085
 Scene ID : 4 628-258 99/04/11 15:54:32 1 X
 Product Code : TA0400L
 Date : 11-JUN-1999 11:12:25

Scene parameters

Scene ID 4 628-258 99/04/11 15:54:32 1 X
 K-J Identification 628-258
 Date 99/04/11
 Time 15 h 54 mn 32 s
 Instrument HRVIR1
 Shift Along Track 0
 Processing level 1A
 Spectral mode XI
 Number of spectral bands 4
 Spectral band indicators XS1 XS2 XS3 XS4
 Orientation angle 012.7 Degres
 Incidence angle R02.5 Degres
 Sun angles (degres) Azimut: 158.7 Elevation: 050.6
 Gain Number 3 2 3 2
 Absolute calibration gains (W/m2/sr/um) 01.09050 00.87000 01.30113 05.86000

Number of lines 3000
 Number of pixels per line 3000
 Row of the First Image Pixel within the record byte nr 33

Scene Center Location

Latitude N045°36'05"
 Longitude W-71°46'11"
 Pixel number 1500
 Line number 1500

Corners Location

Corner	Latitude	Longitude	Pixel n°	Line n°
1	N045°55'16"	W-72°02'36"	1	1
2	N045°48'04"	W-71°17'22"	3000	1
3	N045°23'58"	W-72°14'44"	1	3000
4	N045°16'51"	W-71°29'54"	3000	3000

Files parameters

	Record length	Number of records	Number of imagery rec.
Volume directory	360	5	
Leader File	3960	27	
Imagery file	5400	12001	12000
Trailer file	1080	3	
Null volume directory	360	1	



Work order : 99062306001
 Volume ID : 01026710
 Scene ID : 2 628-258 99/04/02 15:55:54 2 P
 Product Code : TA0200L
 Date : 28-JUL-1999 13:55:35

Scene parameters

Scene ID 2 628-258 99/04/02 15:55:54 2 P
 K-J identification 628-258
 Date 99/04/02
 Time 15 h 55 mn 55 s
 Instrument HRV 2
 Shift Along Track 0
 Processing level 1A
 Spectral mode PAN
 Number of spectral bands 1
 Spectral band indicators PAN
 Orientation angle 012.8 Degres
 Incidence angle L02.2 Degres
 Sun angles (degrees) Azimut: 159.5 Elevation: 047.2
 Gain Number 6
 Absolute calibration gains (W/m2/sr/um) 01.10435

 Number of lines 6000
 Number of pixels per line 6000
 Raw of the First Image Pixel within the record byte nr 33

Scene Center Location

Latitude N045°36'05"
 Longitude W071°48'12"
 Pixel number 3000
 Line number 3000

Corners Location

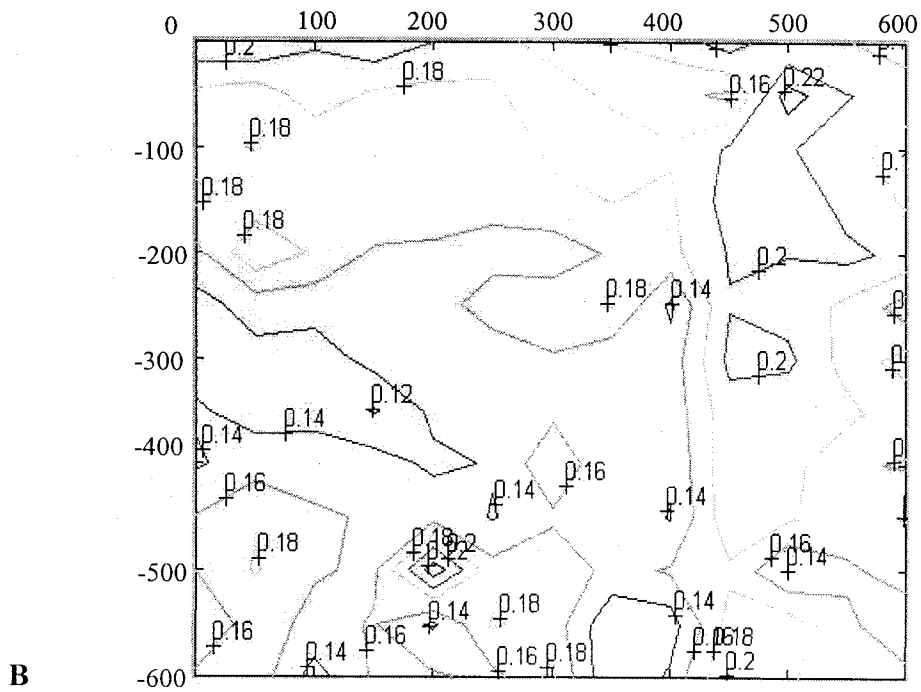
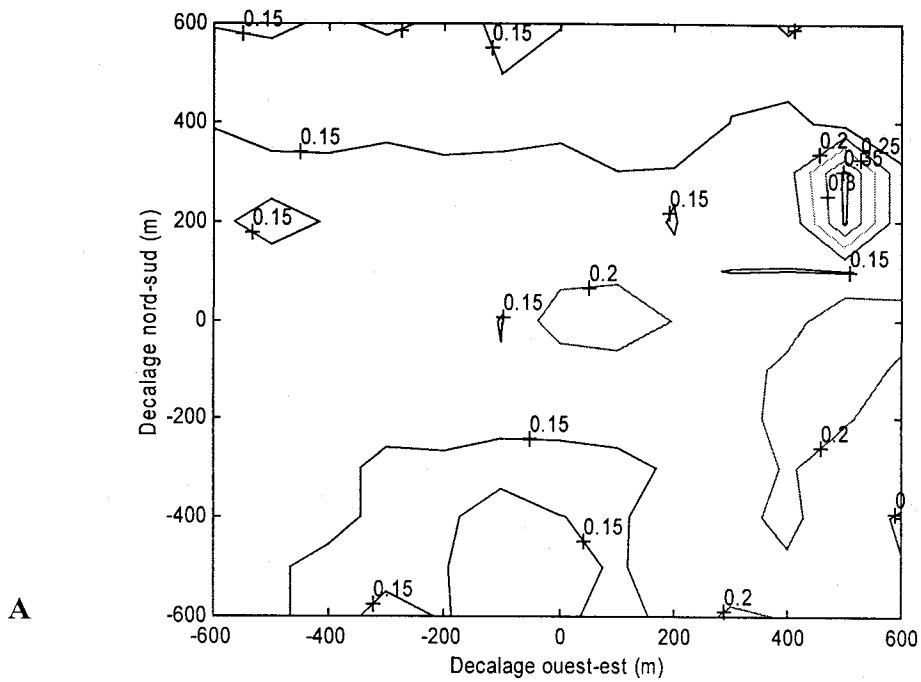
Corner	Latitude	Longitude	Pixel n°	Line n°
1	N045°55'15"	W072°04'37"	1	1
2	N045°48'04"	W071°19'23"	6000	1
3	N045°23'58"	W072°16'45"	1	6000
4	N045°16'50"	W071°31'55"	6000	6000

Files parameters

	Record length	Number of records	Number of imagery rec.
Volume directory	360	5	
Leader File	3960	27	
Imagery file	8640	6001	6000
Trailer file	1080	3	
Null volume directory	360	1	

ANNEXE B

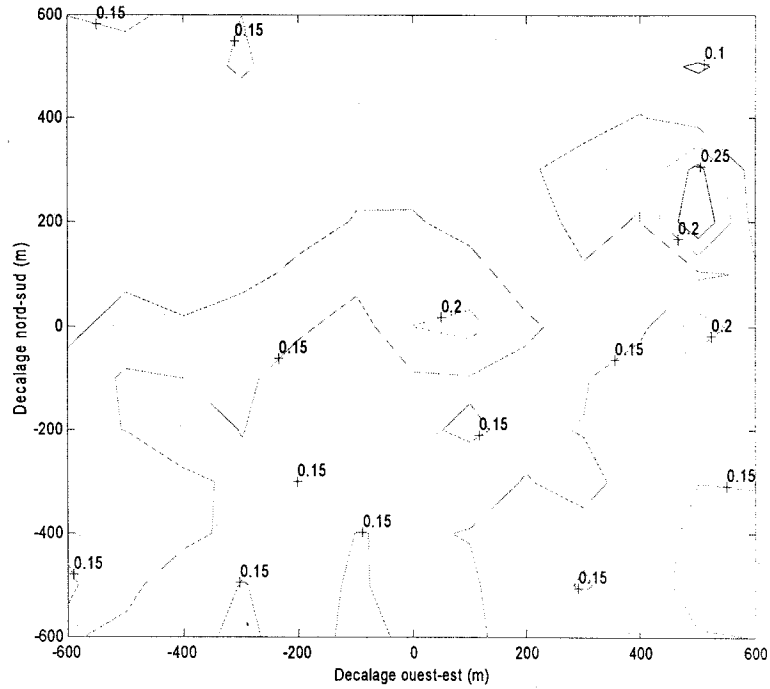
Cartographie par la méthode exhaustive de l'écart-type moyen par bande (ETMB)



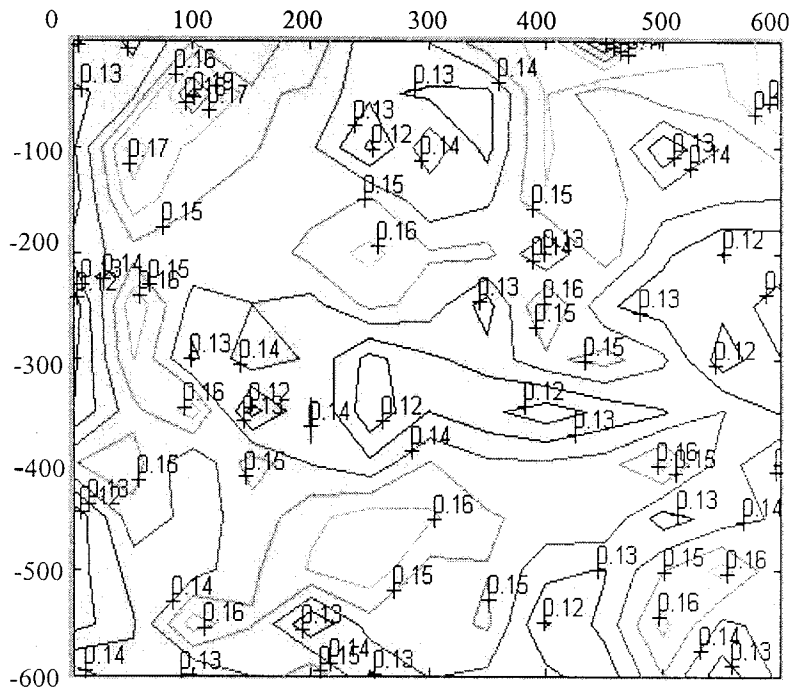
Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B2. Image VEGETATION du 11 avril 1999

A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.

B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



A

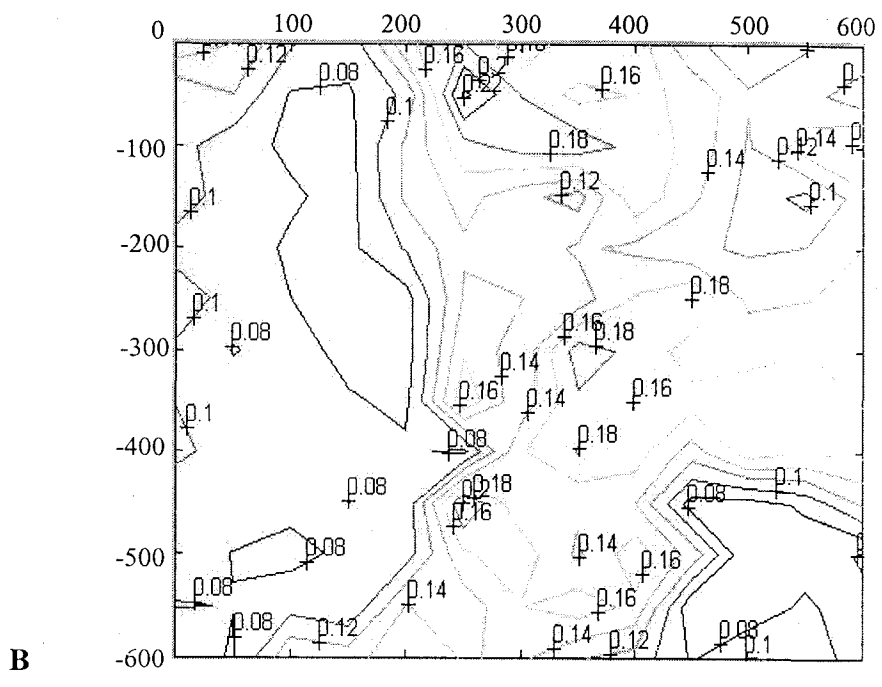
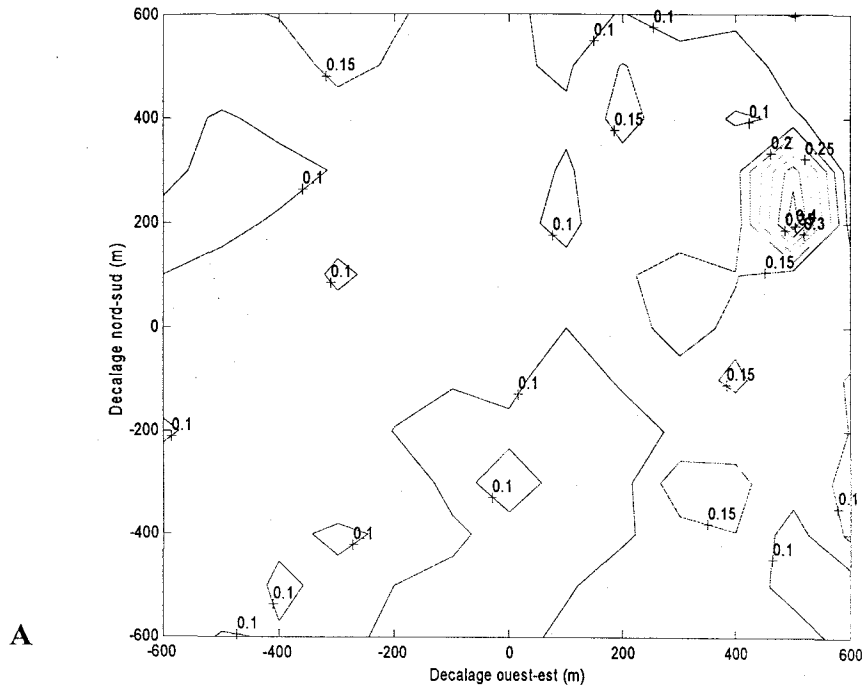


B

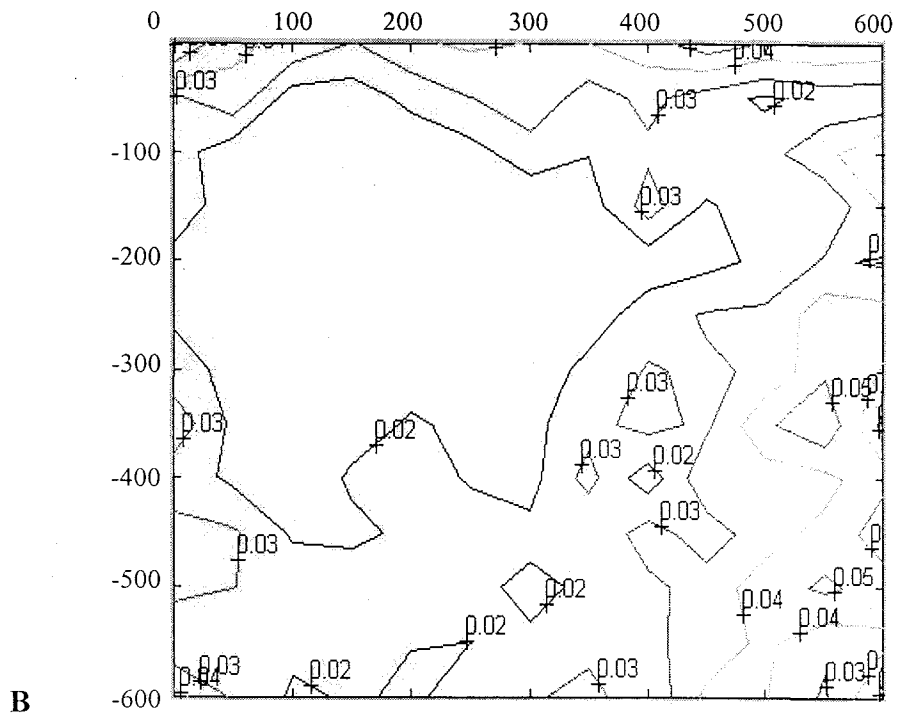
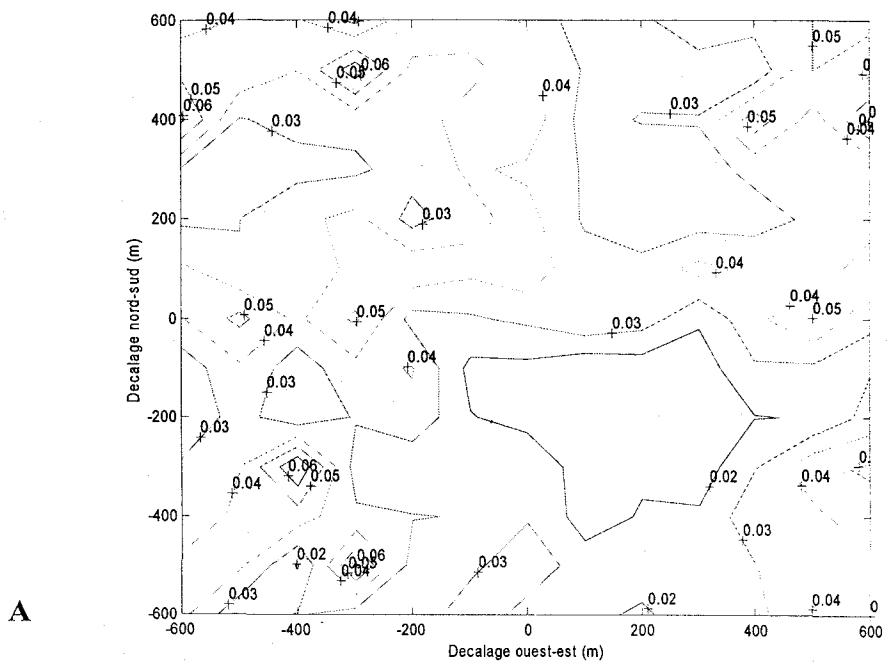
Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B3. Image VEGETATION du 11 avril 1999

A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.

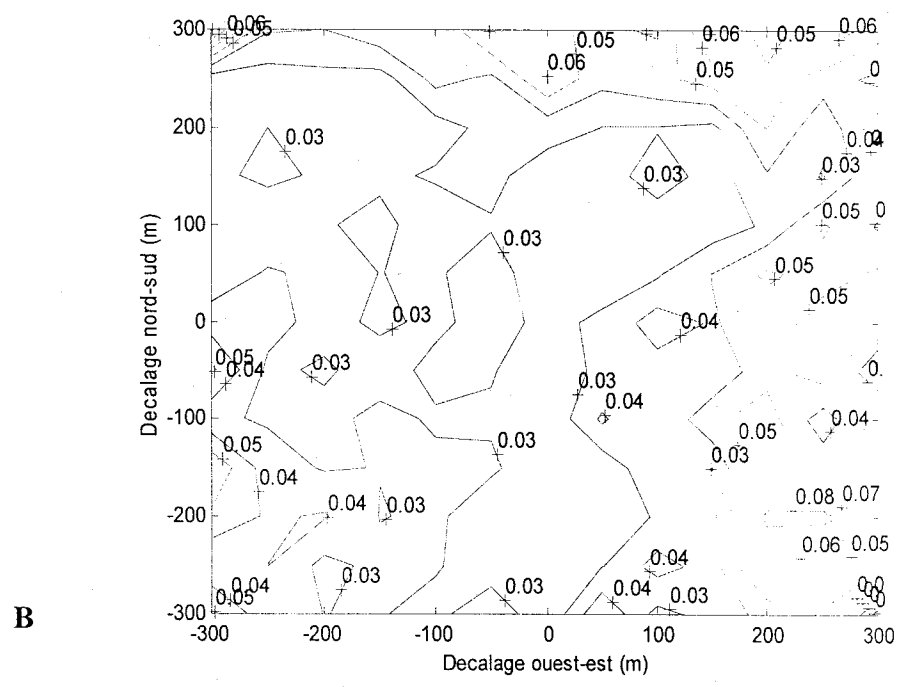
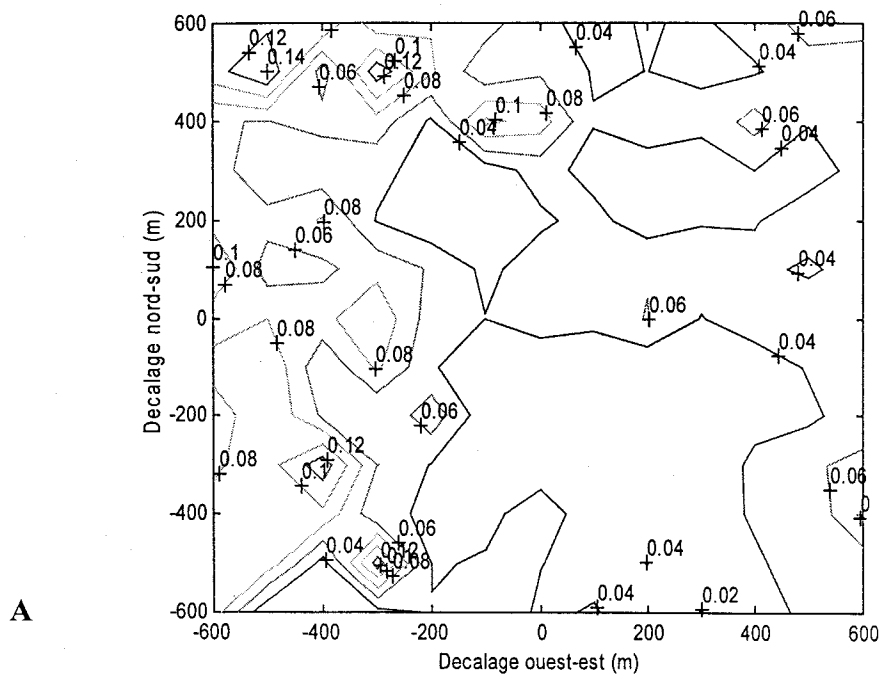
B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



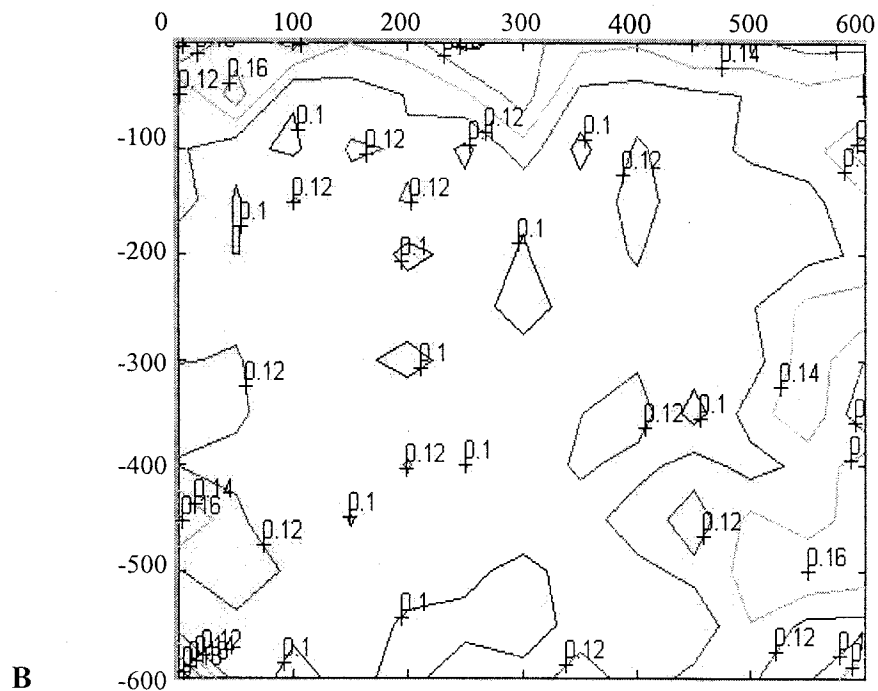
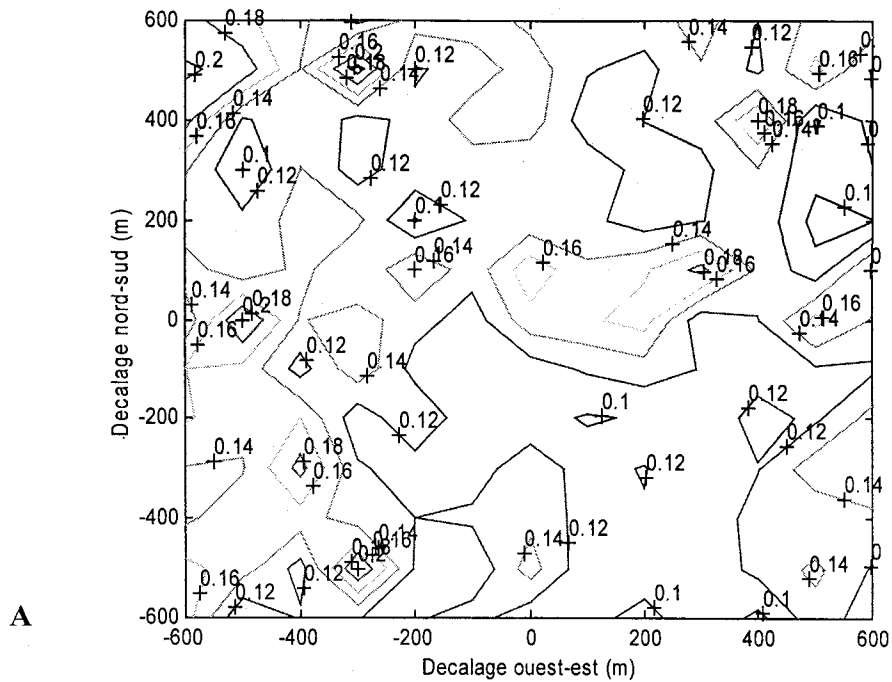
Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B4. Image VEGETATION du 11 avril 1999
 A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.
 B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B2. Image VEGETATION du 2 mai 1999
 A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.
 B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



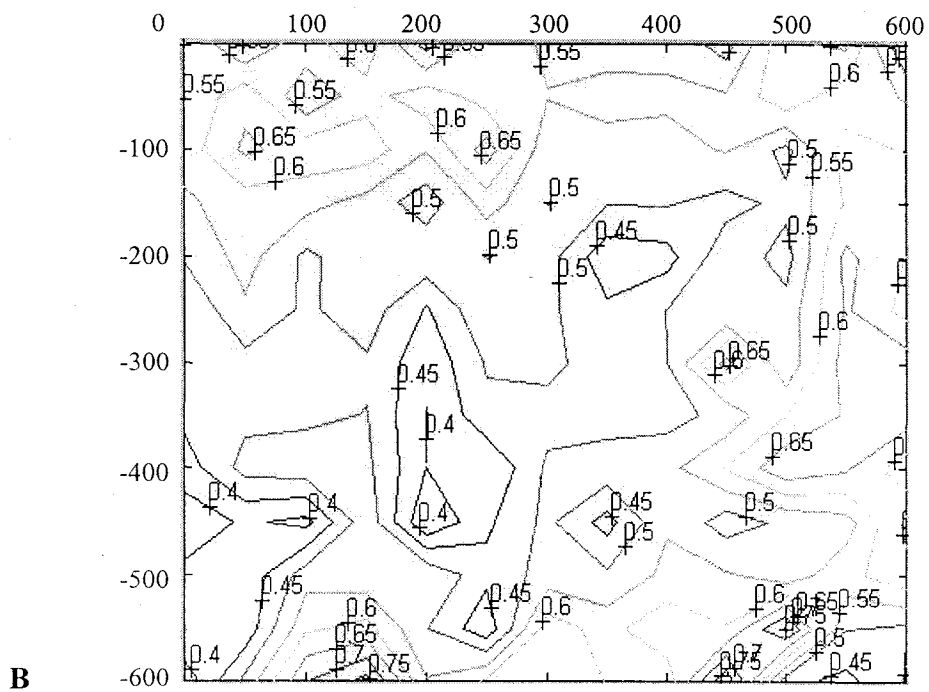
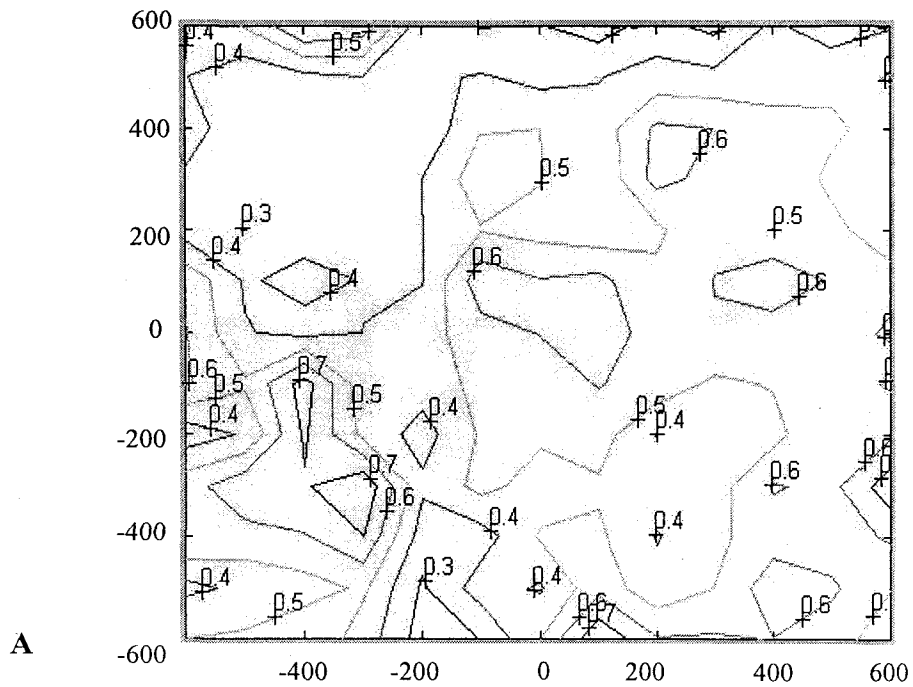
Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B3. Image VEGETATION du 2 mai 1999
 A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.
 B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B4. Image VEGETATION du 2 mai 1999

A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.

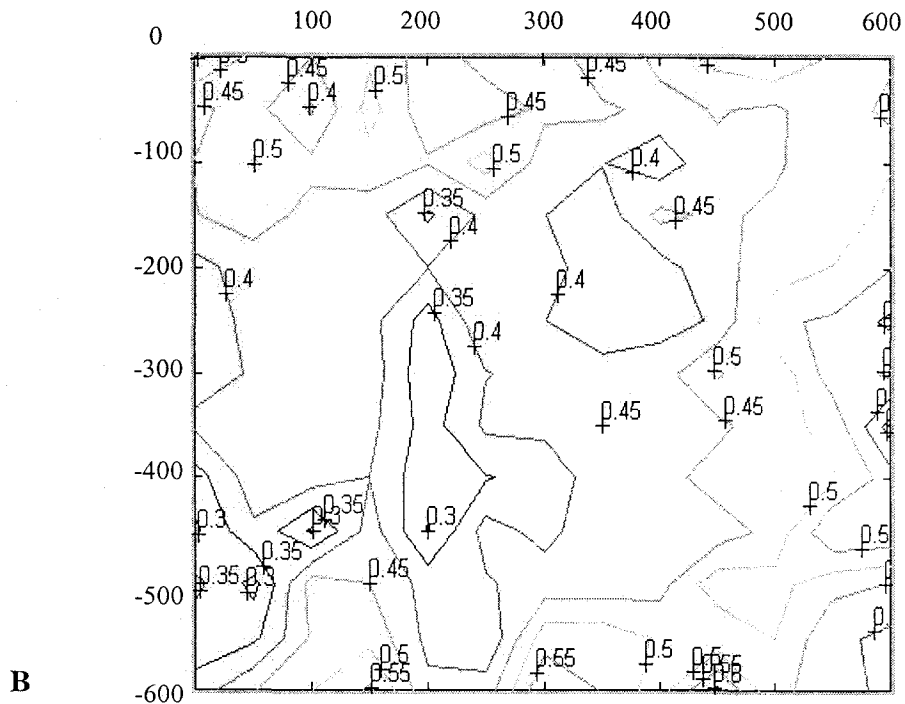
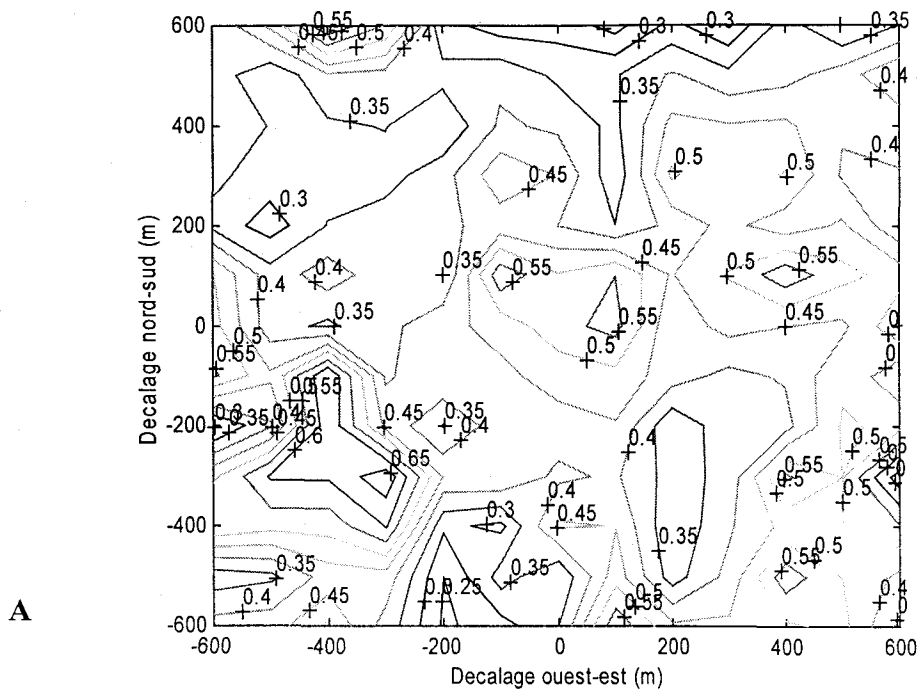
B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B2. Image VEGETATION du 8 février 1999

A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.

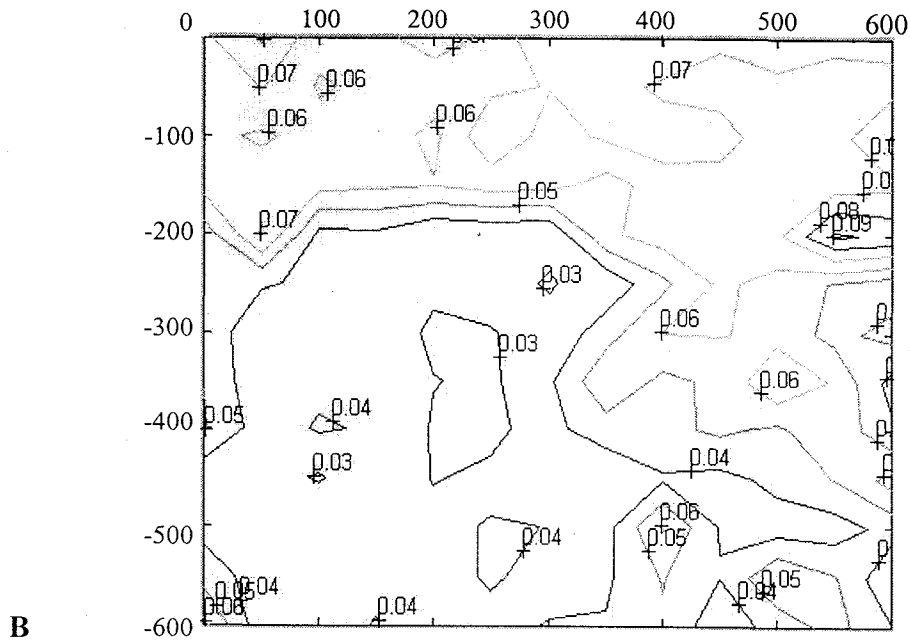
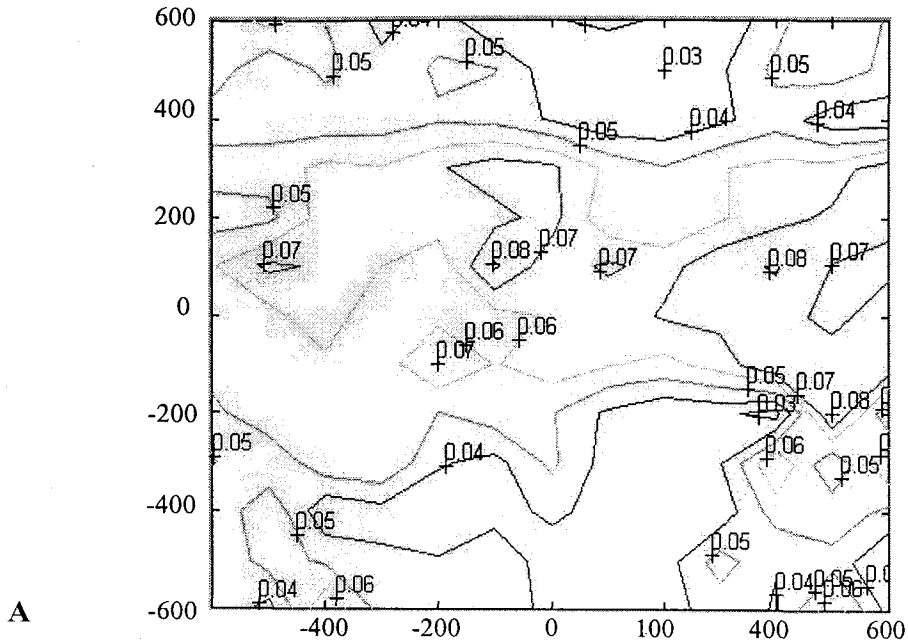
B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B3. Image VEGETATION du 8 février 1999

A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.

B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres



Cartographie de l'écart-type moyen dans la bande B4. Image VEGETATION du 8 février 1999

A- Décalage de 600 mètres direction nord, sud, est et ouest, pas de déplacement de 100 mètres.

B- Décalage de 600 mètres direction est et sud, pas de déplacement de 50 mètres

ANNEXE C

Équations d'estimation du couvert nival (Fortin et al., 1998)

