

Université de Montréal

Systeme prototype pour le suivi des changements de l'occupation du sol
en milieu urbain fondé sur les images du satellite RADARSAT-1

Par
Robert Fiset

Département de géographie
Faculté des arts et sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Ph.D.
en Géographie

Juin 2005

© Robert Fiset, 2005



G

59

U54

2006

V.007

Direction des bibliothèques

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Système prototype pour le suivi des changements de l'occupation du sol
en milieu urbain fondé sur les images du satellite RADARSAT-1

présentée par :

Robert Fiset

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Claude Marois
président-rapporteur

François Cavayas
directeur de recherche

Basel Solaiman
codirecteur

Yves Baudouin
membre du jury

Ridha Touzi
examinateur externe

Yoshua Bengio
représentant du doyen de la FES

RÉSUMÉ

La cartographie des occupations/utilisations du sol est d'une grande importance pour la gestion du territoire en milieu urbain, mais ces cartes deviennent périmées rapidement. Encore de nos jours, le processus de mise à jour est effectué presque entièrement de façon manuelle à l'aide de photographies aériennes. Les étapes en sont essentiellement la détection des changements, leur identification et la mise à jour des bases de données. Toute automatisation du processus, même partielle, est souhaitable au plus haut point. Les images satellitaires radar couvrent de larges territoires et peuvent être acquises même en présence de nuages. Toutefois, elles ont fait l'objet de très peu de recherche pour la cartographie du milieu urbain et il n'existe aucune application opérationnelle qui les utilise pour la mise à jour cartographique dans ce milieu. Or il est connu que le radar en général est sensible aux structures surélevées, tels les bâtiments. L'apparition de nouveaux bâtiments est un indicatif sans faille de la présence de changement en terrain vacant, là où la majorité des modifications de l'occupation du sol surviennent en milieu urbain. Dans le cadre de cette thèse, l'imagerie RADARSAT-1 acquise en mode fin (10 mètre de résolution) a été examinée pour son emploi avec une méthode novatrice de traitement des données de télédétection : l'analyse des images guidée par les données cartographiques. La carte périmée sert à segmenter une image plus récente pour y calculer des traits caractéristiques permettant de détecter des changements et d'identifier leur nature. Des tests montrent que des mesures de texture, obtenues avec un procédé rapide dérivé des matrices de cooccurrence des niveaux de gris, constituent des traits caractéristiques qui permettent de détecter les nouveaux bâtiments. En employant des fenêtres carrées de 11 pixels, les mesures de contraste et d'entropie sont obtenues d'une image RADARSAT-1. Le choix de seuils appropriés permet de localiser les bâtiments à l'intérieur des terrains vacants. La validation de la méthode de détection est effectuée sur 5 sites présentant des conditions physiographiques diverses avec un jeu de données de 14 images RADARSAT-1 acquises en mode fin avec des angles variés au cours de l'année 1999. Dans les meilleurs des cas, nous pouvons obtenir une exactitude de 90% et plus, tandis que dans le pire des cas elle se situe aux alentours de 75%. L'examen des résultats nous amène à conclure qu'il est préférable d'acquérir les images avec un angle d'incidence fort (F4 ou F5) et durant une période sèche (été ou automne). Quant à l'identification des nouveaux taxons, elle ne peut

être faite avec l'imagerie radar. Ainsi, un système prototype est proposé dans lequel les changements détectés avec l'image RADARSAT-1 peuvent constituer le clé d'une recherche dans des bases de données territoriales (photographies aériennes, cadastre, rôle d'évaluation, etc.) pour procéder à l'identification des nouveaux taxons par un opérateur. Ce système appliqué dans un cas réel montre tout son potentiel dans un cadre opérationnel afin d'accélérer et de faciliter les opérations de mise à jour sur de vastes territoires.

Mots clés : cartographie, occupation/utilisation du sol, milieu urbain, mise à jour automatique, analyse guidée par la carte, RADARSAT-1, mesures de texture, matrice de cooccurrence des niveaux de gris.

ABSTRACT

Land use and land cover mapping is of great importance for urban environment management. However, these maps become very rapidly outdated and require constant updating. Even in this day and age, most of the updating process is performed manually with the aid of aerial photography. The essential stages of this process consist in detecting the changes, establishing their nature and performing the database updating accordingly. Automating this operating procedure, even partially, is of utmost importance. Radar imagery may be acquired over large territories even in the presence of clouds. It has been the subject of very few research for urban mapping and there exists no operational application that makes use of it for map updating in this type of environment. However, it is well known that the imaging radar in general is sensitive to raised structures such as buildings. The apparition of new buildings in vacant areas, where most land cover and land use changes occur in urban areas, is clearly an indication for change detection. In the framework of this thesis, RADARSAT-1 imagery acquired in fine mode (10 meter resolution) has been investigated for its use in an innovative image processing method: the map-guided analysis of remote sensing data. The outdated map serves as a guide to segment a more recent image in order to compute characteristic features allowing to detect and identify changes. Tests show that texture measurements obtained with a fast method derived from the grey level co-occurrence matrix constitute such characteristic features allowing new buildings detection. Using 11 pixels square windows, contrast and entropy measurements are computed on a fine mode RADARSAT-1 image. Choosing appropriate thresholds is sufficient to pinpoint new buildings in vacant areas. Validation of this detection method is carried out over 5 sites presenting diverse physiographic characteristics using a dataset of 14 fine mode RADARSAT-1 images acquired with various incident angles throughout 1999. In the best cases, an accuracy of over 90% can be reached, while in the worst case this accuracy is around 75%. The results show that image acquisition using large incidence angles (F4 or F5) during a dry period (summer or fall) is preferable. With regard to the identification of the new taxons, it cannot be achieved with the radar imagery. Thus, a prototype system is developed to perform change detection using a RADARSAT-1 image, which then constitutes the key for the search by an operator into territorial databases (aerial photographs, land register, valuation rolls, etc.) to identify the

new taxons. This prototype system, applied in a real case test, shows its potential for an operational use to accelerate and facilitate land use and land cover map updating over large territories.

Key words: cartography, land use/land cover, urban areas, automatic updating, map-guided analysis, RADARSAT-1, texture measurements, grey level co-occurrence matrix.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xvii
REMERCIEMENTS.....	xviii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1- Les données de base : aperçu général.....	7
1.1- Introduction.....	7
1.2- Les cartes d'occupation/utilisation du sol.....	7
1.3- L'imagerie RADARSAT-1.....	9
CHAPITRE 2- La mise à jour des cartes : problématique.....	16
2.1- Introduction.....	16
2.2- Les procédures actuelles de mise à jour.....	16
2.3- Les tentatives d'automatisation du processus de mise à jour à partir de l'imagerie satellitale.....	18
2.4- Une approche alternative pour l'automatisation du processus de mise à jour.....	23
2.5- Qu'est-ce que l'imagerie radar peut apporter de nouveau ?.....	25
2.6- La texture comme trait caractéristique des images radar.....	29
2.7- Constat général et approche privilégiée.....	33
CHAPITRE 3- Approche méthodologique.....	34
3.1- Introduction.....	34
3.2- Le territoire à l'étude.....	34
3.3- Données et prétraitements.....	35
3.3.1- Images disponibles.....	35
3.3.2- Les cartes d'occupation du sol.....	38
3.3.3- Les autres données.....	39
3.4- Formation des unités d'analyse.....	41
3.5- Les traits caractéristiques.....	41
3.5.1- La matrice de cooccurrence des niveaux de gris.....	42

3.5.2- L'algorithme de calcul rapide de Unser	44
3.5.3- Application de la texture pour la détection des changements	46
3.5.4- Application de la texture pour l'identification des changements	50
3.6- Protocole expérimental pour la détection.....	50
3.6.1- Choix des sites	52
3.6.2- Création des bases de données	55
3.6.3- Analyse de l'influence de la taille de la fenêtre	56
3.6.4- Définition des mesures de texture et des conditions d'acquisition.....	58
3.7- Protocole expérimental pour l'identification.....	61
3.7.1- Choix du site et découpage de l'espace.....	61
3.7.2- Calcul des statistiques par îlot.....	62
3.7.3- Test de séparabilité.....	62
3.7.4- Test de classification	63
3.8- Conception d'un système prototype.....	63
CHAPITRE 4- La détection des changements	65
4.1- Introduction.....	65
4.2- La texture des bâtiments et des boisés : taille des fenêtres.....	65
4.2.1- Comportement attendu des mesures.....	65
4.2.2- Observations en zones bâties et boisées.....	67
4.3- Procédure de validation : analyse des mesures individuelles.....	74
4.4- Validation aux 5 sites.....	78
4.4.1- Le site de Châteauguay	79
4.4.2- Le site de Deux-Montagnes.....	84
4.4.3- Le site de l'est de l'île de Montréal.....	88
4.4.4- Le site de Lachenaie.....	91
4.4.5- Le site de l'ouest de l'île de Montréal.....	92
4.5- Potentiel de détection des bâtiments individuels.....	96
4.6- Fusion des orbites ascendantes et descendantes.....	99
4.7-Conclusions globales sur la détection des changements	101
CHAPITRE 5- L'identification des changements	104
5.1- Introduction.....	104
5.2- Examen des valeurs par îlot d'occupation du sol.....	104
5.2.1- Statistiques de premier ordre.....	104

5.2.2- Statistiques de deuxième ordre.....	107
5.3- Séparabilité.....	111
5.4- Classification dirigée.....	114
5.5- Conclusion sur l'identification des changements.....	120
CHAPITRE 6- Conception d'un système prototype	121
6.1- Méthode proposée	121
6.2- Application dans un cas réel	123
6.2.1- Erreurs d'omission	126
6.2.2- Les fausses alarmes.	128
6.3- Conclusion sur l'application du système prototype	132
CONCLUSIONS.....	134
RÉFÉRENCES.....	136
ANNEXES	150

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- Tendance de l'utilisation du sol en milieu urbain au Canada (1971-1996).....	2
Tableau II- Valeur des permis de bâtir selon le type de construction pour Montréal et l'ensemble du Québec (2000-2004).	4
Tableau III- Caractéristiques d'un système de taxinomie standard adapté du « Michigan Land Use Classification System » fondé sur le système du USGS.	9
Tableau IV- Résumé des diverses techniques de détection des changements appliquées aux données de télédétection.....	20
Tableau V- Liste des travaux en radar sur la détection des changements avec la comparaison image à image.	22
Tableau VI- Résumé de quelques méthodes de calculs de texture.	31
Tableau VII- Images du satellite RADARSAT-1 en mode fin disponibles pour l'année 1999 sur le territoire de la CMM.....	37
Tableau VIII- Taxons des cartes d'occupation du sol employées.....	39
Tableau IX- Équations de trois mesures de texture calculées avec la matrice de cooccurrence des niveaux de gris.	44
Tableau X- Équations des sept mesures de texture calculées avec la méthode rapide.	46
Tableau XI- Résumé des images du satellite RADARSAT-1 en mode fin de 1999 disponibles par site.	55
Tableau XII- Superficie des zones de bâti et de boisé pour l'examen de la taille des fenêtres de calcul au site de Deux-Montagnes.....	58
Tableau XIII- Polygones employés pour les tests couvrant la région de la CMM.....	59
Tableau XIV- Résultats de validation : exemple au site Deux-Montagnes.....	60
Tableau XV- Polygones des îlots urbains employés pour les tests d'identification des taxons de la carte CUM.	62
Tableau XVI- Exemple du tri en ordre croissant des valeurs observées pour chaque zone.	68
Tableau XVII- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Deux-Montagnes.....	75
Tableau XVIII- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Châteauguay.....	76

Tableau XIX- Corrélation entre les images des sept mesures de texture calculées sur l'image du 21 juillet 1999 du site de Deux-Montagnes.....	77
Tableau XX- Résultats de validation aux cinq sites : meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés avec le contraste et l'entropie.....	79
Tableau XXI- Site de Châteauguay : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.	80
Tableau XXII- Site de Deux-Montagnes : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.	85
Tableau XXIII- Site de l'est de l'île de Montréal : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.....	89
Tableau XXIV- Site de Lachenaie : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.	91
Tableau XXV- Site de l'ouest de l'île de Montréal : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.....	93
Tableau XXVI- Résultats de la détection des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale favorable ou non selon l'orbite.....	98
Tableau XXVII- Résultats de la détection des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale variables.....	99
Tableau XXVIII- Résultats de validation aux 5 sites avec les images fusionnées.....	101
Tableau XXIX- Distances de Bhattacharrya calculées pour les dix-sept taxons de la carte de la CUM avec le jeu de données de texture.....	113
Tableau XXX- Distances de Bhattacharrya des 17 taxons de la carte d'occupation du sol de la CUM regroupés dans trois classes générales de densité de bâti.....	114
Tableau XXXI- Matrice de confusion pour la classification par maximum de vraisemblance des 17 taxons de la carte d'occupation du sol de la CUM.....	115
Tableau XXXII-Matrice de confusion pour la classification par « K-plus-proches-voisins » (KNN) des 17 taxons de la carte d'occupation du sol de la CUM.....	116
Tableau XXXIII- Matrices de confusion pour les classifications des 17 taxons d'occupation du sol regroupés dans trois classes générales de densité de bâti.....	118
Tableau XXXIV- Erreurs d'omission/commission pour le test de Kirkland.....	124
Tableau XXXV- Nombre de pixels de fausse alarme dans chaque polygone pour le test de Kirkland.....	128

Tableau Annexe I- Valeurs moyennes de la mesure de contraste triées en ordre croissant.	150
Tableau Annexe II- Valeurs moyennes de la mesure d'écart type triées en ordre croissant.	151
Tableau Annexe III- Valeurs moyennes de la mesure de moyenne triées en ordre croissant.	152
Tableau Annexe IV- Valeurs moyennes de la mesure d'homogénéité triées en ordre croissant.....	153
Tableau Annexe V- Valeurs moyennes de la mesure d'énergie triées en ordre croissant.	154
Tableau Annexe VI- Valeurs moyennes de la mesure de probabilité maximum triées en ordre croissant.	155
Tableau Annexe VII- Valeurs moyennes de la mesure d'entropie triées en ordre croissant.	156

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Évolution des grandes agglomérations urbaines (1950-2015).....	2
Figure 2- Conditions d'acquisition des images du satellite RADARSAT-1 en mode fin....	10
Figure 3- Effet de la résolution sur le niveau de détail visuellement perceptible avec des images optiques.	18
Figure 4- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 en milieu urbain dense.....	26
Figure 5- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 montrant l'effet diédrique.	26
Figure 6- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 montrant l'effet cardinal.	27
Figure 7- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 montrant la sensibilité aux structures surélevées.....	27
Figure 8- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 segmentée en îlots urbains vacants selon la carte d'occupation du sol.	28
Figure 9- Étendue de la Communauté Métropolitaine de Montréal.	35
Figure 10- Images du satellite RADARSAT-1 en mode fin disponibles pour l'année 1999 sur le territoire de la CMM.....	36
Figure 11- Cartes d'occupation du sol disponibles.....	38
Figure 12- Données de précipitations quotidiennes en millimètres lors de la période d'acquisition.	40
Figure 13- Les histogrammes de 1er et 2ième ordre.	43
Figure 14- Les histogrammes des sommes et des différences de la méthode rapide de calcul des textures.	45
Figure 15- Exemple d'application de TEXEL sur une portion d'image RADARSAT-1....	47
Figure 16- Exemple du seuillage des mesures de texture.....	48
Figure 17- Application du calcul des mesures de texture par unité polygonale.	50
Figure 18- Sites à l'étude superposés à la mosaïque d'orthophotographies de 1999.	52
Figure 19- Zones employées pour l'examen de la taille des fenêtres de calcul au site de Deux-Montagnes.	57
Figure 20- Jeu de données image employé pour le test du système prototype.....	64
Figure 21- Portions de zones bâties et boisées des images RADARSAT-1 pour l'examen des textures.	66

Figure 22- Valeurs moyennes de la mesure de contraste en fonction de la taille de la fenêtre.....	68
Figure 23- Valeurs moyennes de la mesure d'écart type en fonction de la taille de la fenêtre.....	69
Figure 24- Valeurs moyennes de la mesure de moyenne en fonction de la taille de la fenêtre.....	70
Figure 25- Valeurs moyennes de la mesure d'homogénéité en fonction de la taille de la fenêtre.....	70
Figure 26- Valeurs moyennes de la mesure d'énergie en fonction de la taille de la fenêtre.	71
Figure 27- Valeurs moyennes de la mesure de probabilité maximum en fonction de la taille de la fenêtre.	72
Figure 28- Valeurs moyennes de la mesure d'entropie en fonction de la taille de la fenêtre.	72
Figure 29- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Deux-Montagnes.	74
Figure 30- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Châteauguay.	77
Figure 31- Site de Châteauguay : meilleurs pourcentages de fausses alarmes.	80
Figure 32- Les fausses alarmes en milieu humide et boisé au site de Châteauguay.....	82
Figure 33- Les fausses alarmes et l'angle d'incidence en zones boisées au site de Châteauguay.	84
Figure 34- Site de Deux-Montagnes : meilleurs pourcentages de fausses alarmes.	85
Figure 35- Les fausses alarmes dues aux effets de relief au site de Deux-Montagnes.....	86
Figure 36- Omission des petits bâtiments isolés au site de Deux-Montagnes.....	87
Figure 37- Site de l'est de l'île de Montréal : meilleurs pourcentages de fausses alarmes.	88
Figure 38- Constance des détections en milieu fortement urbanisé au site de l'est de l'île de Montréal : orthophotographie de référence.	89
Figure 39- Constance des détections en milieu fortement urbanisé au site de l'est de l'île de Montréal.	90
Figure 40- Site de Lachenaie : meilleurs pourcentages de fausses alarmes.	91
Figure 41- Fausses alarmes en bordure des boisés denses au site de Lachenaie.	92

Figure 42- Site de l'ouest de l'île de Montréal : meilleurs pourcentages de fausses alarmes.	93
Figure 43- Erreur d'omission due au mauvais découpage de l'espace au site de l'ouest de l'île de Montréal.	94
Figure 44- Erreur d'omission due à la mauvaise orientation d'un bâtiment à toit plat au site de l'ouest de l'île de Montréal.....	95
Figure 45- Fausses alarmes dues à la présence d'activité anthropique malgré l'absence de bâtiment au site de l'ouest de l'île de Montréal.....	96
Figure 46- Détection individuelle des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale favorable ou non selon l'orbite au site de Châteauguay.....	97
Figure 47- Détection des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale variables selon l'orbite au site de Châteauguay.....	99
Figure 48- Fusion par moyenne d'images en orbite ascendante et descendante au site de Deux-Montagnes.	100
Figure 49- Moyenne des niveaux de gris par îlot d'occupation du sol : image F2 ascendante du 30 avril 1999.....	105
Figure 50- Écart type des niveaux de gris par îlot d'occupation du sol : image F2 ascendante du 30 avril 1999.	106
Figure 51- Mesure de moyenne de 2ième ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.	109
Figure 52- Mesure d'écart type de 2ième ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.	110
Figure 53- Résultats de classification de l'île de Montréal.	117
Figure 54- Résultats de classification pour une portion de l'arrondissement de Saint-Laurent.	119
Figure 55- Système prototype proposé pour la mise à jour des cartes d'occupation du sol fondé sur l'imagerie du satellite RADARSAT-1.....	122
Figure 56- Zone d'application du système prototype à la municipalité de Kirkland.....	124
Figure 57- Zones détectées correctement pour le test de Kirkland.....	125
Figure 58- Erreurs d'omission dues à l'orientation des bâtiments et la présence d'arbres.....	126
Figure 59- Problème d'omission entraîné par l'ombrage d'un bâtiment voisin.	127
Figure 60- Problème d'omission des très petits bâtiments.	128
Figure 61- Fausses alarmes dues à la présence d'activité humaine.....	129

Figure 62- Fausses alarmes de la végétation en zone de friche.....	130
Figure 63- Fausses alarmes en bordure des polygones couverts de boisés.	131
Figure 64- Fausses alarmes qui n'en sont pas dû à l'écart temporel des données de validation.....	132
Figure 65- Test de détection des changements pour l'ensemble des terrains vacants de la région métropolitaine.....	133
Figure Annexe VIII- Mesure de contraste de 2 ^{ième} ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM.....	157
Figure Annexe IX- Mesure d'entropie de 2 ^{ième} ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM.....	158
Figure Annexe X- Mesure d'énergie de 2 ^{ième} ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM.....	159
Figure Annexe XI- Mesure d'homogénéité de 2 ^{ième} ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM.....	160
Figure Annexe XII- Mesure de probabilité maximum de 2 ^{ième} ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM.....	161

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CMM : Communauté Métropolitaine de Montréal

CUM : Communauté Urbaine de Montréal

EDOT : Ensemble de Données d'Observation de la Terre

HH, HV, VH, VV (polarisation du radar) : Horizontale et Verticale

KPPV : K-plus-proches-voisins

MAMM : Ministère des Affaires Municipales et de la Métropole

MCO : Matrice de CoOccurrence

MNA : Modèle Numériques d'Altitude

MV : Maximum de Vraisemblance

SIG : Système d'Information Géographique

USGS : United States Geological Survey

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie très particulièrement et vivement mon directeur, François Cavayas du département de Géographie de l'Université de Montréal avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler, en espérant que cette collaboration continue encore de nombreuses années.

J'aimerais remercier le Gouvernement du Québec pour sa contribution via un projet FCAR-actions concertées qui a permis d'entamer ces recherches. Je remercie aussi la Communauté Urbaine de Montréal et le Ministère des Affaires Municipales et de la Métropole, partenaires dans le projet, pour leurs cartes d'occupation du sol qui furent employées dans ces travaux. Sans oublier, bien sûr, le Centre Canadien de Télédétection qui a fourni les images RADARSAT-1 grâce au projet EDOT. J'en profite également pour remercier les autres partenaires du projet FCAR-actions concertées, soit le Ministère des Transports du Québec, la Commission de la Protection du Territoire Agricole du Québec et l'Université du Québec à Montréal.

Je voudrais remercier mon codirecteur, Basel Solaiman du département Images et Traitement de l'Information de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, pour son accueil chaleureux et son encadrement lors de mon séjour à Brest.

Finalement, il m'est aussi très agréable de saluer et de remercier très chaleureusement ma famille, papa Germain, maman Jacqueline, fréro Jacques et sœur Manon qui m'ont supporté et encouragé au cours de toutes ces années. Je m'en voudrais de ne pas saluer et remercier tous mes amis qui ont constitué un auditoire captivé et même parfois captif, bien malgré eux.

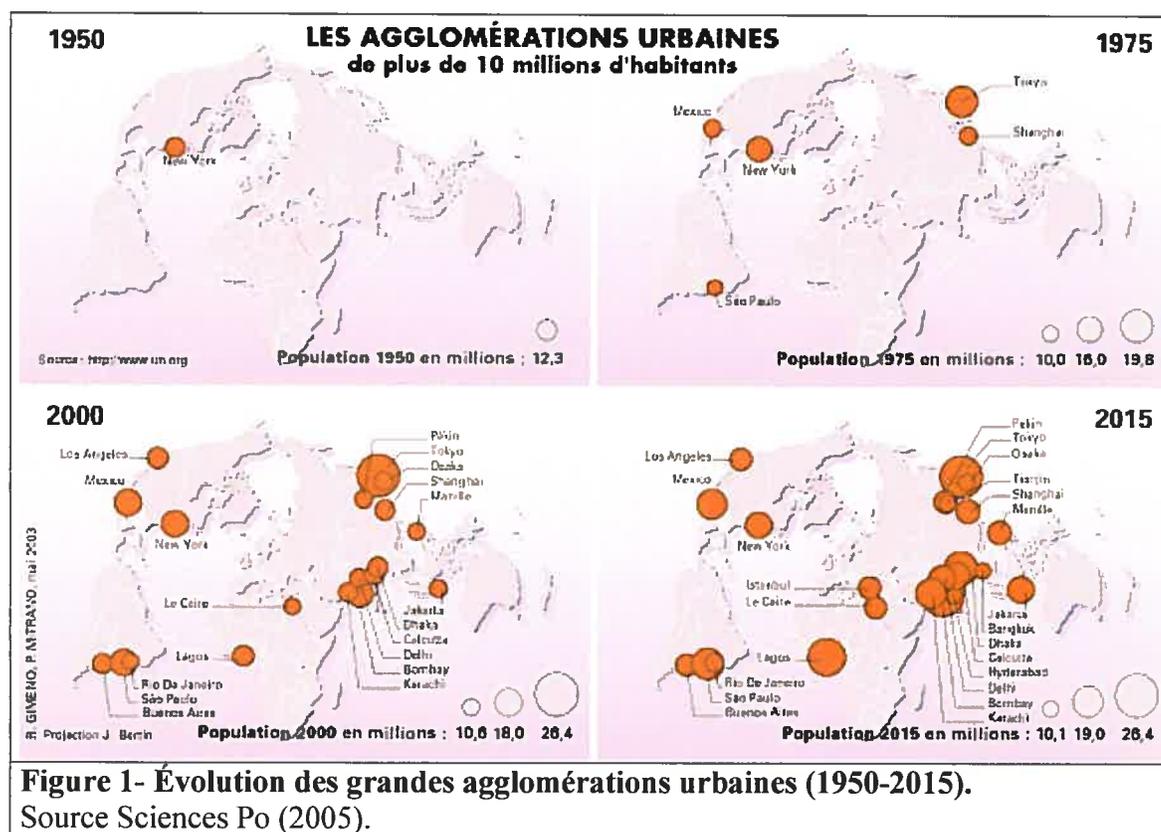
INTRODUCTION

La cartographie des occupations/utilisations du sol est d'une grande importance pour la gestion du territoire. Toutefois, le caractère dynamique des activités humaines fait en sorte que les cartes deviennent périmées très rapidement et que des mises à jour sont constamment requises. En effet, les décideurs oeuvrant à la gestion et la planification du territoire à l'échelle locale ont besoin de données récentes afin de prendre des décisions éclairées.

Le processus de mise à jour s'effectue de manière presque entièrement manuelle malgré les avancés dans les domaines de la télédétection et de l'informatique. L'ordinateur sert tout au plus au stockage d'information et d'outil pour la manipulation et l'édition des documents cartographiques. Un opérateur doit donc comparer la carte périmée à des photographies aériennes récentes et détecter les changements par inspection visuelle. Si les photographies ne sont pas assez précises ou que la classe d'occupation du sol n'y est pas identifiable, il doit faire appel à d'autres sources de données (rôle d'évaluation foncier, données de cadastre, etc.) ou, en dernier ressort, effectuer une vérification sur le terrain. Ce processus est laborieux et requiert des ressources humaines et budgétaires qui ne sont pas toujours disponibles. Les mises à jour sont conséquemment effectuées à une fréquence incompatible avec les besoins des utilisateurs. Ce problème devient de plus en plus aigu avec la régression constante des appareils étatiques. Les services cartographiques ne sont pas mieux lotis que les autres services gouvernementaux. Des cartes vieilles d'une dizaine d'années et plus doivent souvent être employées pour prendre des décisions actuelles. Toute automatisation, même partielle, du processus de mise à jour est donc souhaitable au plus haut point.

Cette situation est particulièrement critique dans les grands centres urbains. La figure 1 montre que le nombre de zones urbaines de plus de 10 millions d'habitants a quadruplé au cours des vingt-cinq dernières années (période 1975-2000). On recensait en 2003 environ 175 villes de deux millions d'habitants et plus (ONU, 2005). De plus, on note que la tendance est à l'étalement urbain et que les besoins en espaces requis pour accueillir les

activités urbaines augmentent aussi. Le tableau I montre cette tendance depuis les années '70 au Canada.



Province	1971	1981	1991	1996	Variation de 1971 à 1996 (%)
	Kilomètres carrés				
Terre-neuve	455	479	622	825	81
Ile-Du-Prince-Édouard	56	76	96	136	143
Nouvelle-Écosse	541	600	763	948	75
Nouveau-Brunswick	618	599	869	1 078	74
Québec	4 255	4 400	5 711	6 830	61
Ontario	5 545	6 019	7 593	9 017	63
Manitoba	695	749	977	1 126	62
Saskatchewan	752	884	1 131	1 312	74
Alberta	1 424	2 080	2 667	3 302	132
Colombie-Britannique	1 564	2 129	2 673	3 471	122
Canada	15 905	18 015	23 102	28 045	76

Tableau I- Superficie dévolue au milieu urbain au Canada (1971-1996).
Source Statistiques Canada (2001).

Pour prendre un exemple plus près de nous, dans la région de Montréal, la carte d'occupation du sol de référence date du milieu des années '90. On remarque cependant

que des changements importants surviennent depuis plusieurs années. Le tableau II illustre de manière éloquent cette évolution rapide de l'occupation du sol rendant la carte disponible complètement désuète. Ainsi, sur l'île de Montréal la valeur des permis de construire du secteur résidentiel a presque triplée entre les années 2000 et 2004 passant d'environ 550 millions à près d'un milliard et demi de dollars. Pour se représenter ce montant, si l'on prend une valeur moyenne approximative de \$500 000 par maison, c'est quelques 3 000 nouvelles maisons qui étaient en chantier sur l'île de Montréal en 2004. Pour cette même année, le secteur résidentiel comptait pour plus de la moitié (58%) de la valeur totale des permis de construire. Sur l'île de Laval, c'est 77% des 850 millions de dollars des valeurs de permis accordés en 2004 qui ont été dévolus au secteur résidentiel. Cette tendance à la hausse s'observe aussi à l'échelle de la province et on note que le secteur résidentiel compte pour un montant de près de 8 milliards de dollars en 2004, soit 68,5% de tous les secteurs réunis.

Au fil des ans, les données de télédétection ont montré leur potentiel pour l'extraction d'information cartographique selon des thématiques diverses. Plusieurs recherches ont été effectuées pour la cartographie des occupations/utilisations du sol avec les données optiques (TM Landsat, HRV SPOT, etc.). Au laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal une méthode particulière a été développée et appliquée avec succès dans le domaine de la mise à jour des cartes avec ces données (Maillard et Cavayas 1989, Thibault et Cavayas 1989, Cavayas et Francoeur 1991, Baudouin 1992, Baudouin *et al.* 1995, Fiset et Cavayas 1997, Chalifoux *et al.* 1998, Leduc 2003). Cette méthode dite d'interprétation d'images guidée par la carte est calquée sur la démarche suivie par l'opérateur procédant manuellement à la mise à jour cartographique. La carte à mettre à jour permet d'émettre des hypothèses quant à l'emplacement le plus probable des changements. En guidant la recherche des changements on réduit considérablement le temps de traitements. De plus, avec la carte il est possible de segmenter rapidement l'image en « objets » dont la classe d'appartenance telle qu'indiquée par la carte peut être validée via des traits caractéristiques extraits de l'image (statistiques du 1er et 2e ordre, arêtes, etc.). Cette façon d'aborder le problème de détection/identification des changements court-circuite un grand nombre de problèmes rencontrés lors de l'application des méthodes standard de détection des changements impliquant la comparaison d'images diachroniques (Lu *et al.* 2003).

	2000	2001	2002	2003	2004	Variation 2004/2003 %	TCAM ¹	
	k\$							
	Montréal							
Tous les secteurs	1 487 339	2 068 574	1 856 609	2 131 998	2 482 110	16,4	13,7	
Commercial	468 575	1 024 907	572 623	611 864	519 186	-15,1	2,6	
Industriel	301 975	192 662	149 335	104 248	146 320	40,4	-16,6	
Institutionnel	166 647	229 958	356 307	347 802	374 048	7,5	22,4	
Résidentiel	550 142	621 047	778 344	1 068 084	1 442 556	35,1	27,3	
	Laval							
Tous les secteurs	407 871	453 249	457 972	595 927	847 672	42,2	20,1	
Commercial	123 475	130 943	116 325	149 347	114 468	-23,4	-1,9	
Industriel	35 095	57 819	30 983	28 934	23 684	-18,1	-9,4	
Institutionnel	26 475	22 013	9 924	20 293	55 518	173,6	20,3	
Résidentiel	222 826	242 474	300 740	397 353	654 002	64,6	30,9	
	Ensemble du Québec							
Tous les secteurs	6 271 986	7 571 091	8 628 370	10 090 949	11 629 583	15,2	16,7	
Commercial	1 559 172	2 249 333	1 684 661	1 883 766	1 927 010	2,3	5,4	
Industriel	932 834	859 757	720 509	804 373	758 991	-5,6	-5,0	
Institutionnel	585 629	814 905	1 007 083	896 080	972 996	8,6	13,5	
Résidentiel	3 194 351	3 647 096	5 216 117	6 506 730	7 970 586	22,5	25,7	
	1. Taux de Croissance Annuel Moyen.							
	Compilation : Institut de la statistique du Québec, Direction des statistiques économiques et sociales, 10 mars 2005.							
	Tableau II- Valeur des permis de bâtir selon le type de construction pour Montréal et l'ensemble du Québec (2000-2004).							
	Source Gov.-Qc (2005).							

Les images radar du satellite RADARSAT-1 sont disponibles sur une base régulière et fiable depuis bientôt dix ans. Leur acquisition n'est pas limitée par la présence de nuages et les différentes configurations du faisceau employé font que le même site peut être revisité à des intervalles très courts de l'ordre d'une douzaine d'heures, si besoin est. Il n'y a toutefois pratiquement pas eu de recherche pour la cartographie du milieu urbain avec ces images et certainement aucune application opérationnelle qui les utilise pour la mise à jour des cartes d'occupation du sol. Or il est déjà connu que le radar en général est sensible aux structures surélevées, tels les bâtiments. L'apparition de nouveaux bâtiments est un indicatif sans faille de la présence d'un changement de l'occupation du sol. Leur détection automatique constitue donc un bon point de départ pour attaquer le problème de la mise à jour. Dans ce contexte, il est apparu intéressant de tester le potentiel des images de ce satellite pour aider à l'automatisation de la mise à jour.

Ceci nous amène à formuler l'hypothèse de base qui sera examinée dans le cadre de cette thèse. Les images du satellite RADARSAT-1 analysées selon l'approche guidée par la carte fournissent des informations exactes sur l'apparition de nouvelles constructions dans le milieu urbain depuis l'ancien inventaire des occupations des sols. Si cette hypothèse s'avérait, l'approche préconisée dans cette thèse pourrait constituer la base du développement d'un système de mise à jour des cartes d'occupation/utilisation du sol beaucoup plus rapide et efficace par rapport à ce qui se fait actuellement. Afin d'y parvenir il faudra répondre aux questions suivantes :

- 1) Est-il possible d'effectuer la détection des changements avec ces images radar ?
- 2) Est-ce que l'on est capable d'identifier la nature des changements détectés pour procéder à la mise à jour en employant uniquement les images du satellite RADARSAT-1 ?
- 3) Comment peut-on employer le plus efficacement possible les connaissances acquises afin de concevoir un système opérationnel pour la mise à jour des cartes d'occupation du sol fondé sur l'imagerie RADARSAT-1 ?

Afin d'explorer les deux premières questions, il est essentiel d'examiner un grand nombre de cas réels afin de tester les limites des images radar. Nous avons eu l'occasion d'entamer ces recherches dans le cadre d'un projet FCAR-actions concertées réalisé lors des années 1999 et 2000 avec la participation de l'Université de Montréal, l'Université du Québec à Montréal, de la Communauté Urbaine de Montréal (CUM) ainsi que du Ministère des Transports du Québec. Ce projet incluait l'acquisition d'une douzaine d'images RADARSAT en mode fin au dessus de l'île de Montréal en 1999 via le programme EDOT (Ensemble de Données d'Observation de la Terre : Centre Canadien de Télédétection). Ces acquisitions ont été faites dans des conditions variées d'angle, d'orbite et de saison, ce qui nous a aidé à déterminer la meilleure combinaison de ces paramètres.

La thèse est divisée en 6 chapitres. Le premier chapitre définit les caractéristiques des deux documents de base utilisés dans cette recherche, à savoir les cartes d'occupation/utilisation du sol et l'imagerie RADARSAT-1. Ceci facilitera la compréhension du chapitre 2 qui porte sur la problématique de la mise à jour de ces cartes et de l'utilité de l'imagerie RADARSAT-1 dans ce contexte. Le troisième chapitre expose la méthodologie qui est suivie pour les expérimentations afin d'étudier la question. Le chapitre quatre vise à évaluer le potentiel des images RADARSAT-1 pour la détection des changements alors que le chapitre cinq en examine les possibilités pour l'identification des changements détectés. Au chapitre six, nous proposons un système pour effectuer la mise à jour des cartes d'occupation du sol et validons son fonctionnement dans des conditions réelles. La thèse se termine avec les conclusions générales et les perspectives futures des développements du système proposé.

CHAPITRE 1- Les données de base : aperçu général

1.1- Introduction

Cette recherche fait appel à deux types des données numériques : les cartes d'occupation/utilisation des sols et les images du satellite RADARSAT-1. Quelques définitions et éclaircissements s'imposent avant d'entrer dans le vif du sujet qui est la mise à jour des cartes. Nous définirons tout d'abord le contenu thématique des cartes d'occupation/utilisation du sol selon leur échelle pour enchaîner avec les spécifications techniques et les caractéristiques de l'imagerie RADARSAT-1.

1.2- Les cartes d'occupation/utilisation du sol

Le système hiérarchique de taxinomie

Il faut d'abord distinguer l'occupation et l'utilisation du sol. L'occupation fait référence à ce qui se trouve physiquement sur les lieux comme la végétation, l'hydrographie, les routes et les bâtiments. L'utilisation du sol touche plutôt la fonction des surfaces, ce qui implique une définition de l'activité humaine qui s'y déroule. Les classes employées pour l'occupation du sol mettent en évidence la répartition spatiale des ressources du territoire alors que l'utilisation du sol se préoccupe davantage de la répartition spatiale de la présence et de l'activité humaine (Lo 1998). Toutefois, afin de ne pas alourdir le texte nous parlerons de « carte d'occupation du sol » en demeurant bien conscient que l'on inclut les deux termes.

Dans les années soixante-dix, lorsque les images satellitales optiques commençaient à être disponibles, la cartographie de l'occupation du sol a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont fortement contribué à établir les standards encore employés de nos jours. L'organisme gouvernemental américain « United States Geological Survey » (USGS) a développé un système de classification, le « Land Use and Land Cover », basé sur le niveau de détail de

l'information qui pouvait être manuellement extraite des images satellitales disponibles à l'époque (Landsat MSS ; 80 m de résolution spatiale) ainsi que des photographies aériennes (Anderson 1971, Anderson *et al.* 1972, Anderson *et al.* 1976). Ce système de classification comporte plusieurs niveaux hiérarchiques et les taxons d'un niveau quelconque sont des subdivisions des taxons plus généraux du niveau précédent. Par exemple, le premier niveau délimite l'espace urbain ou construit, le second niveau identifie des aires résidentielles et le troisième niveau distingue les zones résidentielles en unités unifamiliales, multifamiliales, parcs de maisons mobiles, etc.

Selon l'échelle de la carte d'occupation du sol (Tableau III), la source des données varie. Ainsi, les images LANDSAT MSS et les photographies aériennes prises en haute altitude (échelle 1 : 80 000 et plus petite) permettraient d'identifier les taxons des niveaux I et II. Les photographies aériennes aux échelles moyennes (1 : 20 000 à 1 : 80 000) seraient adaptées au niveau III tandis que celles à grande échelle (1 : 20 000 ou plus) seraient adaptées au niveau IV. Tel que montré au tableau II, les niveaux III et IV requièrent des données provenant d'autres sources que les images ou les photographies aériennes. Il faut toutefois préciser que même des taxons du niveau II sont impossibles à distinguer uniquement du haut des airs sans l'apport d'autres données. Par exemple, des artères commerciales et des rues résidentielles voisines d'un même quartier peuvent contenir des bâtiments identiques où seules les devantures précisent la fonction.

D'autres systèmes de classification d'occupation du sol ont été développés afin de tenir compte des particularités du territoire, tel le système CORINE (« COoRdination of INformation on the Environment ») qui comprend des taxons spécifiques au contexte européen (TCEEA, 2005). Le principe d'hierarchisation des classes est similaire à celui développé par le USGS.

Dans le cadre de cette thèse, les échelles cartographiques visées sont celles habituellement employées pour supporter les opérations de planification et d'aménagement du territoire, c'est-à-dire entre le 1 : 20 000 et le 1 : 50 000. En considérant le tableau III, les taxons de niveau IV devraient constituer notre préoccupation. Toutefois, les services d'aménagement et de planification urbaine adoptent parfois des systèmes taxinomiques qui ne répondent pas nécessairement aux spécifications du USGS. À titre d'exemple, dans la région

métropolitaine de Montréal, qui est notre région d'étude (voir chapitre 3), la carte d'occupation du sol est à l'échelle du 1 : 20 000 mais les taxons correspondent au niveau thématique II. Au chapitre 2, nous ferons donc état des travaux avec des images de télédétection portant sur la cartographie de l'occupation du sol à partir du niveau II et plus.

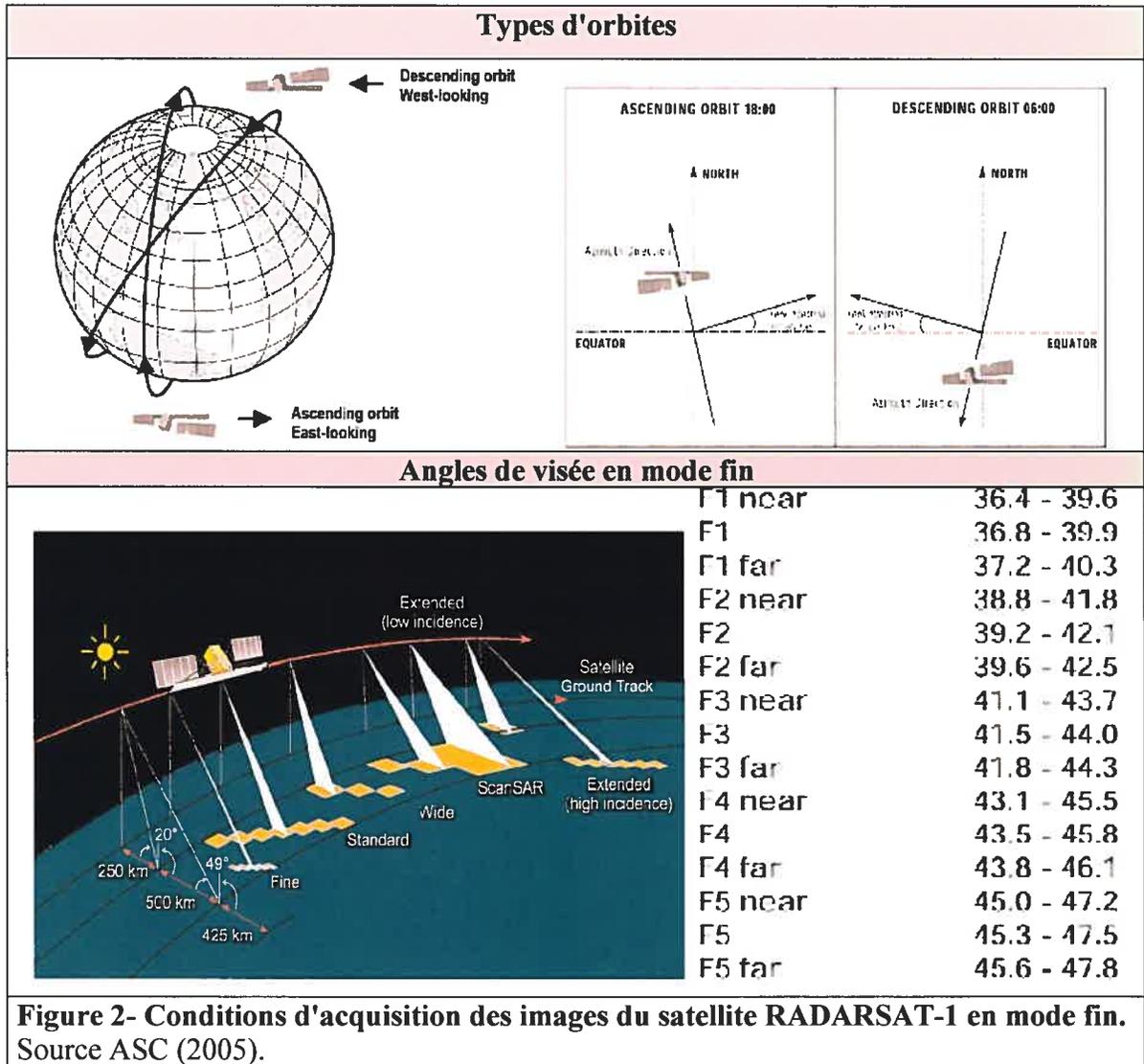
Critères	Niveau I	Niveau II	Niveau III	Niveau IV
Usage principal	National	National	Régional	Local
Échelles cartographiques	1 : 250 000 à 1 : 1 000 000	1 : 125 000 à 1 : 250 000	1 : 50 000 à 1 : 125 000	1 : 20 000 à 1 : 50 000
Unité de surface cartographique minimale approximative (km ²)	1 à 15	0,25 à 1	0,04 à 0,25	0,01 à 0,04
Base de classification	Occupation	Occupation	Occupation/ utilisation	Occupation/ Utilisation
Source de données	Principalement dépendant de l'interprétation visuelle	Principalement dépendant de l'interprétation visuelle	Combinaison de l'interprétation visuelle et de données terrains	Combinaison de l'interprétation visuelle et de données terrains

Tableau III- Caractéristiques d'un système de taxinomie standard adapté du « Michigan Land Use Classification System » fondé sur le système du USGS.
Tiré de Jensen (1983).

1.3- L'imagerie RADARSAT-1

1.3.1 Spécifications techniques

Le satellite RADARSAT-1 a été lancé le 4 novembre 1995 et continue de fonctionner sans relâche depuis ce temps (ASC, 2005). Il orbite autour de la terre à une altitude moyenne d'environ 800 kilomètres suivant une trajectoire polaire héliosynchrone avec une inclinaison de 98,6°. Puisque les radars sont des capteurs actifs (ils possèdent leur propre source de rayonnement) ils acquièrent des données de jour comme de nuit, en orbite ascendante ou descendante, c'est à dire respectivement en allant du sud au nord ou du nord au sud (Figure 2). En orbite ascendante le passage du satellite se produit à environ 18h, alors qu'en orbite descendante il passe plutôt à 6h à l'heure normale locale.



Le radar de ce satellite est du type à synthèse d'ouverture. Sans trop entrer dans les détails techniques, la résolution des images produites par un radar-imageur dans la direction azimutale (parallèle à la trajectoire de vol) dépend de la dimension de l'antenne dans cette direction, aussi appelée son ouverture. À des altitudes orbitales, pour obtenir une résolution du même ordre de grandeur que celle obtenue dans la direction de la portée (échelle métrique) il faudrait une antenne dont la taille est de l'ordre kilométrique, ce qui est impensable d'un point de vue pratique. Pour obtenir une telle résolution chaque portion du territoire est illuminée par un grand nombre d'impulsions successives. Les phases et les amplitudes des signaux rétrodiffusés portion par portion sont utilisées pour simuler une ouverture beaucoup plus grande, d'où le nom de radar à synthèse d'ouverture. Cette synthèse se fait par traitement informatique des caractéristiques des signaux mesurés par le

capteur et télémétrés par le satellite lors du survol du territoire. En ce sens le radar n'obtient pas directement une image du territoire. Nous pouvons également traiter les signaux de telle sorte pour qu'on obtienne des images à des résolutions variables (traitements multi-vues).

La plupart des radars spatiaux de télédétection sont munis d'une seule antenne spécialement construite pour émettre et recevoir des ondes à une seule fréquence dans les micro-ondes (radar mono-fréquence). Les principales longueurs d'ondes d'opération selon une convention internationale sont 0,8 cm (bande K), 3,2 cm (bande X), 5,6 cm (bande C), 23,5 cm (bande L) et 68 cm (bande P). Le radar de RADARSAT-1 opère dans la bande C à 5,6 cm.

Le radar étant un capteur monochromatique nous pouvons aisément définir la polarisation des ondes émises. De même nous pouvons modifier électroniquement l'état de l'antenne pour qu'elle capte des ondes avec une polarisation qui n'est pas nécessairement celle des ondes émises. La polarisation d'une onde électromagnétique est définie par le comportement du vecteur électrique dans le temps sur un plan orthogonal à la direction de propagation du rayonnement. Rappelons qu'un vecteur est une mesure qui donne à la fois une intensité et une direction. Si l'extrémité du vecteur décrit un cercle sur le plan en fonction du temps, la polarisation est dite circulaire ; s'il décrit une ellipse, elle est dite elliptique. Si l'extrémité du vecteur décrit un segment de droite, la polarisation est dite linéaire et l'orientation peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 180° (les valeurs de 180 à 360° sont redondantes). Une polarisation linéaire orientée à 0° est dite horizontale (H), alors qu'elle est dite verticale (V) si elle est orientée à 90°. Ce sont ces deux polarisations qui sont employées par les systèmes radar de télédétection. En plus donc de la longueur d'onde (ou la fréquence) qu'emploie un radar de télédétection, on décrit habituellement le système selon la polarisation qu'il émet et celle qu'il capte. Les radars spatiaux lancés dans les années '90 étaient du type mono-polarisation. RADARSAT-1 est du type C-HH contrairement aux satellites européennes de la série ERS qui étaient du type C-VV. Ce n'est que tout récemment que le premier satellite automatique pouvant opérer en quasi-simultané avec deux configurations de polarisation différentes (HH-HV ou VV-VH ou HH-VV) a été mis en orbite : le satellite européen ENVISAT.

Une autre caractéristique importante qui spécifie le type du radar est sa multi-angularité. RADARSAT-1 était le premier satellite automatique possédant cette caractéristique. Ainsi par télécommande et par voie électronique la position du faisceau radar peut changer sur un plan perpendiculaire (portée) à la trajectoire de vol (azimut). Selon la résolution spatiale que l'on veut obtenir les différentes positions permises et l'ouverture du faisceau ne sont pas les mêmes (Figure 2). Dans cette recherche nous nous intéressons tout particulièrement au mode dit fin. La résolution nominale au sol varie entre 8 et 10 m selon la position du faisceau. Ici une note s'impose concernant la résolution. Habituellement et contrairement aux capteurs optiques, nous préférons utiliser le terme espacement inter-pixel lorsque nous parlons d'une image radar. Ceci est la conséquence directe de la génération de l'image post-acquisition par traitement (échantillonnage) des signaux emmagasinés par le radar lors du survol du territoire, tel que mentionné plus haut. L'espacement inter-pixel est la taille du pixel au sol de l'image disponible à l'utilisateur. En gros, la résolution correspond au double de cet espacement inter-pixel. Dans la direction d'azimut l'obtention d'un tel espacement peut nécessiter un traitement spécial des signaux (multi-vues). Pour le mode fin de RADARSAT-1 cet espacement est fixé à 6,25 m.

1.3.2 Caractéristiques des images

La plupart des principes énoncés ici sont tirés du manuel de télédétection radar qui constitue actuellement la source de référence par excellence dans le domaine. Les caractéristiques radiométriques des images radars en général sont couvertes avec force de détails aux chapitres 2 et 3 de cet ouvrage (Raney 1998 et Lewis *et al.* 1998).

Trois caractéristiques majeures distinguent les radars des capteurs employant le rayonnement solaire réfléchi traditionnellement utilisés en télédétection : 1) ce sont des systèmes actifs, 2) ils opèrent dans les ondes centimétriques (micro-ondes) tandis que le rayonnement solaire est capté dans les ondes micrométriques, 3) la polarisation de l'onde transmise et captée est prise en considération.

Un autre aspect du radar digne de mention est la possibilité de mesurer la phase des ondes. Le radar est capable de séparer les ondes en deux composantes (en phase et en quadrature

de phase) ce qui permet par traitement d'obtenir une mesure de l'amplitude ainsi que de la phase de l'onde. Dans le cas de RADARSAT-1, cette information sur la phase est exploitée dans le domaine de l'interférométrie. Ceci est une technique qui requiert deux acquisitions avec des perspectives différentes. Les différences de phase donnent alors la possibilité de créer des modèles numériques d'altitudes (MNA). Le futur satellite RADARSAT-2 exploitera cette information sur la phase en combinaison avec des mesures dans plusieurs polarisations pour mettre en application un autre domaine prometteur : la polarimétrie. Cette information sur la phase n'est pas prise en considération dans notre étude.

Toutes ces caractéristiques confèrent aux images RADARSAT-1 des propriétés qui les différencient à maints égards de celles des images du rayonnement solaire réfléchi, notamment :

- 1) À partir de 3 cm environ l'atmosphère est quasi-transparente aux ondes électromagnétiques. Un des problèmes fréquemment rencontrés avec l'imagerie optique provient des conditions d'acquisition qui doivent être optimales pour obtenir des données appropriées à la mise à jour. La présence de nuages rend aléatoire l'acquisition des images, ce qui peut être indésirable d'un point de vue opérationnel. Le radar est un outil par excellence pour les applications nécessitant une acquisition en tout temps. Les radars satellitaires en particulier peuvent acquérir des données en orbite ascendante et descendante et sont donc très utiles pour une couverture diachronique serrée.
- 2) À des longueurs d'ondes centimétriques la rugosité de la surface qui module la réflexion radar n'est pas la même que dans le cas des ondes micrométriques. Un terrain sablonneux est une surface rugueuse pour les ondes micrométriques mais il est une surface lisse pour les micro-ondes. Et qui dit surface lisse dit réflexion spéculaire. Comme l'émetteur et le récepteur se trouvent au même emplacement et que la visée est oblique, les surfaces lisses ne retournent presque pas de rayonnement au radar.
- 3) Les ondes radars qui illuminent le terrain induisent des courants électriques qui à leur tour sont responsables du rayonnement retourné au radar. La constante diélectrique des objets, qui décrit en quelque sorte la facilité de formation des courants électriques, est intimement liée à la quantité de signal réfléchi des surfaces. Plus cette constante est élevée

et plus la réflexion est forte. La plupart des matériaux naturels possèdent une constante faible dans les micro-ondes, soit de 3 à 8 lorsqu'ils sont secs, alors que l'eau possède une constante très élevée de l'ordre de 80. Le contenu en eau est donc déterminant pour la proportion du signal rétrodiffusé des surfaces.

4) Tandis que les ondes micrométriques ne pénètrent que dans une peau mince de la surface du sol, les ondes centimétriques vont plus loin dans le sol. De manière générale, l'onde radar pénètre dans le sol à une profondeur à peu près équivalente à sa longueur d'onde. Le contenu en humidité des sols module toutefois fortement cette propriété.

5) La manière dont le radar acquiert ses données (mesure du temps aller-retour du signal) en combinaison avec l'angle d'incidence du faisceau provoquent des déformations géométriques lorsque le terrain possède un fort relief. Ainsi, la longueur des pentes faisant face au radar est rétrécie, surtout lorsque l'angle d'incidence est proche du nadir. Les pentes apparaissent donc extrêmement brillantes et courtes à cause de l'arrivée simultanée de nombreux signaux provenant des points situés le long de la pente. Sous certaines conditions, les pentes apparaissent inversées si leur sommet est plus proche du radar que la base (inversion des pentes). Le même phénomène d'inversion est susceptible de se produire avec des structures surélevées comme les bâtiments ou les pylônes électriques. Lorsque l'angle d'incidence est prononcé, les pentes faisant dos au faisceau radar ne retournent aucun signal car elles sont dans l'ombre. Puisqu'il n'y a pas d'éclairement diffus du ciel comme pour les images optiques, ces zones apparaissent totalement obscures. L'angle d'incidence a aussi d'autres conséquences sur les caractéristiques radiométriques des images radar. Ainsi, une surface humide apparaît beaucoup plus brillante lorsque l'angle du faisceau est faible. Au contraire, une surface rugueuse apparaît plus brillante lorsque l'angle est prononcé.

6) Les images radars présentent un bruit caractéristique appelé chatoiement. Un signal cohérent et pratiquement monochromatique comme celui du radar produit des additions d'ondes constructives (maximum pour deux ondes en phase) ou destructives (zéro pour deux ondes déphasées de 180°) en fonction de la distance au capteur de chaque objet à l'intérieur d'une cellule de résolution (phénomène d'interférence). Ceci occasionne une variation imprévisible de l'intensité du signal d'une cellule de résolution à l'autre donnant

un aspect granuleux aux images. Ce phénomène n'a pas lieu dans le cas des images optiques puisque le rayonnement est non cohérent et la valeur radiométrique enregistrée est donc une sommation de l'énergie réfléchiée par les objets contenus dans une cellule de résolution.

CHAPITRE 2- La mise à jour des cartes : problématique

2.1- Introduction

Dans ce chapitre nous passerons en revue les méthodes actuelles utilisées pour la mise à jour des cartes et les tentatives pour son automatisation avec des images satellitales. Par la suite, nous situerons dans ce contexte l'approche préconisée dans cette thèse. Le chapitre sera complété avec une analyse du contenu en information des images RADARSAT-1 en milieu urbain afin d'établir les traits caractéristiques à examiner plus à fond pour la détection et l'identification des changements.

2.2- Les procédures actuelles de mise à jour

Baudouin (1992) présente une revue des différentes méthodes conventionnelles de mise à jour des cartes d'occupation du sol dans un contexte canadien. Parmi ces méthodes, la plus répandue est celle employant des appareils photogrammétriques de bas niveau tel le « Zoom-Tranferscope » ou le « Sketch Master » avec lesquels on visualise simultanément les photographies aériennes récentes et la carte à mettre à jour. Un opérateur scrute les deux documents afin de détecter des différences. Celles-ci sont interprétées, et les changements appropriés sont dessinés à main levée sur la carte. Ce document (brouillon) sert ensuite pour l'édition de la carte mise à jour. Avec l'apparition des moyens informatiques, la version plus moderne de cette approche consiste à superposer sur l'écran des orthophotographies numériques et les vecteurs de la carte. Ceci facilite les manipulations et l'édition de la carte actualisée, mais l'approche demeure essentiellement basée sur les mêmes principes. Ainsi, malgré l'apparition de ces nouveaux outils, la mise à jour demeure laborieuse particulièrement dans les grands centres urbains où, tel que mentionné précédemment, les changements surviennent à une cadence très rapide. De plus, une très grande quantité de photographies aériennes est requise pour couvrir l'ensemble du territoire. Par exemple, près de 120 orthophotographies à l'échelle 1 : 40 000 sont nécessaires pour couvrir la Communauté Métropolitaine de Montréal. Ainsi, les coûts

qu'entraînent la main d'œuvre requise et l'acquisition fréquente de photographies afin de répondre aux besoins de la mise à jour de tout le territoire sont prohibitifs.

Dans ce contexte, l'utilisation des images satellitales qui couvrent de grands territoires, acquises avec une fréquence plus grande et à moindre coût aurait pu présenter un intérêt particulier pour la mise à jour des cartes. Or, les expériences menées avec ces images ont montré que leur interprétation visuelle n'aboutit pas à une cartographie adaptée aux milieux urbains. Très souvent, pour identifier les taxons, l'interprète a recours à la reconnaissance des petits objets et à leur agencement, ce qui n'apparaît que sur les images à des résolutions fines. À titre d'exemple, la figure 3 montre l'effet de la résolution sur l'interprétabilité des images optiques. On y observe une zone industrielle telle que captée par les satellites SPOT, IRS et QuickBird en mode panchromatique avec des résolutions spatiales que l'on peut respectivement qualifier de moyenne, fine et ultra fine (10 mètres, 5 mètres et 60 cm). On peut comparer ces images à une orthophotographie numérique rééchantillonnée à 1 mètre de résolution, produite à partir de photographies aériennes noir et blanc à l'échelle 1 : 40 000 (Figure 3c). On constate qu'il est difficile d'identifier visuellement l'occupation du sol sur les images SPOT et IRS mais que celle-ci est très facile à reconnaître sur l'image QuickBird et l'orthophotographie grâce à la richesse des détails perceptibles.

Étant donné que dans l'état actuel des choses, une résolution fine des images optiques signifie nécessairement la couverture d'une portion beaucoup plus restreinte du territoire, les problèmes des coûts d'acquisition et de la lourdeur de la tâche d'interprétation demeurent entiers. Dans ces conditions, l'automatisation du processus de mise à jour devient absolument nécessaire. À la section qui suit, nous examinerons ce qui a été fait jusqu'à date dans ce domaine.

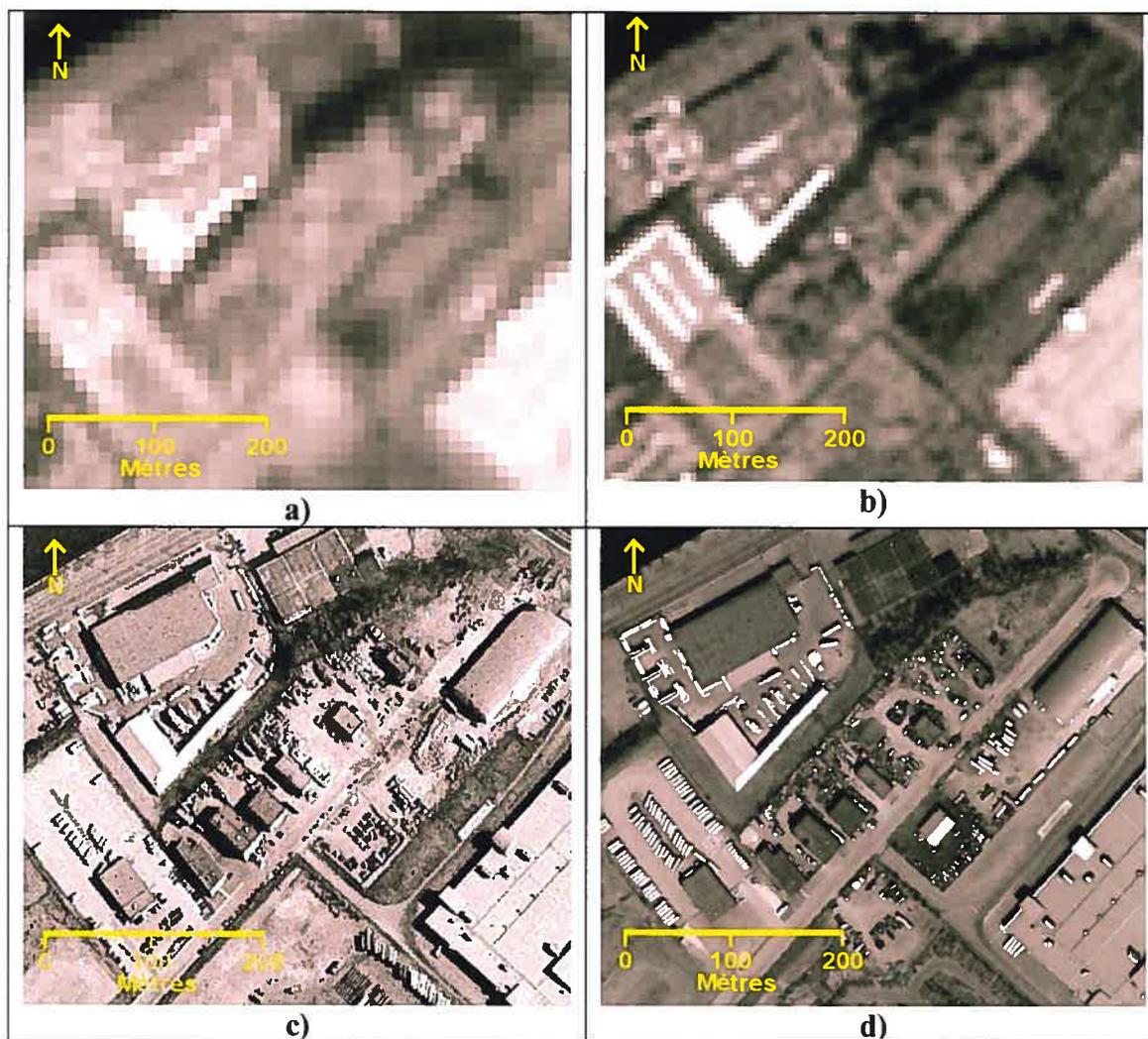


Figure 3- Effet de la résolution sur le niveau de détail visuellement perceptible avec des images optiques.

Zone industrielle en bordure du canal Lachine (Montréal): a) Image SPOT panchromatique à 10 mètres de résolution (juin 1997), b) Image IRS panchromatique à 5 mètres de résolution (août 1998), c) Image d'une mosaïque d'orthophotographies rééchantillonnées à 1 mètre de résolution issue de photographies aériennes à l'échelle 1 : 40 000 (avril 1999), et d) Image QuickBird à 60 cm de résolution (avril 2002).

2.3- Les tentatives d'automatisation du processus de mise à jour à partir de l'imagerie satellitale

Pour bien comprendre la problématique de l'automatisation de la mise à jour, il faut séparer ce processus en étapes distinctes :

- a) la détection des changements,
- b) l'identification des changements détectés,

- c) la sélection des changements identifiés selon leur pertinence vis-à-vis la carte examinée : ex. l'extension d'un bâtiment industriel n'est pas considérée comme un changement pour une carte d'occupation du sol car l'ensemble du terrain est déjà caractérisé comme industriel,
- d) le regroupement des pixels de changement sélectionnés pour former des entités cartographiques (points, lignes, polygones) qui serviront à la mise à jour de la carte, et finalement,
- e) les manipulations des données cartographiques existantes afin d'apporter les modifications qui s'imposent suite aux étapes a) à d). Ces modifications portent sur la géométrie (ex. division d'un îlot urbain vacant en deux polygones, un avec des résidences et l'autre avec des commerces), simplement sur l'étiquette d'un polygone (ex. polygone vacant à polygone résidentiel) ou sur les deux à la fois.

Il est à noter que les étapes d et e relèvent plutôt de la géomatique et ne font pas l'objet de nos préoccupations.

2.3.1 L'imagerie optique

La plupart des articles trouvés dans la littérature portent sur l'utilisation des images optiques pour la détection des changements (Huertas et Nevatia 1998, Ji *et al.* 2001, Hurd *et al.* 2001, Petit *et al.* 2001, Zhang 2001, Hung 2002, Liu et Lathrop 2002, Seto *et al.* 2002, Xiuwan 2002, Zhang *et al.* 2003, Esch *et al.* 2005). Le tableau IV résume quelques méthodes tirées de la revue exhaustive de Lu *et al.* (2003) dont la plupart ont été développées avec des images à résolution moyenne ou faible. Les territoires étudiés comprennent rarement des milieux urbains denses.

Plusieurs méthodes n'offrent qu'une automatisation de la première étape du processus de mise à jour. Dans cette catégorie nous retrouvons par exemple des méthodes telles que la soustraction pixel à pixel des images de télédétection prises à deux dates différentes. La variation drastique de la valeur numérique du même pixel d'une date à l'autre est considérée comme une indication qu'un changement de l'occupation du sol est survenu. Le qualificatif « drastique » implique l'intervention de l'opérateur qui doit fixer un seuil. Dans la pratique, les étapes b) et c) sont la plupart du temps confiées à l'opérateur. Comme ces

méthodes sont appliquées « aveuglément », tout changement est détecté, qu'il soit significatif ou non pour la mise à jour de la carte. En d'autres mots ces approches ne déchargent pas tellement l'opérateur et nous sommes encore loin d'une automatisation du processus de la mise à jour. Et comme nous l'avons démontré plus haut, même l'identification visuelle des changements est souvent ardue avec les images de résolution plus grossière que la dizaine de mètres.

Approches	Méthodes
Algébrique	Différences de valeurs radiométriques, de ratios, d'indices de végétation, image de régression, analyse de vecteurs de changement, soustraction de la trame de fond
Transformations	Appliquées avec des images diachroniques ou des séries multitemporelles : composantes principales, Gramm-Schmidt, Kauth-Thomas, Chi-Carré
Classification	Comparaisons de résultats post-classification de jeux de données multispectrales ou multibandes
Mesures biophysiques	Modèles de réflectance, de mélange hyperpectral
Système d'Information Géographique (SIG)	Incorporant des données de télédétection ou approche purement SIG
Comparaisons visuelles diachroniques	Photointerprétation
Autres	Méthodes mixtes
Tableau IV- Résumé des diverses techniques de détection des changements appliquées aux données de télédétection. Tiré de Lu <i>et al.</i> (2003).	

D'autres méthodes supportent l'automatisation des étapes a) à c). L'exemple classique est la comparaison des images acquises à deux dates différentes et classifiées séparément. Ici c'est l'étiquette d'un même pixel qui est comparée. Ainsi l'intervention de l'opérateur ne se situe qu'en amont pour spécifier le classificateur, définir des sites d'entraînement, etc. Le fait d'avoir adapté le classificateur au système de taxinomie utilisé élimine le problème de détection de tout changement peut importe sa signification. Toutefois ces méthodes posent de sérieux problèmes. D'une part, avec les images à résolution moyenne ou grossière, il y a beaucoup de confusions entre les taxons, même de niveau II, pour que l'information soit pertinente dans une cartographie du milieu urbain. D'autre part, avec les images à résolution fine, la majorité des méthodes de classification fonctionnent très mal. Non seulement n'est-il pas plus facile d'identifier automatiquement des taxons de niveau III, mais il devient même difficile d'extraire les taxons de niveau II. À ce niveau de détail on

commence à reconnaître les objets constituant de chaque classe (ex. pixels de gazon, asphalte, toits de maison, arbres et autres). Ces objets hétéroclites sont souvent de taille variable et leur présence à l'intérieur d'un taxon donné n'est pas constante. Plusieurs se tournent vers des approches complexes demandant des systèmes de compréhension d'images (Argialas et Harlow 1990). Il est toutefois très difficile en milieu urbain de généraliser l'application des règles d'une procédure d'interprétation automatique. Il est donc tout à fait paradoxal de constater que l'avènement des images satellitaires optiques à très haute résolution nous ramène pratiquement vingt ans en arrière. En effet, même si les ressources informatiques sont plus développées de nos jours, il demeure beaucoup plus facile de faire l'interprétation visuelle des images à très haute résolution que d'en extraire automatiquement l'information.

2.3.2 L'imagerie radar

Depuis le lancement des satellites européens munis d'un radar à synthèse d'ouverture au début des années '90 suivi du satellite canadien RADARSAT-1 et d'autres satellites comme le japonais JERS-1 et récemment ENVISAT, une grande masse de données est devenue accessible aux chercheurs partout à travers le monde. Henderson et Xia (1997 et 1998) constatent toutefois que les travaux touchant l'analyse du milieu urbain avec les images radar ont reçu beaucoup moins d'attention que les études sur la végétation, les sols, la géologie, la géomorphologie et autres paramètres biophysiques. Dans le domaine de la détection des changements, certaines études ont été effectuées, tel que montré au tableau V. Toutes ces études démontrent clairement que les comparaisons d'images diachroniques pixel à pixel n'aboutissent pas à des résultats concluants si on ne tient pas compte de l'effet de chatoiement. Il faut donc d'une manière ou d'une autre réduire ce bruit soit par filtrage ou en tenant compte du voisinage de chaque pixel (Polidori *et al.* 1995, Rignot et vanZyl 1993, Dong *et al.* 1998, Horgan 1998 et 1999, Bao 1999, Bazi *et al.* 2005, White 1989, White et Oliver 1990 ; Rignot et Chellappa, 1992, Caves et Quegan 1994, Caves *et al.* 1996, Bujor *et al.* 2001, 2002, 2003 et 2004, Inglada 2003, Coulon et Tourneret 2002, Bianchin *et al.* 1999, Lombardo et Oliver 2001, Lombardo et Pellizzeri 2002a et 2002b).

La seule de ces études qui porte sur le milieu urbain a été effectuée avec une série multitemporelle de 12 images ERS (Bianchin *et al.* 1999). Les auteurs tentent de

caractériser les zones urbaines inchangées et procèdent au filtrage du chatoiement avec une adaptation du filtre de Lee (1981) prenant en compte la variation temporelle en plus de la variation spatiale. Seules des illustrations des résultats sont présentés sans aucune quantification et les auteurs concluent que le suivi des zones urbaines est une tâche très difficile avec les images ERS. On peut expliquer ceci en partie par la faible résolution (environ 30 m) de ce type d'imagerie.

Auteurs	Images (nombre)	Milieu ou thématique étudié
Rignot et Chellappa (1992)	AIRSAR (2)	Variation saisonnière de l'humidité
Rignot et vanZyl (1993)	ERS (2)	Réserve naturelle
White (1989), White et Oliver (1990)	SAR aéroporté (non spécifié)	(non spécifié)
Caves et Quegan (1994), Caves <i>et al.</i> (1996)	ERS (3)	Rural
Bujor <i>et al.</i> (2001, 2002)	ERS (2)	Forêt tropicale
Bao (1999)	RADARSAT mode fin (2), ERS (8)	Forêt
Bazi <i>et al.</i> (2005)	ERS (2)	Zones inondées
Inglada (2003)	RADARSAT mode fin (2)	Volcanisme
Mercier et Derrode (2004)	RADARSAT mode fin (2),	Volcanisme
Coulon et Tourneret (2002)	Série multitemporelle (non spécifié)	(non spécifié)
Bujor <i>et al.</i> (2003 et 2004)	ERS (7)	Zones inondées, érosion littorale
Bianchin <i>et al.</i> (1999)	ERS (12)	Urbain
Lombardo et Oliver (2001) et Lombardo et Pellizzeri (2002a, 2002b)	ERS (≈ 10)	Rural et boisé

Tableau V- Liste des travaux en radar sur la détection des changements avec la comparaison image à image.

Concernant l'approche de comparaison post-classification, il n'y a pas de travaux. Ceci s'explique du fait les images radar monofréquences/monopolarisées ne se prêtent pas facilement à un tel exercice. C'est pourquoi certains auteurs proposent l'utilisation combinée d'images radar et optique (Rocha et Tenedório 2001, Pellizzeri *et al.* 2003, Onana *et al.*, 2003). Cependant, cela ne porte pas sur la détection des changements mais sur la cartographie thématique du territoire.

Finalement, on recense aussi un certain nombre de travaux sur la détection des changements ou la classification qui emploient des données de polarimétrie (Baronti *et al.* 1994, Dong *et al.* 1997, Dierking et Skriver 2002, Qong 2004, Xia 1996, Smith *et al.* 1998, Lee *et al.* 2001) et d'interférométrie (Priess *et al.* 2003, Schneider et Fernandes 2003). Cependant, tel que mentionné au chapitre 2, ces deux domaines sortent du cadre de cette recherche.

2.4- Une approche alternative pour l'automatisation du processus de mise à jour

Tel que mentionné en introduction, l'approche préconisée pour la détection des changements est celle guidée par la carte. Les expériences effectuées avec cette approche ainsi que la façon dont nous comptons l'appliquer dans notre recherche sont revues dans cette section.

Cette approche a été appliquée avec des images optiques de résolution faible à moyenne pour la mise à jour de plusieurs types de cartes, incluant les cartes topographiques, les cartes forestières et les cartes d'occupation du sol. Les expériences ont démontré qu'il est aisé de trouver une stratégie de détection des changements en fonction de la thématique examinée. Le cas du réseau routier illustre bien ce concept. L'hypothèse de base est qu'une nouvelle route est un segment connecté en au moins un point quelconque au réseau existant et que la recherche des nouveaux segments sur l'image doit être initiée à proximité de l'ancien réseau. Un filtre linéaire de détection d'arête sur une image SPOT panchromatique peut être suffisant en guidant la recherche de la sorte (Maillard 1989, Maillard et Cavayas 1989). Les traits caractéristiques servant à détecter la nouvelle route peuvent aussi prendre la forme de valeurs d'activation d'un réseau de neurones à rétropropagation de l'erreur entraîné à reconnaître des segments de routes (Fiset 1993, Fiset *et al.* 1996a et 1996b, Fiset et Cavayas 1997, Fiset *et al.* 1998) ou des valeurs d'appartenance floue à la classe route (Solaiman *et al.* 1998).

Dans le cas des entités polygonales, les changements possibles sont les suivants : 1) extension des bordures, 2) diminution des bordures, 3) morcellement de la superficie. Le

contexte et les données employées permettent de poser les hypothèses de travail qui définissent la procédure à appliquer pour l'analyse du polygone. Par exemple, pour la détection des changements du contour d'une gravière, le contour du polygone défini par la carte sert de point de départ pour la recherche d'une arête caractéristique de la limite entre la carrière (sol minéralisé) et les zones environnantes (souvent couvertes de végétation). Puisque l'on suppose qu'une carrière en activité s'est agrandie depuis la dernière mise à jour, on initiera la recherche d'une nouvelle arête du pourtour vers l'extérieur (Thibault et Cavayas 1989, Maillard et Cavayas 1989). Dans le cas du suivi de la végétation en milieu périurbain ou forestier, on suppose plutôt que les boisés ont diminué et on initiera la recherche d'une nouvelle arête du pourtour vers le centre (Maillard 1989). Pour détecter les polygones devant être morcelés, l'examen des images doit révéler toute anomalie radiométrique par rapport aux classes spécifiées sur la carte à mettre à jour. Par exemple, avec la distribution des valeurs dans les différentes bandes d'une image satellitale multispectrale à l'intérieur des polygones forestiers on détecte la présence de perturbations telles les coupes où les épidémies d'insectes. Les traits caractéristiques proviennent soit de l'analyse des histogrammes des valeurs numériques ou des mesures de texture. La détection et l'identification des changements peut être fondée sur les principes des systèmes experts (Cavayas et Francoeur 1991, Beaulieu 1991, Chalifoux *et al.* 1998, Leduc 2003).

Dans le cas de la mise à jour des cartes d'occupation du sol, des études ont été effectuées au laboratoire de télédétection avec des images SPOT multispectrales (20 m de résolution) et panchromatiques (10 m de résolution) sur l'île de Montréal. Thibault (1990) met en évidence un problème important de l'application de la méthode avec les polygones de la carte d'occupation du sol. En effet, sur ces cartes le réseau routier, à l'exception des autoroutes, n'est pas pris en considération. Ainsi les traits caractéristiques extraits par polygone contiennent un mélange des signatures spectrales, particulièrement si le polygone de la carte s'étend sur plusieurs îlots urbains, ce qui n'est pas rare. À titre d'exemple un quartier résidentiel avec le même type d'habitations est représenté par un seul polygone. Baudouin (1992) résout ce problème en travaillant sur la base de l'îlot urbain. Concernant les traits caractéristiques utilisés, Thibault (1990) essaie de tirer profit de la présence des diverses bandes spectrales pour définir les critères de détection/identification des changements par polygone de la carte de l'occupation du sol. Pour sa part, Baudouin *et al.* (1995) emploient les statistiques du premier ordre (coefficient de variation) par îlot urbain

extrait d'une image panchromatique. Ils introduisent aussi des traits morphologiques des îlots (compacité) tels que définis par la carte du réseau routier. L'application de cette approche, malgré la résolution des images, permet d'atteindre le niveau thématique II et parfois le niveau III. L'exactitude des détections/identifications des changements se situe entre 80% et 85%.

2.5- Qu'est-ce que l'imagerie radar peut apporter de nouveau ?

La figure 4 montre une image RADARSAT-1 en mode fin acquise au dessus d'un milieu urbain dense. On constate la difficulté d'interprétation que pose ce type de milieu. Cependant il est possible de dégager quelques caractéristiques qui serviront dans une perspective de mise à jour des cartes. On perçoit trois gammes de tonalités. Les surfaces foncées, tel qu'expliqué au chapitre 2, sont des surfaces plutôt lisses (réflexion spéculaire). Elles peuvent contenir du gazon ou des aires asphaltée (parking ou routes). Les surfaces de tonalité moyenne correspondent à des aires résidentielles de quartiers possédant des arbres matures. Quelques rangées de bâtiments ressortent bien (pixels brillants) et parfois même on observe un phénomène souvent mentionné dans la littérature, l'effet cardinal dont il sera question un peu plus bas. À l'intérieur des surfaces sombres de grande étendue on observe souvent des arêtes brillantes ainsi que des amas de pixels brillants. Il s'agit de grands bâtiments du type industriel ou commercial ou de leur murs faisant face au faisceau. C'est la manifestation d'un autre phénomène aussi souvent mentionné dans la littérature, l'effet diédrique ou triédrique.

La figure 5 illustre bien le phénomène de la réflexion diédrique. Les murs verticaux des deux tours montrées et les espaces dégagés devant eux constituent deux plans orthogonaux formant un dièdre. Ceci se traduit par des pixels très brillants approchant du point de saturation lorsque le bâtiment est de grande taille et que le dièdre est orienté dans le sens de l'azimut. L'effet triédrique, similaire au précédent, survient pour trois plans orthogonaux entre eux (ex. deux murs et le sol). Selon Henderson et Lewis (1998) l'orientation de la structure par rapport au faisceau joue un rôle moins important dans le cas des trièdres que pour les dièdres.

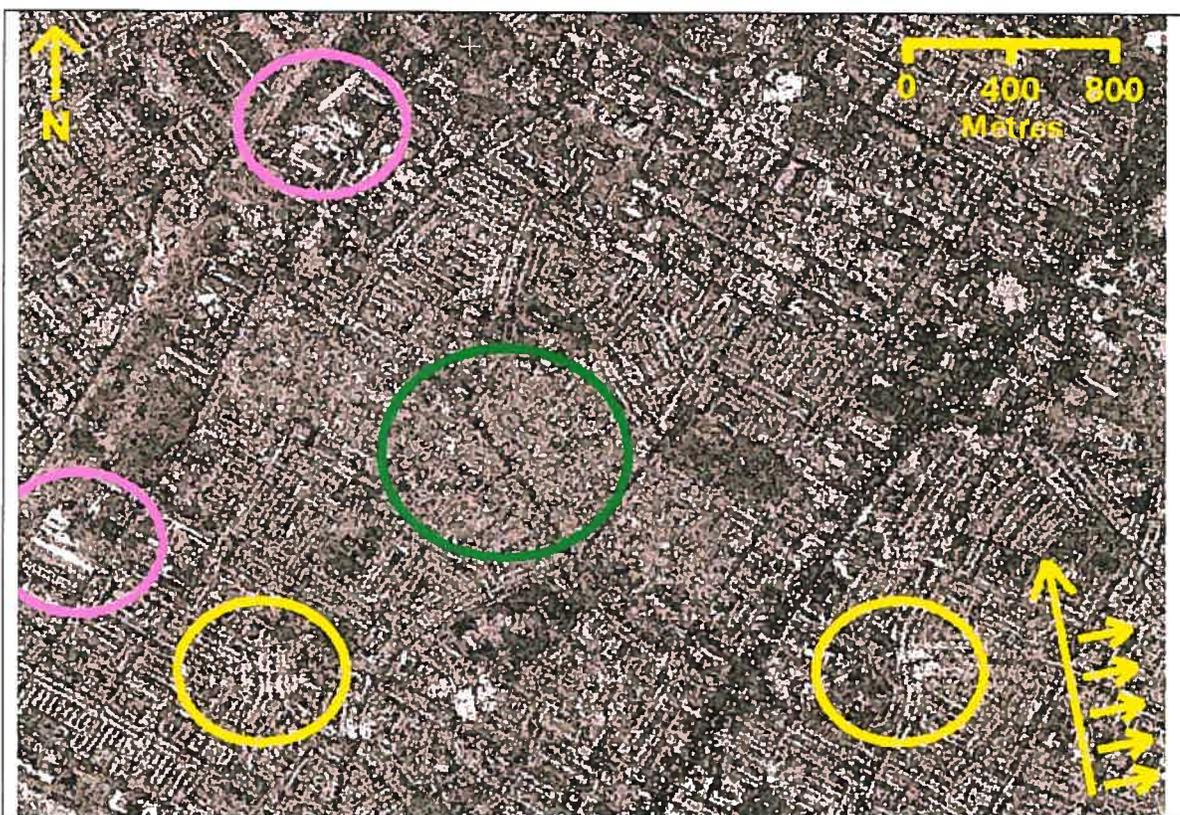


Figure 4- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 en milieu urbain dense. Quartier de Saint-Léonard montrant des bâtiments industriels (cercles roses), une aire résidentielle (cercle vert) et des manifestations de l'effet cardinal (cercles jaunes).

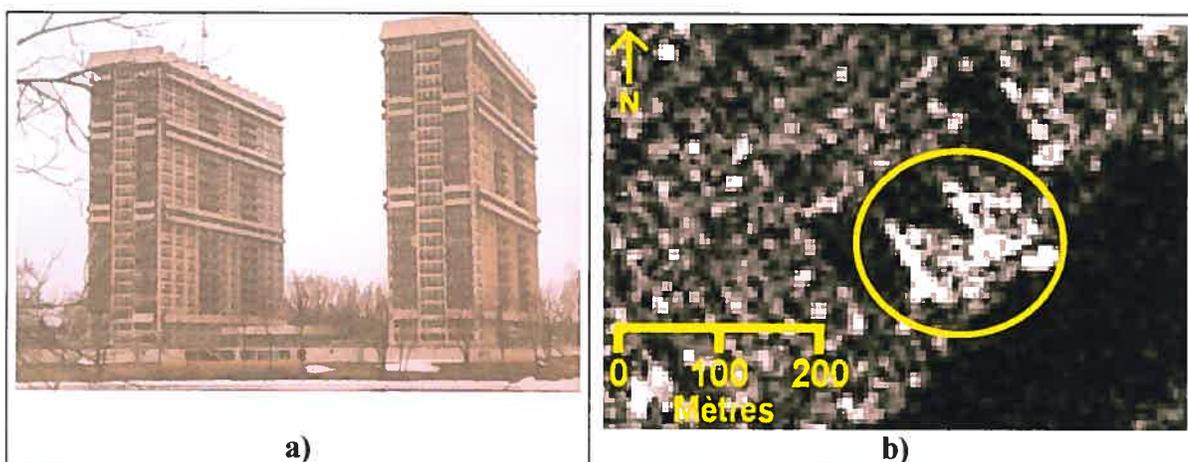
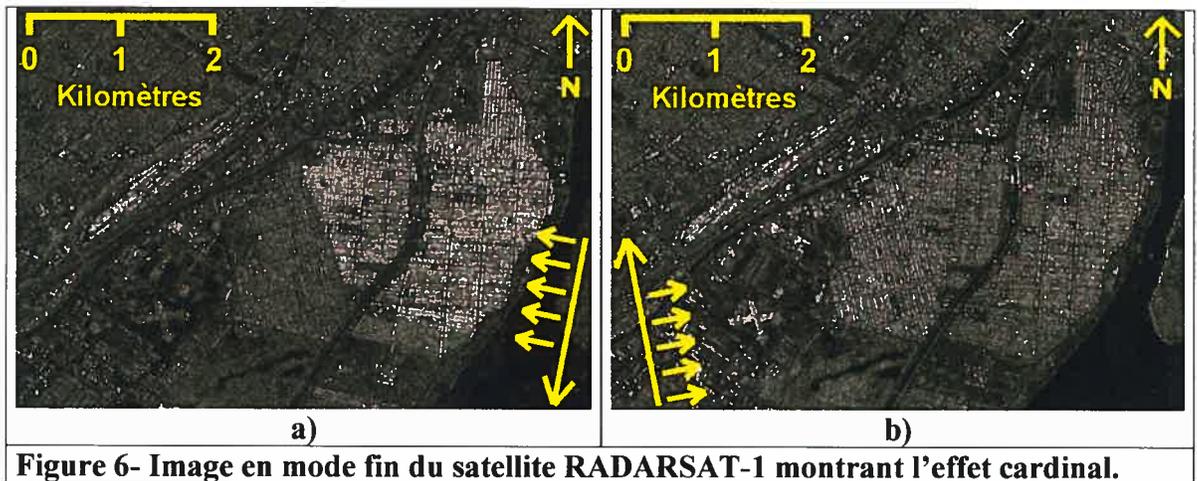
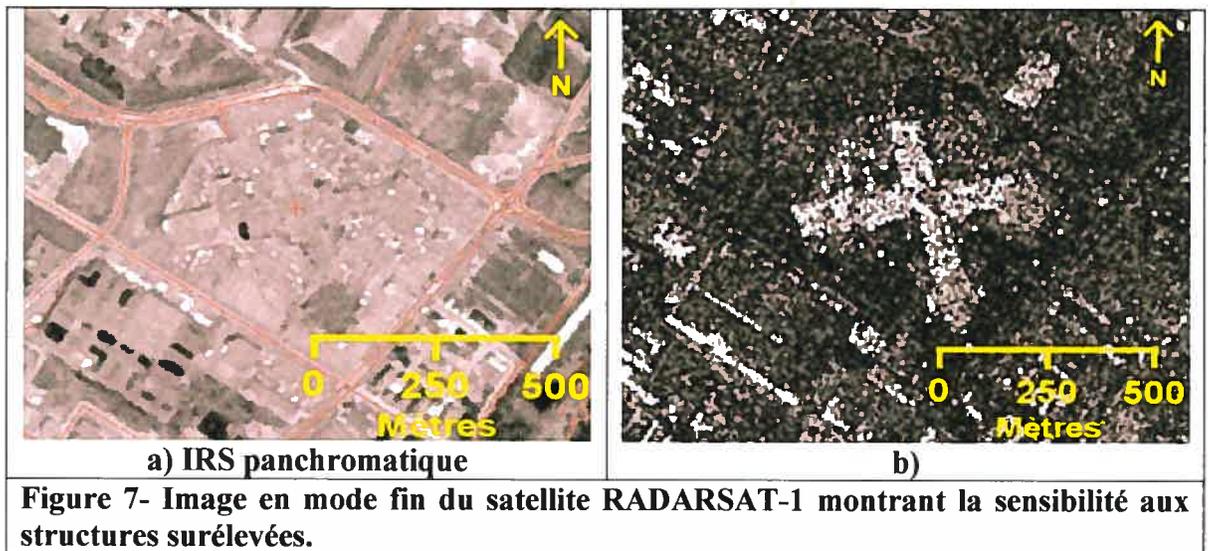


Figure 5- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 montrant l'effet diédrique. Les deux tours photographiées sont encerclées en jaune sur l'image radar.

L'effet cardinal est clairement montré à la figure 6. L'orientation de la trame urbaine et le type de construction créent les conditions favorisant la manifestation de ce phénomène de façon différente, selon l'orbite du satellite. L'effet cardinal est dû à l'alignement de plusieurs bâtiments (diffuseurs) en azimut (Henderson et Lewis 1998).



Le radar est donc particulièrement sensible aux structures surélevées comme les bâtiments, d'autant plus s'il y a absence d'arbres matures. La figure 7 compare une image radar avec une image IRS panchromatique toutes deux à des résolutions semblables. On constate que le centre commercial au centre des images est très difficile à détecter visuellement sur l'image optique alors qu'il ne pose aucune difficulté sur l'image radar.



On peut donc envisager une méthode automatique qui séparera les bâtiments du reste. Étant donné que la majorité des changements de l'occupation du sol est accompagnée de la construction de nouveaux bâtiments, ceci constitue l'axe principal de nos recherches. Comme il a été mentionné plus haut, une méthode de détection des bâtiments doit nécessairement tenir compte du voisinage de chaque pixel, car le phénomène de

chatoiement qui donne cet aspect granuleux à l'image complexifie l'analyse sur la base du pixel. Dans une perspective de mise à jour, l'exemple de la figure 8 illustre bien les possibilités de chercher les changements avec notre approche guidée par la carte, tout en tirant profit des capacités des images radars. Dans cet exemple, l'image est segmentée selon les îlots urbains, et seuls les pixels appartenant à la classe vacante font l'objet d'analyse. On aperçoit plusieurs amas de pixels brillants qui correspondent à de nouveaux bâtiments. Ceci est une indication claire de la présence d'un changement de l'occupation du sol.



Figure 8- Image en mode fin du satellite RADARSAT-1 segmentée en îlots urbains vacants selon la carte d'occupation du sol.

Karjalainen *et al.* (2003) signalent toutefois que la détection des bâtiments sur les images radar est beaucoup plus aisée lorsque ceux-ci ont des façades qui dépassent la dizaine de mètres de hauteur. Ils ont analysé visuellement des images RADARSAT-1 en mode fin avec plusieurs angles d'incidence. Ils constatent également que des bâtiments ressortent mieux du fond pour certains angles d'incidence. Les bâtiments d'une hauteur de moins de 5 mètres sont détectables pourvu que leur orientation favorise la manifestation du phénomène diédrique. Il faudra donc trouver des traits caractéristiques appropriés qui permettront aussi la détection des bâtiments de petite taille. La question du choix des traits caractéristiques pour la détection automatique du bâti est examinée à la section 2.6.

Cependant, au niveau de l'identification du nouveau taxon de l'occupation du sol, nous appréhendons des difficultés car les images RADARSAT-1, même visuellement, n'offrent pas autant de détails qu'une image optique. C'est par ailleurs ce que d'autres auteurs ont constaté par l'examen des images radars monofréquences/monopolarisées. À titre d'exemple, Dousset (1995) inspecte des images ERS (VV, bande C), SEASAT (HH, bande L) et SIR-C (multipolarisation, bandes L et C) en milieu urbain et note les fortes variations du signal par taxon que ce milieu très complexe occasionne. L'auteur ne distingue essentiellement que deux classes, soit l'asphalte (routes, piste d'aéroport) et les zones industrielles et commerciales. Pour sa part, Weydahl (1997, 2002) analyse plusieurs images RADARSAT-1 (F1, F2, F3, et F5, en orbite descendante) acquises sur une période de plusieurs semaines en milieu urbain. Il examine la variation d'intensité d'objets brillants en fonction de l'angle du faisceau sur les images étalonnées pour la radiométrie. La sélection des objets s'effectue en appliquant un seuil aux valeurs d'intensité et en ne retenant que des agglomérations de 4 à 6 pixels contiguës au minimum. Ils sont identifiés avec des données de validation (cartes, photos aériennes) et attribués à des classes résidentielles, industrielles, chemin de fer, zones d'entrepôts, travaux de construction, réservoirs et tuyaux, stationnements automobiles. L'effet cardinal est tellement prononcé que les trois premières classes sont scindées en deux selon que leurs composantes sont orientées ou non dans la direction de l'azimut. L'examen ne montre pas de variation systématique des valeurs de chaque classe en fonction de l'angle d'incidence. Toutefois, les classes qui comportent plus d'éléments anthropiques présentent de plus grands écarts de valeurs comparées à celles incluant des surfaces naturelles (gazon, forêt). L'auteur estime que l'utilisation de plusieurs images à angle d'incidence variable pourrait aider à discriminer tout au plus les zones résidentielles, les zones industrielles et celles contenant des diffuseurs isotropes comme les réservoirs et tuyaux de métal.

2.6- La texture comme trait caractéristique des images radar

Comme nous venons de voir, la gamme très dispersée des valeurs qu'entraînent les différents mécanismes de réflexion des ondes radar (diédrique, diffus, spéculaire) et les écarts abrupts observés d'un pixel à l'autre rendent l'analyse des images très difficile sur la base de la segmentation des distributions des niveaux de gris. Et l'effet de chatoiement

inhérent au radar complique davantage la tâche. La notion de contexte spatial devient donc importante afin de réduire la trop grande hétérogénéité des images. Lors de l'examen visuel des images radars nous tenons compte du contexte instinctivement : nous percevons en fait les diverses textures en plus de l'intensité des niveaux de gris. Par exemple sur la figure 4 (page 26) on distingue au centre les quartiers résidentiels possédant une forte densité de végétation par rapport aux autres quartiers, principalement par le changement de la texture de l'image. On voit aussi une densité plus lâche de bâtiments dans les secteurs industriel et commercial sur le pourtour de l'image.

Bon nombre de travaux portent spécifiquement sur l'examen de méthodes visant à quantifier ce phénomène de texture. Reed et Buf (1993) distinguent trois groupes de méthodes selon qu'elles sont basées sur : 1) l'extraction de mesures descriptives ou traits caractéristiques texturaux (ex. statistiques de premier et deuxième ordre), 2) des modèles qui expliquent l'agencement des pixels (ex. fractals, chaînes de Markov), et 3) des modèles structuraux employant des primitives qui peuvent être regroupées en objets de complexité croissante. Les auteurs constatent que la plupart des méthodes développées se retrouve dans le premier groupe. Des statistiques de premier ou de deuxième ordre sont calculées pixel par pixel en spécifiant avec une fenêtre le voisinage à inclure. Dans le cas des statistiques de premier ordre, le coefficient de variation est souvent employé comme mesure de texture. Pour les statistiques de deuxième ordre, le calcul passe d'abord par la formation de la matrice de cooccurrence des niveaux de gris (MCO). Tel que nous verrons plus en détails au chapitre 3, la MCO représente la probabilité conjointe d'occurrence de deux niveaux de gris à l'intérieur de la fenêtre de calcul. Des mesures telles que l'énergie, l'entropie et le contraste sont utilisées (Haralick *et al.* 1973). Les résultats du calcul sont présentés sous forme d'images de textures qui peuvent alors être segmentées en régions homogènes. La précision des classifications est conditionnée par la pertinence des statistiques employées et par la méthode de segmentation/classification utilisée. La plupart de ces méthodes ont été appliquées sur des images optiques, particulièrement dans un contexte de classification de l'occupation du sol. On compte plusieurs applications récentes dont, Karathanassi *et al.* (2000), Shaban et Dikshit (2001), Rao *et al.* (2002), Zhang *et al.* (2003), Maillard (2003).

Dans le cas de l'imagerie radar, des méthodes appartenant à l'une des trois catégories de Reed et Buf (1993) ont été expérimentées. Le tableau VI énumère quelques unes de ces

méthodes. Il est à noter que toutes les publications récentes consultées portent sur l'utilisation de ces mesures de texture pour la classification de l'occupation du sol. Le milieu urbain est vu comme une classe à distinguer des autres (Paudyal *et al.* 1995, Dekker 2001 et 2003). Parfois, on retrouve une classe « bâtiment » (Rajesh *et al.* 2001, Kurosu *et al.* 2001). Rares sont ceux qui tentent de différencier le milieu urbain selon la densité du bâti (Dell'Acqua et Gamba 2003a et b).

Statistiques de 1 ^{er} ordre	Obtenues de la distribution de valeurs d'un ensemble de pixels (région ou fenêtre). Des mesures comme la variance ou le coefficient de variation sont liées à la texture.
Matrice de cooccurrence des niveaux de gris (MCO) : statistiques de 2 ^{ème} ordre	Dérivées de la distribution de valeurs d'un ensemble de pixels (région ou fenêtre) examinées par paires. Une distance et une orientation entre les pixels doivent être fixées pour l'échantillonnage des paires. Des mesures comme la moyenne, la variance ou le contraste décrivent la texture.
Spectre de texture	Emploie une unité de texture calculée pour chaque pixel et ses huit voisins. Cette valeur est établie selon que le pixel central possède une valeur inférieure, égale ou supérieure à chaque voisin.
Spectre de puissance	S'appuie sur les fréquences spatiales calculées avec la transformée de Fourier.
Ondelettes	La transformée en ondelettes est une décomposition multi-résolution. Des mesures d'énergie et d'entropie des composantes obtenues sont indicatives de la texture.
Semi-variogramme	Mesure appliquée à un ensemble de pixels qui montre la variance des paires en fonction de la distance de séparation des échantillons.
Dimension fractale et lacunarité	Mesures basées sur le degré de similarité ou de différence des objets à des échelles variables.
Chaînes de séquences	Encodage des séquences de valeurs identiques d'un ensemble de pixels. Un grand nombre de chaînes courtes est caractéristique de textures fines alors qu'un petit nombre de chaînes longues représentent des textures grossières.
Tableau VI- Résumé de quelques méthodes de calculs de texture.	

Dans le cas où on veut distinguer le milieu urbain du reste (eau, buissons, arbrisseaux, rizières et champs en culture), la séparabilité n'est pas évidente. À titre d'exemple, Dekker (2001 et 2003) emploie plusieurs méthodes de calcul de texture (statistiques de 1^{er} ordre, ondelettes, dimension fractale, lacunarité, semi-variogramme) pour classifier une image ERS. Il constate que la plus grande difficulté se situe entre les classes « urbain » et « forêt ». Aucune des mesures utilisées ne donne une exactitude de classification (logiciel

eCognition) satisfaisante. Pour leur part, Paudyal *et al.* (1995) utilisent les statistiques de premier et deuxième ordre (MCO) sur une image ERS. Ils étudient la séparabilité de l'urbain et des autres classes et constatent que celle-ci est meilleure lorsque l'on emploie les statistiques de deuxième ordre.

Les résultats de classification sont meilleurs lorsque la classe bâtie est utilisée. Ainsi, Rajesh *et al.* (2001) obtiennent des exactitudes de classification avec une image ERS entre 60% et 70% dépendamment de la méthode employée pour le calcul des textures. Les trois meilleurs résultats proviennent de la dimension fractale (72%), du spectre de texture (64%) et de la matrice de co-occurrence (60%). Pour leur part, Kurosu *et al.* (2001) utilisent trois images JERS (bande L) acquises de juillet à octobre pour calculer des mesures de texture de la MCO (énergie, contraste, entropie, moment inverse) afin d'effectuer une classification par maximum de vraisemblance. Les résultats atteignent 80% d'exactitude. Cette exactitude est améliorée davantage avec un filtre post-classification.

Finalement, lorsque l'on tente de différencier des zones de bâti à l'intérieur d'un milieu urbain (centre-ville, résidentiel et banlieue) on constate qu'il est possible d'atteindre une exactitude de 60% même avec des images à résolution faible comme celles du satellite ERS. Dell'Acqua et Gamba (2003a) examinent en effet les mesures de la MCO (contraste, corrélation, dissimilitude, entropie, moyenne, homogénéité, 2^{ème} moment et variance) avec six images ERS en employant plusieurs tailles de fenêtres carrées (3, 21, 41 et 77 pixels). Les mêmes auteurs (2003b) constatent que les résultats ne s'améliorent pas tellement, même avec des images à résolution plus fine (mode fin du satellite RADARSAT-1). De plus, ils signalent que l'exactitude de la classification dépend de l'angle d'incidence utilisé. Ils suggèrent l'emploi des angles d'incidence à pic.

Tous ces résultats tendent à confirmer nos conclusions de la section précédente, à savoir : 1) la texture est un trait caractéristique important pour l'analyse des images radars à une composante, 2) la séparation entre bâti et autres est plus facile que l'atteinte d'un niveau thématique plus élevé, et 3) la détection des changements via l'apparition de nouveaux bâtiments en terrains vacants semble réalisable, par contre, l'identification des nouveaux taxons de l'occupation du sol semble être une tâche beaucoup plus complexe, même en employant les mesures de texture.

2.7- Constat général et approche privilégiée

La revue de littérature nous a montré que les méthodes classiques de détection des changements développées avec des images optiques ne fonctionnent pas bien avec les images radar. Une grande partie du problème provient de la très forte variation des valeurs d'un pixel à l'autre due à la combinaison des propriétés diélectriques des surfaces et la géométrie des objets, ainsi que leur disposition au sol face au faisceau radar. Le phénomène de chatoiement inhérent au radar complique davantage la tâche. On peut atténuer ces problèmes avec la prise en compte du contexte spatial. De plus, les différents taxons de l'occupation du sol qui incluent des bâtiments semblent avoir des traits texturaux qui les différencie des autres taxons.

L'approche préconisée dans cette recherche est celle de la détection/identification des changements guidée par la carte. L'accent est mis sur la détection/identification des changements en terrain vacant. Les traits caractéristiques que nous privilégions pour effectuer cette tâche sont les mesures de texture. Plus souvent qu'autrement, ces mesures de texture sont les statistiques de deuxième ordre (matrice de cooccurrence des niveaux de gris). Ce sont donc ces statistiques qui seront examinées dans cette recherche.

CHAPITRE 3- Approche méthodologique

3.1- Introduction

Dans ce chapitre nous examinons les images du satellite RADARSAT-1 en relation avec la carte d'occupation du sol afin de concevoir un système permettant l'automatisation des procédures de mise à jour cartographique qui fait usage de mesures de texture.

3.2- Le territoire à l'étude

Le territoire étudié, tel que mentionné en introduction, est celui de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM). Il inclut l'île de Montréal, l'île de Laval et les villes en périphérie des rives nord et sud (Figure 9). Dans l'ensemble, il présente peu de relief quoiqu'il y ait deux exceptions notables : le mont Royal sur l'île de Montréal et Deux-Montagnes sur la rive nord. La région métropolitaine de Montréal est caractérisée par des occupations du sol diversifiées et l'on retrouve des espaces urbains très denses, des zones de frange péri-urbaine, des boisés, des champs agricoles, des zones humides, des sols à nu, etc. Ce territoire connaît depuis plusieurs années des changements importants, surtout en construction domiciliaire, tel que nous l'avons vu au tableau II (page 4). La région métropolitaine constitue donc un cadre idéal pour concevoir et tester notre système de mise à jour.

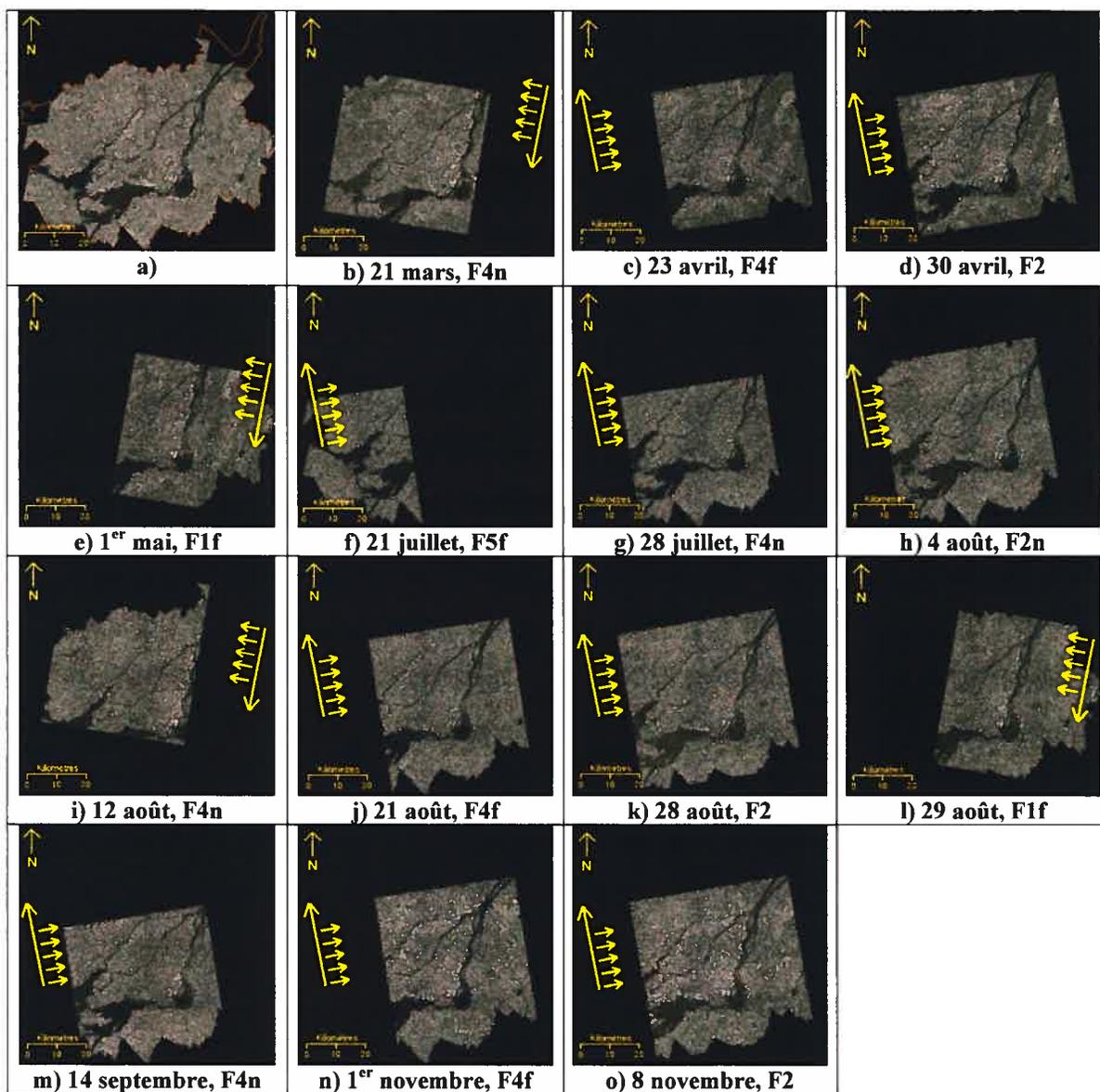


Figure 10- Images du satellite RADARSAT-1 en mode fin disponibles pour l'année 1999 sur le territoire de la CMM.

a) Mosaïque de référence délimitant la zone, et b) à o) Les 14 images de 1999 disponibles.

Faisceau RADARSAT					
	F1 (36,4° à 40,3°)	F2 (38,8° à 42,5°)	F3 (41,1° à 44,3°)	F4 (43,1° à 46,1°)	F5 (45,0° à 47,8°)
Hiver				21 Mars F4n_d	
Printemps	1 Mai F1f_d	30 Avril F2_a		23 Avril F4f_a	
Été	29 Août F1f_d	4 Août F2n_a		28 Juillet F4n_a	21 Juillet F5f_a
		28 Août F2_a		12 Août F4n_d	
				21 Août F4f_a	
				14 Sept. F4n_a	
Automne		8 Nov. F2_a		1 Nov. F4f_a	

Tableau VII- Images du satellite RADARSAT-1 en mode fin disponibles pour l'année 1999 sur le territoire de la CMM.

La nomenclature employée est la suivante : le faisceau en mode fin est identifié avec un « F » majuscule, la sous catégorie « *near* » ou « *far* » est notée avec un f ou un n minuscule et l'orbite ascendante ou descendante avec « *_a* » ou « *_d* ». Les images acquises en orbite descendante apparaissent en caractères gras pour faciliter leur repérage.

Tous les pré-traitements typiques pour les images du satellite RADARSAT-1 ont été effectués dans l'environnement PCI. Le module SARSIGMA a servi pour effectuer une correction radiométrique en tenant compte du patron de l'antenne radar et de la variation de l'angle d'incidence en portée afin de produire des images d'amplitude. En l'absence de toute information sur les paramètres d'étalonnage spécifiques de chaque image ainsi que d'un modèle exhaustif tenant compte avec précision du relief local, ceci constitue la plus proche approximation d'un jeu de données étalonné dans un référentiel commun que nous puissions obtenir.

Les images (en unité d'amplitude) ont été orthorectifiées avec le module Ortho-Engine de PCI à l'aide d'une soixantaine de points d'appui choisis à des intersections du réseau routier des cartes topographiques et d'un MNA couvrant le territoire de la CMM. Le MNA a été créé en employant les courbes de niveau de la carte topographique au 1 : 20 000 (équidistance 10 mètres). Elles ont été ré-échantillonnées par convolution cubique à une résolution spatiale de 5 mètres et ré-échelonnées sur 256 niveaux de gris (8 bits : 0 à 255). Ce ré-échelonnement était requis afin de calculer les textures avec la MCO. Nous avons ré-échelonné linéairement les valeurs en prenant un seuil commun à toutes les images. Une vue d'ensemble des images corrigées géométriquement et radiométriquement est montrée à la figure 10.

3.3.2- Les cartes d'occupation du sol

Nous disposons de deux cartes d'occupation du sol pour la région de Montréal. La première carte à l'échelle de 1 : 50 000 couvre l'île de Montréal et correspond au territoire de l'ancienne Communauté Urbaine de Montréal (carte CUM) (Figure 11a). Les taxons appartiennent à la fois aux niveaux II et III selon la classification USGS. Le tableau VIII dresse la liste des 19 taxons employés. Les premières versions de cette carte ont commencé à être disponibles au début des années quatre-vingt et des mises à jour ont été effectuées à plusieurs reprises. La carte CUM dont nous disposons a été compilée en 1994. La seconde carte produite par le Ministère des Affaires Municipales et de la Métropole (carte MAMM) couvre l'ensemble de la CMM (Figure 11b). Cette carte montre les occupations du sol uniquement dans le territoire urbanisé de la CMM. Elle a été obtenue en intégrant plusieurs documents (carte CUM, plans d'aménagement des municipalités) et les taxons sont de niveau II du USGS (Tableau VIII). Les plans d'aménagement ont permis de distinguer cinq classes de vacants (affectation) plutôt qu'une seule pour la CUM. Il est à noter que les documents utilisés ont été compilés entre 1988 et 1997.

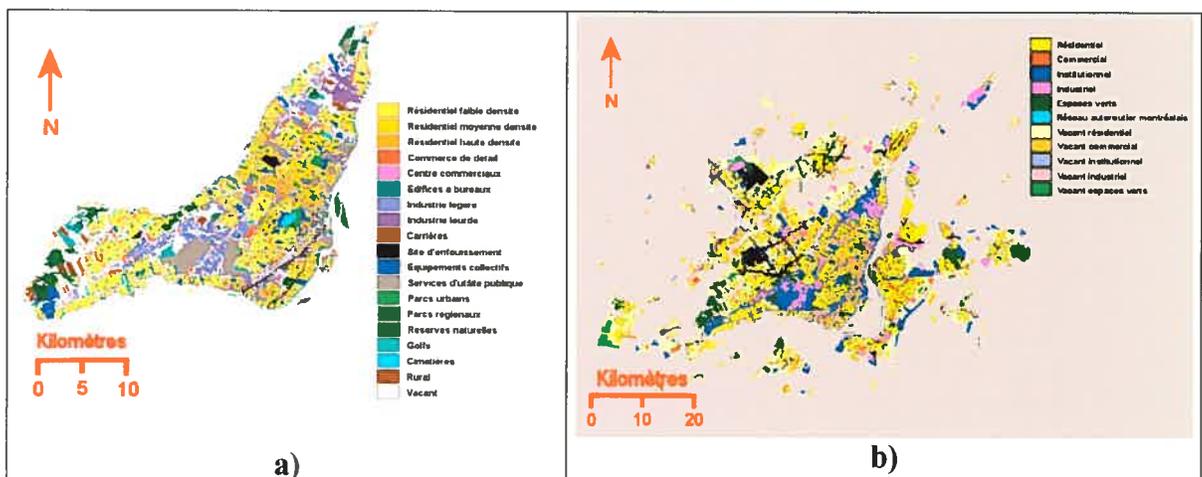


Figure 11- Cartes d'occupation du sol disponibles.

a) Communauté urbaine de Montréal (carte CUM, 1994), et b) Ministère des Affaires Municipales et de la Métropole (carte MAMM, 1988-1997).

Carte CUM	Carte MAMM
1- Résidentiel faible densité	1- Résidentiel
2- Résidentiel moyenne densité	2- Commercial
3- Résidentiel forte densité	3- Institutionnel
4- Commerce de détail	4- Industriel
5- Centre commercial	5- Espace vert
6- Industrie légère	6- Ram (route)
7- Industrie lourde	7- Vacant résidentiel
8- Carrière	8- Vacant commercial
9- Site d'enfouissement	9- Vacant institutionnel
10- Cimetière	10- Vacant industriel
11- Édifice à bureaux	11- Vacant espace vert
12- Équipement collectif	
13- Golf	
14- Parc régional	
15- Parc urbain	
16- Réserve naturelle	
17- Service d'utilité publique	
18- Rural	
19- Vacant	

Tableau VIII- Taxons des cartes d'occupation du sol employées.

3.3.3- Les autres données

Nous avons aussi employé des cartes topographiques au 1 : 20 000 couvrant l'ensemble du territoire de la CMM. Tel que mentionné précédemment, ces cartes ont servi aux corrections géométriques des images radar. De plus, la couche du réseau routier a servi à former nos unités d'analyse comme il sera question plus loin (voir section 3.4).

Pour l'année 1999 (année d'acquisition des images RADARSAT) nous disposons d'une mosaïque d'orthophotographies noir et blanc, provenant à l'origine du ministère québécois des ressources naturelles et de la faune et des parcs, et obtenue à partir de photographies aériennes à l'échelle 1 : 40 000 acquises au mois d'avril. Le fichier disponible en format numérique a été produit avec une résolution spatiale de 1 mètre. Cette mosaïque est le document de base pour la validation des résultats puisqu'elle permet d'identifier aisément la majorité des objets. Toutefois, quelques éléments sont parfois difficiles à distinguer et

des visites sur le terrain ont dû être effectuées à quelques reprises pour confirmer les cas douteux.

Étant donné l'influence sur les images radar des conditions d'humidité du sol, il est indispensable de connaître les quantités de précipitation au moment de l'acquisition des données. Nous avons donc eu recours aux données météorologiques d'Environnement Canada pour l'aéroport Pierre Elliott. Trudeau à Dorval (Env. Can. 2005). La figure 12 résume les données de précipitations quotidiennes en millimètres pour la période couvrant toutes les acquisitions d'image de 1999. Sur l'axe horizontal du graphique, les traits rouges indiquent les dates correspondant aux 14 images disponibles. Toutes les acquisitions ont eu lieu lors de journées sans pluie sauf celles du 4 août et du 14 septembre. Dans les deux cas, le satellite passait en orbite ascendante et les images ont été acquises vers 19h à l'heure avancée de l'est. Les données météorologiques horaires indiquent que pour ces deux dates il pleuvait lors de l'observation de 19h (averses de pluie le 4 août, averses de pluie et brouillard le 14 septembre). Ces données horaires ne mentionnent pas les quantités de précipitations pour chaque heure, mais les résumés quotidiens donnent 5,5 mm et 9 mm respectivement pour les deux dates.

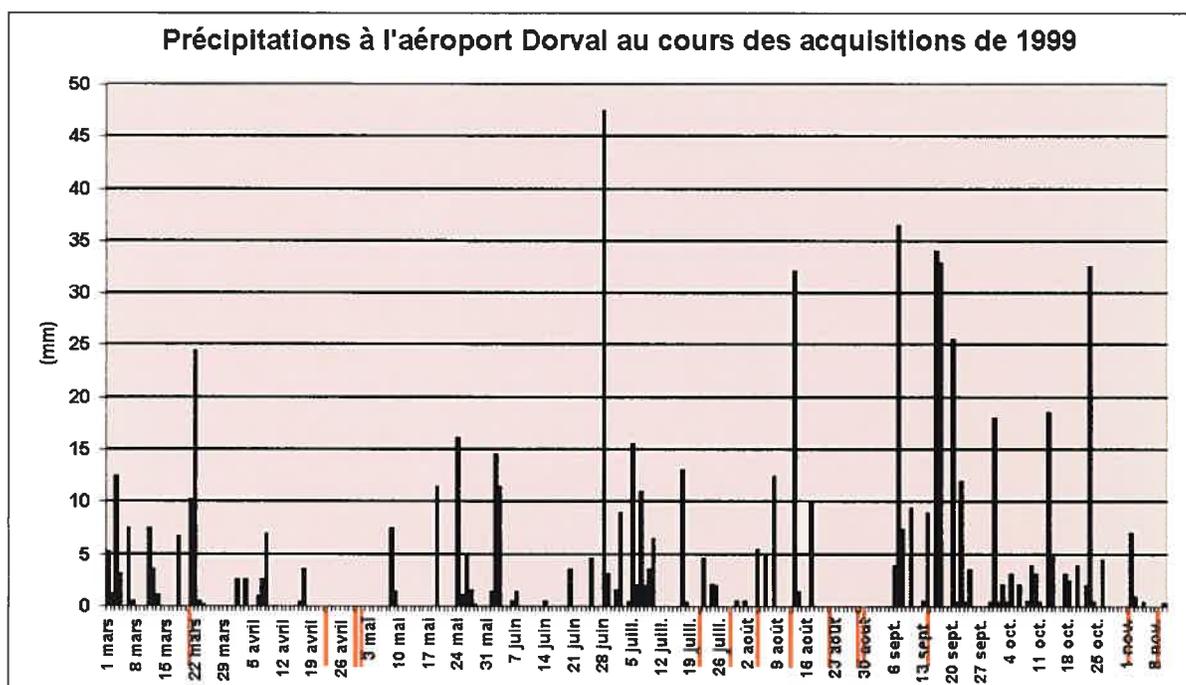


Figure 12- Données de précipitations quotidiennes en millimètres lors de la période d'acquisition.

Les traits rouges indiquent les journées d'acquisition. Source Env. Can. (2005).

3.4- Formation des unités d'analyse

Tel que mentionné au chapitre 2, notre unité d'analyse est définie par les polygones de la classe vacante de la carte CMM (sans égard à son affectation) et remodelé par le réseau routier (filot). Ce dernier provient de la carte topographique au 1 : 20 000. Afin de mettre en application notre méthode de détection des changements, chaque unité d'analyse doit être sous forme matricielle et les pixels constituant doivent posséder un numéro unique. Afin d'y parvenir, il a fallu concevoir un programme (POLYGO) qui emploie le réseau routier ainsi que les contours des polygones vacants rastérisés. Il fonctionne selon les principes d'accroissement de région. À partir d'un pixel de départ, on recherche autour (haut, bas, gauche, droite) les pixels du polygone vacant jusqu'à ce qu'une frontière soit rencontrée et freine l'expansion. Cette frontière est soit un segment de route ou le contour du polygone. Tant que ce n'est pas le cas, chaque nouveau point qui est inclus constitue le point de départ d'une nouvelle recherche jusqu'à ce que tous les pixels à l'intérieur des frontières soient détectés. Les nouveaux polygones matriciels obtenus sont constitués de pixels contigus possédant tous un numéro unique qui sert d'identifiant. Il devient ainsi facile de localiser les pixels des images radar qui appartiennent à une unité spécifique d'analyse. Le programme POLYGO a été conçu dans l'environnement de développement PCI fin d'effectuer cette tâche directement dans les bases de données image.

3.5- Les traits caractéristiques

Que ce soit pour la détection ou l'identification des changements, il faut des traits caractéristiques qui décrivent le comportement de l'ensemble des pixels appartenant à un polygone vacant. Pour la détection des changements, les traits caractéristiques doivent indiquer que des bâtiments sont présents. Puisque les nouvelles constructions ne couvrent pas nécessairement tout le polygone vacant, nous avons aussi besoin de traits caractéristiques afin de localiser correctement les nouveaux bâtiments pour procéder à la segmentation du polygone le cas échéant. Quant à l'identification des changements, les traits caractéristiques doivent pouvoir nous aider à définir la classe d'appartenance de

chaque nouvelle détection. Également, pour que les traits caractéristiques soient utiles, ils leur faut varier le moins possible selon les conditions d'acquisition. Nous avons vu au chapitre 2 que les valeurs de coefficient de rétrodiffusion du radar sont trop variables pour employer les statistiques de 1^{er} ordre. Celles du 2^{ième} ordre constituent le trait caractéristique privilégié dans le cadre de nos travaux. La technique la plus employée pour quantifier les textures est la MCO (Haralick *et al.* 1973). L'application de cette méthode implique un temps de calcul excessivement long, particulièrement avec le nombre d'images que nous avons à traiter. C'est pourquoi nous avons préféré employer la méthode de Unser (1986) qui réduit considérablement le temps de calcul tout en permettant d'obtenir plusieurs mesures extraites des MCO standards. Ces deux méthodes sont expliquées dans les sections qui suivent.

3.5.1- La matrice de cooccurrence des niveaux de gris

La MCO proposée par Haralick *et al.* (1973) se présente sous la forme d'un histogramme de fréquence analogue à celui habituellement employé pour le calcul des statistiques de premier ordre. Il comporte toutefois une différence majeure par rapport à celui-ci. Les statistiques de premier ordre appliquées aux images examinent les fréquences d'occurrence d'un ensemble de pixels et traitent la probabilité d'observer une valeur donnée ou, d'une manière plus formelle, un événement a . Les statistiques de deuxième ordre traitent plutôt les probabilités conjointes d'observer deux événements simultanément, dénotés a et b , qui correspondent à des paires de niveau de gris. La figure 13 illustre les histogrammes pour calculer les statistiques de 1^{er} et 2^{ième} ordre d'une fenêtre de 11 par 11 pixels. Essentiellement, un échantillon de pixels dans une zone très hétérogène (très texturé) possède une MCO peuplée de telle sorte que l'on observera une grande dispersion des fréquences. À l'inverse, un échantillon dans une zone homogène (peu texturé) montre des fréquences qui tendent à se concentrer le long de la diagonale (beaucoup de paires a et b identiques) ou à la limite en un point sur cette diagonale (toutes les valeurs a et b égales). Les travaux de Haralick *et al.* (1973) font état de plusieurs mesures statistiques qui reflètent cette distribution des paires de pixels. Les équations pour le calcul de trois de ces mesures sont montrées au tableau IX. Le contraste exprime la tendance à l'éloignement des fréquences observées à la diagonale principale de la MCO. L'énergie, pour sa part, montre

la tendance à la concentration des fréquences observées, peu importe les valeurs de niveaux de gris des paires de pixels. Finalement, l'entropie est en quelque sorte l'inverse de l'énergie. Plus les fréquences observées sont éparpillées, plus l'entropie est forte.

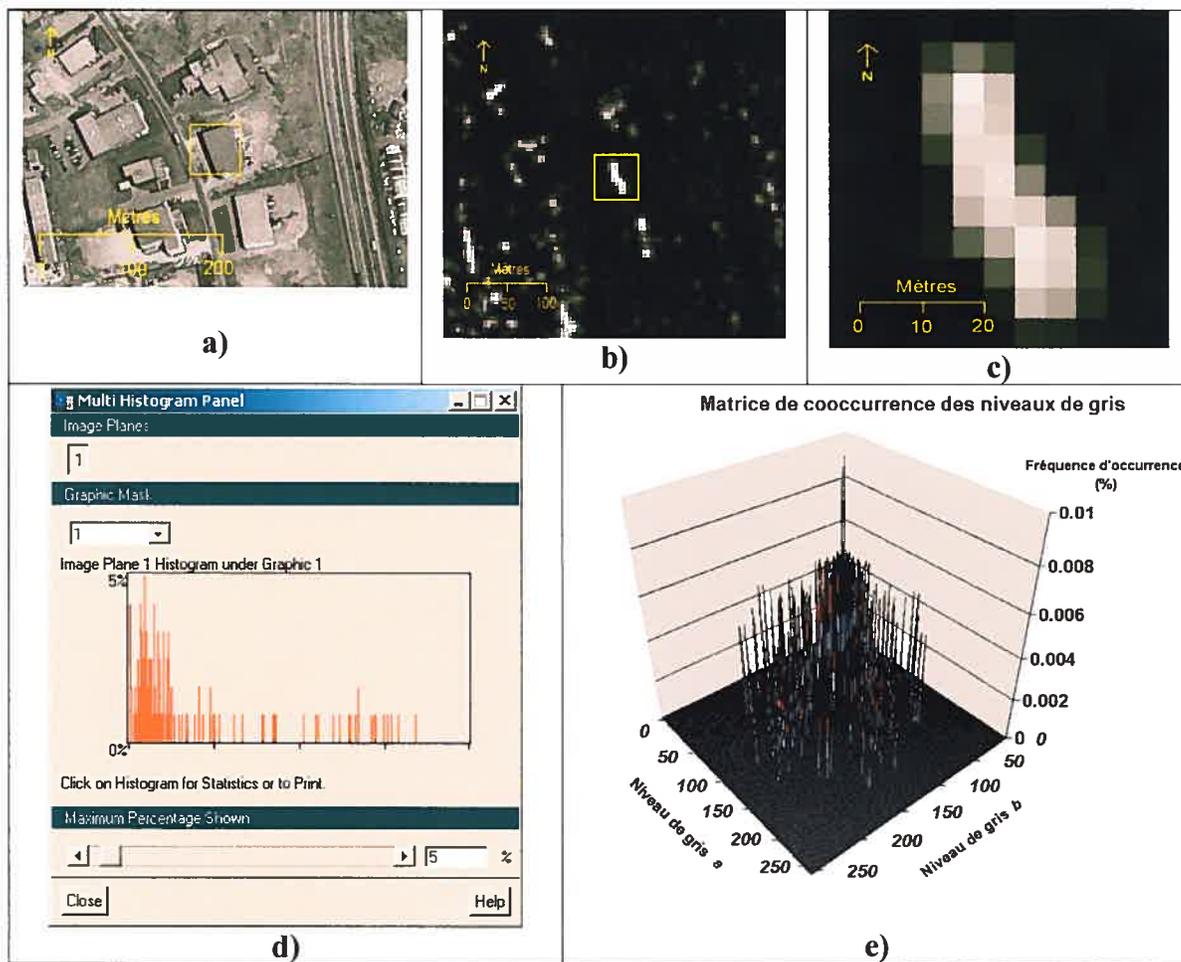


Figure 13- Les histogrammes de 1er et 2ième ordre.

Exemple pour un bâtiment en zone industrielle : a) Orthophotographie noir et blanc de référence, b) Image RADARSAT à 256 niveaux de gris, c) Fenêtre de 11 par 11 pixels examinée, d) Histogramme de fréquence d'occurrence des niveaux de gris pour le calcul des statistiques de 1^{er} ordre, et e) Matrice de cooccurrence des niveaux de gris des paires de pixels dans la direction horizontale avec un pas d'échantillonnage de un pixel.

$\text{Contraste} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j) * (i-j)^2$	$\text{Énergie} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j)^2$
$\text{Entropie} = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j) * \log(p(i,j))$	
<p>Tableau IX- Équations de trois mesures de texture calculées avec la matrice de cooccurrence des niveaux de gris. Source Haralick <i>et al.</i> (1986). N est le nombre de niveau de gris des images examinées, i et j sont les valeurs des niveaux de gris des pixels de chaque paire et $p(i,j)$ est la fréquence d'occurrence d'une paire de niveaux de gris i et j donnés.</p>	

Nous pouvons créer des images de ces mesures de texture en utilisant des fenêtres mobiles appliquées aux images analysées. Toutes les paires de pixels à l'intérieur de la fenêtre sont examinées afin de former la MCO. La mesure calculée est assignée au pixel central de la fenêtre. Les paires de pixels sont choisies avec une distance (pas d'échantillonnage) et dans une direction donnée. Le pas d'échantillonnage peut traduire une échelle de texture particulière alors que la direction est susceptible de faire ressortir l'orientation de la texture. La taille de la fenêtre est aussi un élément important, surtout lorsque l'image est composée de textures avec un grain de taille variable. Il est donc souhaitable d'effectuer plusieurs tests afin d'examiner les effets de la variation de ces mesures. Toutefois, cela présente certaines contraintes de temps de calcul puisque pour des images à 8 bits (256 niveaux de gris) la MCO est un tableau de 65 536 éléments et le calcul de chaque mesure nécessite le décompte de toutes ces cellules pour chaque pixel de l'image examinée. Ceci ne présente qu'un inconvénient lors d'une exécution unique mais devient rapidement une contrainte majeure dans le cadre d'une série de tests employant des fenêtres et des pas d'échantillonnage variables. C'est pourquoi la méthode rapide de calcul des mesures de texture telle que décrite à la section suivante est apparue plus appropriée pour nos besoins.

3.5.2- L'algorithme de calcul rapide de Unser

Les travaux de Unser (1986) ont montré qu'on pouvait obtenir une très bonne approximation de certaines mesures de la MCO en employant uniquement deux vecteurs linéaires. L'occurrence des événements a et b se traduit alors par l'occurrence des sommes

et des différences de a et b . Puisqu'un pixel encodé sur 8 bits prend une valeur entre 0 et 255, la somme d'une paire est incluse entre 0 et 510, ce qui correspond à un vecteur de 511 éléments. De la même manière, les différences vont de -255 à 255 ce qui correspond aussi à 511 éléments. D'un point de vue pratique, cela implique un temps d'exécution 64 fois plus rapide. La figure 14 illustre les deux vecteurs linéaires avec l'exemple du bâtiment industriel de la figure 13 (page 43) en employant les mêmes paramètres de calcul que la MCO. Ces deux distributions linéaires sont employées pour le calcul des sept mesures de texture qui font l'objet de notre étude (Tableau X). Pour appliquer la méthode, nous avons écrit un programme en langage C (TEXEL) dans l'environnement de traitement d'image PCI Geomatics. Nous bénéficions aussi de l'environnement EASI-PACE pour l'automatisation des différentes procédures (exécution en « batch »). La programmation initiale de l'algorithme de Unser s'est inspirée du code donné par Parker (1996). Les mesures calculées sont stockées sur des images de quatre octets par pixel permettant de représenter les valeurs en nombres réels.

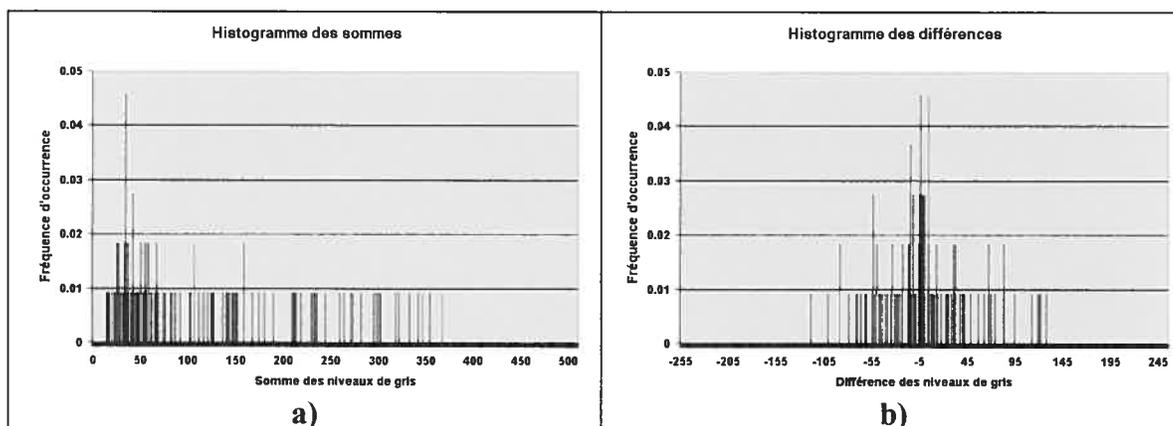


Figure 14- Les histogrammes des sommes et des différences de la méthode rapide de calcul des textures.

Exemple du bâtiment en zone industrielle de la figure 13. a) Histogramme des sommes des niveaux de gris des mêmes paires, et b) Histogramme des différences des niveaux de gris des paires.

Comme dans le cas des statistiques de premier ordre, la moyenne et l'écart type sont des mesures de tendance centrale. La probabilité maximale correspond tout simplement à la fréquence de la paire qui revient le plus souvent, en fait l'analogue du mode mais sans expliciter de valeur de niveau de gris. L'entropie traduit l'état de désordre des distributions avec une valeur maximale lorsque toutes les paires observées sont différentes alors que l'énergie donne plutôt une mesure de la tendance inverse avec des valeurs faibles pour des

distributions très dispersées. Les mesures de contraste et d'homogénéité sont similaires aux deux précédentes, mais elles font aussi intervenir les valeurs des niveaux de gris en plus des fréquences d'occurrence.

$Moyenne = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2N-1} i \cdot f_s(i)$	$Contraste = \sum_{j=1}^{2N-1} (j^2 \cdot f_d(j))$
$Homogénéité = \sum_{j=1}^{2N-1} \left(\frac{1}{1+j^2} \cdot f_d(j) \right)$	$PMax = \text{Max}\{f_s(i)\}$
$Énergie = \sum_{i=1}^{2N-1} (f_s(i) \cdot f_s(i)) \cdot \sum_{j=1}^{2N-1} (f_d(j) \cdot f_d(j))$	
$Entropie = - \sum_{i=1}^{2N-1} (\log(f_s(i))) \cdot f_s(i) - \sum_{j=1}^{2N-1} (\log(f_d(j))) \cdot f_d(j)$	
$Écart-type = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{2N-1} ((i-2\mu)^2 \cdot f_s(i)) + \sum_{j=1}^{2N-1} (j^2 \cdot f_d(j)) \right)}$	

Tableau X- Équations des sept mesures de texture calculées avec la méthode rapide.

Source Unser (1986). N est le nombre de niveau de gris des images examinées, f_s et f_d sont les vecteurs des fréquences d'occurrence des sommes et des différences des niveaux de gris, i et j sont les indices de ces vecteurs. Une image de 256 niveaux de gris emploie des vecteurs 511 éléments, soit pour les valeurs de différence allant de -255 à 255 pour f_s et les valeurs de somme de 0 à 510 pour f_d .

3.5.3- Application de la texture pour la détection des changements

Le changement que nous visons à détecter est l'apparition des nouveaux bâtiments en terrain vacant. Conséquemment, une mesure de texture doit différencier les endroits construits et les zones libres pour qu'elle soit considérée comme un trait caractéristique utile. Des tests préliminaires ont montré qu'une simple segmentation par seuillage des valeurs de certaines mesures de texture permet de localiser rapidement les structures surélevées. Le résultat se présente sous la forme d'un masque binaire superposable aux données d'origine. Les figures 15 et 16 montrent le résultat d'un tel traitement.

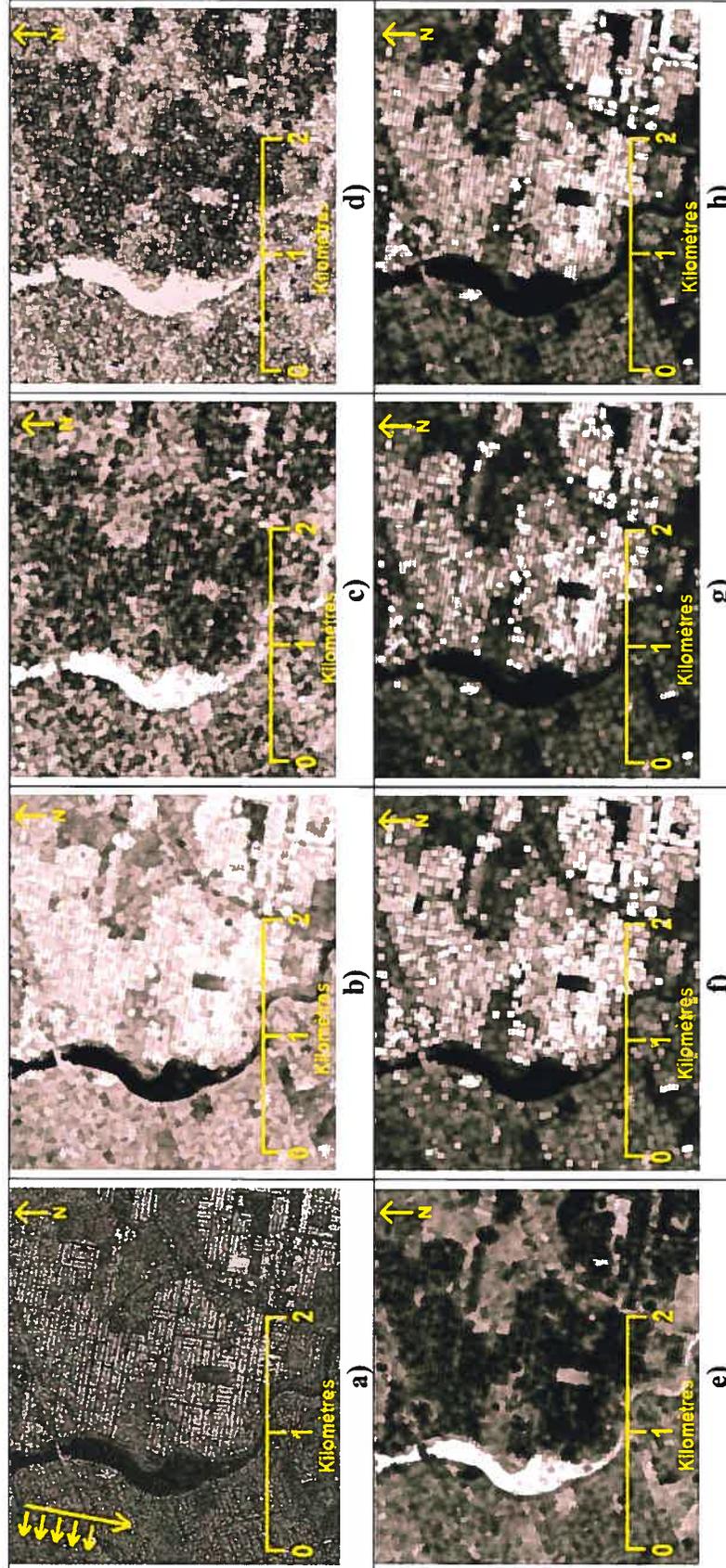


Figure 15- Exemple d'application de TEXEL sur une portion d'image RADARSAT-1.

Châteauguay, acquisition le 29 août 1999 en mode F1f en orbite descendante. Des fenêtres de 11 par 11 pixels et un pas d'échantillonnage d'un pixel dans la direction horizontale ($dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) sont employés pour l'extraction des paires de niveaux de gris : a) Image RADARSAT-1 (les zones les plus brillantes contiennent des bâtiments), b) Entropie, c) Homogénéité, d) Probabilité maximale, e) Énergie, f) Écart type, g) Contraste, et h) Moyenne.

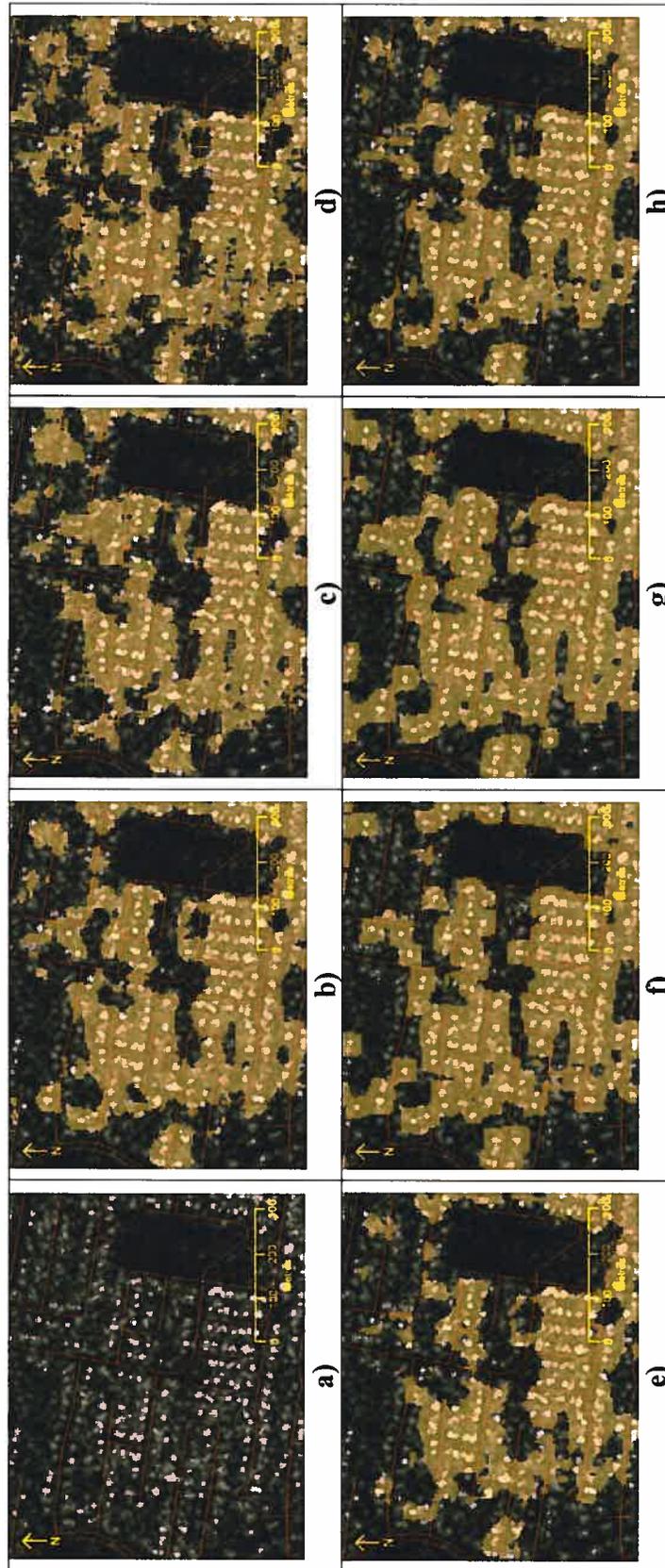


Figure 16- Exemple du seuillage des mesures de texture.

a) Image RADARSAT-1, b) à h) Résultats du seuillage superposés à l'image d'origine, b) Entropie, c) Homogénéité, d) Probabilité maximale, e) Énergie, f) Écart-type, g) Contraste, et h) Moyenne.

Dans cet exemple les sept mesures de texture ont été segmentées avec des seuils choisis empiriquement. Les résultats variables d'une mesure à l'autre s'expliquent de plusieurs façons : 1) la mesure est inappropriée pour la tâche, 2) les variables contrôlant la mesure (taille de fenêtre, direction et distance du pas d'échantillonnage) ne sont pas optimales, 3) le seuil choisi n'est pas approprié et, 4) les objets recherchés ne sont pas détectés suffisamment bien par le capteur. L'étude des mesures de texture fera le tour de ces questions afin de déterminer lesquelles sont utilisables comme traits caractéristiques dans une procédure fonctionnelle (chapitre 4).

Puisque l'analyse des images procède par unité polygonale, nous avons intégré ce principe dans le programme TEXEL. Ainsi, les paires de pixels employées pour le calcul des textures doivent toutes être incluses dans un même polygone d'analyse. La figure 17 montre l'avantage que cela comporte pour éviter certaines confusions en milieu urbain. Le polygone du centre possède un bâtiment que l'on perçoit facilement grâce aux pixels très brillants, alors que ce n'est pas le cas du polygone voisin (Figure 17a). En calculant de la manière classique une mesure de texture telle l'entropie, on constate que les valeurs élevées dues à la présence du bâtiment s'étendent à l'extérieur du polygone jusqu'au polygone voisin (Figure 17b). Dans cet exemple, l'application d'un seuil pour la détection des changements pourrait donner un résultat erroné pour le polygone réellement vacant. En calculant l'entropie en ne considérant que les pixels inclus dans chaque unité d'analyse, on évite de tels problèmes de débordement (Figure 17c). On doit toutefois être conscient que le nombre de pixels employés pour les calculs varie au pourtour des polygones ou pour les polygones de petite taille comparé à la taille de la fenêtre d'analyse. L'exemple de la figure 17 est cependant assez éloquent pour justifier cette approche dans le milieu urbanisé.

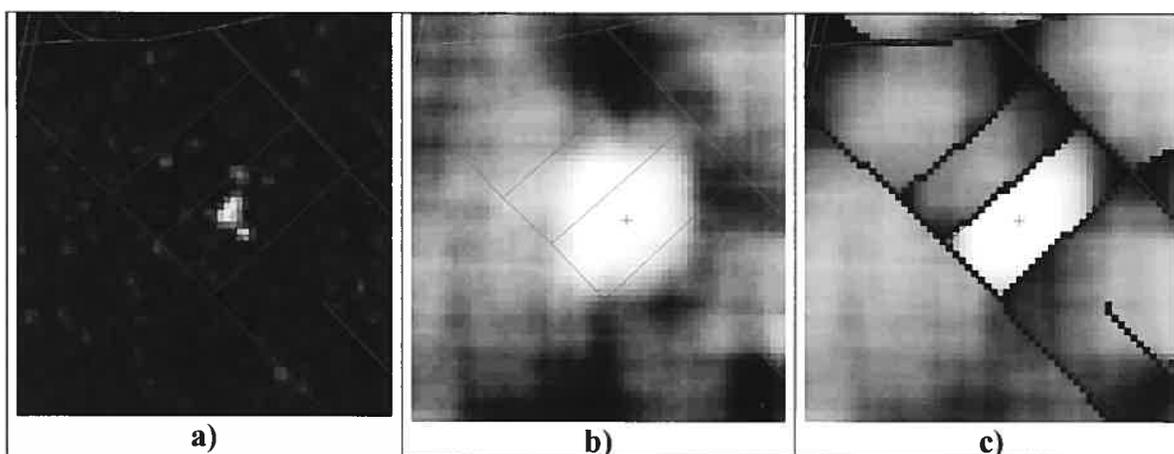


Figure 17- Application du calcul des mesures de texture par unité polygonale.

L'entropie est calculée avec des fenêtres de 21 par 21 pixels et un pas $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel : a) Image RADARSAT-1 originale ré-échelonnée sur 8 bits, b) Entropie calculée avec toutes les paires incluses dans les fenêtres d'analyse, et c) Entropie calculée avec les paires incluses dans les fenêtres à l'intérieur de chaque polygone d'analyse.

3.5.4- Application de la texture pour l'identification des changements

Dans le cas de l'identification, il faut que les traits caractéristiques soient beaucoup plus robustes puisque l'information qu'ils servent à discriminer est plus complexe. La texture des bâtiments détectés doit refléter les types d'occupation du sol. La seule façon d'aborder le problème consiste donc à examiner les mesures en terme de potentiel de discrimination entre chaque classe d'occupation.

3.6- Protocole expérimental pour la détection

Tel que mentionné précédemment, la détection des bâtiments dépend de plusieurs paramètres. Il y a tout d'abord les paramètres qui contrôlent le calcul des différentes mesures de texture (taille des fenêtres, pas et direction d'échantillonnage). Vient ensuite la capacité d'une mesure de capter adéquatement les différences de texture entre le bâti et les autres objets. Le choix des seuils employés pour décider ce qui est bâti ou non prend aussi une grande importance. Finalement, le tout est conditionné par les paramètres d'acquisition des images radar. En plus de l'angle du faisceau, de l'orientation de l'orbite face à la trame urbaine, il y a la saison d'acquisition qui joue un rôle majeur. Il est souhaitable d'effectuer

les tests avec un grand nombre de cas réels choisis sur plusieurs sites et avec un grand nombre d'images acquises dans des conditions variables. Compte tenu de tous les facteurs mentionnés précédemment, il est absolument vital de réduire immédiatement le nombre de cas à examiner.

Premièrement, il est possible de réduire le nombre de directions examinées en posant une hypothèse simplificatrice. Les images traitées proviennent spécifiquement du satellite RADARSAT-1. La trajectoire du satellite passe plus ou moins par les deux pôles, ce qui signifie que l'antenne vise le terrain soit vers l'est ou l'ouest. Comme ce sont les bâtiments qui nous intéressent, les murs les plus apparents sont exposés à l'ouest ou à l'est, selon que l'orbite est ascendante ou descendante. De même, les zones d'ombres correspondent aux murs opposés, ce qui signifie qu'on peut s'attendre à observer des variations plus prononcées dans le sens de la portée, soit à peu près dans la direction est-ouest. Ainsi, la direction horizontale devrait être suffisante pour accentuer les différences de texture.

En second lieu, les variations attendues entre la rétrodiffusion d'un bâtiment et d'une parcelle non construite sont drastiques et souvent de grande amplitude. Un bâtiment de bonne taille correspond souvent à plusieurs pixels similaires de forte valeur, mais tout le pourtour présente quand même de grandes différences avec le voisinage immédiat. Nous sommes donc en mesure de fixer le pas d'échantillonnage à 1 pixel sans trop de craintes quant à la détection des variations abruptes correspondant à l'arête des bâtiments.

Troisièmement, nous devons choisir une taille de fenêtre unique pour effectuer l'évaluation quantitative des résultats. Compte tenu des grandes variations de la taille des bâtiments et de leur densité, il faut examiner la taille des fenêtres qui optimise les résultats afin de n'en choisir qu'une seule. Ceci permettra d'analyser plus à fond les autres facteurs, tels la mesure de texture et les conditions d'acquisition, dont l'influence n'est pas connue à priori faute d'études en milieu urbain. Ainsi, nous avons décidé de procéder à une série de tests selon les étapes suivantes :

- 1- Choix des sites d'étude représentatifs de la région métropolitaine
- 2- Création des bases de données
- 3- Analyse de l'influence de la taille de la fenêtre sur les mesures de texture et choix d'une taille unique pour les analyses subséquentes

- 4- Définition des mesures de texture et des conditions d'acquisition qui optimisent la détections des changements.

3.6.1- Choix des sites

Cinq sites présentant des conditions physiographiques diverses ont été choisis afin de procéder aux divers tests. Ils sont situés aux endroits suivants : 1) Deux-Montagnes, 2) Châteauguay, 3) Lachenaie, 4) une portion de l'ouest de l'île de Montréal, 5) une portion de l'est de l'île de Montréal. La figure 18 montre l'emplacement de chaque site sur le territoire de la CMM avec les polygones vacants obtenus de la carte MAMM. Le sixième site indiqué sur la figure 18 sera utilisé comme base pour des tests de validation du système prototype, comme il sera question au chapitre 6.

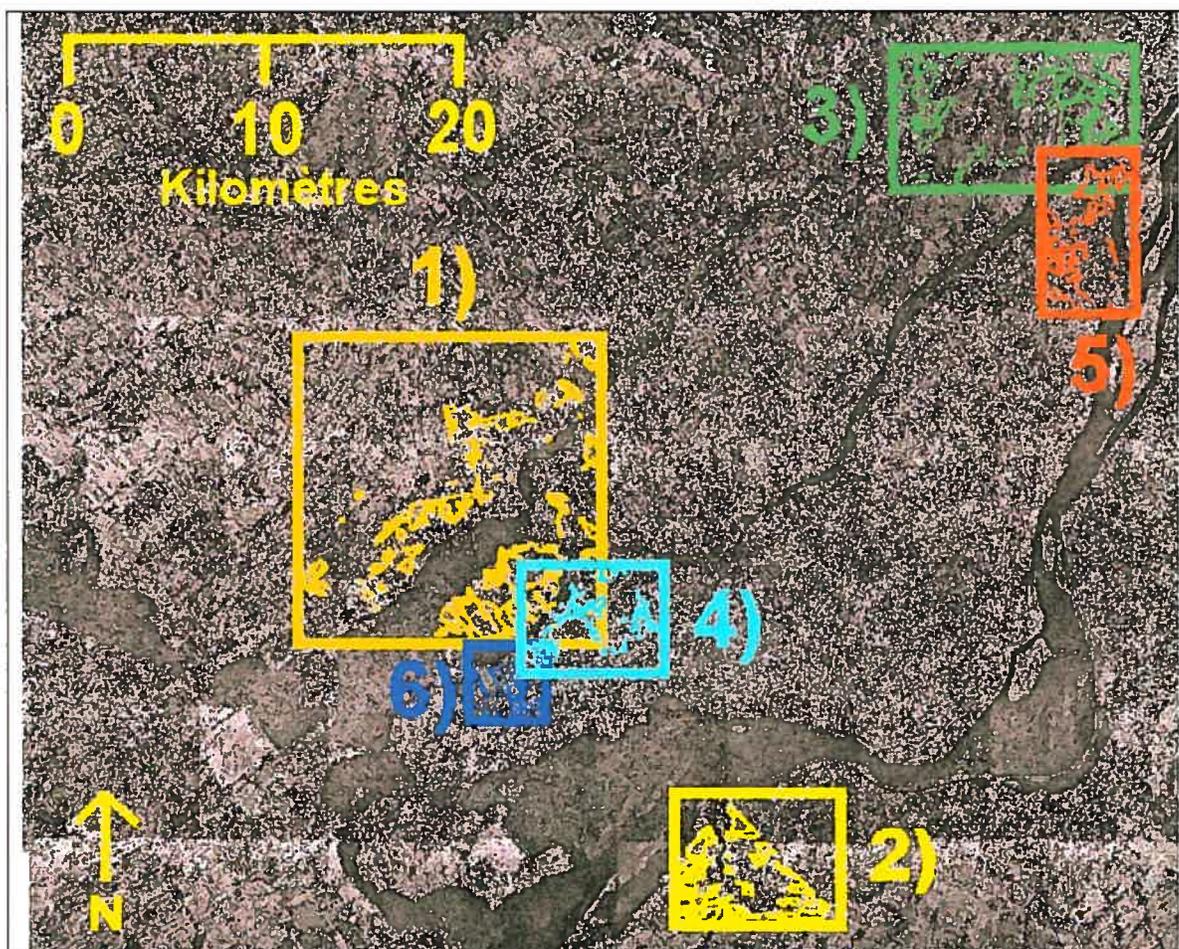


Figure 18- Sites à l'étude superposés à la mosaïque d'orthophotographies de 1999.

1) Deux-Montagnes, 2) Châteauguay, 3) Lachenaie, 4) Ouest de l'île de Montréal, et 5) Est de l'île de Montréal, et 6) Zone test de Kirkland pour l'image de 2003 (voir section 3.8).

Le site de Deux-Montagnes

Ce site est le plus gros des cinq sites étudiés, autant au niveau de sa superficie que de la superficie des terrains vacants analysés. Il comprend les municipalités de Saint-Joseph-Du-Lac, Sainte-Marthe-Sur-Le-Lac, Deux-Montagnes et Saint-Eustache, ainsi que la portion à l'est du territoire de Oka. L'île Bizard et une portion de Boisbriand ont aussi été incluses dans ce test. Le site présente une topographie variable et comprend une grande diversité d'occupations du sol, avec des zones industrielles et commerciales, des boisés denses. On y retrouve aussi beaucoup de zones résidentielles de faible densité caractéristiques de la frange périurbaine montréalaise. Comme un peu partout dans la région montréalaise, l'orientation de la trame urbaine a été fortement conditionnée par la présence des cours d'eau majeurs qui servaient de voies de communication lors des débuts du peuplement du territoire. La trame urbaine du site est donc généralement orientée suivant la berge le long du Lac-Des-Deux-Montagnes, soit à peu près dans la direction sud-ouest/nord-est. C'est donc dire que bon nombre de routes sont aussi orientées nord-ouest/sud-est puisque l'angle droit est omniprésent dans le contexte du réseau routier nord-américain. Toutefois, quelques portions du territoire sont orientées différemment, comme le quartier de la rivière Nord et ses environs à Saint-Eustache où les routes ont un angle de 10 degrés dans le sens anti-horaire par rapport à l'axe nord-sud (ou est-ouest). Il est à noter que ceci correspond presque parfaitement à la trace du satellite en orbite ascendante. D'autres portions des images, comme ce que l'on retrouve sur l'île Bizard, montrent un réseau de forme plus variable où les bâtiments sont vus sous des angles très variés. C'est surtout le cas dans les quartiers d'habitation de faible densité un peu plus récents où le réseau est souvent dessiné avec de nombreuses courbes. Les quartiers résidentiels de la rivière Nord et de l'île Bizard sont les endroits où la majorité des changements a été observé sur nos images.

Le site de Châteauguay

Ce site comporte une faible variation topographique et compte surtout des zones résidentielles de faible densité, un parc industriel et des boisés feuillus. L'orientation de la trame urbaine suit deux directions préférentielles à l'est et à l'ouest de la rivière Châteauguay. La plupart des routes à l'ouest de la rivière, qui comptent pour un peu moins du tiers du nombre total, font un angle d'environ 20 degrés dans le sens anti-horaire par

rapport à l'axe nord-sud (ou est-ouest). À l'est de la rivière, les deux tiers restants font un angle d'environ 10 degrés dans le sens horaire par rapport à l'axe nord-sud (ou est-ouest) ce qui oriente la majorité des bâtiments presque directement dans le sens de la trajectoire du satellite en orbite descendante. Aussi, près de la moitié des surfaces vacantes sont en milieu boisé et une large bande en bordure du lac Saint-Louis se trouve en milieu humide marécageux inondé au printemps après la fonte des neiges.

Le site de Lachenaie

Quelques zones résidentielles de faible densité, quelques zones boisées peuplées de feuillus et de conifères, plusieurs terres agricoles ainsi que de nombreuses friches composent l'essentiel de ce territoire. On note aussi la présence de bassins d'épurations et quelques zones de sol à nu où la topographie est variable et les processus d'érosion semblent plus actifs (présence de plusieurs ruisseaux bien visibles). L'orientation des routes est variable et la densité moyenne du réseau est assez faible pour l'ensemble du site.

Le site de l'ouest de l'île de Montréal

Des portions des arrondissements de Roxboro, Dollard-Des-Ormeaux et Pierrefonds sont incluses dans la zone examinée, qui ne compte que très peu de surfaces boisées. On retrouve des quartiers résidentiels de faible, moyenne et forte densités et des zones d'industries légères qui bordent la portion nord de l'autoroute 40. Quelques commerces de détail et plusieurs centres commerciaux sont présents ainsi que des équipements collectifs et quelques parcs urbains. Les grands boulevards sont généralement orientés à 35 degrés en sens anti-horaire par rapport à l'axe nord-sud (ou est-ouest). Toutefois, les rues des quartiers résidentiels présentent de nombreuses courbes, offrant des angles d'exposition de bâtiments variables face aux faisceaux radar. On note aussi une zone de carrière à Pierrefonds, où quelques polygones vacants jouxtent certaines parois abruptes.

Le site de l'est de l'île de Montréal

Ce site inclut des portions des villes de Montréal-Est et Montréal (quartiers Pointe-Aux-Trembles et Rivière-Des-Prairies). Le relief varie peu et on note une forte urbanisation avec

des zones d'industries lourdes et légères, des quartiers résidentiels de faible, moyenne et forte densités ainsi que des zones de commerce au détail et quelques centres commerciaux. On trouve aussi des espaces verts dont le Parc nature de la Pointe-Aux-Prairies. Le patron du réseau routier des zones résidentielles est orienté selon la direction générale des rives. Ainsi, les routes situées près du fleuve Saint-Laurent sont généralement orientées à 27 degrés dans le sens horaire par rapport à l'axe nord-sud (ou est-ouest). Celles donnant sur la Rivière des Prairies sont orientées à environ à 28 degrés dans le sens anti-horaire par rapport à l'axe nord-sud (ou est-ouest) donc à environ 55 degrés du premier groupe.

3.6.2- Création des bases de données

Pour chaque site étudié, une base de données a été créée incluant les images disponibles ainsi que les polygones vacants la carte MAMM. Il est à noter que dû aux conditions d'acquisition variables des images RADARSAT (orbites, angles des faisceaux) les sites ne sont pas couverts par toutes les images. Le tableau XI montre les images employées par site. En ce qui a trait aux polygones vacants, leur nombre varie de 62 (Lachenaie) à 309 (Deux-Montagnes).

Image de 1999	Deux-Montagnes	Châteauguay	Lachenaie	Ouest de l'île	Est de l'île
21 Mars F4n d	X	X		X	X
23 Avril F4f a		X	X		X
30 Avril F2 a		X		X	X
1 Mai F1f d		X			X
21 Juillet F5f a	X				
28 Juillet F4n a		X		X	
4 Août F2n a	X	X	X	X	X
12 Août F4n d	X		X	X	X
21 Août F4f a		X	X	X	X
28 Août F2 a		X	X	X	X
29 Août F1f d		X	X		X
14 Sept. F4n a	X	X		X	X
1 Nov. F4f a		X	X		X
8 Nov. F2 a		X	X	X	X

Tableau XI- Résumé des images du satellite RADARSAT-1 en mode fin de 1999 disponibles par site.

Les caractères gras indiquent les images acquises en mode descendant.

3.6.3- Analyse de l'influence de la taille de la fenêtre

Cette étape avait pour but de fixer une taille de fenêtre appropriée pour les calculs de texture ainsi que pour effectuer une première évaluation des capacités de discrimination de chaque mesure de texture entre les milieux bâtis et boisés. Des tests préliminaires ont effectivement montré que les arbres répondent parfois fortement au signal radar et que les boisés présentent conséquemment un potentiel de confusion avec les zones construites. Particulièrement pour les zones en frange urbaine, comme celle de Deux-Montagnes, les terrains vacants sont en majorité couverts de boisés et seule une faible portion est réellement occupée par des bâtiments. C'est pourquoi nous avons entrepris ces tests uniquement à ce site afin d'étudier le problème.

Une seule image couvrait la totalité du site. Elle a été acquise le 21 juillet en orbite ascendante avec un faisceau F5f. Une autre image acquise en orbite descendante le 12 août avec un faisceau F4n couvre aussi la presque totalité du site, à l'exception d'une portion à l'ouest de la zone. Ces deux images acquises avec des faisceaux similaires à des dates rapprochées permettent d'examiner des zones boisées et construites dans des conditions où seule l'orientation de la visée varie. La figure 19 est constituée de la superposition des deux images utilisées. Parmi tous les terrains vacants, un certain nombre a été choisi pour effectuer nos tests. Les orthophotographies de 1999 ont été inspectées visuellement afin de circonscrire des zones de boisé ainsi que des zones où de nouveaux bâtiments ont été construits. La figure 19 montre la position des masques employés pour étudier les mesures de texture.

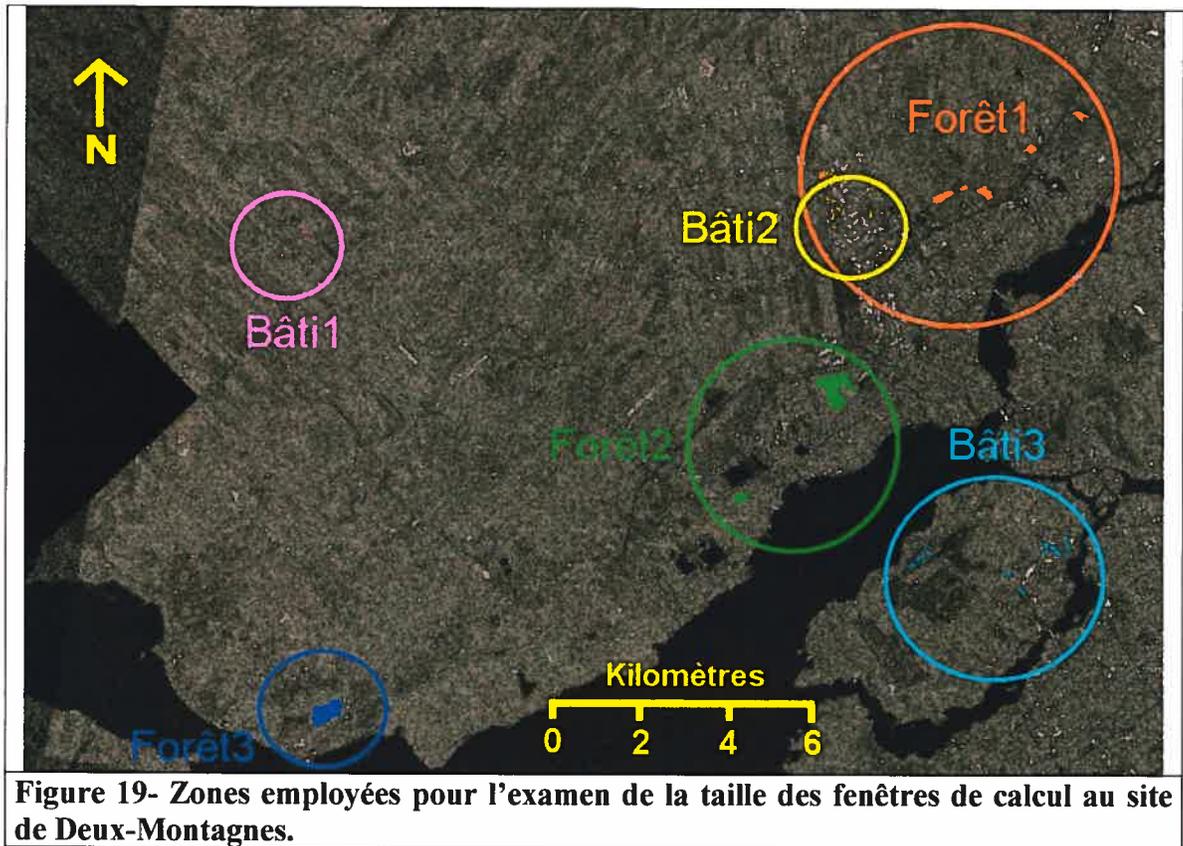


Figure 19- Zones employées pour l'examen de la taille des fenêtres de calcul au site de Deux-Montagnes.

Les zones choisies sont décrites brièvement ci-contre et les superficies de chacune apparaissent au tableau XII.

- **Bâti1** : Petite agglomération urbaine de Saint-Benoît située directement à l'ouest de Saint-Eustache. La majorité des bâtiments sont des unités unifamiliales à l'exception de deux bâtiments dont l'un est équivalent à environ cinq maisons et l'autre, une école, correspond tout au plus à une dizaine de maisons. La trame urbaine est orientée nord-ouest/sud-est à peu près à 40° de la direction nord-sud.
- **Bâti2** : Développement de la Rivière Nord à Saint-Eustache. Il s'agit strictement d'un quartier résidentiel dont la plupart des bâtiments sont des résidences unifamiliales avec quelques duplex ou triplex représentant environ un cinquième de la superficie échantillonnée. La trame urbaine est généralement nord-ouest/sud-est à peu près à 10° de la direction nord-sud. Toutefois, le patron de deux ou trois petites portions de routes épouse quelques courbes légères et l'orientation varie de part et d'autre d'une vingtaine de degrés.

- **Bâti3** : Quartiers résidentiels de l'île Bizard peuplés strictement de résidences unifamiliales. La trame urbaine est très convolutive et les bâtiments n'ont pas réellement d'orientation préférentielle.
- **Forêt1** : Portions boisées feuillues le long de l'autoroute 640 allant de Saint-Eustache jusqu'à l'autoroute 13 aux limites de Boisbriand.
- **Forêt2** : Portions boisées mixtes à Sainte-Marthe-sur-le-Lac le long de l'autoroute 640 tout près du club de golf de Sainte-Marthe-sur-le-Lac et portion feuillue à Saint-Joseph-du-Lac.
- **Forêt3** : Portions boisées mixtes et de résineuses à Oka près du club de golf d'Oka.

	Superficie des échantillons (km ²)
Forêt1	0,268
Forêt2	0,475
Forêt3	0,278
Bâti1	0,020
Bâti2	0,058
Bâti3	0,162

Tableau XII- Superficie des zones de bâti et de boisé pour l'examen de la taille des fenêtres de calcul au site de Deux-Montagnes.

3.6.4- Définition des mesures de texture et des conditions d'acquisition

Cette étape visait à confronter les résultats de détection des changements avec des données terrain dans le but de conclure sur les mesures de texture les plus utiles. Les données terrain ont été obtenues par l'interprétation des orthophotographies. Les terrains vacants de chaque site ont été examinés pour déterminer la présence de bâtiments et les résultats de la photointerprétation sont montrés au tableau XIII. Chaque polygone de validation retenu possède au moins 30 pixels afin d'avoir suffisamment d'échantillons pour les calculs des mesures de texture.

	État réel	Deux-Montagnes	Châteauguay	Lachenaie	Ouest de l'île	Est de l'île
Polygones	Occupés	224	73	37	70	69
	Vacants	85	70	25	21	31
	Total	309	143	62	91	100

Tableau XIII- Polygones employés pour les tests couvrant la région de la CMM.
L'état réel d'occupation des polygones a été obtenu à l'aide des orthophotographies noir et blanc.

Cette étape s'est déroulée en deux parties. Premièrement, nous avons évalué le potentiel de chacune des mesures pour les images disponibles. Le critère employé pour conclure sur les mesures les plus utiles était les taux d'omission et de fausses alarmes. Étant donné le volume de calcul, nous nous sommes restreint aux deux sites les plus complexes dû à la présence des boisés, celui de Deux-Montagnes et de Châteauguay. Les mesures de texture choisies ont été par la suite utilisées pour une validation plus exhaustive sur l'ensemble des sites afin de conclure sur les conditions optimales d'acquisition des données. Pour faciliter ces tests, une procédure (VÉRITÉ) a été conçue permettant d'obtenir les résultats des omissions et des fausses alarmes sous forme tabulaire.

L'exactitude de la détection des changements est calculée à l'aide de mesures standards issues de la matrice de confusion : exactitude globale, erreurs d'omission et de commission et coefficient kappa (Cohen, 1960). Ces mesures évaluent l'accord entre deux juges qui observent l'occurrence d'un phénomène. Dans le cas présent, le premier juge est le photointerprète et le second est le résultat de l'algorithme. Le phénomène observé ou non se définit par la présence ou l'absence de bâtiment en terrain vacant. Ainsi, pour tout polygone que l'on suppose vacant à partir de la carte d'occupation du sol, deux cas sont possibles : le polygone est réellement vacant ou il est occupé par une nouvelle structure. D'un autre côté, le masque obtenu par le seuillage d'une mesure de texture indique qu'il y a présence ou absence de bâtiment. Dans notre cas, nous avons adopté un test très sévère en considérant qu'un seul pixel de bâti détecté signifie un changement, et ce même si la proportion du changement ne constitue qu'une infime partie du polygone. Ainsi il y a quatre cas qui peuvent être observés : 1) on détecte un bâtiment et il y a présence réelle de bâti, 2) on détecte un bâtiment et il y a absence réelle de bâti, 3) on ne détecte pas de bâtiment et il y a présence réelle de bâti, 4) on ne détecte pas de bâtiment et il y a absence

réelle de bâti. Les premier et quatrième cas constituent un succès de l'algorithme, alors que le deuxième cas est une omission et le troisième cas est une fausse alarme (commission). Selon les proportions obtenues, les erreurs d'omission/commissions sont calculées tel qu'illustré par l'exemple du tableau XIV.

Algorithmme Photo	Bâti	Vacant	Total
Bâti	281	28	309
Vacant	34	76	110
Total	315	104	419
Exactitude globale = 85%			
<i>Classe bâti :</i>			
Exactitude du producteur (erreur d'omission) = 91% (9 %)			
Exactitude de l'utilisateur (erreur de commission) = 89% (11%)			
<i>Classe vacant :</i>			
Exactitude du producteur (erreur d'omission) = 69% (31%)			
Exactitude de l'utilisateur (erreur de commission) = 73% (27%)			
Coefficient kappa = 0,611			
Tableau XIV- Résultats de validation : exemple au site Deux-Montagnes.			
Test avec 419 polygones vacants : 28 polygones omis sur 309 polygones réellement occupés et 34 fausses alarmes sur 110 polygones réellement vacants.			

Le programme VÉRITÉ s'applique assez facilement de manière automatique dans une procédure itérative afin d'évaluer les résultats d'une mesure employée avec des seuils variables. L'environnement du logiciel PCI permet effectivement l'exécution des programmes en lots. Ainsi, un masque est créé pour un seuil donné (programme THR de PCI) et les erreurs obtenues pour ce seuil sont calculées avec le programme VÉRITÉ. L'application de ces deux programmes dans une boucle, en modifiant la valeur du seuil selon un certain incrément, donne un portrait plus précis de l'utilité de chaque mesure. Toutefois cette méthode présente un inconvénient car la valeur de l'incrément est difficile à déterminer à prime abord. Un incrément trop grand donne des valeurs d'erreurs qui varient trop d'une exécution à l'autre. Par exemple on peut trouver 5 polygones omis pour une exécution et 25 polygones omis à l'exécution suivante. Il semble évident qu'il faut choisir l'incrément le plus petit possible, mais une contrainte reliée à la taille des fichiers empêche le choix d'un incrément trop petit. En effet, la procédure requiert la création d'un masque pour chaque valeur de seuil mais les bases de données PCI n'en contiennent qu'un maximum de 1 024. La solution pratique consiste donc à appliquer la procédure

automatique en effectuant plusieurs exécutions, d'abord avec un incrément grossier et ensuite avec des incréments de plus en plus fins autour des seuils qui donnent les résultats les plus intéressants.

Normalement, on considère qu'un processus de décision est acceptable lorsque l'exactitude globale est au dessus de 80%. Toutefois, à cause du nombre variable de terrains vacants d'un site à l'autre, les comparaisons des résultats sur cette base n'est pas tout à fait adéquate. C'est pourquoi nous utiliserons comme critère de comparaison des résultats les taux de fausses alarmes obtenus en fixant les seuils d'omission. Ces seuils ont été fixés à 5% et 10%.

3.7- Protocole expérimental pour l'identification

Afin de déterminer s'il est possible de distinguer les classes d'occupation du sol, nous avons défini un protocole expérimental qui comprend les étapes suivantes :

- 1- Choix du site d'expérimentation et découpage de l'espace en îlots urbains
- 2- Calcul des statistiques par îlot
- 3- Test de séparabilité
- 4- Test de classification

3.7.1- Choix du site et découpage de l'espace

Pour ce test, nous employons le territoire de l'île de Montréal car la carte CUM est plus détaillée que la carte MAMM. Le territoire de l'île de Montréal a été découpé en îlots urbains avec le programme POLYGO, en utilisant seulement les vecteurs de routes. Au total, nous avons obtenu plus de 19 000 polygones qui comprennent une ou plusieurs classes d'occupation du sol.

3.7.2- Calcul des statistiques par îlot

Seuls les îlots à fonction unique ont été retenus pour cette analyse. Le tableau XV montre le nombre d'îlots par taxons qui ont été étudiés. Les statistiques de deuxième ordre ont été calculées par îlot avec le programme TEXEL. L'examen de ces statistiques nous permet une première évaluation de chaque mesure pour l'identification des classes. Même si selon la littérature l'on peut s'attendre à des résultats non probants, des tests ont quand même été effectués avec les statistiques de premier ordre comme dans les cas des travaux de Baudouin *et al.* (1995) avec les images SPOT panchromatiques.

Taxon	Nombre d'îlot	Nombre de pixels	Superficie (km ²)	Superficie moyenne par d'îlot (m ²)
Commerce de détail	79	27 648	0,691	8 749
Édifice à bureaux	14	4 882	0,122	8 718
Résidentiel forte densité	36	17 896	0,447	12 428
Résidentiel faible densité	2676	1 505 818	37,645	14 068
Résidentiel moyenne densité	998	431 522	10,788	10 810
Centre commercial	12	16 392	0,410	34 150
Équipement collectif	201	132 541	3,314	16 485
Industrie légère	182	240 143	6,004	32 987
Industrie lourde	64	83 723	2,093	32 704
Service d'utilité publique	341	232 862	5,822	17 072
Cimetière	166	64 948	1,624	9 781
Golf	2	5 783	0,145	72 288
Parc régional	28	61 069	1,527	54 526
Parc urbain	544	257 736	6,443	11 844
Réserve naturelle	11	22 520	0,563	51 182
Rural	32	1 582 793	39,570	1 236 557
Espaces Vacants	608	140 927	3,523	5 795

Tableau XV- Polygone des îlots urbains employés pour les tests d'identification des taxons de la carte CUM.

3.7.3- Test de séparabilité

Ces tests sont effectués avec les sept mesures de texture en employant tous les îlots urbains sans égard au nombre de classes présent. La distance de Bhattacharyya est employée pour l'examen de la séparabilité avec tous les pixels.

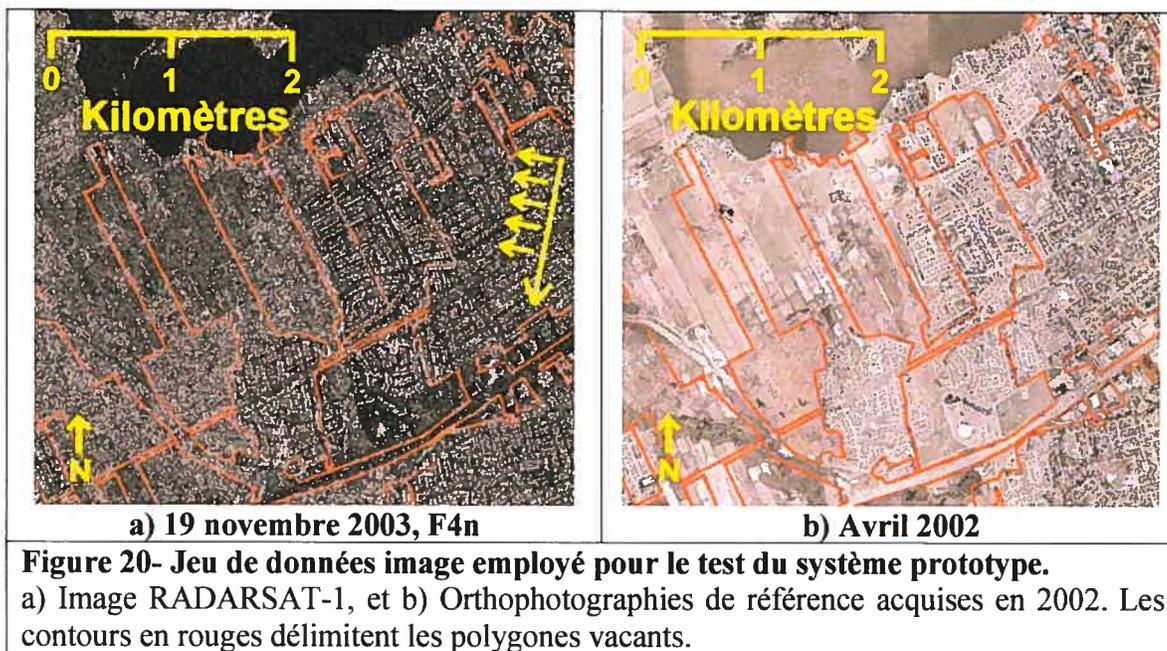
3.7.4- Test de classification

Deux classificateurs dirigés disponibles dans le logiciel PCI sont testées, l'un de type paramétrique (le maximum de vraisemblance : module MLC) et l'autre de type non paramétrique (l'algorithme des K-plus proches voisins : module KNN) (Duda et Hart; 1973, Schowengerdt; 1983, Fukunaga; 1990). Pour ces tests, nous employons la moitié des pixels pour l'entraînement et l'autre moitié pour l'évaluation quantifiée des résultats.

3.8- Conception d'un système prototype

Selon les résultats obtenus dans les tests de détection et d'identification des changements, nous examinerons au chapitre 6 les possibilités d'établir un système dédié à la mise à jour cartographique à partir des images du satellite RADARSAT-1 acquises en mode fin. Au chapitre 2, nous avons montré les difficultés d'automatiser le processus d'identification des taxons. Tout au moins, s'il est possible de détecter rapidement les changements, nous baserons la conception du système en employant cette capacité.

Pour tester ce système prototype, nous avons obtenu une image RADARSAT-1 en 2003 et appliqué l'ensemble des procédures. Pour valider les résultats obtenus, nous avons utilisé des orthophotographies couleurs de l'île de Montréal à l'échelle du 1 : 8 000 acquises en 2002 (Figure 20). Le site choisi est localisé à Kirkland et comporte un grand nombre de nouveaux quartiers. L'emplacement de ce site est montré à la figure 18 (page 52). La validation est effectuée avec le programme VÉRITÉ pour 125 polygones vacants, dont 85 sont réellement occupés selon les orthophotographies.



CHAPITRE 4- La détection des changements

4.1- Introduction

Dans ce chapitre nous analysons les mesures de texture appliquées à la détection des bâtiments à l'intérieur des terrains vacants. Nous examinerons les effets de la fenêtre employée pour le calcul de la texture et nous choisirons les mesures de textures les plus pertinentes pour effectuer la validation aux cinq sites. Il sera ainsi possible de conclure sur les mesures les plus appropriées pour l'acquisition des images RADARSAT-1 pour la détection des changements.

4.2- La texture des bâtiments et des boisés : taille des fenêtres

Pour cette première analyse des mesures de texture, nous employons des fenêtres de tailles impaires allant de 3 pixels jusqu'à 19 pixels avec un pas d'échantillonnage constant de 1 pixel dans la direction horizontale (section 3.6). Le calcul des sept mesures de texture (Tableau X, page 46) a été effectué sur les images du 21 juillet (F5f) et du 12 août (F4n) 1999, acquises respectivement en orbite ascendante et descendante pour la portion du site de Deux-Montagnes. Les valeurs moyennes de chaque mesure aux trois zones boisées et aux trois zones bâties (Figure 19, page 57) sont examinées afin de poser un premier diagnostic sur leur capacité à distinguer les deux classes.

4.2.1- Comportement attendu des mesures

Nous pouvons d'abord tenter de prédire la réponse des mesures pour les deux classes en fonction de ce que nous observons sur les images RADARSAT-1 (Figure 21). L'inspection visuelle des milieux boisés (Figure 21a et b) montre souvent des surfaces visuellement moins texturées comparativement au bâti (Figure 21c à f). Les pixels des bâtiments sont généralement plus brillants dû à la réflexion en coin, mais les variations qu'entraîne l'effet diédrique peuvent être de grande amplitude (Figure 21e et f). Certaines zones bâties montrent parfois des valeurs assez faibles selon l'orientation du faisceau (Figure 21e).

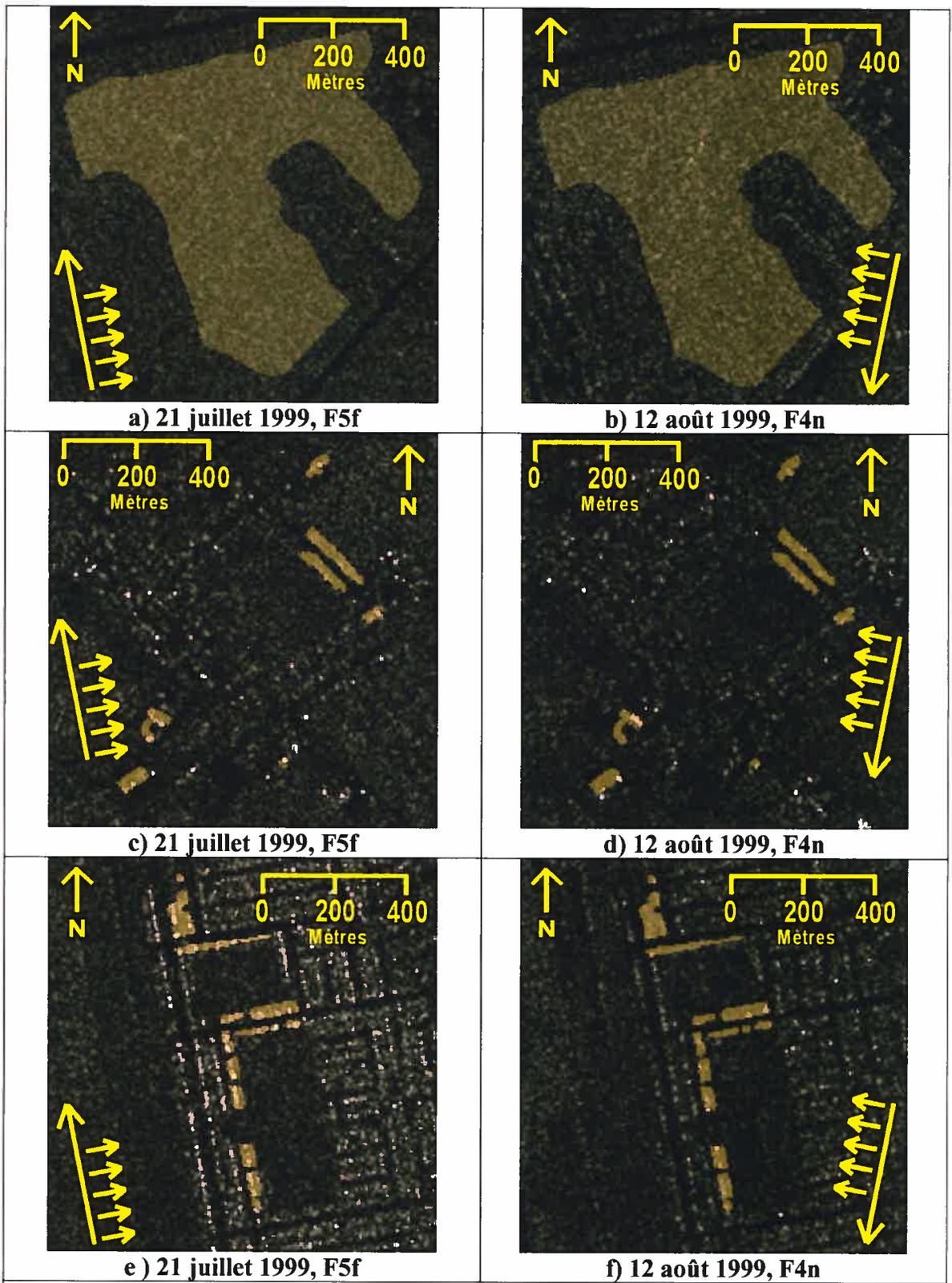


Figure 21- Portions de zones bâties et boisées des images RADARSAT-1 pour l'examen des textures.

a) et b) Boisé mixte (forêt2), c) et d) Petite agglomération en milieu rural (bâti1), e) et f) Quartier résidentiel de faible densité (bâti2).

En milieu de faible densité urbaine, des bâtiments de petite taille peuvent posséder des valeurs similaires aux zones boisées (Figure 21c et d). Pour les mesures de contraste et d'écart type, il est clair que les variations de forte amplitude des zones construites devraient donner des valeurs plus élevées que celles des zones boisées. À l'inverse, les valeurs d'énergie et d'homogénéité les plus élevées devraient correspondre à des zones boisées.

Pour les bâtiments, souvent caractérisés par des valeurs plus élevées, il est fort probable que la mesure de moyenne sera plus élevée en zone bâtie. Quant à l'entropie, plus les fréquences observées sont éparpillées, plus sa valeur est forte. On s'attend donc à ce que les surfaces boisées qui montrent souvent des variations plus petites prennent des valeurs d'entropie plus faibles que les zones construites où les variations sont importantes. Finalement, la probabilité maximale représente la fréquence d'occurrence la plus élevée de la distribution et il n'est pas aisé de prédire laquelle des classes sera caractérisée par les valeurs les plus élevées. Nous sommes en droit de supposer que les boisés ont une valeur plus élevée pour cette mesure puisque les distributions sont plus resserrées. Mais une zone bâtie où les bâtiments ressortent peu et les distributions sont resserrées pourrait aussi avoir une probabilité maximale plus élevée qu'une zone boisée.

4.2.2- Observations en zones bâties et boisées

Nous présentons les résultats obtenus de manière graphique et sous forme de tableaux, montrés en annexe, où les valeurs sont triées en ordre croissant. Dans plusieurs cas, les graphiques laissent voir les tendances au premier coup d'œil. Toutefois, certaines mesures de texture montrent des gammes de valeurs très faibles et il n'est pas possible de distinguer visuellement les résultats pour chaque zone. Les tableaux des valeurs triées en ordre croissant que l'on retrouve en annexe permettent quand même d'apprécier le comportement des mesures de chaque zone pour toutes les tailles de fenêtre (Annexes I à VII). L'extrait ci-contre tiré du tableau de la mesure d'énergie révèle l'utilité de présenter les résultats de la sorte (Tableau XVI). Les zones de bâti sont notées en caractère gras afin de faciliter leur repérage. L'exemple indique clairement qu'avec une fenêtre de 7 pixels, les zones bâties possèdent des valeurs moyennes plus faibles que toutes les zones boisées, alors qu'en employant une fenêtre de 9 pixels la zone Forêt3 est mal classée selon les attentes pour

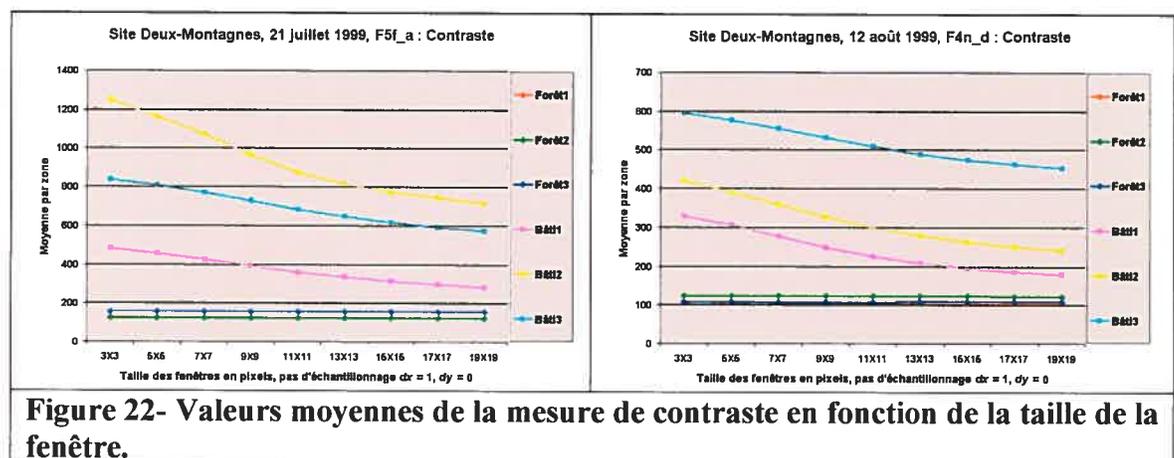
cette mesure. Ceci est impossible à observer sur le graphique correspondant. Les paragraphes qui suivent présentent les résultats détaillés des analyses pour chaque mesure de texture utilisée.

7X7	0,0016	0,0016	0,0018	0,0019	0,0020	0,0023
	Bâti2	Bâti3	Bâti1	Forêt3	Forêt2	Forêt1
9X9	0,0008	0,0009	0,0011	0,0011	0,0012	0,0014
	Bâti2	Bâti3	Forêt3	Bâti1	Forêt2	Forêt1

Tableau XVI- Exemple du tri en ordre croissant des valeurs observées pour chaque zone.

- **Le contraste**

Tel qu'attendu, les valeurs moyennes de la mesure de contraste sont plus élevées pour les zones bâties mais on observe qu'elles diminuent avec l'augmentation de la taille de la fenêtre (Figure 22 et tableau Annexe I). Les valeurs de chaque zone boisée sont beaucoup plus faibles et ne varient presque pas en fonction de la taille de la fenêtre. Il est possible de distinguer correctement toutes les zones de bâti des zones de boisées, autant sur l'image en orbite ascendante que celle en orbite descendante. La zone bâti1 qui présente les contrastes les plus faibles parmi le bâti, surtout pour des tailles de fenêtre approchant 19 pixels, possède quand même toujours des valeurs supérieures à celles des zones boisées. On note aussi que la zone bâti2, mieux orientée par rapport au capteur en orbite ascendante (Figure 22e) présente les valeurs de contraste les plus élevées sur l'image du 21 juillet. Sur l'image du 12 août acquise en orbite descendante, c'est la zone bâti3 qui possède les valeurs les plus élevées.



- L'écart type

L'écart type des zones bâties est plus élevées que celui des zones boisées, comme il avait été anticipé (Figure 23 et tableau Annexe II). Pour la plupart des zones, on observe des valeurs maximales pour des fenêtres de taille entre 7 et 11 pixels. Les valeurs des boisés sont beaucoup plus faibles et montrent peu de variation avec la taille de la fenêtre. L'écart type permet de distinguer les deux classes dans tous les cas et pour les deux images.

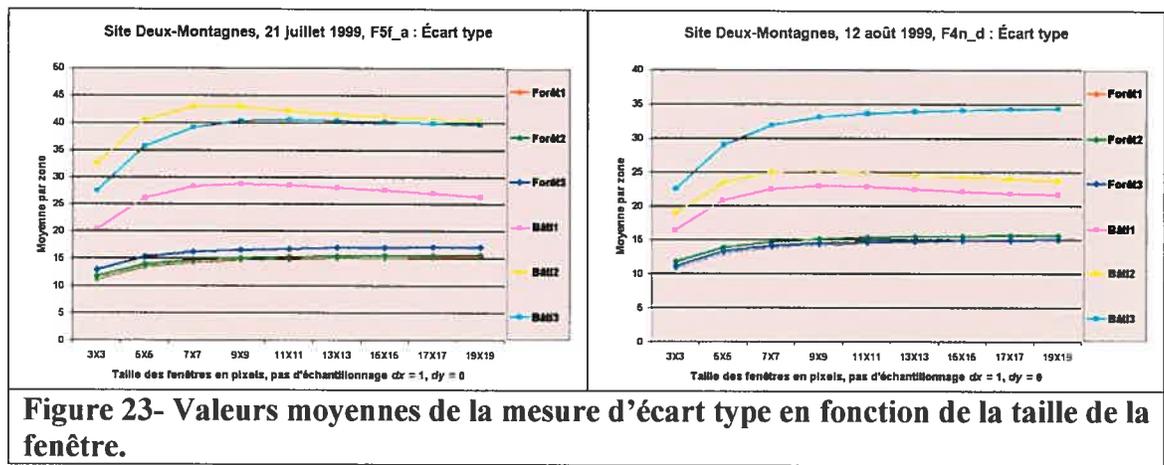
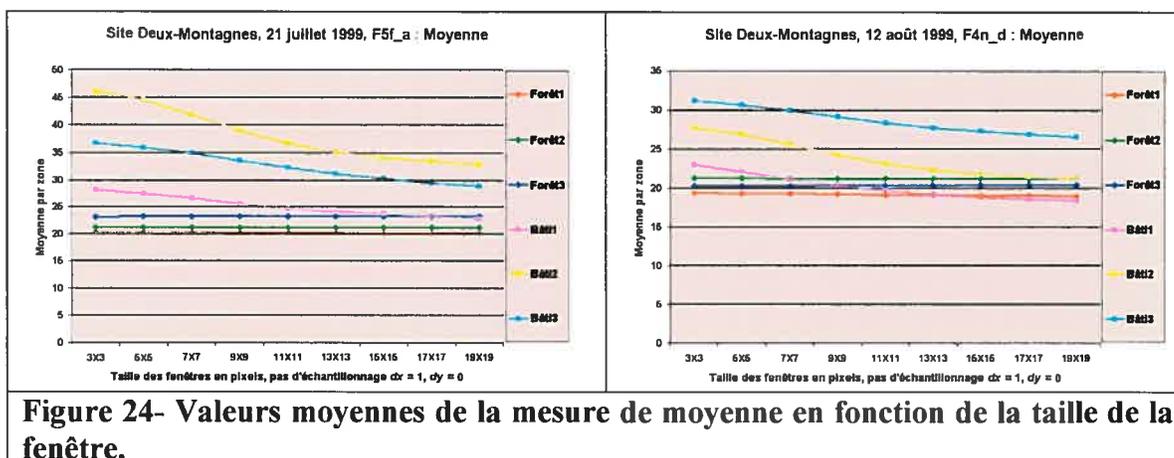


Figure 23- Valeurs moyennes de la mesure d'écart type en fonction de la taille de la fenêtre.

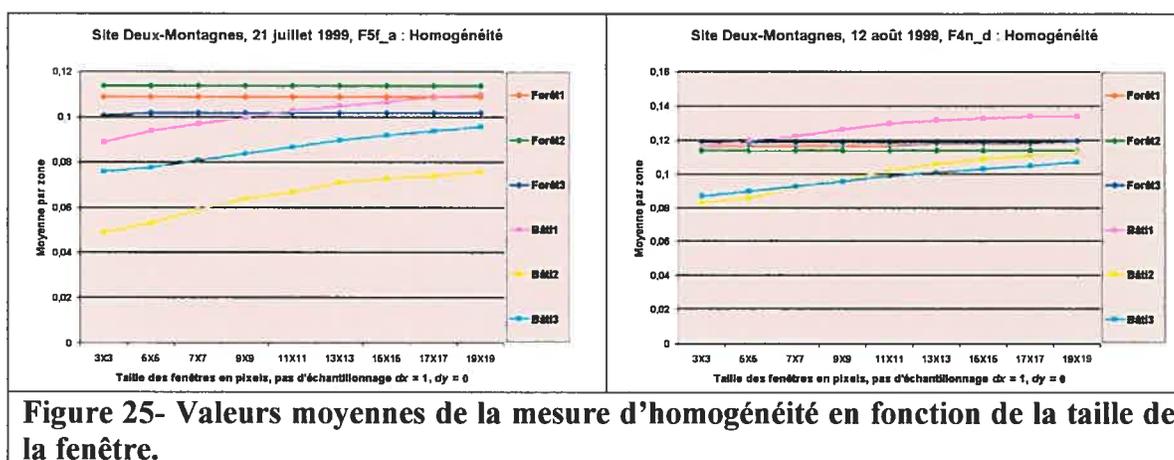
- La moyenne

Les valeurs de cette mesure sont généralement plus élevées pour le bâti et diminuent avec l'augmentation de la taille de la fenêtre pour cette classe (Figure 24 et tableau Annexe III). Les valeurs des zones boisées sont plus faibles et ne varient pratiquement pas en fonction de la taille de la fenêtre. Sur l'image du 21 juillet, les zones bâti2 et bâti3 se distinguent toujours des zones de forêt. La zone bâti1 possède une valeur presque égale à la zone forêt3 pour des fenêtres d'une taille de 15 pixels et inférieure pour des fenêtres plus grandes. Sur l'image du 12 août, le mauvais classement de la zone bâti1 survient à partir d'une taille de 7 pixels, et à 15 pixels elle possède des valeurs inférieures à toutes les zones de forêt. À cette taille, il commence à être difficile de distinguer la zone bâti2 de la zone forêt2, et cette dernière présente même une valeur supérieure à une taille de 19 pixels.



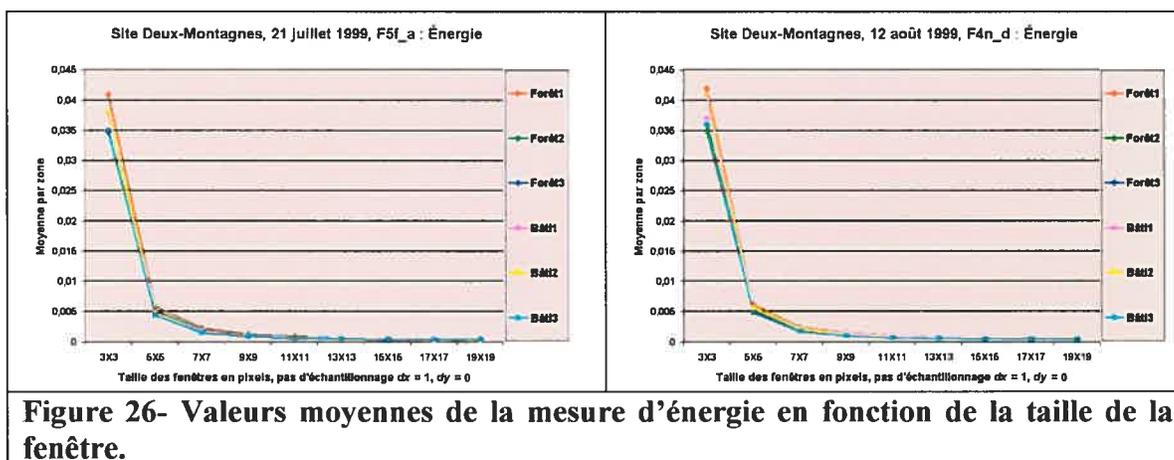
- L'homogénéité

Les valeurs de cette mesure sont plus faibles pour le bâti et plus élevées pour la forêt, à l'exception de la zone bâti1 qui présente presque toujours les valeurs les plus élevées pour le 12 août (Figure 25 et tableau Annexe IV). Pour le 21 juillet, cette zone est mal classée pour des fenêtres de 11 pixels et plus. La forêt montre des valeurs qui ne varient presque pas avec la taille des fenêtres pour chaque zone. On note aussi la très faible gamme des valeurs obtenues pour toutes les zones. Ces faibles écarts pourraient poser certains problèmes puisque les images des valeurs réelles de l'environnement PCI sont encodés sur 4 octets (« single precision »).



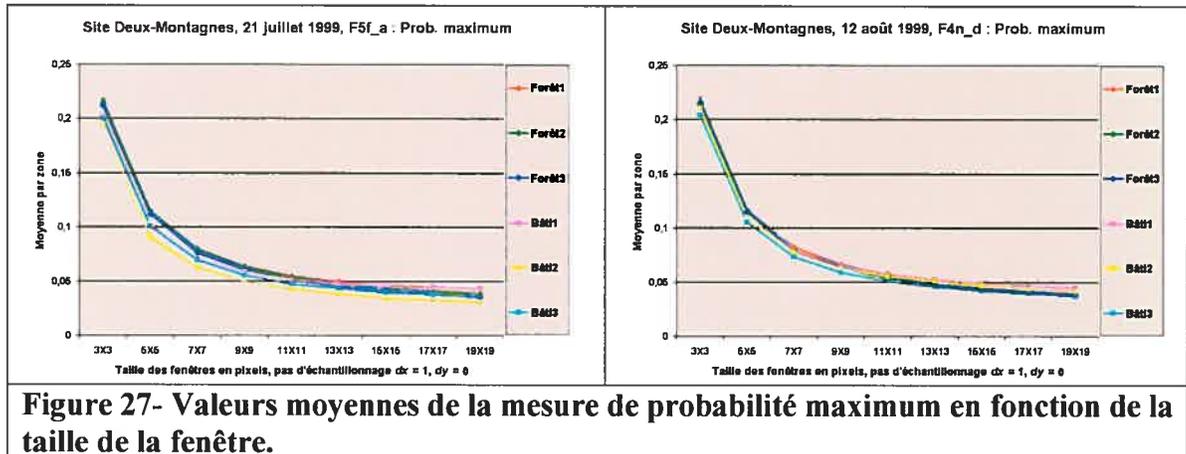
- **L'énergie**

Les valeurs d'énergie sont très faibles et incluses dans une gamme encore plus restreinte que pour l'homogénéité (Figure 26 et tableau Annexe V). Elles sont généralement plus faibles pour le bâti tel qu'attendu, avec toutefois plusieurs exceptions. Des fenêtres de 3 pixels donnent des valeurs d'énergie du bâti supérieures à celles des zones forêt2 et forêt3. Cette mesure est très sensible et montre des confusions lorsque les bâtiments ressortent peu dû aux conditions d'acquisition (site bâti2 le 12 août, site bâti1 aux deux dates).



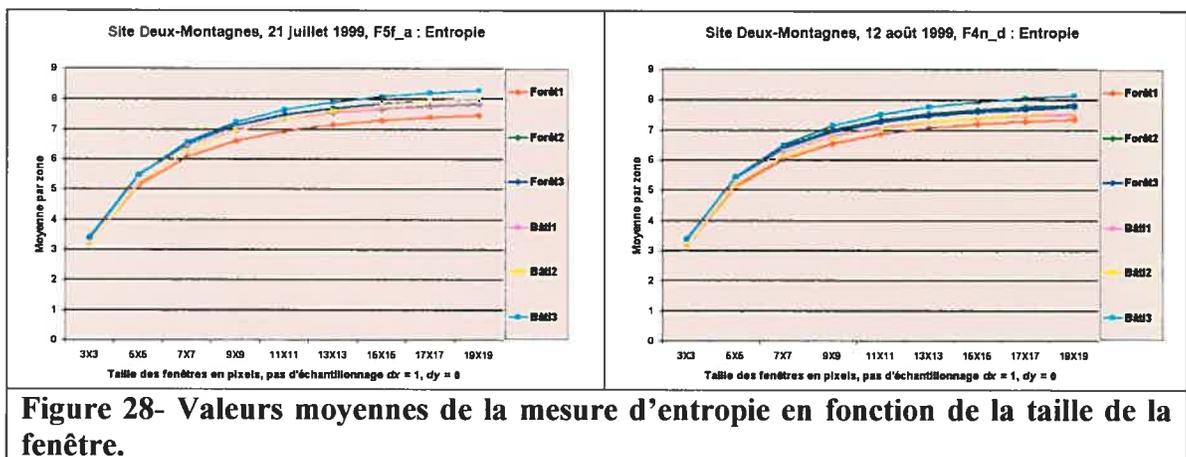
- **La probabilité maximale**

Cette mesure montre aussi une gamme de valeurs faible pour toutes les zones. Les valeurs les plus faibles sont obtenues dans les conditions où les bâtiments ressortent mieux (21 juillet) et les plus fortes lorsqu'ils apparaissent moins bien (zones bâti1 et bâti2 en orbite ascendante le 12 août) (Figure 27 et tableau Annexe VI). L'augmentation de la taille de la fenêtre pour ces zones où le bâti est moins visible donne des valeurs égales ou supérieures à la forêt.



- L'entropie

Les valeurs de cette mesure sont presque toujours plus élevées pour la zone bâti3 et plus faibles dans la zone forêt1, autant pour l'image en orbite ascendante que celle en orbite descendante (Figure 28 et tableau Annexe VII). La valeur de cette mesure croît avec la taille des fenêtres pour toutes les zones. Pour l'image du 12 août, les zones forêt2 et forêt3 montrent des valeurs presque toujours supérieures à celles des zones bâti1 et bâti2 contrairement à nos attentes. Pour le 21 juillet, ces deux zones bâties possèdent des valeurs légèrement supérieures ou égales à la zone forêt2 pour des tailles de 11 et 13 pixels. Pour cette date, les moins bons résultats sont obtenus avec des tailles de 17 et 19 pixels, alors qu'on observe une alternance des classes pour les valeurs triées en ordre croissant.



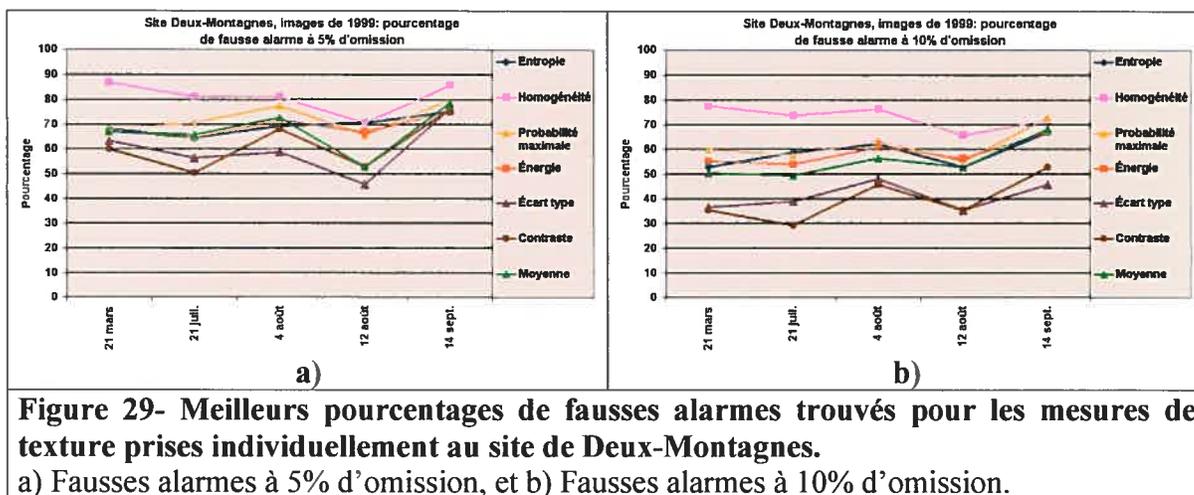
Résumé et choix d'une taille de fenêtre

Les deux meilleures mesures pour discriminer le bâti du boisé sont le contraste et l'écart type. Peu importe la taille de la fenêtre, on distingue tous les échantillons des boisés de ceux du bâti. Toutefois, pour le contraste on observe que l'écart des valeurs entre les deux classes diminue avec l'augmentation de la taille de la fenêtre. Pour l'écart type, on note les valeurs maximales du bâti pour des tailles de fenêtres entre 7 et 11 pixels. L'homogénéité et la moyenne montrent qu'il est toujours possible de distinguer les zones bâties et boisées lorsque la taille est petite, mais que certaines confusions commencent à apparaître lorsqu'elle augmente, surtout pour les zones où le bâti ressort moins bien. Les mesures d'énergie et de probabilité maximum semblent encore plus sensibles à ces endroits et donnent les résultats les moins intéressants. L'entropie donne aussi des résultats plutôt mitigés, montrant un mauvais classement aux endroits où le bâti est plus difficile à distinguer. Toutefois, la zone forêt1 constituée de feuillus montre presque toujours les valeurs les plus faibles, alors que les deux autres zones de boisés mixtes possèdent des valeurs parfois égales ou carrément supérieures aux zones bâties moins contrastées.

Les résultats pour les meilleures mesures sont obtenus avec les tailles les plus petites de fenêtre. Toutefois, certains essais empiriques de seuillage de la mesure de contraste calculée avec très peu d'échantillons ont montré une nette surestimation des valeurs à des endroits non construits. Ceci se produisait souvent au pourtour des polygones vacants, où la prise en compte des pixels uniquement contenus dans ceux-ci fait de la taille des fenêtres une variable critique. Une taille de 11 pixels semble donc un bon compromis pour obtenir un nombre suffisant d'échantillons sans toutefois considérer des fenêtres trop grandes qui tendent à poser des problèmes en zones bâties pour plusieurs mesures. Cette taille (55 mètres par 55 mètres) correspond aussi à une superficie légèrement supérieure aux lots individuels habituellement rencontrés en frange urbaine dans les quartiers d'habitation unifamiliale.

4.3- Procédure de validation : analyse des mesures individuelles

La méthode de validation définie à la section 3.6.4 a d'abord été appliquée à chaque mesure individuelle au site de Deux-Montagnes. Pour ce site, nous possédons 5 images (Tableau XI, section 3.6.2, page 55) sur lesquelles se trouvent les 309 polygones de validation (Tableau XIII, section 3.6.4, page 59). Les sept mesures de texture ont été calculées en employant des fenêtres de 11 pixels. Les taux de fausses alarmes les plus bas trouvés autour de 5% et 10% d'omission sont montrés à la figure 29. Ces résultats triés en ordre croissant apparaissent au tableau XVII.



Ce test de validation confirme les observations de la section précédente à l'effet que le contraste et l'écart type sont les deux meilleures mesures, autant à 5% que 10% d'omission. Suivent dans l'ordre, la moyenne, l'entropie, l'énergie, la probabilité maximale et l'homogénéité. Cette dernière est la pire des mesures avec des fausses alarmes qui ne descendent jamais sous les 70% pour 5% d'omission et sous 70% uniquement sur l'image du 12 août pour 10% d'omission.

5%	Écart type		Contraste		Moyenne		
	45,9	12 août	50,6	21 juil.	52,9	12 août	
	56,5	21 juil.	52,9	12 août	65,9	21 juil.	
	58,8	4 août	60,0	21 mars	67,1	21 mars	
	63,5	21 mars	68,2	4 août	72,9	4 août	
	76,5	14 sept.	76,5	14 sept.	78,8	14 sept.	
	Entropie		Énergie		Probabilité maximale		Homogénéité
	64,7	21 juil.	64,7	21 juil.	65,9	12 août	70,6 12 août
	68,2	21 mars	67,1	21 mars	68,2	21 mars	81,2 21 juil.
	69,4	4 août	67,1	12 août	70,6	21 juil.	81,2 4 août
	70,6	12 août	71,8	4 août	77,6	4 août	85,9 14 sept.
	75,3	14 sept.	75,3	14 sept.	80,0	14 sept.	87,1 21 mars
10%	Contraste		Écart type		Moyenne		
	29,4	21 juil.	35,3	12 août	49,4	21 juil.	
	35,3	21 mars	36,5	21 mars	50,6	21 mars	
	35,3	12 août	38,8	21 juil.	52,9	12 août	
	45,9	4 août	45,9	14 sept.	56,5	4 août	
	52,9	14 sept.	48,2	4 août	68,2	14 sept.	
	Entropie		Énergie		Probabilité maximale		Homogénéité
	52,9	21 mars	54,1	21 juil.	55,3	12 août	65,9 12 août
	52,9	12 août	55,3	21 mars	57,6	21 juil.	71,8 14 sept.
	58,8	21 juil.	56,5	12 août	60,0	21 mars	74,1 21 juil.
	62,4	4 août	61,2	4 août	63,5	4 août	76,5 4 août
	67,1	14 sept.	67,1	14 sept.	72,9	14 sept.	77,6 21 mars

Tableau XVII- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Deux-Montagnes.

La méthode de validation des mesures individuelles a ensuite été appliquée au site de Châteauguay, pour lequel nous disposons de 12 images (Tableau XI, page 55) et 143 polygones de validation (Tableau XIII, page 59). Les taux de fausses alarmes montrés à la figure 30 et au tableau XVIII confirment que ce sont avec les mesures d'écart type et de contraste que l'on obtient les meilleurs résultats. L'entropie et l'énergie viennent ensuite et devancent dans l'ordre l'homogénéité, la probabilité maximum et la moyenne à 5% d'omission et la moyenne, la probabilité maximum et l'homogénéité à 10% d'omission

5%	Écart type		Contraste		Entropie	
	31,4	8 nov.	32,9	8 nov.	35,7	29 août
	34,3	1 nov.	41,4	21 août	45,7	28 août
	35,7	28 août	42,9	28 août	48,6	21 août
	38,6	21 août	45,7	29 août	51,4	4 août
	44,3	4 août	47,1	23 avril	52,9	28 juil.
	48,6	28 juil.	47,1	28 juil.	52,9	8 nov.
	51,4	30 avril	48,6	1 mai	54,3	1 mai
	51,4	29 août	52,9	1 nov.	54,3	1 nov.
	52,9	23 avril	58,6	30 avril	61,4	21 mars
	54,3	21 mars	64,3	21 mars	61,4	23 avril
	61,4	1 mai	65,7	4 août	64,3	30 avril
	76,5	14 sept.	76,5	14 sept.	75,3	14 sept.
	Énergie		Homogénéité		Probabilité maximale	
37,1	29 août	55,7	21 août	47,1	1 mai	50,0 1 mai
44,3	28 août	55,7	29 août	48,6	29 août	51,4 28 juil.
48,6	21 août	57,1	28 août	52,9	28 juil.	51,4 29 août
51,4	4 août	58,6	4 août	57,1	21 mars	52,9 28 août
52,9	28 juil.	61,4	21 mars	57,1	21 août	52,9 8 nov.
52,9	8 nov.	61,4	1 mai	58,6	1 nov.	54,3 21 mars
54,3	1 mai	67,1	1 nov.	60,0	8 nov.	55,7 21 août
54,3	1 nov.	70,0	8 nov.	61,4	23 avril	57,1 1 nov.
55,7	23 avril	71,4	23 avril	62,9	4 août	62,9 4 août
62,9	21 mars	71,4	28 juil.	65,7	30 avril	68,6 23 avril
65,7	30 avril	75,7	30 avril	65,7	28 août	74,3 30 avril
74,1	14 sept.	85,9	14 sept.	80,0	14 sept.	78,8 14 sept.
10%	Écart type		Contraste		Énergie	
	18,6	1 nov.	18,6	1 nov.	31,4	29 août
	18,6	8 nov.	24,3	8 nov.	32,9	1 mai
	27,1	21 août	31,4	29 août	35,7	21 août
	31,4	4 août	32,9	21 août	41,4	28 juil.
	34,3	28 août	35,7	28 juil.	42,9	4 août
	37,1	28 juil.	37,1	4 août	42,9	28 août
	40,0	23 avril	38,6	23 avril	44,3	21 mars
	40,0	30 avril	38,6	28 août	45,7	1 nov.
	42,9	1 mai	41,4	1 mai	47,1	8 nov.
	44,3	29 août	45,7	21 mars	51,4	23 avril
	45,9	14 sept.	48,6	30 avril	52,9	30 avril
	47,1	21 mars	52,9	14 sept.	67,1	14 sept.
	Entropie		Moyenne		Probabilité maximale	
31,4	1 mai	32,9	29 août	35,7	1 mai	52,9 21 mars
32,9	29 août	35,7	8 nov.	40,0	29 août	52,9 21 août
40,0	28 août	38,6	28 juil.	45,7	28 juil.	52,9 28 août
41,4	28 juil.	40,0	4 août	48,6	21 août	52,9 29 août
41,4	21 août	47,1	28 août	50,0	21 mars	55,7 1 mai
44,3	8 nov.	48,6	21 mars	52,9	1 nov.	55,7 4 août
45,7	4 août	48,6	1 nov.	54,3	23 avril	57,1 28 juil.
47,1	21 mars	50,0	1 mai	54,3	30 avril	65,7 1 nov.
48,6	1 nov.	52,9	21 août	55,7	28 août	67,1 8 nov.
50,0	23 avril	57,1	23 avril	57,1	8 nov.	68,6 23 avril
54,3	30 avril	64,3	30 avril	60,0	4 août	71,8 14 sept.
67,1	14 sept.	68,2	14 sept.	75,3	14 sept.	74,3 30 avril

Tableau XVIII- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Châteauguay.

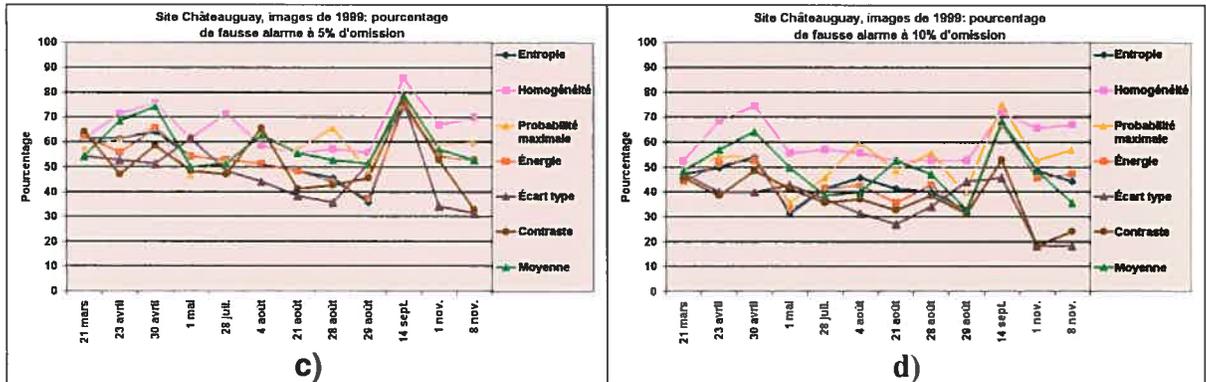


Figure 30- Meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés pour les mesures de texture prises individuellement au site de Châteauguay.

a) Fausses alarmes à 5% d'omission, et b) Fausses alarmes à 10% d'omission.

Examen de la corrélation pour la sélection de deux mesures

Un examen de la corrélation entre les mesures calculées sur l'image du 21 juillet de Deux-Montagnes a été effectué afin de déterminer celles qui sont redondantes (Tableau XIX). Le but est de n'en choisir que deux afin d'appliquer la méthode de validation à toutes les images des cinq sites. L'emploi de plus de deux mesures simultanément entraîne un trop grand nombre de traitements qui nous obligerait à réduire le nombre de sites ou d'images employés.

	Homogénéité	Probabilité maximale	Énergie	Écart type	Contraste	Moyenne
Entropie	-0,66	-0,8	-0,84	0,54	0,43	0,68
Homogénéité		0,66	0,73	-0,51	-0,45	-0,74
Probabilité maximale			0,85	-0,42	-0,33	-0,59
Énergie				-0,41	-0,3	-0,57
Écart type					0,95	0,82
Contraste						0,79

Tableau XIX- Corrélation entre les images des sept mesures de texture calculées sur l'image du 21 juillet 1999 du site de Deux-Montagnes.

Nous avons vu précédemment que les mesures les plus prometteuses sont le contraste et l'écart type, mais on observe une corrélation de 0,95 entre elles, ce qui montre qu'on peut n'en choisir qu'une comme mesure primaire. Puisque les deux donnent des résultats assez similaires, nous choisissons le contraste car les valeurs obtenues s'étendent dans une large

gamme. La moyenne est assez fortement corrélée avec le contraste (0,79) et elle sera donc ignorée. Les mesures les moins corrélées avec le contraste sont l'énergie (-0,3), la probabilité maximum (-0,33), l'entropie (0,43) et l'homogénéité (-0,45). Les résultats obtenus aux deux sites testés montrent que l'homogénéité et la probabilité maximum présentent peu d'intérêt. L'énergie et l'entropie donnent des résultats assez similaires. Toutefois, nous avons vu à la section précédente que les valeurs d'énergie sont incluses dans une gamme très faible. Nous avons donc décidé de retenir l'entropie comme seconde mesure pour procéder à la validation de l'ensemble des 5 sites.

4.4- Validation aux 5 sites

L'algorithme TEXEL a été appliqué à toutes les images disponibles pour obtenir le contraste et l'entropie à partir de fenêtres de 11 par 11 pixels et un pas d'échantillonnage de un pixel dans la direction horizontale. La procédure itérative de seuillage nous a permis de trouver les meilleurs résultats en termes de fausses alarmes obtenues à 5% et 10% d'omission (Tableau XX).

Les meilleurs résultats ont été obtenus au site de l'est de l'île de Montréal caractérisé par un relief très plat et où les espaces vacants contiennent très peu de boisés. Le site qui présente les moins bons résultats est celui de Deux-Montagnes où le relief variable est parfois prononcé et de nombreux boisés et friches occupent des espaces vacants de grande taille en quelques occasions. Pour les sites de l'ouest de l'île de Montréal et de Deux-Montagnes, l'image du 14 septembre qui correspondait à une journée pluvieuse donne des taux très élevés de fausses alarmes, autant à 5% qu'à 10% d'omission. Cette tendance s'observe aussi dans une moindre mesure au site de Châteauguay et de l'est de l'île de Montréal. Les précipitations moindres du 4 août semblent quand même avoir eu un effet perturbateur pour les sites de Deux-Montagnes et de l'ouest de l'île de Montréal. Ces problèmes sont très probablement dus à l'augmentation de la constante diélectrique des objets lorsqu'ils sont mouillés. Bien que cet effet soit moins marqué pour un site fortement urbanisé comme celui de l'est de l'île de Montréal, il semble qu'il faille éviter d'employer des images acquises les journées de pluie.

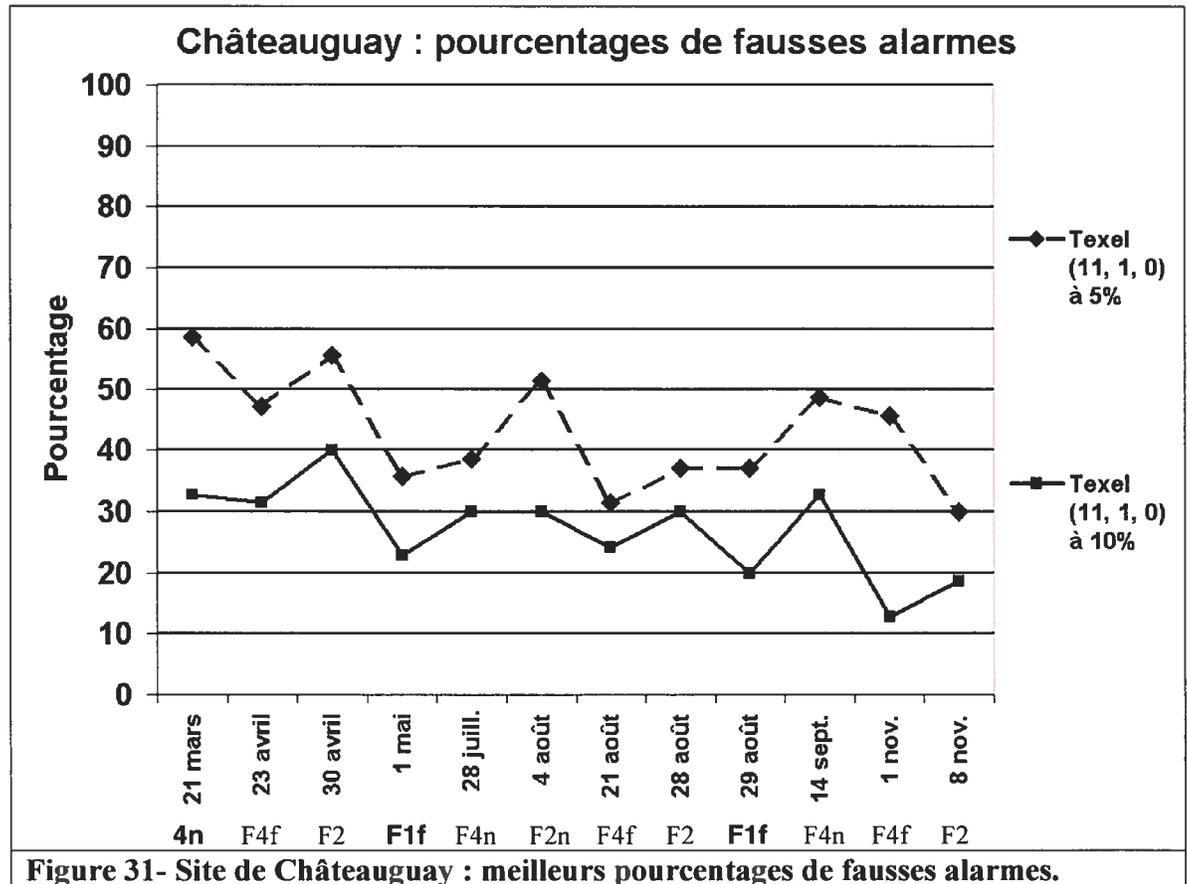
	Château.		Deux-Mont.		Est de l'île		Lachenaie		Ouest de l'île	
	à 5%	à 10%	à 5%	à 10%	à 5%	à 10%	à 5%	à 10%	à 5%	à 10%
21 mars F4n_D	58,6%	32,9%	52,9%	35,3%	22,6%	16,1%			57,1%	42,9%
23 avril F4f_A	47,1%	31,4%			12,9%	3,2%	36,0%	32,0%		
30 avril F2_A	55,7%	45,7%			19,4%	12,9%			66,7%	23,8%
1 mai F1f_D	35,7%	22,9%			16,1%	6,5%				
21 juill. F5f_A			42,4%							
28 juill. F4n_A	38,6%	30,0%		27,1%					33,3%	28,6%
4 août F2n_A	51,4%	30,0%	58,8%	43,5%	6,5%	6,5%	32,0%	28,0%	61,9%	33,3%
12 août F4n_D			48,2%	30,6%	22,6%	12,9%	28,0%	16,0%	28,6%	23,8%
21 août F4f_A	31,4%	24,3%			29,0%	19,4%	32,0%	20,0%	52,4%	28,6%
28 août F2_A	37,1%	30,0%			9,7%	3,2%	52,0%	32,0%	61,9%	14,3%
29 août F1f_D	37,1%	20,0%			6,5%	3,2%	36,0%	20,0%		
14 sept. F4n_A	48,6%	32,9%	67,1%	48,2%	29,0%	12,9%			71,4%	61,9%
1 nov. F4f_A	45,7%	12,9%			22,6%	19,4%	40,0%	28,0%		
8 nov. F2_A	30,0%	18,6%			16,1%	12,9%	32,0%	28,0%	57,1%	52,4%

Tableau XX- Résultats de validation aux cinq sites : meilleurs pourcentages de fausses alarmes trouvés avec le contraste et l'entropie.

Les valeurs en caractères gras représentent les meilleurs scores pour chaque site.

4.4.1- Le site de Châteauguay

Les résultats du site de Châteauguay sont montrés à la figure 31 et apparaissent triés en ordre croissant de fausses alarmes au tableau XXI.



Châteauguay			
5%		10%	
8 nov. F2_a	30,0%	1 nov. F4f a	12,9%
21 août F4f a	31,4%	8 nov. F2_a	18,6%
1 mai F1f d	35,7%	29 août F1f d	20,0%
28 août F2 a	37,1%	1 mai F1f d	22,9%
29 août F1f d	37,1%	21 août F4f a	24,3%
28 juill. F4n a	38,6%	28 juill. F4n a	30,0%
1 nov. F4f a	45,7%	4 août F2n a	30,0%
23 avril F4f a	47,1%	28 août F2 a	30,0%
14 sept. F4n a	48,6%	23 avril F4f a	31,4%
4 août F2n a	51,4%	21 mars F4n d	32,9%
30 avril F2 a	55,7%	14 sept. F4n a	32,9%
21 mars F4n d	58,6%	30 avril F2 a	40,0%

Tableau XXI- Site de Châteauguay : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.

Les couleurs jaune, vert, rouge et bleu correspondent respectivement aux images acquises au printemps, en été, en automne et en hiver. Les caractères gras indiquent les images acquises en orbite descendante.

Les images des mois de mars, avril et septembre sont celles qui donnent le plus de fausses alarmes, surtout en milieu humide près du lac Saint-Louis. Cela s'explique du fait que ces surfaces sont lisses, soit parce qu'elles sont gelées (21 mars) imbibées d'eau de fonte au printemps (23 et 30 avril) ou trempées par les précipitations (14 septembre). Dans ce cas, les moindres aspérités, comme les troncs d'arbres ou la végétation marécageuse (joncs, quenouilles, herbes, etc.), retournent fortement le signal au capteur. La seule exception est l'image du 1^{er} mai qui montre un taux de fausses alarmes beaucoup plus faible comparativement à l'image acquise la journée précédente. Dans ce cas, deux phénomènes peuvent expliquer ces résultats : 1) Contrairement aux autres images, il s'agit d'une image acquise en orbite descendante et la majorité des nouveaux quartiers se situent à l'est de la rivière. Puisque leurs rues sont orientées presque directement selon la trajectoire du satellite ou perpendiculairement, les nouveaux bâtiments sont très visibles sur l'image en orbite descendante et les valeurs des mesures d'entropie et de contraste sont élevées. Lors de l'application de la procédure de validation, l'augmentation des seuils des mesures entraîne normalement une augmentation des omissions ainsi qu'une diminution des fausses alarmes. Toutefois, comme il y a plus de polygones favorablement orientés, l'augmentation de la valeur des seuils entraîne une diminution des fausses alarmes sans que les omissions augmentent de manière aussi marquée; 2) L'angle du faisceau de l'image du 1^{er} mai est plus près du nadir (F1f) et les aspérités doivent être plus élevées pour retourner le signal au capteur. La comparaison avec les résultats moins bons de l'image du 21 mars (F4n) semble confirmer ceci. Il faut toutefois demeurer prudent puisque le sol était gelé le 21 mars et il restait encore environ 1 cm de neige au sol.

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les images du mois de novembre et les images acquises durant l'été. Les images d'automne donnent les plus faibles taux de fausses alarmes à 10% d'omission. Il est probable que la chute des feuilles ait le double avantage d'offrir des branches dénudées, qui réfléchissent donc moins le signal radar qu'une canopée bien fournie, et que les feuilles au sol cachent partiellement certains endroits humides, à tout le moins s'il n'y a pas eu de précipitations récentes. La figure 32 illustre les problèmes que posent les milieux humides et les boisés selon les saisons d'acquisition.

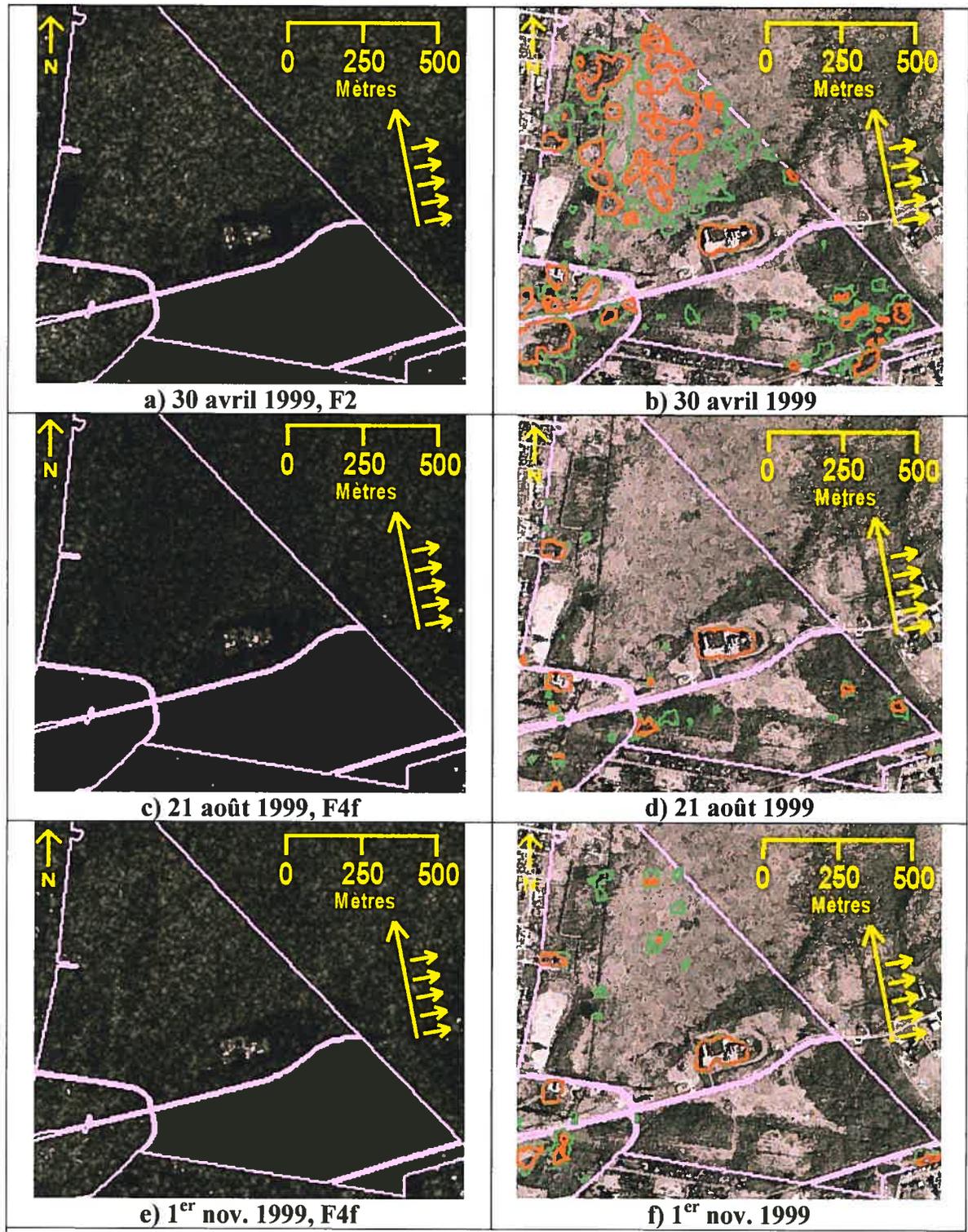


Figure 32- Les fausses alarmes en milieu humide et boisé au site de Châteauguay.

Images RADARSAT-1 et résultats du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) à 5% et 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours verts et rouges correspondent aux fausses alarmes à 5% et 10% d'omission respectivement.

Pour tous les exemples qui sont montrés, les contours des polygones vacants sont en rose et les détections pour des seuils correspondant à 5% et 10% d'omission sont en vert et en rouge respectivement. Les résultats obtenus pour les images du 30 avril, 21 août et 1^{er} novembre sont superposés à l'orthophotographie de référence. Les deux polygones montrés sont situés près de l'embouchure de la rivière Châteauguay au lac Saint-Louis. Le polygone de la moitié supérieure de l'image, d'une superficie de 0,72 km², est occupé par une station d'épuration d'une superficie d'environ 16 000 m². On note aussi la présence de trois maisons de type bungalow pour une superficie d'environ 4 500 m² à la limite du coté gauche à mi chemin vers le haut. Toutefois, la plus grande portion du polygone est vacante et on y observe des champs et des friches avec de la végétation arbustive. Le polygone du bas de l'image, d'une superficie d'environ 0,27 km² est entièrement vacant et contient des friches et des boisés. Les champs de ces deux polygones sont toujours très détremés au printemps après la fonte des neiges. Les résultats du 30 avril montrent un très grand nombre de fausses détections, surtout dans les champs mais aussi les boisés. L'image du 21 août ne donne presque plus de fausses alarmes, mais on peut observer de petites portions de boisé qui sont détectées comme des bâtiments. Pour l'image du 1^{er} novembre, on n'obtient aucune détection de boisé mais quelques fausses alarmes dans les champs. Il est à noter que dans tous les cas la station d'épuration et les trois maisons sont détectées correctement.

Contrairement aux milieux humides, il semble que les angles d'incidences plus près du nadir occasionnent plus de fausses détections en milieu forestier par rapport à des angles plus rasants. La figure 33 montre les résultats des seuillage à 5% et 10% d'omission pour deux images acquises à une semaine d'intervalle, donc au même stade de croissance de la forêt. L'image du 21 août acquise avec un faisceau F4f présente beaucoup moins de fausses alarmes que celle du 28 août acquise avec un faisceau F2 pour des taux identiques d'omission.

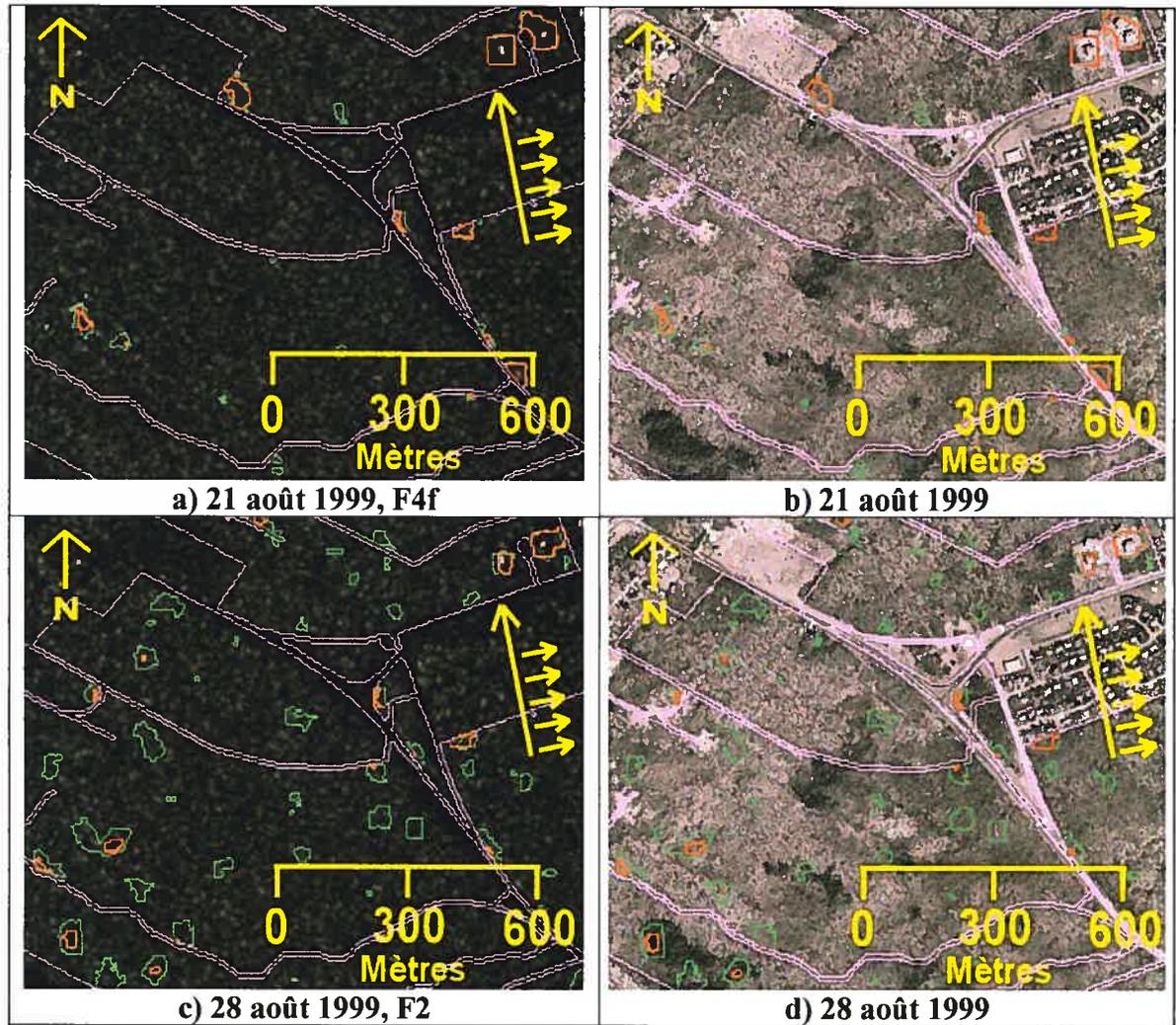


Figure 33- Les fausses alarmes et l'angle d'incidence en zones boisées au site de Châteauguay.

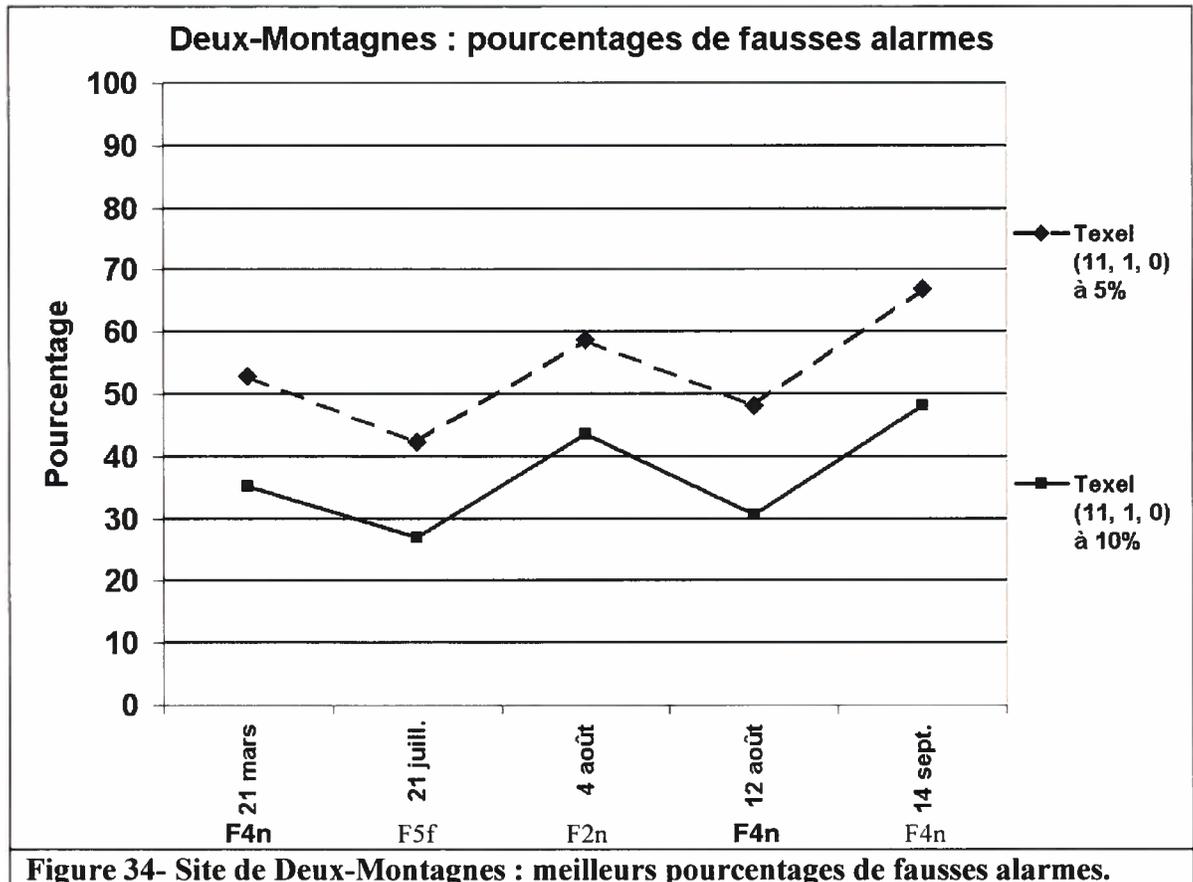
Images RADARSAT-1 et résultats du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) à 5% et 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours verts et rouges correspondent aux fausses alarmes à 5% et 10% d'omission respectivement.

4.4.2- Le site de Deux-Montagnes

Les résultats du site de Deux-Montagnes sont montrés à la figure 34 et apparaissent triés en ordre croissant de fausses alarmes au tableau XXII.

Deux des cinq images employées pour l'analyse de ce site ont été acquises alors qu'il pleuvait et présentent les taux de fausses alarmes les plus élevés. L'image acquise en hiver

donne aussi passablement de fausses alarmes à 5% et 10% d'omission avec des valeurs de 53% et 35% respectivement. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'image du 21 juillet, bien que le taux de fausses alarmes le plus bas soit quand même de 27% pour 10% d'omission.



Deux-Montagnes			
5%		10%	
21 juill. F5f a	42,4%	21 juill. F5f a	27,1%
12 août F4n d	48,2%	12 août F4n d	30,6%
21 mars F4n d	52,9%	21 mars F4n d	35,3%
4 août F2n a	58,8%	4 août F2n a	43,5%
14 sept. F4n a	67,1%	14 sept. F4n a	48,2%

Tableau XXII- Site de Deux-Montagnes : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.

Les couleurs vert et bleu correspondent respectivement aux images acquises en été et en hiver. Les caractères gras indiquent les images acquises en orbite descendante.

Le relief variable parfois assez prononcé entraîne plusieurs fausses alarmes inévitables. On observe ce phénomène près de la Trappe d'Oka, où certains polygones vacants possèdent un relief tellement accidenté que la carte topographique montre des points cotés plutôt que des isohypses afin de décrire la morphologie du terrain (figure 35).

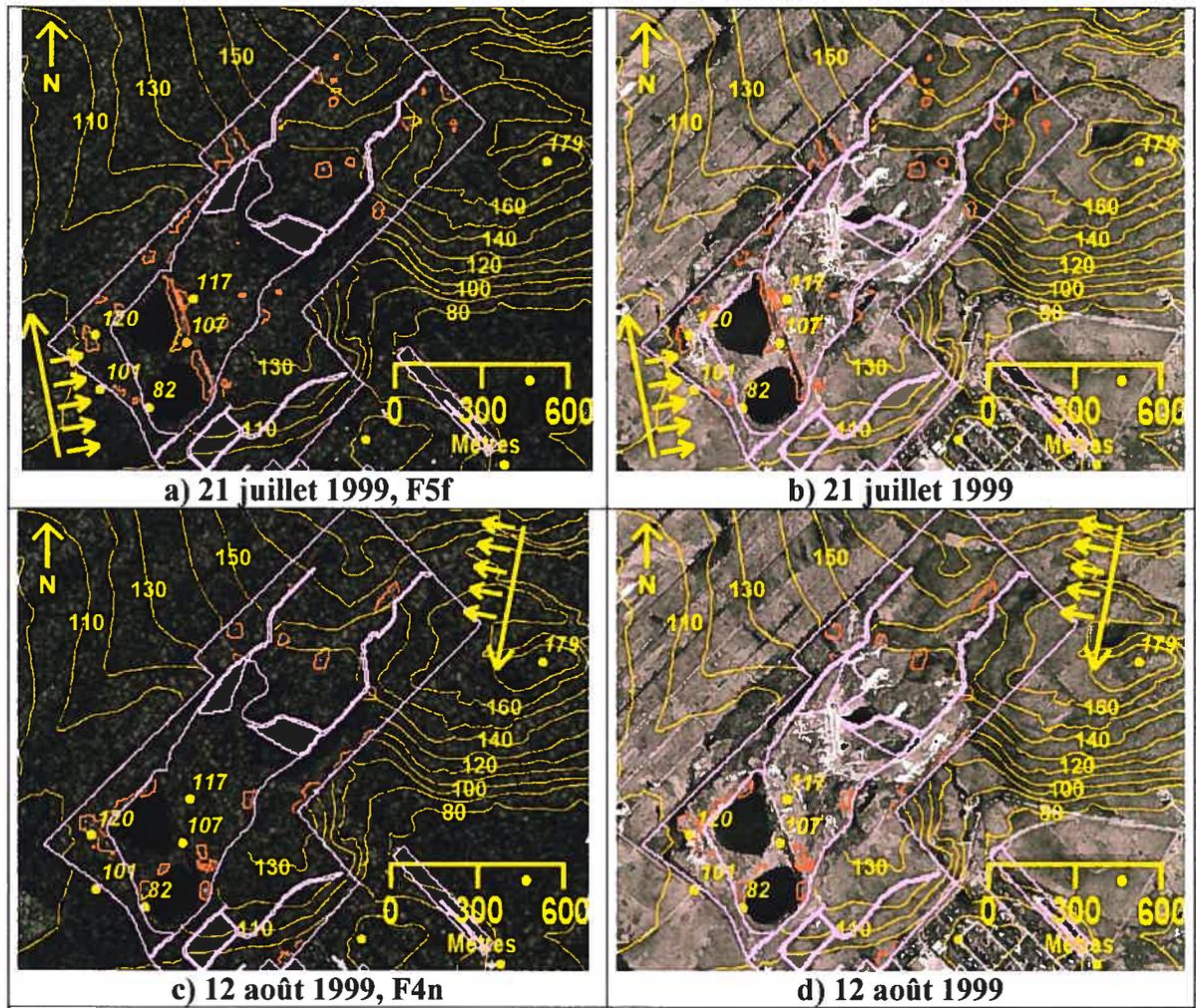


Figure 35- Les fausses alarmes dues aux effets de relief au site de Deux-Montagnes. Images RADARSAT-1 et résultats du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx=1$ et $dy=0$ pixel) à 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours rouges correspondent aux fausses alarmes à 10% d'omission. Les points cotés d'altitude sont notés en italique.

On note le grand nombre de fausses alarmes, autant pour l'image du 21 juillet en orbite ascendante que pour celle du 12 août en orbite descendante. On observe également les fausses alarmes en bordure des étendues d'eau, comme c'est le cas pour les deux petits lacs

ronds apparaissant en noir dans la portion gauche de l'image. Le signal radar est très bien réfléchi par les surfaces d'eau et rebondi ensuite sur les berges pour revenir au capteur.

Un autre problème constaté est l'omission des petits bâtiments isolés, tel qu'illustré à la figure 36. On observe un polygone d'une superficie de 2 750 m² où un petit bâtiment isolé d'environ 250 m² est très difficile à percevoir sur les images RADARSAT d'origine et n'est détecté par la méthode de seuillage que sur l'image du 21 mars acquise en orbite descendante. Sur l'image du 14 septembre, bien que la procédure identifie correctement le polygone comme étant changé, c'est plutôt un endroit vacant situé à 50 mètres de la maison qui est détecté. Deux facteurs semblent défavoriser la détection du bâtiment : cette maison est de petite taille et elle est éclairée en coin par le faisceau radar, autant en orbite ascendante que descendante. Il est probable que les surfaces glacées le 21 mars, entraînant plusieurs fausses alarmes ailleurs, aient favorisé la détection dans ce cas précis.

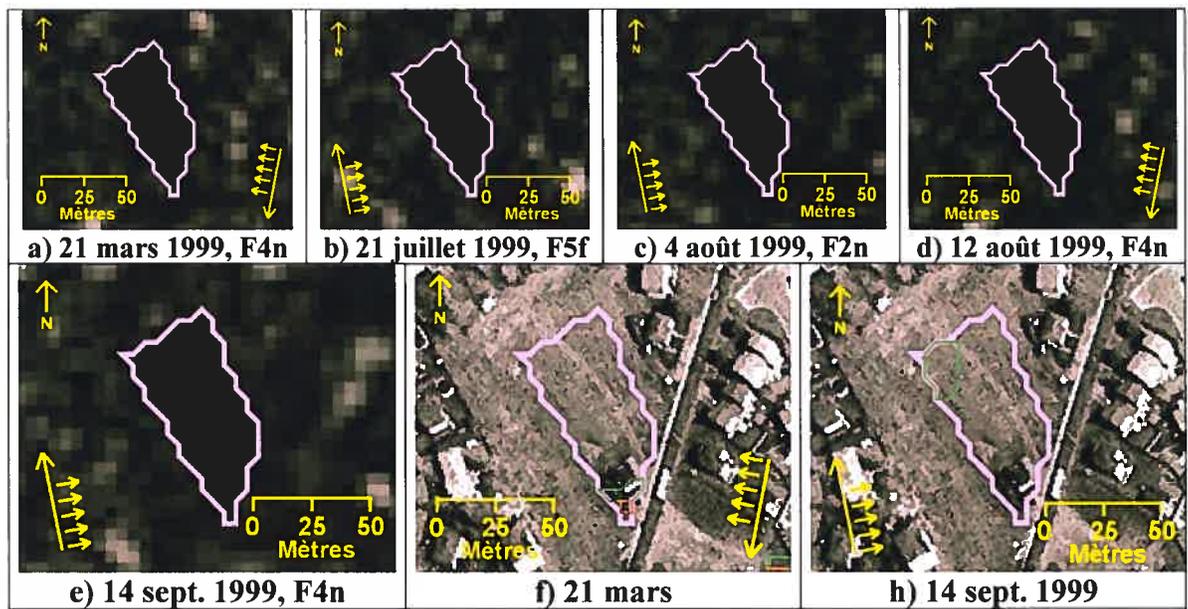


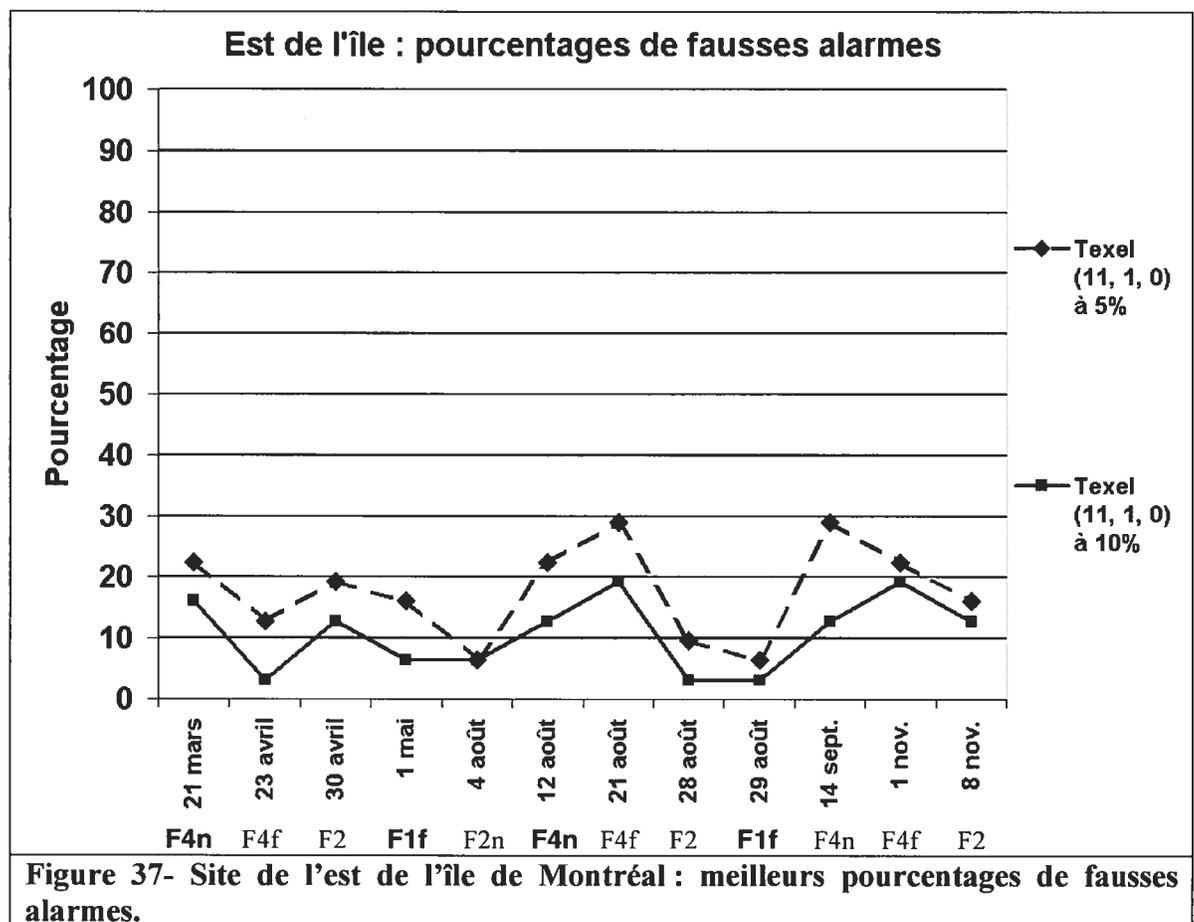
Figure 36- Omission des petits bâtiments isolés au site de Deux-Montagnes.

Images RADARSAT-1 et résultats du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) à 5% et 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours verts et rouges correspondent aux fausses alarmes à 5% et 10% d'omission respectivement.

4.4.3- Le site de l'est de l'île de Montréal

Les résultats du site de l'est de l'île de Montréal sont montrés à la figure 37 et apparaissent triés en ordre croissant de fausses alarmes au tableau XXIII.

Ce site montre les meilleurs résultats parmi tous les sites examinés. Il semble que dans ce milieu très fortement urbanisé, l'effet de la saison d'acquisition ait beaucoup moins d'influence. Pour un taux de 10% d'omission, les images du 23 avril, 28 et 29 août donnent toutes trois un taux de fausses alarmes aussi bas que 3%.



À l'exception de l'image du 23 avril, il semble que les faisceaux dont l'angle d'incidence est plus grand occasionnent plus de fausses alarmes dans ce milieu que les faisceaux dont la visée s'approche du nadir. Toutefois, l'examen des résultats pour les douze images disponibles montre une constance remarquable pour certains quartiers, et ce quels que soient la saison d'acquisition, l'orbite ou le faisceau employé. La figure 38 montre

l'orthophotographie pour une portion contenant plusieurs dizaines de nouveaux bâtiments. Le résultat du seuillage des images de texture est montré à la figure 39. On note que dans beaucoup de cas les contours pour 5% et 10% se confondent et englobent presque tous les nouveaux bâtiments.

Est de l'île de Montréal			
5%		10%	
4 août F2n a	6,5%	29 avril F4f a	3,2%
29 août F1f d	6,5%	28 août F2 a	3,2%
28 août F2 a	9,7%	29 août F1f d	3,2%
23 avril F4f a	12,9%	1 mai F1f d	6,5%
1 mai F1f d	18,1%	4 août F2n a	6,5%
8 nov. F2 a	16,1%	30 avril F2 a	12,9%
30 avril F2 a	19,4%	12 août F4n d	12,9%
21 mars F4n d	22,6%	14 sept. F4n a	12,9%
12 août F4n d	22,6%	8 nov. F2 a	12,9%
1 nov. F4f a	22,6%	21 mars F4n d	16,1%
21 août F4f a	29,0%	21 août F4f a	19,4%
14 sept. F4n a	29,0%	1 nov. F4f a	19,4%

Tableau XXIII- Site de l'est de l'île de Montréal : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.

Les couleurs jaune, vert, rouge et bleu correspondent respectivement aux images acquises au printemps, en été, en automne et en hiver. Les caractères gras indiquent les images acquises en orbite descendante.



Figure 38- Constance des détections en milieu fortement urbanisé au site de l'est de l'île de Montréal: orthophotographie de référence.

Les contours en rose indiquent les polygones vacants.

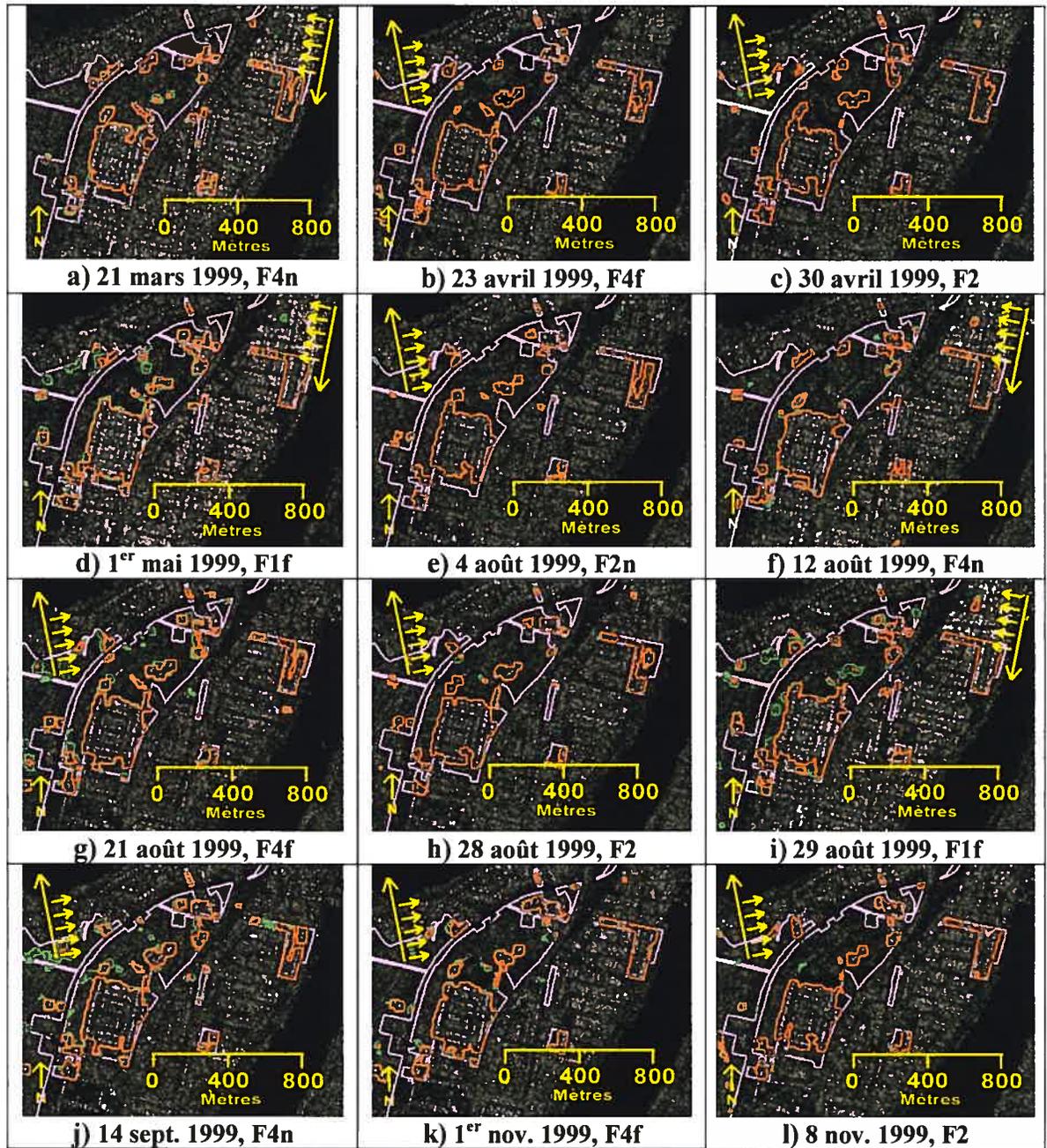
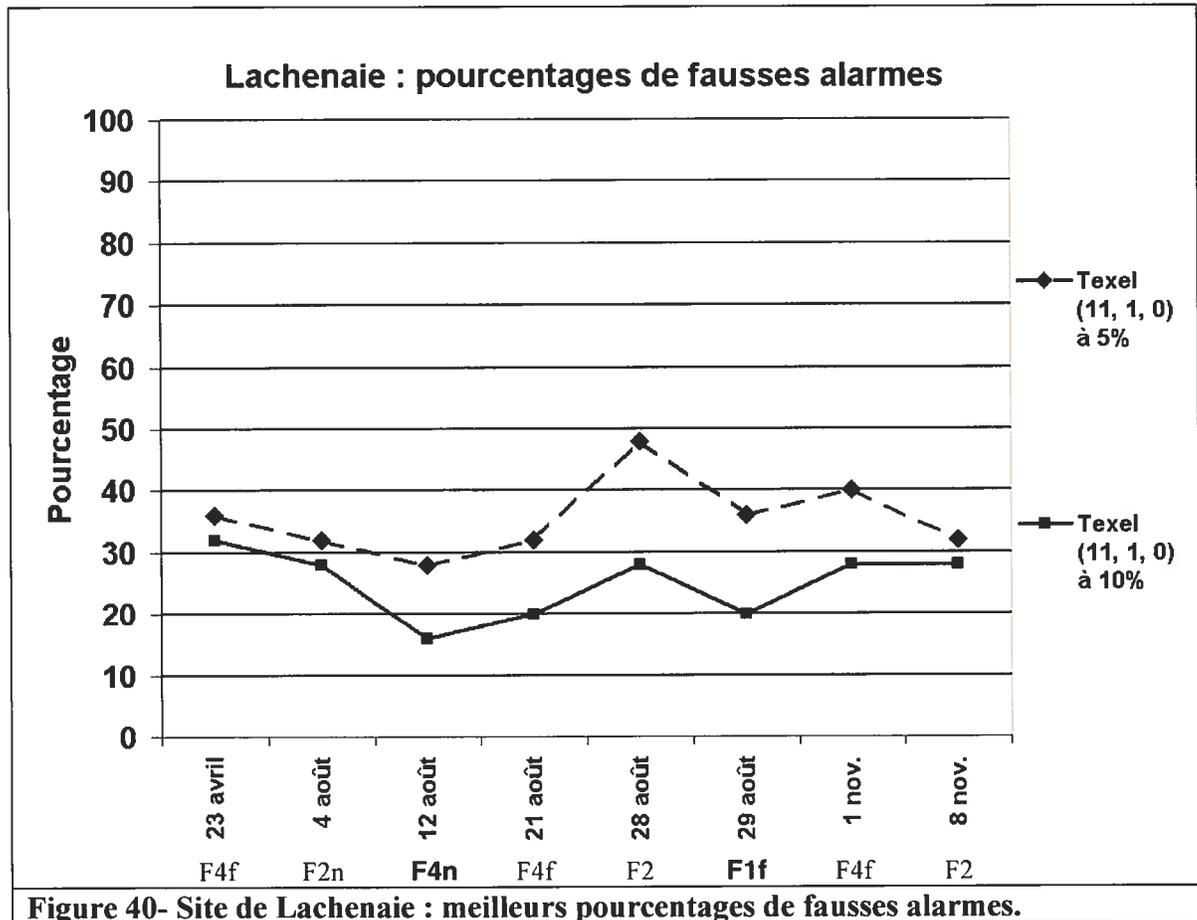


Figure 39- Constance des détections en milieu fortement urbanisé au site de l'est de l'île de Montréal.

Résultats du seuillage des images de texture pour 5% et 10% d'omission superposé aux images RADARSAT-1. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours verts et rouges correspondent aux fausses alarmes à 5% et 10% d'omission respectivement.

4.4.4- Le site de Lachenaie

Les résultats du site de Lachenaie sont montrés à la figure 40 et apparaissent triés en ordre croissant de fausses alarmes au tableau XXIV.



Lachenaie			
5%		10%	
12 août F4n d	28,0%	12 août F4n d	16,0%
4 août F2n a	32,0%	21 août F4f a	20,0%
21 août F4f a	32,0%	29 août F1f d	20,0%
8 nov. F2 a	32,0%	4 août F2n a	28,0%
23 avril F4f a	36,0%	1 nov. F4f a	28,0%
29 août F1f d	36,0%	8 nov. F2 a	28,0%
1 nov. F4f a	40,0%	28 août F2 a	28,0%
28 août F2 a	48,0%	23 avril F4f a	32,0%

Tableau XXIV- Site de Lachenaie : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.

Les couleurs jaune, vert et rouge correspondent respectivement aux images acquises au printemps, en été et en automne. Les caractères gras indiquent les images acquises en orbite descendante.

Les images en orbite descendante présentent des résultats légèrement meilleurs puisque les nouveaux bâtiments sont mieux orientés pour cette orbite. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les images d'été à l'exception du 28 août où l'angle d'incidence est plus près du nadir (F2). D'ailleurs, l'image du 29 août acquise aussi avec un angle faible (F1f) donne de moins bons résultats que celle du 12 août malgré l'orbite descendante. Ce site comporte un relief modérément variable avec plusieurs ruisseaux et les images acquises avec des angles faibles sont plus sensibles à ces variations. On note aussi quelques problèmes à l'orée des boisés denses où la forte rétrodiffusion au capteur crée des fausses alarmes. Ceci est d'autant marqué si le sol avoisinant est lisse et favorise la réflexion en coin. La figure 41 montre un tel cas où une zone boisée longe une route. Plusieurs fausses détections ont été obtenues en bordure de polygones de ce type.

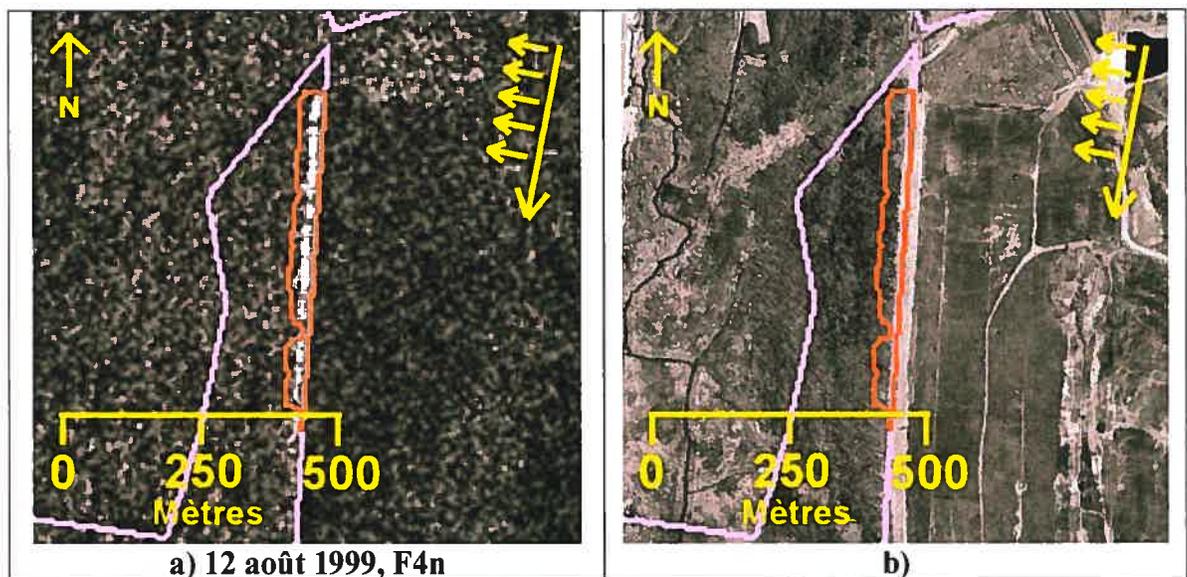
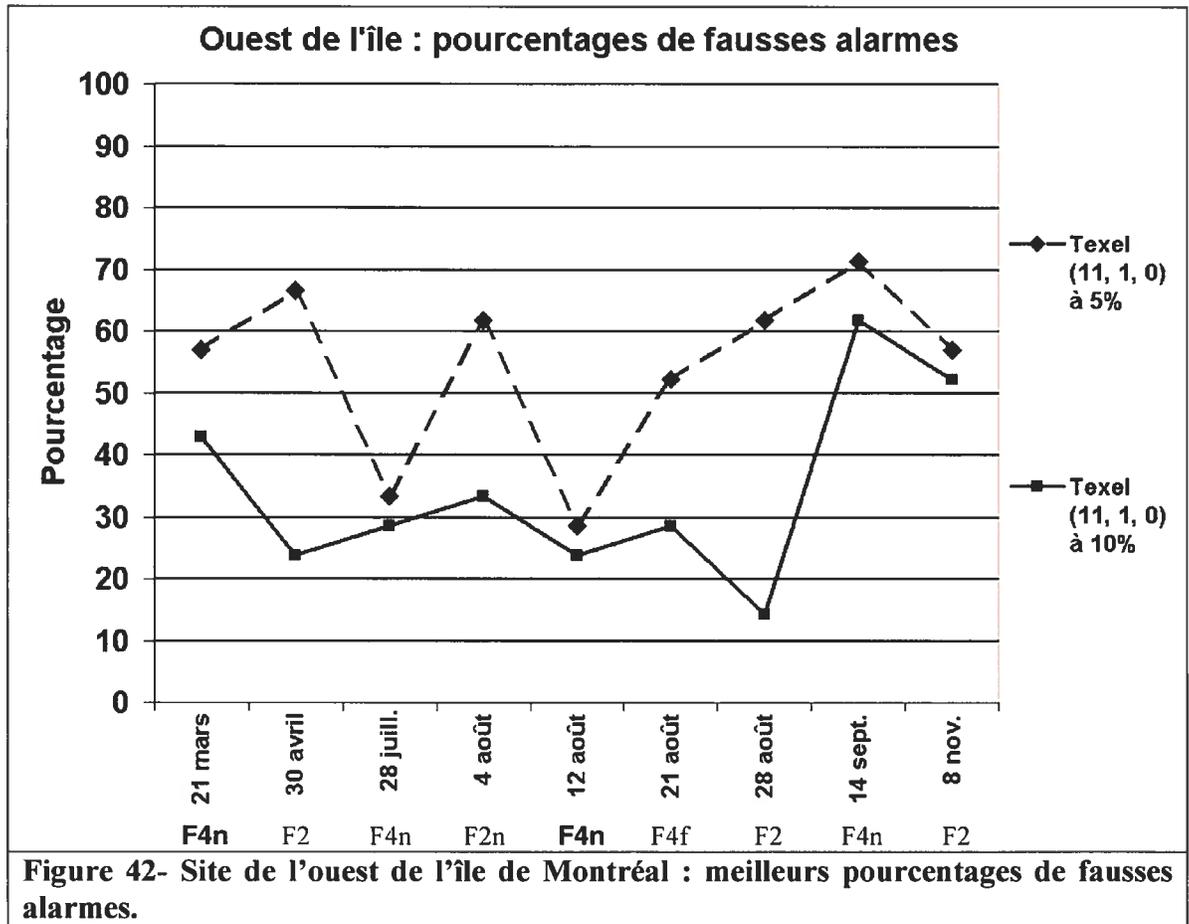


Figure 41- Fausses alarmes en bordure des boisés denses au site de Lachenaie.
Image RADARSAT-1 et résultat du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) à 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours rouges correspondent aux fausses alarmes à 10% d'omission.

4.4.5- Le site de l'ouest de l'île de Montréal

Les résultats du site de l'ouest de l'île de Montréal sont montrés à la figure 42 et apparaissent triés en ordre croissant de fausses alarmes au tableau XXV.



Ouest de l'île de Montréal			
5%		10%	
12 août F4n d	28,6%	28 août F2 a	14,3%
28 juill. F4n a	33,3%	30 avril F2 a	23,8%
21 août F4f a	52,4%	12 août F4n d	23,8%
21 mars F4n d	57,1%	28 juill. F4n a	28,6%
8 nov. F2 a	57,1%	21 août F4f a	28,6%
4 août F2n a	61,9%	4 août F2n a	33,3%
28 août F2 a	61,9%	21 mars F4n d	42,9%
30 avril F2 a	66,7%	8 nov. F2 a	52,4%
14 sept. F4n a	71,4%	14 sept. F4n a	61,9%

Tableau XXV- Site de l'ouest de l'île de Montréal : meilleurs résultats en ordre croissant de fausses alarmes.

Les couleurs jaune, vert, rouge et bleu correspondent respectivement aux images acquises au printemps, en été, en automne et en hiver. Les caractères gras indiquent les images acquises en orbite descendante.

Ce site montre des résultats très variables, surtout pour les détections à 5% d'omission. Les images acquises alors que le sol était mouillé (30 avril, 4 août et 14 septembre) donnent des taux de fausses alarmes extrêmement élevés à 5% d'omission. À 10% d'omission, l'image

du 14 septembre donne le pire résultat de tous les sites, avec plus de 60% de fausses alarmes. Plusieurs des problèmes déjà évoqués sont observables à ce site. Ainsi, des fausses détections dues au relief sont présentes dans des polygones vacants voisins de la carrière Pierrefonds.

On remarque quelques cas où les erreurs dans les limites des polygones sur la carte entraînent des omissions selon le faisceau employé. La figure 43 montre un cas où plusieurs conditions défavorables sont réunies : les bâtiments sont de petites tailles, éclairés en coin et le polygone d'analyse est allongé et très mince ce qui donne très peu de paires pour les calculs de texture. De plus, ce sont les cours arrière qui constituent l'espace vacant examiné et il semble que c'est la présence d'une piscine hors-terre qui apparaît aussi brillante qu'un bâtiment sur l'image du 21 mars. Les polygones de ce type devraient au moins être signalés à l'aide d'une mesure morphométrique descriptive afin de les examiner manuellement plutôt que par l'emploi de mesures de texture. Le nombre faible de tels cas justifierait cette approche.

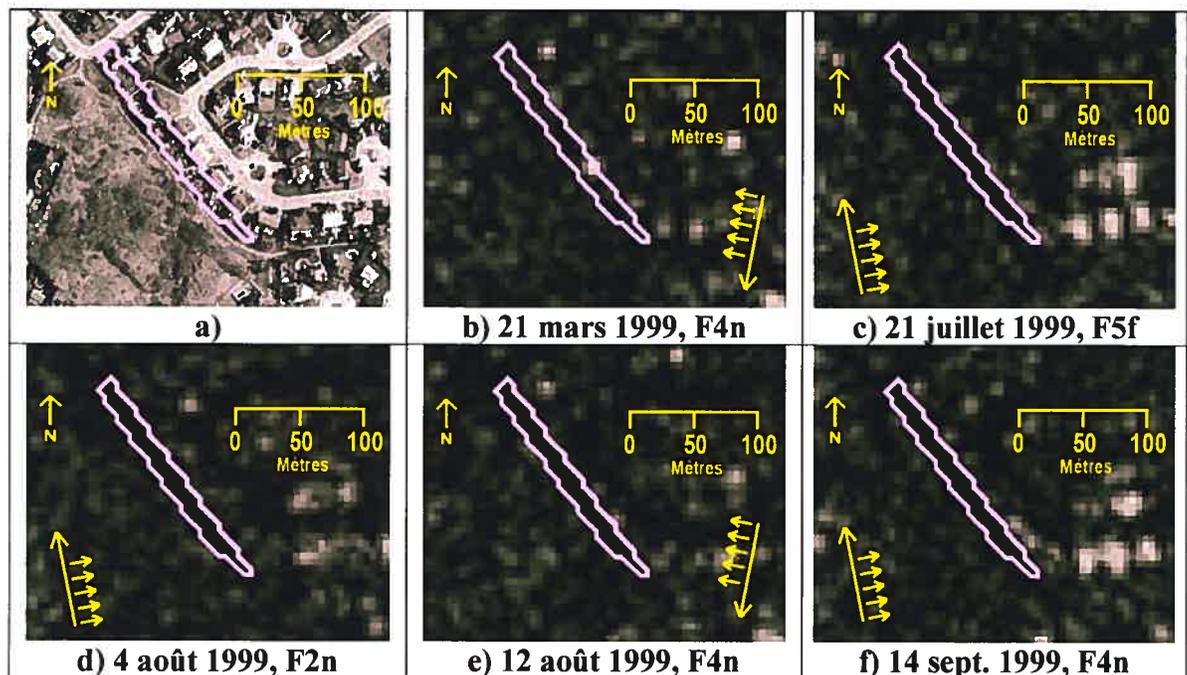
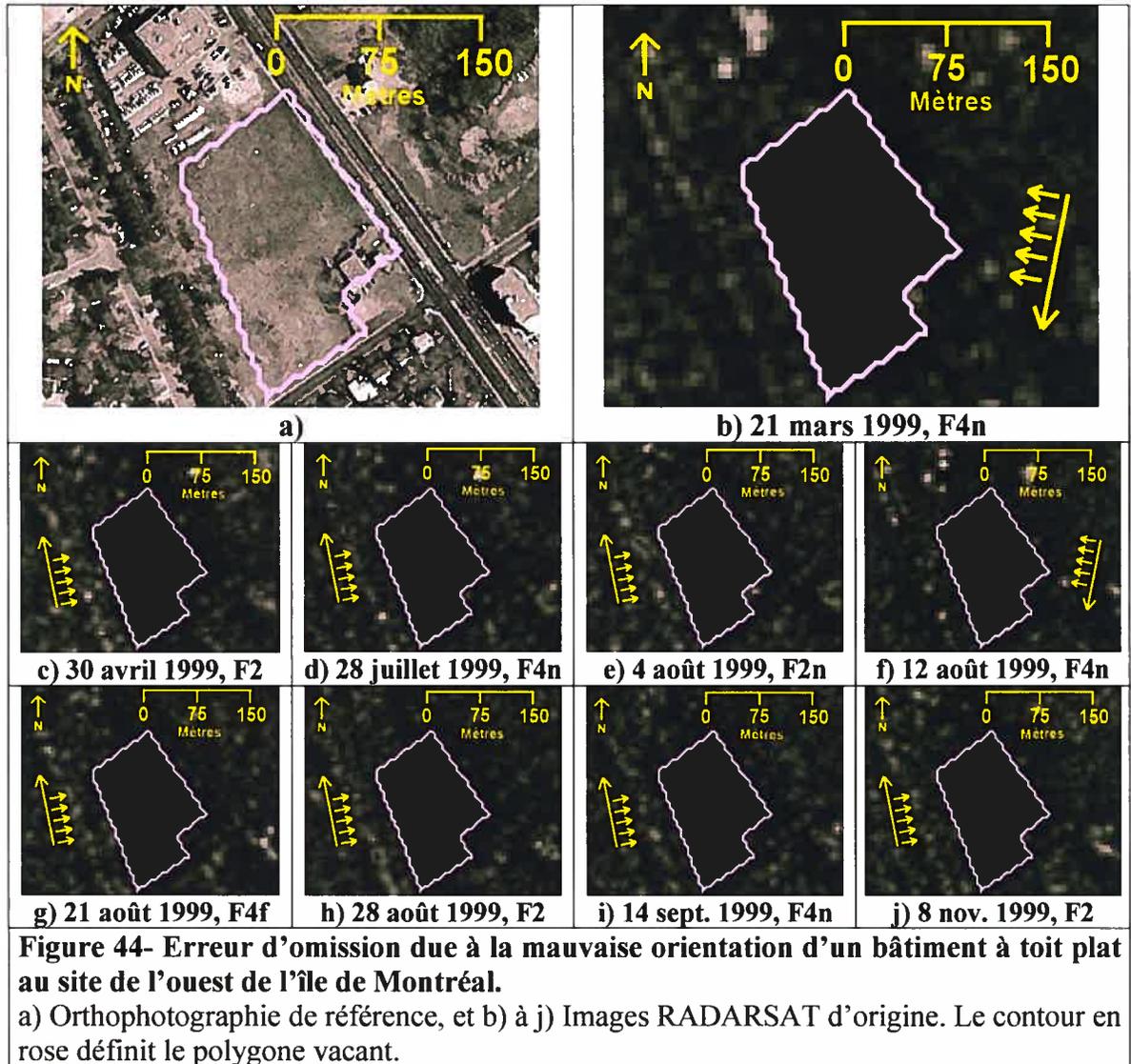


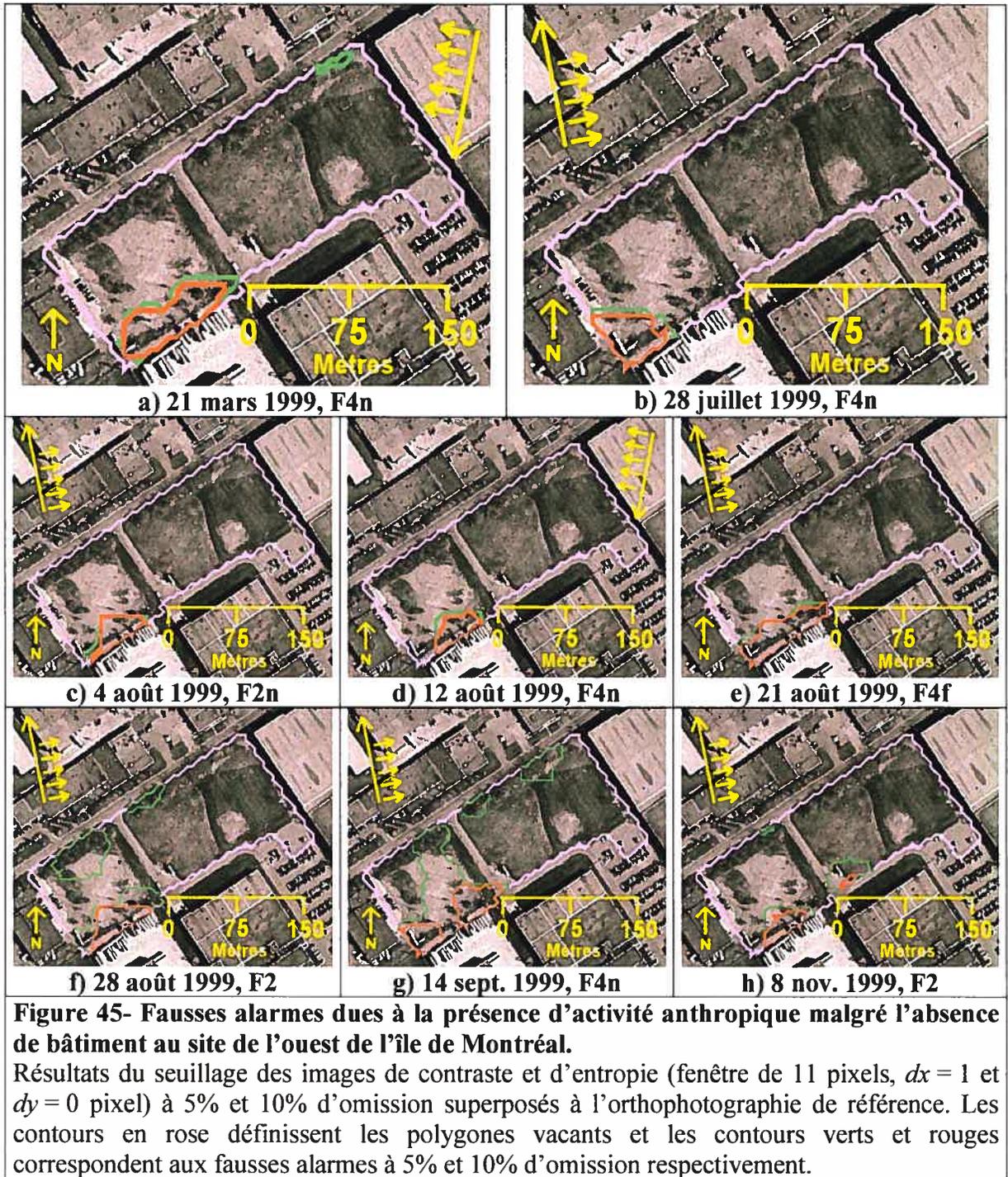
Figure 43- Erreur d'omission due au mauvais découpage de l'espace au site de l'ouest de l'île de Montréal.

a) Orthophotographie de référence, et b) à f) Images RADARSAT-1. Le contour en rose définit le polygone vacant.

L'orientation des rues du site de l'ouest de l'île pose un sérieux problème pour la détection de plusieurs bâtiments, et la tâche se complique davantage selon leur forme. La figure 44 montre un bâtiment à toit plat d'une taille comparable à une résidence unifamiliale et qui est complètement invisible sur toutes les images.



Nous avons pu noter des fausses alarmes dues à la présence d'activités anthropiques malgré l'absence de construction. La figure 45 montre un tel cas où l'on obtient des détections sur toutes les images. L'examen de l'orthophotographie montre clairement que l'industrie située sur le terrain voisin se sert de cet endroit comme aire de stationnement pour des voitures, des camions et remorques. Les conditions variables d'endroits de ce genre selon l'heure du jour feront qu'ils seront tantôt détectés comme étant vacant et tantôt comme étant occupé.



4.5- Potentiel de détection des bâtiments individuels

Nous avons vu que le site de Châteauguay présente des endroits où le réseau routier est orienté favorablement en relation avec la trace du satellite en orbite descendante. Il est donc

intéressant d'étudier les résultats sur la base de la détection des maisons individuelles d'un nouveau quartier où l'orientation est favorable ou non selon l'orbite du satellite. La figure 46 montre ce quartier résidentiel où les maisons ressortent extrêmement bien pour les images acquises en orbite descendante et beaucoup moins bien pour celles acquises en orbite ascendante. L'image du 28 août (F2) a été acquise en orbite ascendante et celle du 29 août (F1f) a été acquise douze heures plus tard en orbite descendante. Nous avons dénombré les maisons des polygones analysés en employant l'orthophotographie. Nous ne considérons que le seuillage correspondant à 10% d'omission pour ce test. Un bâtiment est détecté s'il est inclus, même partiellement, dans le contour obtenu du seuillage.

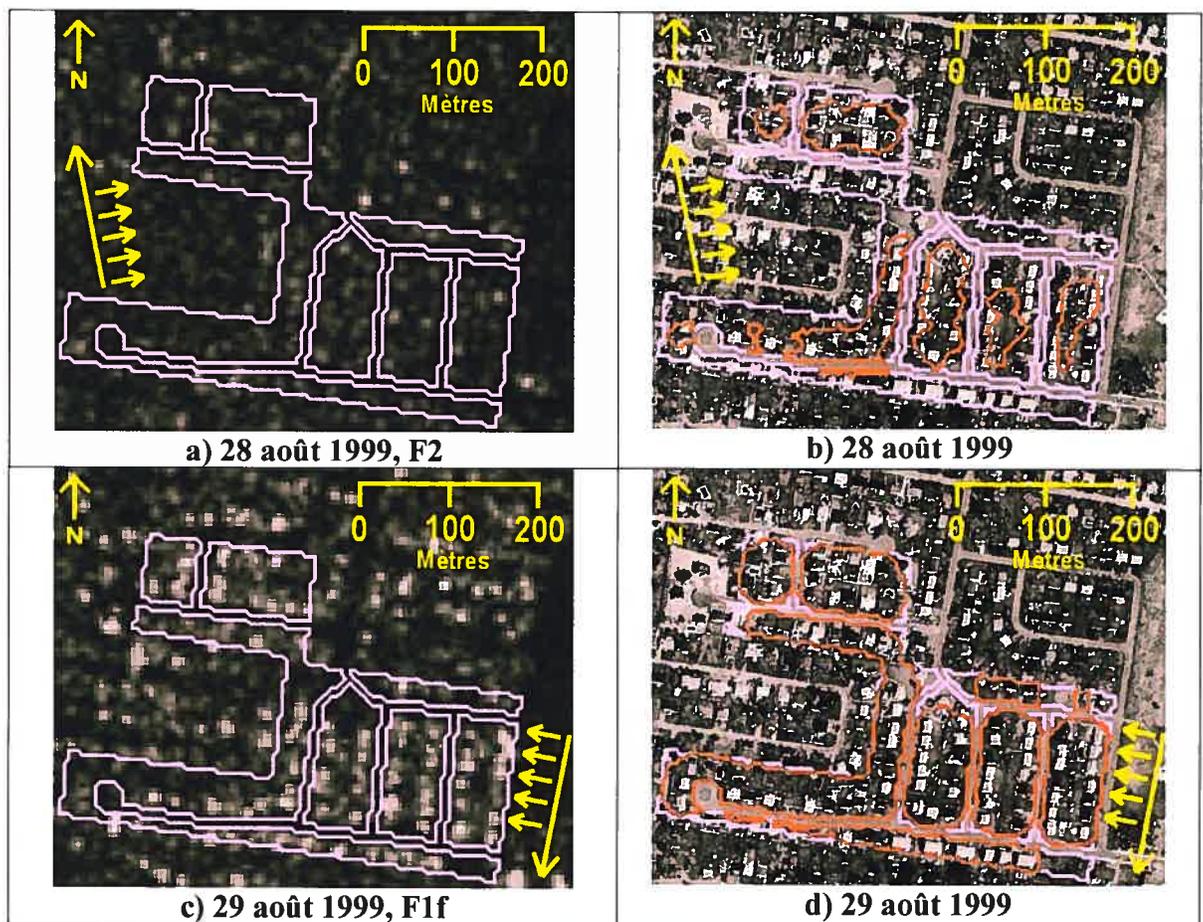


Figure 46- Détection individuelle des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale favorable ou non selon l'orbite au site de Châteauguay. Images RADARSAT-1 et résultats du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) à 5% et 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours verts et rouges correspondent aux fausses alarmes à 5% et 10% d'omission respectivement.

Les résultats montrent clairement que le nombre de petits bâtiments détectés dépend de l'orbite du satellite (Tableau XXVI). Lorsque l'orientation est favorable, on détecte les maisons individuelles presque parfaitement avec 107 bâtiments sur un total de 112. Toutefois, lorsque l'orientation n'est pas favorable on arrive à moins de 50% de détection des bâtiments individuels (54 maisons sur 112). Beaucoup d'omissions se produisent surtout là où les polygones vacants sont très étroits.

Numéro de polygone	Superficie (m ²)	Nombre de bâtiments	Bâtiments détectés en orbite ascendante (28 août, F2)	Bâtiments détectés en orbite descendante (29 août, F1f)
341	4 125	6	2	6
345	8 525	13	10	12
357	32 625	46	19	43
373	4 100	6	0	5
377	9 725	13	11	13
384	9 075	14	5	14
385	9 025	14	7	14
Total des bâtiments		112	54	107

Tableau XXVI- Résultats de la détection des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale favorable ou non selon l'orbite.

Un second test de détection individuelle des petits bâtiments a été effectué pour une zone où l'orientation des maisons est variable et ni l'une ou l'autre des orbites ne présente un avantage systématique. La figure 47 montre le résultat du seuillage superposé aux orthophotographies et le tableau XXVII donne les détections dans chaque polygone. Les résultats sont similaires pour les deux orbites, avec des pourcentages de détection autour de 60%.



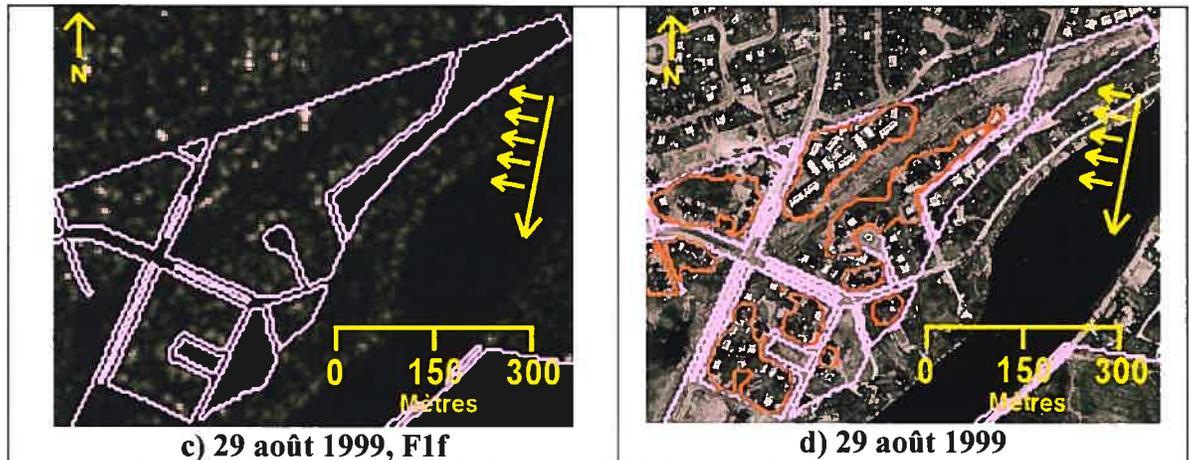


Figure 47- Détection des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale variables selon l'orbite au site de Châteauguay.

Images RADARSAT-1 et résultats du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx=1$ et $dy=0$ pixel) à 5% et 10% d'omission superposés à l'orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants et les contours verts et rouges correspondent aux fausses alarmes à 5% et 10% d'omission respectivement.

Numéro de polygone	Superficie (m ²)	Nombre de bâtiments	Bâtiments détectés en orbite ascendante (28 août, F2)	Bâtiments détectés en orbite descendante (29 août, F1f)
719	19 475	9	4	0
734	68 500	56	44	37
756	16 850	15	8	9
765	307 825	16	9	12
786	22 950	32	13	24
790	4 025	2	0	2
796	7 850	4	1	2
Total des bâtiments		134	79	86

Tableau XXVII- Résultats de la détection des petits bâtiments dans des conditions d'orientation spatiale variables.

4.6- Fusion des orbites ascendantes et descendantes

Compte tenu des résultats obtenus précédemment, nous avons examiné le potentiel pour la détection des changements en employant des images fusionnées d'orbites ascendante et descendante. La fusion des images a été effectuée par le calcul de la moyenne des valeurs pour chaque pixel. Bien que certains bâtiments de l'image résultante aient tendance à être un peu moins visibles, ceux qui n'étaient pas détectés dû à leur mauvaise orientation deviennent visibles dans plusieurs cas (Figure 48).

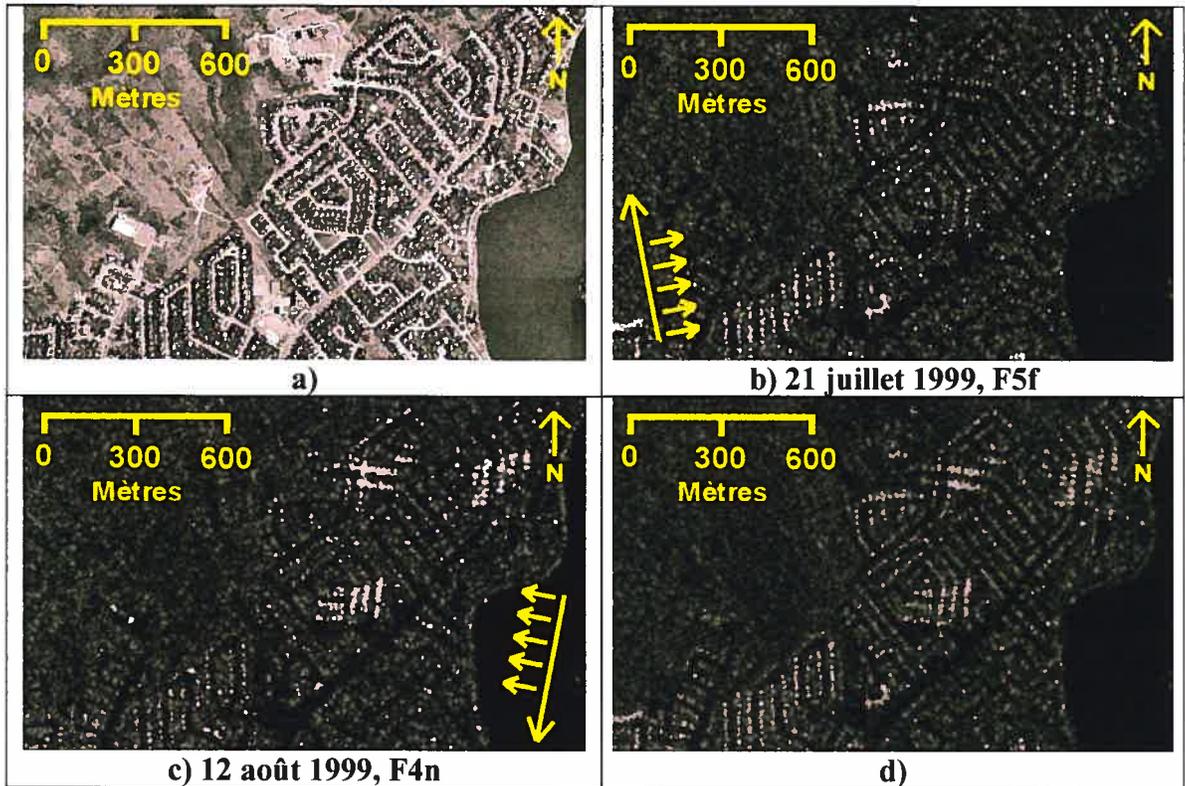


Figure 48- Fusion par moyenne d'images en orbite ascendante et descendante au site de Deux-Montagnes.

a) Orthophotographie de référence, b et c) Images RADARSAT-1 d'origine, et d) Image de fusion par moyenne des valeurs.

Des images fusionnées ont été produites pour chacun des 5 sites et traitées avec TEXEL en employant les mêmes paramètres que précédemment. Le tableau XXVIII fait état des résultats de la procédure de validation permettant de trouver les meilleurs taux de fausse alarme pour 5% et 10% d'omission comparés aux meilleurs résultats obtenus précédemment en employant une seule image.

Le test effectué avec la fusion par moyenne n'a pas permis d'améliorer les résultats pour les sites de Châteauguay et de l'est de l'île de Montréal. Toutefois, les trois autres sites ont bénéficiés de l'ajout de la fusion. Au site de Lachenaie, cette amélioration est modeste avec 2 polygones de fausse alarme en moins à 5% d'omission (28% à 20%) et 1 polygone en moins à 10% d'omission (16% à 12%). Les gains sont toutefois plus appréciables aux deux autres sites. Au site de l'ouest de l'île, on obtient 5 polygones de fausse alarme en moins à 5% d'omission (52,4% à 28,6%) et un polygone en moins à 10% (19% à 14,3%). Les meilleures améliorations sont constatées au site de Deux-Montagnes où l'on obtient 5

polygones de fausse alarme en moins à 5% d'omission (42,4% à 36,5%) et 11 polygones en moins à 10% d'omission (27,1% à 14,1%). Il ressort donc que les sites qui présentaient le plus de difficultés pour l'application de la méthode sont ceux qui bénéficient le plus de la fusion d'images.

	Château. à 5% à 10%	Deux-Mont. à 5% à 10%	Est de l'île à 5% à 10%	Lachenaie à 5% à 10%	Ouest de l'île à 5% à 10%
Images employées pour la fusion	29 août (F1f_d) 1 nov. (F4f_a)	21 juillet (F5f_a) 12 août ((F4n_d)	12 août (F4n_d) 21 août (F4f_a)	12 août (F4n_d) 21 août (F4f_a)	12 août (F4n_d) 21 août (F4f_a)
Résultats pour la moyenne des orbites ascendante et descendante	34,3% 20,0%	36,5% 14,1%	12,9% 3,2%	20,0% 12,0%	52,4% 19,0%
Meilleurs résultats obtenus précédemment avec une seule image	30,0% 12,9%	42,4% 27,1%	6,5% 3,2%	28,0% 16,0%	28,6% 14,3%

Tableau XXVIII- Résultats de validation aux 5 sites avec les images fusionnées.
Pourcentage des fausses alarmes les plus basses trouvées à 5% et 10% d'omission.

4.7-Conclusions globales sur la détection des changements

Tel que mentionné, les classes qui donnent le plus de fausses alarmes sont surtout les boisés, particulièrement lorsque le sol est humide. L'examen des valeurs moyennes de plusieurs zones bâties et boisées nous a montré que les deux mesures les plus appropriées pour minimiser les fausses alarmes sont le contraste et l'écart type. L'homogénéité et la moyenne montrent un certain potentiel, tout comme l'énergie, l'entropie et la probabilité maximum, mais toutes ces mesures éprouvent certaines faiblesses lorsque les bâtiments sont difficiles à distinguer sur l'image radar d'origine. Quand la taille des fenêtres est trop petite, la faible quantité d'échantillons peut donner des valeurs de texture peu représentatives. Lorsqu'elle est trop grande, les bâtiments ont une moins grande influence sur les valeurs en zone où la densité du bâti est plus faible. Une taille de 11 pixels nous a donc semblé un bon compromis pour le calcul des mesures de texture dans l'application de la méthode de validation. Cette méthode appliquée à chaque mesure prise individuellement confirme que le contraste et l'écart type sont les deux meilleures mesures. Viennent ensuite la moyenne, l'entropie, l'énergie, la probabilité maximale et l'homogénéité.

L'examen de la corrélation des sept mesures a rendu possible la sélection de deux d'entre elles pour leur emploi simultané dans l'application de la méthode de validation sur

l'ensemble des cinq sites. L'examen des images de contraste et d'écart type a montré qu'elles sont très fortement corrélées (0,95) et que l'une ou l'autre est suffisante. Le contraste est retenu pour les forts écarts observés entre les valeurs moyennes du bâti et des boisés. La deuxième mesure retenue est l'entropie qui a donné des résultats assez intéressants à l'évaluation des mesures individuelles et présente une faible corrélation avec le contraste (0,43).

La validation aux 5 sites fait ressortir les éléments suivants :

- 1) Les meilleurs résultats sont obtenus en milieu fortement urbanisé, tel le site de l'est de l'île de Montréal. Les bâtiments sont aisément détectés, quels que soient l'orbite du satellite, l'angle du faisceau ou la saison d'acquisition.
- 2) Les petits bâtiments isolés ou qui sont cachés dans l'ombre d'autres éléments (arbres ou autres bâtiments) sont parfois impossibles à détecter. Les petits polygones vacants peuvent aussi entraîner des omissions, surtout lorsqu'ils sont allongés et étroits.
- 3) L'orientation des bâtiments peut les rendre indétectables et la forme qu'ils possèdent amplifie parfois ce phénomène. Par exemple, certains bâtiments à toit plat éclairés directement sur un coin sont complètement invisibles même s'ils ne sont pas de petite taille. Le choix d'une orbite appropriée prend donc une certaine importance selon la trame locale du réseau routier. La fusion d'images en orbite ascendante et descendante peut aider à réduire les problèmes liés à l'orientation.
- 4) Les conditions météorologiques ont une certaine influence lors de l'acquisition des images radar. Bien que les nuages soient transparents au radar, il n'est pas entièrement vrai que le radar fonctionne toujours aussi bien en tout temps. La constante diélectrique des surfaces est directement reliée à la présence d'eau et une surface détrempée par la pluie possède une valeur diélectrique beaucoup plus élevée que d'ordinaire.
- 5) La saison d'acquisition peut jouer un grand rôle en frange urbaine où les conditions du milieu sont un facteur déterminant. Par exemple, les endroits humides ou inondés après la fonte des neiges produisent beaucoup de fausses alarmes. Selon les sites, les meilleurs résultats ont été obtenus en été ou à l'automne.
- 6) L'angle d'incidence du faisceau joue un rôle en zone boisée et on y observe plus de fausses alarmes avec des angles qui s'approchent du nadir. Des angles d'incidence

plus élevés (F4, F5) sont donc plus appropriés dans notre procédure de détection des bâtiments si l'on ne veut pas déclencher trop de fausses alarmes.

- 7) Les endroits où le relief est très prononcé produisent des fausses détections qui sont impossibles à éliminer. La carte topographique pourrait être employée pour signaler ces endroits afin d'y réduire les fausses alarmes.

L'examen de toutes les images analysées montre que la méthode de détection des changements localise rapidement les nouveaux bâtiments dans une bonne proportion selon les conditions d'acquisition. Dans des conditions optimales (milieu, orientation, saison, angle du faisceau) presque tous les nouveaux bâtiments d'un polygone sont détectés. Dans des conditions moins favorables, on arrive à en localiser environ 60%. Dans les pires conditions, aucun bâtiment n'est détecté ni n'est visuellement perceptible sur l'image d'origine. Ceci demeure toutefois très rare.

La méthode qui consiste à analyser l'espace par polygone et à signaler d'abord ceux qui sont modifiés pour ensuite localiser les nouveaux bâtiments à l'intérieur du polygone permet de détecter quand même les changements dans des conditions moins favorables. En effet, les résultats obtenus mettent en lumière l'avantage d'employer une méthode de détection qui attire l'attention de l'utilisateur sur les polygones entiers plutôt que sur les bâtiments individuels.

CHAPITRE 5- L'identification des changements

5.1- Introduction

Les tests d'identification des changements ont été effectués avec l'image du 30 avril qui a été acquise à une date très proche des orthophotographies de référence et qui couvrait l'ensemble de l'île de Montréal. Ce chapitre fait état des résultats de ces tests. Dans un premier temps, nous avons essayé de voir si la procédure d'identification des taxons proposée par Baudouin (1992) avec des images panchromatiques est applicable sur les images radar avec des statistiques de premier et de deuxième ordre. L'unité d'analyse est l'îlot urbain. Dans un second temps, nous effectuons des tests de séparabilité et classification des taxons sur la base du pixel.

5.2- Examen des valeurs par îlot d'occupation du sol

Comme statistiques de 1^{er} ordre, nous avons utilisé la moyenne et l'écart type des valeurs de niveau de gris de l'image pour les îlots retenus pour chaque taxon (Tableau XV, page 62).

5.2.1- Statistiques de premier ordre

Les figures 49 et 50 montrent les moyennes et les écarts types des îlots calculés à partir des niveaux de gris de l'image. Les résultats sont groupés sur quatre graphiques selon la similitude des fonctions d'occupation du sol. Les deux premiers groupes représentent des taxons caractérisés par la présence de bâtiments. Les classes résidentielles de faible, moyenne et forte densité, les commerces de détails et les édifices à bureaux constituent le premier groupe, dont la taille moyenne des îlots varie entre environ 8 000 à 14 000 m². Le deuxième groupe comprend les taxons : centre commercial, équipement collectif, industries légère et lourde et service d'utilité publique et les superficies moyennes sont comprises entre 16 000 à 34 000 m².

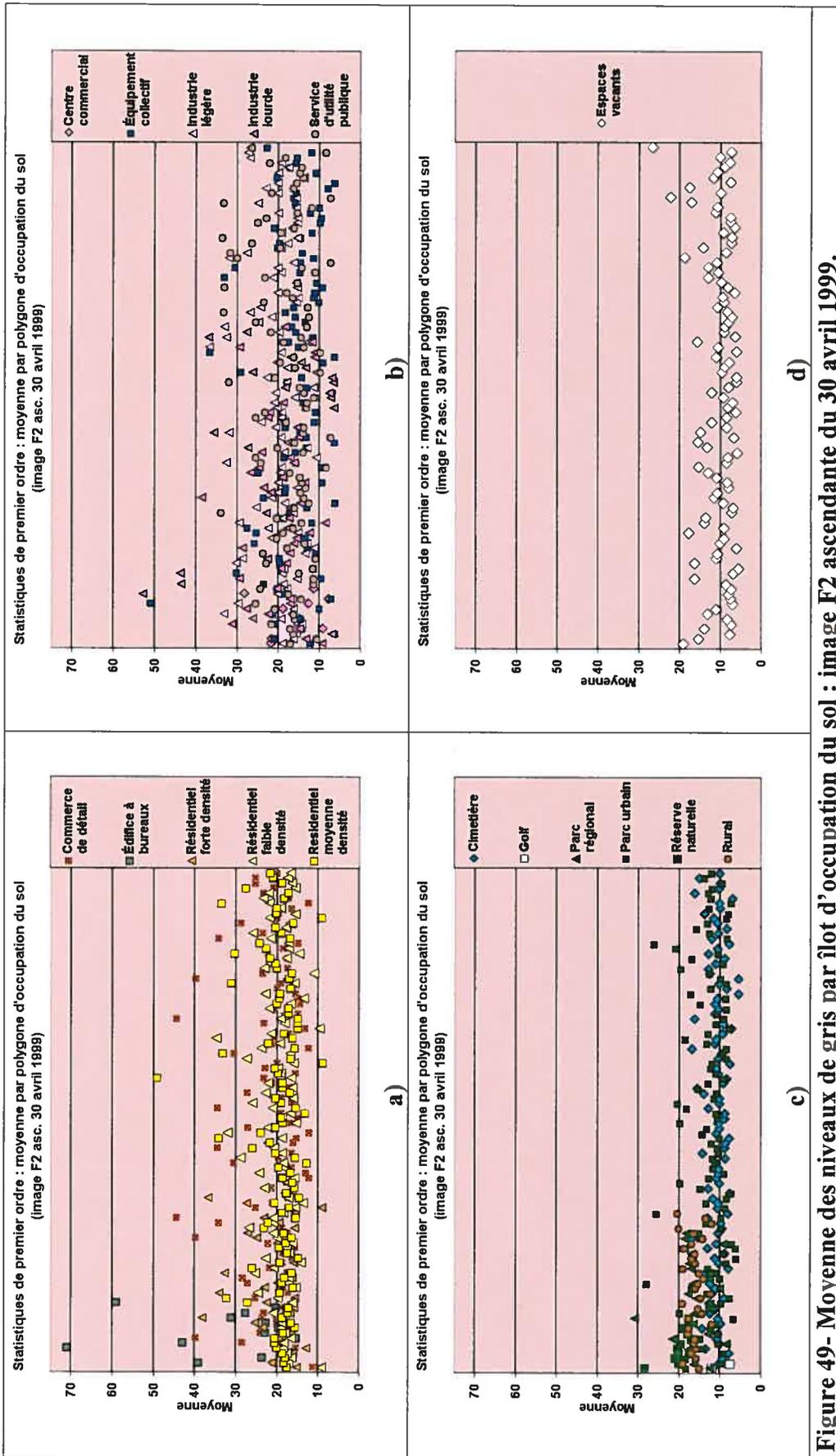


Figure 49- Moyenne des niveaux de gris par îlot d'occupation du sol : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

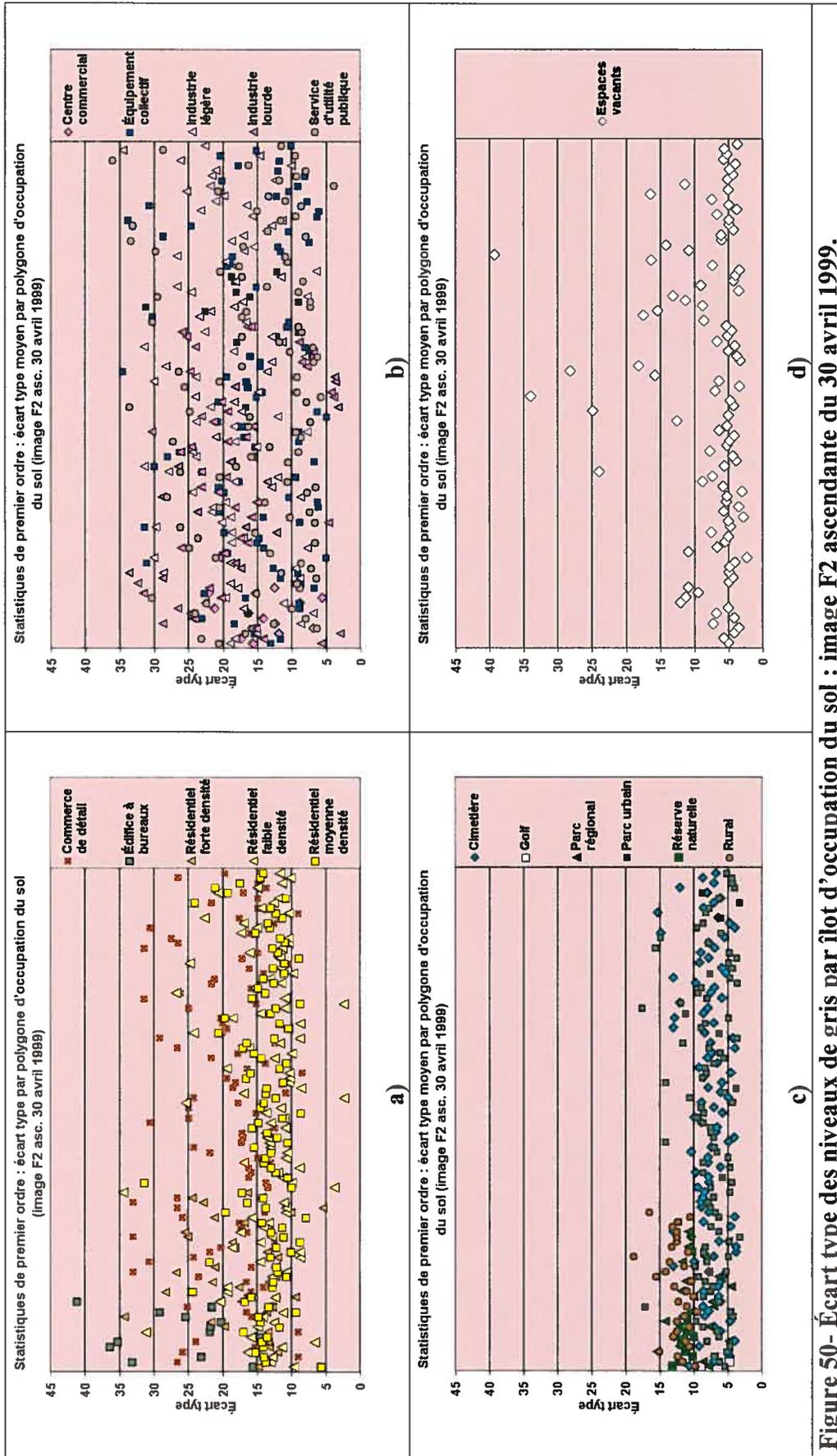


Figure 50- Écart type des niveaux de gris par îlot d'occupation du sol : image F2 ascendante du sol : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

Le troisième groupe inclut des taxons dont la plus grande partie de la surface est libre de construction. Des bâtiments peuvent être présent mais généralement leur superficie est très faible par rapport à la taille des îlots. Les taxons sont : rural, cimetière, golf, parcs régional et urbain, réserve naturelle et possèdent des superficies entre 10 000 et 72 500 m². Le quatrième groupe montre uniquement la classe vacante dont la superficie moyenne est de près de 6 000 m² et devrait normalement n'inclure aucun bâtiment.

Certains taxons possédaient des milliers d'échantillons, ce qui rendait les graphiques illisibles, surtout pour les classes sous représentées. Nous avons limité l'affichage du nombre de polygones par classe à 100 îlots. La sélection des îlots pour les huit taxons comprenant plus de 100 polygones a été effectuée de manière aléatoire pour éviter un biais spatial. Tous les îlots des autres taxons (moins de 100 îlots) ont été inclus tels quels.

Les résultats montrés aux figures 49 et 50 corroborent les observations des autres chercheurs (voir chapitre 2) à savoir que les statistiques de premier ordre ne constituent pas des traits caractéristiques appropriés pour discriminer les taxons entre eux dans le cas des images radars. Tout au plus, nous pouvons distinguer tant bien que mal les îlots contenant une forte densité de bâtiments de ceux libres de constructions. Il apparaît donc que l'emploi des deux mesures statistiques de 1^{er} ordre examinées pour effectuer la classification de l'occupation du sol par îlot, comme dans la procédure employée par Baudouin *et al.* (1995) avec des images panchromatiques, soit très peu prometteur avec une image RADARSAT-1.

5.2.2- Statistiques de deuxième ordre

Les sept mesures de texture programmées dans TEXEL ont été calculées avec les mêmes paramètres que pour les tests de validation (chapitre 4). Les figures 51 et 52 montrent respectivement les moyennes par îlot des mesures de texture de moyenne et d'écart type, selon les quatre regroupements de taxons, tel que précédemment. Les moyennes des cinq autres mesures de texture calculées sont montrées en annexe (figures Annexes VIII à XII).

L'examen des graphiques des moyennes de 1^{er} et 2^{ième} ordre (figures 49 et 51) montre des distributions pratiquement identiques. Par contre les écarts types de 1^{er} et 2^{ième} ordre montrent une différence significative en ce qui a trait à la classe de vacant (figures 50 et 52). Cette mesure de deuxième ordre semble intéressante pour la discrimination entre bâti et non bâti. Ceci confirme les résultats du chapitre précédent, à savoir que l'écart type permet la détection des nouveaux bâtiments à l'intérieur des terrains vacants. Quant aux autres mesures de texture tel que l'entropie et le contraste (voir annexes VIII à XII) ils semblent pouvoir discriminer les cimetières et une bonne partie des parcs urbains des taxons du premier groupe (bâti). Toutefois, on constate que les taxons du deuxième groupe (centres commerciaux, industries, service d'utilité publique, équipement collectifs) présentent des valeurs tellement variables que l'on peut s'attendre à de nombreuses confusions. Il apparaît donc que lorsque les statistiques de 2^{ième} ordre sont employées pour caractériser l'ensemble de l'îlot, elles ne facilitent pas l'identification de l'occupation du sol.

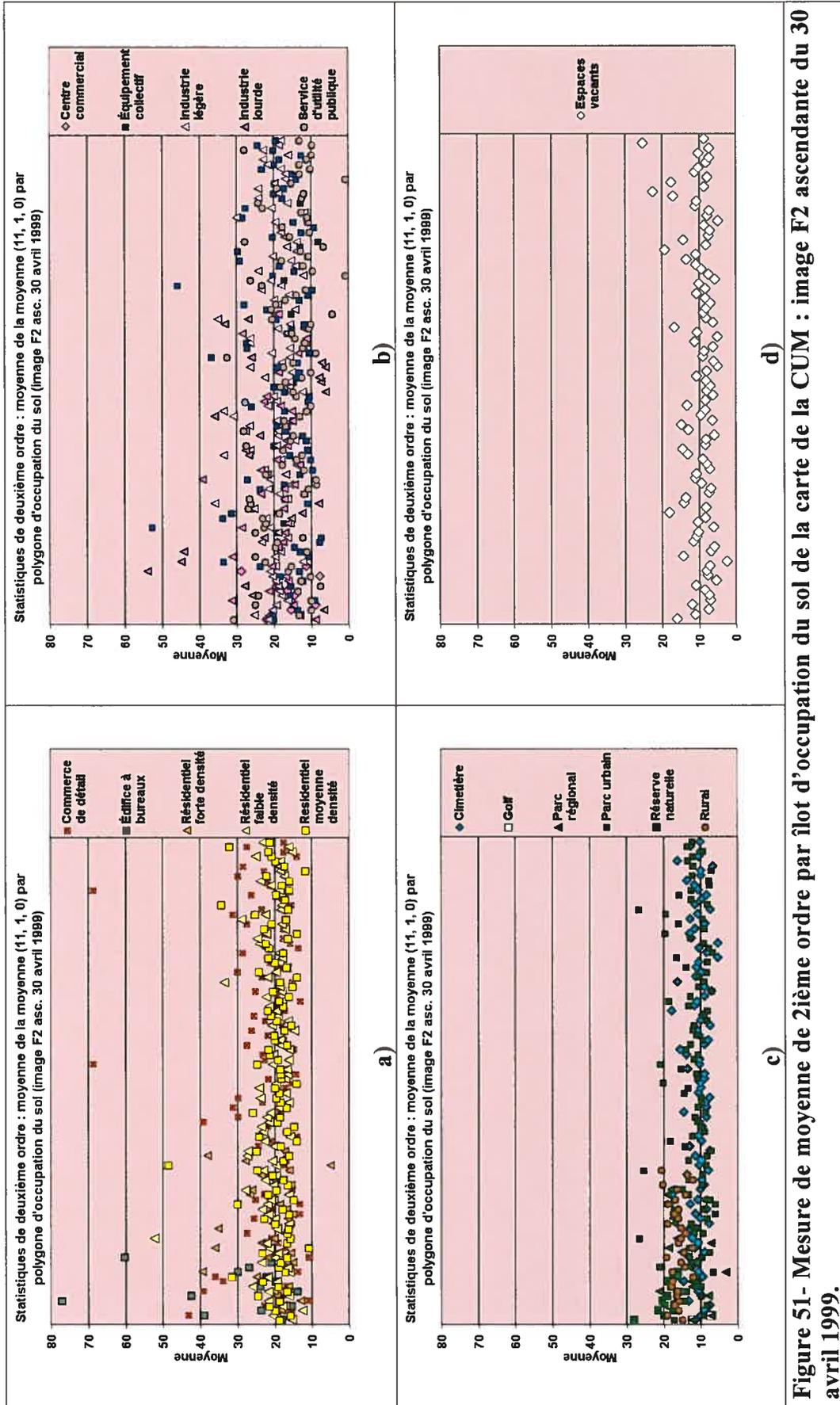


Figure 51- Mesure de moyenne de 2ième ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

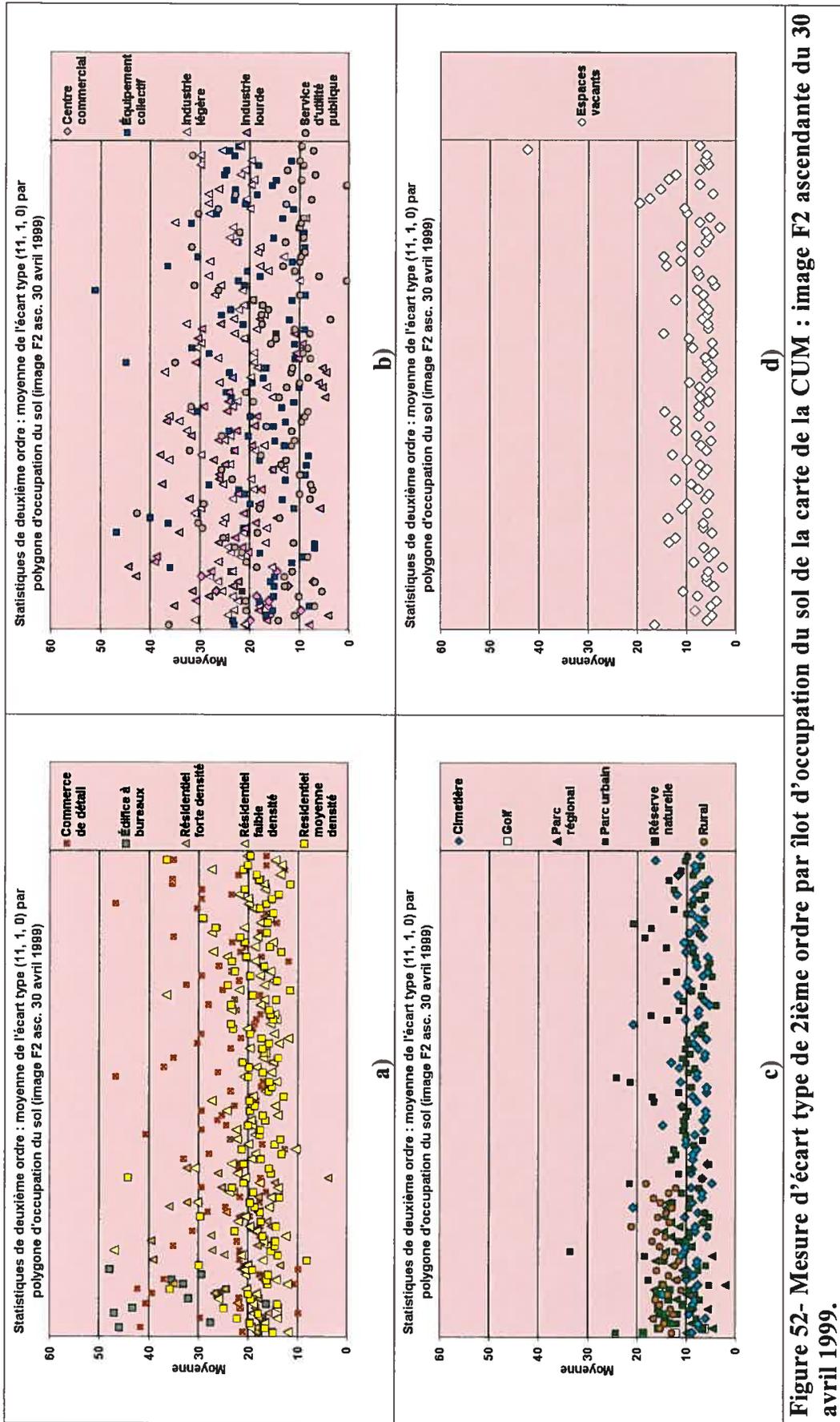


Figure 52- Mesure d'écart type de 2ième ordre par îlot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

5.3- Séparabilité

Puisque les mesures moyennes par îlot urbain ne montrent pas beaucoup de potentiel pour la classification d'images RADARSAT-1, nous avons décidé d'analyser les distributions des valeurs sur la base des pixels pour évaluer la séparabilité de chaque taxon. Tous les pixels d'une classe donnée pour tous les îlots de l'image sont employés afin de calculer des distances de Bhattacharyya. Cette mesure quantifie le chevauchement des classes examinées deux par deux à partir des moyennes et des matrices de covariance des échantillons (Richards, 1986). Pour ces analyses, nous n'avons retenu que les statistiques de 2^{ème} ordre qui ont montré plus de potentiel discriminant, comme nous l'avons vu à la section précédente. Nous avons donc appliqué l'algorithme TEXEL (fenêtres de 11 pixels et un pas d'échantillonnage $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) pour l'ensemble de l'image en employant tous les îlots urbains.

Il est à noter que ce test de séparabilité suppose des distributions normales par classe, ce qui ne se vérifie pas nécessairement avec les images de télédétection, particulièrement avec les mesures de texture. Toutefois, cette méthode donne tout de même une indication sur les difficultés (ou la facilité) que l'on peut s'attendre à rencontrer pour classifier les données. Les distances calculées vont de 0 à 2. Une valeur entre 0 et 1 signifie que deux classes présentent une très faible séparabilité. Une valeur entre 1 et 1,9 correspond à une faible séparabilité, et plus de 1,9 signifie que les classes se séparent bien. Puisque nos distributions ne sont probablement pas normales, nous prenons une attitude peu sévère en considérant que toutes les valeurs de 1,5 et plus présentent un bon potentiel de discrimination. De plus, la carte d'occupation du sol n'étant pas à jour, les distances de moins de 1,9 pourraient être dues en partie au fait que les pixels n'appartiennent tout simplement pas aux classes présumées.

Le tableau XXIX montre les distances de Bhattacharyya obtenues pour les dix-sept taxons en employant les 7 mesures de texture. Pour faciliter la lecture, les résultats en bleu dénotent une très faible séparabilité, en noir une faible séparabilité et en rouge une bonne séparabilité (plus de 1,5). Les taxons sont regroupés en trois classes plus générales selon la densité du bâti : bâti de forte densité (caractères gras), de densité moyenne (caractères gras

italique) et non bâti (souligné). Nous constatons que : 1) les taxons d'un même groupe ne se distinguent pas entre-eux (distances inférieures à 1,5), 2) les taxons du deuxième groupe se distinguent clairement de ceux du premier groupe (distances supérieures à 1,7), et 3) les taxons du troisième groupe donnent des résultats variables. Ils se distinguent tous facilement vis-à-vis ceux du deuxième groupe (distances supérieures à 1,7) mais présentent parfois une faible discrimination avec certains taxons du premier groupe (cimetière versus équipements collectifs, industrie lourde versus vacant, service d'utilité publique versus vacant, etc.). Pour certains taxons, les faibles valeurs de séparabilité sont attribuables au fait qu'un taxon donné comprend des aires bâties et non bâties. Par exemple, des polygones de service d'utilité publique, d'équipements collectifs ou encore d'industrie lourde peuvent contenir des portions importantes de terrains non construits entraînant des confusions avec les taxons du troisième groupe.

	<u>CCom</u>	<u>CDet</u>	<u>EBur</u>	<u>RMoy</u>	<u>RFor</u>	<u>InLe</u>	<u>InLo</u>	<u>ECol</u>	<u>S_{Pub}</u>	<u>RFai</u>	<u>P_{Urb}</u>	<u>Rur</u>	<u>Golf</u>	<u>Cim</u>	<u>PReg</u>	<u>R_{Nat}</u>
<u>CDet</u>	0,4															
<u>EBur</u>	0,6	0,3														
<u>RMoy</u>	0,7	0,4	0,9													
<u>RFor</u>	0,4	0,1	0,2	0,5												
<u>InLe</u>	0,2	0,2	0,3	0,6	0,2											
<u>InLo</u>	0,3	0,2	0,2	0,7	0,1	0,2										
<u>ECol</u>	0,2	0,2	0,5	0,5	0,3	0,2	0,3									
<u>S_{Pub}</u>	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,0	0,8	0,7								
<u>RFai</u>	1,8	1,7	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8	1,7	1,7							
<u>P_{Urb}</u>	1,8	1,8	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,0						
<u>Rur</u>	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,3	1,0					
<u>Golf</u>	1,2	1,5	1,6	1,4	1,6	1,4	1,5	1,1	1,4	1,9	1,8	1,8				
<u>Cim</u>	1,2	1,3	1,5	1,2	1,4	1,3	1,3	0,9	1,2	1,8	1,7	1,7	0,4			
<u>PReg</u>	1,4	1,4	1,6	1,2	1,4	1,4	1,5	1,2	1,6	1,8	1,8	1,7	0,9	0,7		
<u>R_{Nat}</u>	1,6	1,6	1,7	1,3	1,6	1,6	1,7	1,5	1,7	1,9	1,9	1,8	1,4	1,2	0,3	
<u>Vac</u>	1,1	1,1	1,3	1,0	1,2	1,2	1,1	0,8	0,6	1,7	1,6	1,8	0,9	0,6	0,9	1,2

CCom : Centre commercial
CDet : Commerce de détail
EBur : Édifice à bureaux
RMoy : Résidentiel de moyenne densité
RFort : Résidentiel de forte densité
InLe : Industrie légère
InLo : Industrie lourde
ECol : Équipement collectif
S_{Pub} : Service d'utilité publique

RFai : Résidentiel de faible densité
P_{Urb} : Parc urbain
Rur : Espace rural
Golf : Terrain de golf
Cim : Cimetière
PReg : Parc régional
R_{Nat} : Réserve naturelle
Vac : Espace vacant

Tableau XXIX- Distances de Bhattacharrya calculées pour les dix-sept taxons de la carte de la CUM avec le jeu de données de texture.

Les valeurs dénotant d'un mauvaise séparabilité sont montrées en bleu. Les valeurs en rouge montrent un certain potentiel de séparabilité.

Pour l'ensemble des 17 taxons, nous obtenons une distance de Bhattacharrya moyenne de 1,2 et l'on peut envisager de gros problèmes pour classifier le jeu de données selon une thématique aussi pointue. En regroupant les pixels des 17 taxons selon les trois classes générales de densité de bâti, nous avons calculé de nouvelles distances (Tableau XXX). On observe une valeur moyenne légèrement plus élevée de 1,4 mais le premier et le troisième groupe se distinguent toujours aussi mal.

	Groupe 1	Groupe 2
Groupe 2	1,7	
Groupe 3	0,8	1,7
<p>Groupe 1 : Taxons CUM « fortement bâtis » Groupe 2 : Taxons CUM « moyennement bâtis » Groupe 3 : Taxons CUM « non bâtis »</p>		
<p>Tableau XXX- Distances de Bhattacharrya des 17 taxons de la carte d'occupation du sol de la CUM regroupés dans trois classes générales de densité de bâti.</p>		

5.4- Classification dirigée

Les pixels de chaque taxons de la carte CUM (Figure 53a) ont été séparés en deux groupes, le premier servant à entraîner le classificateur, et le second pour valider les résultats. La sélection des pixels d'entraînement a été effectuée de manière aléatoire avec le module RANDBIT de PCI afin de ne pas induire un biais spatial. Les pixels d'évaluation des résultats correspondent aux pixels restants pour chaque taxon. Les tableaux XXXI et XXXII montrent les matrices de confusion obtenues pour chaque classification et les résultats de classification apparaissent aux figures 53b et c. L'exactitude demeure très basse pour les deux classificateurs, soit aux alentours de 18%.

	CCom	CDet	Cim	Ebur	ECol	Golf	RFor	RFai	RMoy	InLe	InLo	PReg	PUrb	RNat	Rur	S _{Pub}	Vac
CCom	8,8	0,9	5,0	4,3	1,6	25,1	2,6	0,0	14,6	15,4	3,8	12,3	0,5	3,3	0,0	1,3	0,3
CDet	3,8	6,7	6,8	6,4	1,4	14,7	2,7	0,0	22,4	14,3	1,9	12,9	0,4	3,9	0,0	1,4	0,5
Cim	0,4	0,5	20,3	0,7	0,5	33,2	0,3	0,0	3,5	1,6	0,1	29,0	1,1	6,4	0,0	1,7	0,6
Ebur	4,4	5,3	5,7	13,1	1,5	16,3	3,0	0,0	15,5	18,7	2,5	9,8	0,3	2,5	0,0	1,2	0,3
ECol	3,0	1,7	8,9	3,7	1,3	32,0	1,4	0,0	10,5	12,6	1,4	17,6	0,5	4,3	0,0	0,9	0,2
Golf	0,5	0,1	4,8	0,2	0,4	62,7	0,2	0,0	1,9	1,1	0,1	17,6	0,9	7,5	0,0	1,6	0,2
RFor	5,1	3,6	4,9	7,6	1,5	12,4	3,9	0,0	23,6	17,6	2,3	12,4	0,2	3,9	0,0	0,7	0,3
RFai	3,0	3,5	5,9	2,7	0,5	4,8	1,7	0,0	25,6	4,6	1,2	27,2	0,5	17,6	0,0	0,7	0,4
RMoy	3,4	4,1	5,9	2,6	0,6	5,7	2,5	0,0	33,2	6,0	0,9	22,3	0,2	11,3	0,0	0,8	0,4
InLe	5,2	1,7	5,3	6,2	1,7	22,1	1,8	0,0	13,4	24,4	3,3	11,4	0,3	2,4	0,0	0,7	0,2
InLo	5,4	1,8	5,9	8,1	1,2	19,9	2,0	0,0	11,1	22,6	5,1	13,4	0,5	1,9	0,0	0,9	0,2
PReg	1,2	0,3	3,9	0,9	0,1	12,5	1,0	0,0	3,4	0,3	0,0	30,9	0,2	44,6	0,0	0,4	0,3
PUrb	1,0	0,7	14,4	0,8	0,8	37,5	0,3	0,0	4,8	2,9	0,1	23,7	1,7	8,4	0,0	2,1	0,6
RNat	1,4	0,4	1,7	1,4	0,1	2,4	1,7	0,0	2,9	0,2	0,0	16,9	0,1	69,9	0,0	0,4	0,4
Rur	0,5	0,1	5,8	0,4	0,2	24,7	0,5	0,0	3,0	0,6	0,0	43,9	0,4	19,6	0,0	0,1	0,1
S_{Pub}	2,7	1,6	10,7	4,1	0,8	37,6	1,1	0,0	6,7	8,9	1,9	14,6	1,7	3,4	0,0	3,6	0,5
Vac	1,2	0,5	8,6	1,0	0,5	28,3	0,6	0,0	4,6	3,4	0,3	31,4	1,2	16,6	0,0	1,4	0,3
CCom	Centre commercial																
CDet	Commerce de détail																
Cim	Cimetière																
Ebur	Édifice à bureaux																
ECol	Équipement collectif																
Golf	Terrain de golf																
RFort	Résidentiel de forte densité																
RFai	Résidentiel de faible densité																
RMoy	Résidentiel de moyenne densité																
InLe	Industrie légère																
InLo	Industrie lourde																
PReg	Parc régional																
PUrb	Parc urbain																
RNat	Réserve naturelle																
Rur	Espace rural																
S_{Pub}	Service d'utilité publique																
Vac	Espace vacant																
	Précision moyenne : 16,83%																
	Précision globale : 11,38%																
	Coefficient de kappa : 0,06850																
Tableau XXXI- Matrice de confusion pour la classification par maximum de vraisemblance des 17 taxons de la carte d'occupation du sol de la CUM.																	

	CCom	Cdet	Cim	Ebur	ECol	Golf	RFor	RFai	RMoy	InLe	InLo	PReg	PUrb	RNat	Rur	S _{Pub}	Vac
CCom	13.1	8.4	3.8	5.3	4.1	12.0	9.8	6.2	9.3	9.2	7.0	1.3	2.7	2.0	3.1	1.5	1.0
CDet	7.9	10.6	4.0	5.4	2.9	5.7	10.8	9.9	13.3	8.3	7.1	2.2	2.1	3.5	4.0	1.2	1.0
Cim	2.1	1.3	20.9	0.6	2.6	16.2	1.8	4.2	3.3	1.8	1.4	5.4	5.9	3.7	18.7	6.3	4.0
Ebur	9.6	9.0	3.3	10.7	3.3	6.5	11.2	6.7	9.5	10.0	9.2	1.4	1.9	2.3	3.3	1.2	0.8
ECol	7.6	5.6	8.7	3.9	4.0	14.0	7.2	4.8	6.4	7.8	5.3	2.7	4.2	2.8	9.0	3.9	2.1
Golf	3.5	0.9	9.1	0.5	3.2	43.2	1.4	2.9	2.6	1.8	0.9	4.1	5.2	4.5	8.6	5.5	2.2
RFor	8.2	10.5	2.9	7.1	3.0	4.0	14.5	8.8	14.1	8.7	7.5	1.9	1.4	2.9	2.9	0.6	0.8
RFai	3.3	7.6	3.1	2.4	1.0	1.2	6.6	19.0	18.7	2.5	2.8	9.2	1.3	12.1	6.9	0.2	1.7
RMoy	4.3	9.4	2.4	2.9	1.3	1.3	9.8	18.6	22.5	3.4	3.1	5.8	1.0	8.1	4.6	0.2	1.1
InLe	9.8	8.9	4.8	7.2	4.2	8.1	10.6	4.7	7.4	12.8	9.0	1.2	2.6	1.4	4.4	1.7	1.2
InLo	8.7	8.9	6.3	8.1	3.7	6.9	10.0	4.8	6.8	10.7	10.4	1.2	2.8	1.1	6.2	1.7	1.5
PReg	0.9	0.9	7.2	0.2	0.9	3.8	1.0	8.3	5.1	0.5	0.4	17.8	2.1	31.2	14.7	1.8	3.2
PUrb	4.7	2.1	13.7	0.9	3.4	19.8	2.6	5.1	4.0	3.5	1.9	5.9	6.3	4.6	12.6	5.4	3.1
RNat	0.3	0.4	2.3	0.1	0.3	1.0	0.5	6.9	3.9	0.1	0.1	17.0	0.7	58.3	6.2	0.3	1.4
Rur	1.2	0.9	13.6	0.3	1.6	6.5	1.4	6.6	4.6	0.9	0.7	10.5	3.4	12.1	26.8	3.8	4.8
S_{Pub}	5.6	4.5	11.1	3.7	2.9	18.3	5.0	4.2	4.7	5.5	4.5	2.5	4.7	2.4	9.3	8.2	2.0
Vac	3.0	2.1	12.8	1.1	2.3	11.1	2.7	5.9	4.7	2.7	1.8	8.7	4.4	10.3	17.7	4.5	3.7

CCom : Centre commercial	InLe : Industrie légère
CDet : Commerce de détail	InLo : Industrie lourde
Cim : Cimetière	PReg : Parc régional
Ebur : Édifice à bureaux	PUrb : Parc urbain
ECol : Équipement collectif	RNat : Réserve naturelle
Golf : Terrain de golf	Rur : Espace rural
RFort : Résidentiel de forte densité	S _{Pub} : Service d'utilité publique
RFai : Résidentiel de faible densité	Vac : Espace vacant
RMoy : Résidentiel de moyenne densité	

Précision moyenne : **17,81%**
Précision globale : **13,95%**
Coefficient de kappa : **0,08232**

Tableau XXXII-Matrice de confusion pour la classification par « K-plus-proches-voisins » (KNN) des 17 taxons de la carte d'occupation du sol de la CUM.

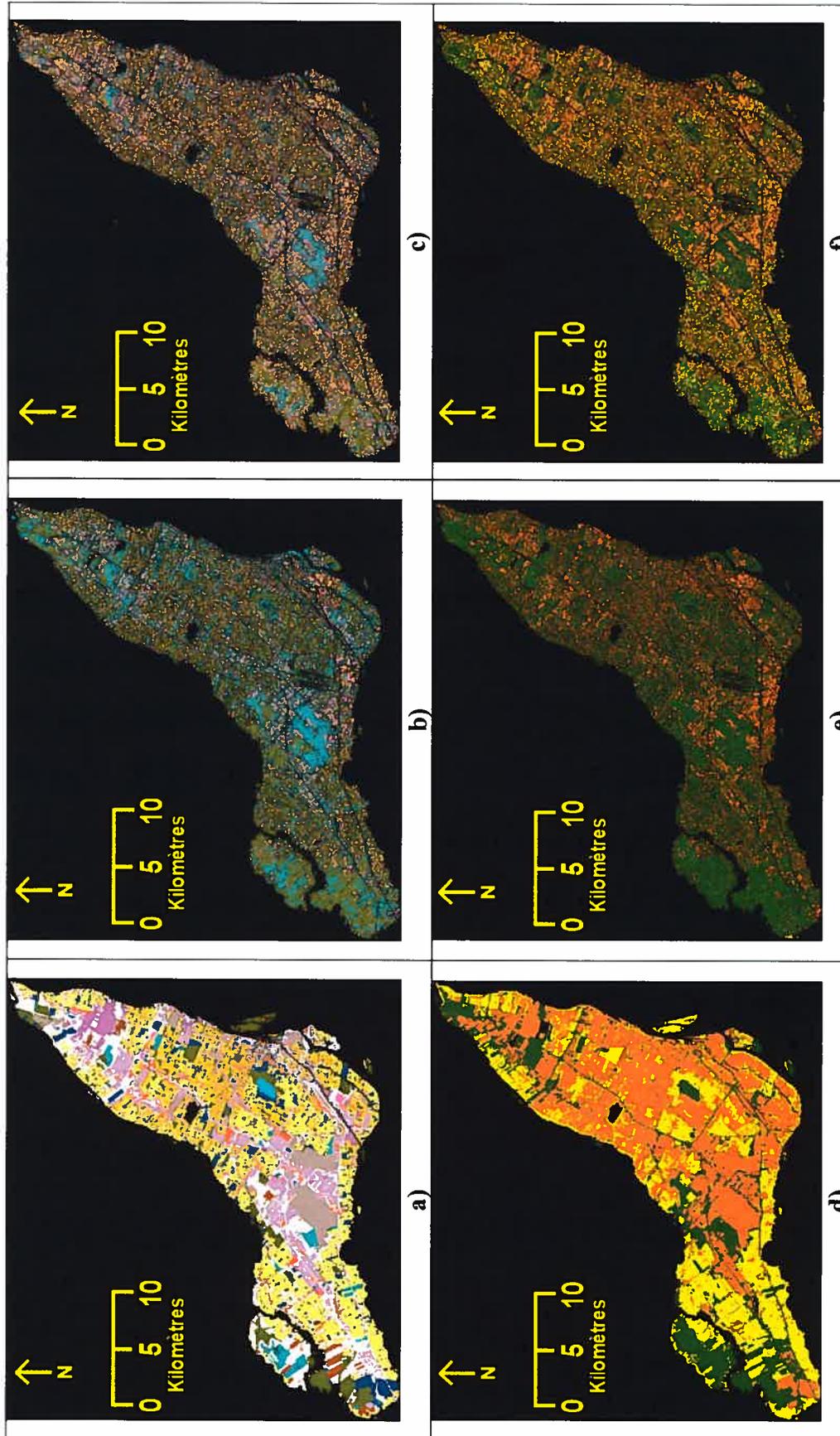


Figure 53- Résultats de classification de l'île de Montréal.

a) Carte d'occupation du sol de la CUM à 17 taxons, b) Classification par maximum de vraisemblance à 17 taxons, c) Classification KNN à 17 taxons, d) Carte d'occupation du sol à 3 taxons, e) Classification par maximum de vraisemblance à 3 taxons, et f) Classification KNN à 3 taxons.

En regroupant les taxons de la carte CUM selon les trois densités de bâti (Figures 53a et d), nous augmentons la précision moyenne à près de 45% pour la classification par MV et 51% pour la classification par KPPV (Tableau XXXIII). Toutefois, le bâti de moyenne densité présente un taux de réussite pratiquement nul d'environ 1% pour la classification par MV. Pour cette classification, près de 72% des pixels du deuxième groupe se retrouvent dans le troisième groupe qui correspond au non bâti. La figure 53e et f montre les cartes obtenues des classifications.

La figure 54 montre une portion plus détaillée des résultats obtenus pour une partie de l'arrondissement de Saint-Laurent. La carte CUM indique qu'on y retrouve des centres commerciaux, des commerces de détails, du résidentiel de faible et moyenne densité, des édifices à bureaux, des industries légères, des espaces vacants, le parc régional du Bois-de-Saraguay au bord de la rivière des Prairies et même une des rares zones rurales de l'île de Montréal (Figure 54b). Les classifications à 17 taxons semblent montrer un certain potentiel pour l'industrie légère, mais on voit bien que plusieurs autres taxons y sont faussement inclus (Figure 54d et e). Ceci est aussi le cas pour le résidentiel de faible densité, qui est très mal détecté pour la classification par MV (Figure 54d) ou qui inclut plusieurs autres taxons pour la classification par KPPV (Figure 54e). Il est amusant de constater que la grande plage vacante du centre qui s'étend vers la droite, et qui apparaît en foncé sur l'image radar (Figure 54a), est détectée par les classificateurs MV et KPPV comme un terrain de golf. En fait, l'image date d'avril 1999 et à cette époque il s'agit encore de l'aéroport abandonné de Cartierville qui deviendra en juin 2002 le club de golf Le Challenger ! Les résultats pour les taxons regroupés montrent que la classification KPPV tend à reconnaître tant bien que mal ces trois groupes (Figure 54g). Par contre, le classificateur MV arrive à reconnaître le groupe bâti de forte densité du reste (Figure 54f).

	Classe 1	Classe 2	Classe 3		Classe 1	Classe 2	Classe 3
Classe 1	43,7	0,5	55,9	Classe 1	45,3	26,9	27,8
Classe 2	27,5	0,9	71,6	Classe 2	24,1	44,1	31,8
Classe 3	9,2	0,8	90	Classe 3	12,4	23,7	63,8
Maximum de vraisemblance				K-plus-proches-voisins			
Précision moyenne : 44,85%				Précision moyenne : 50,94%			
Précision globale : 41,93%				Précision globale : 48,96%			
Coefficient de kappa : 0,15977				Coefficient de kappa : 0,24118			
Tableau XXXIII- Matrices de confusion pour les classifications des 17 taxons d'occupation du sol regroupés dans trois classes générales de densité de bâti.							

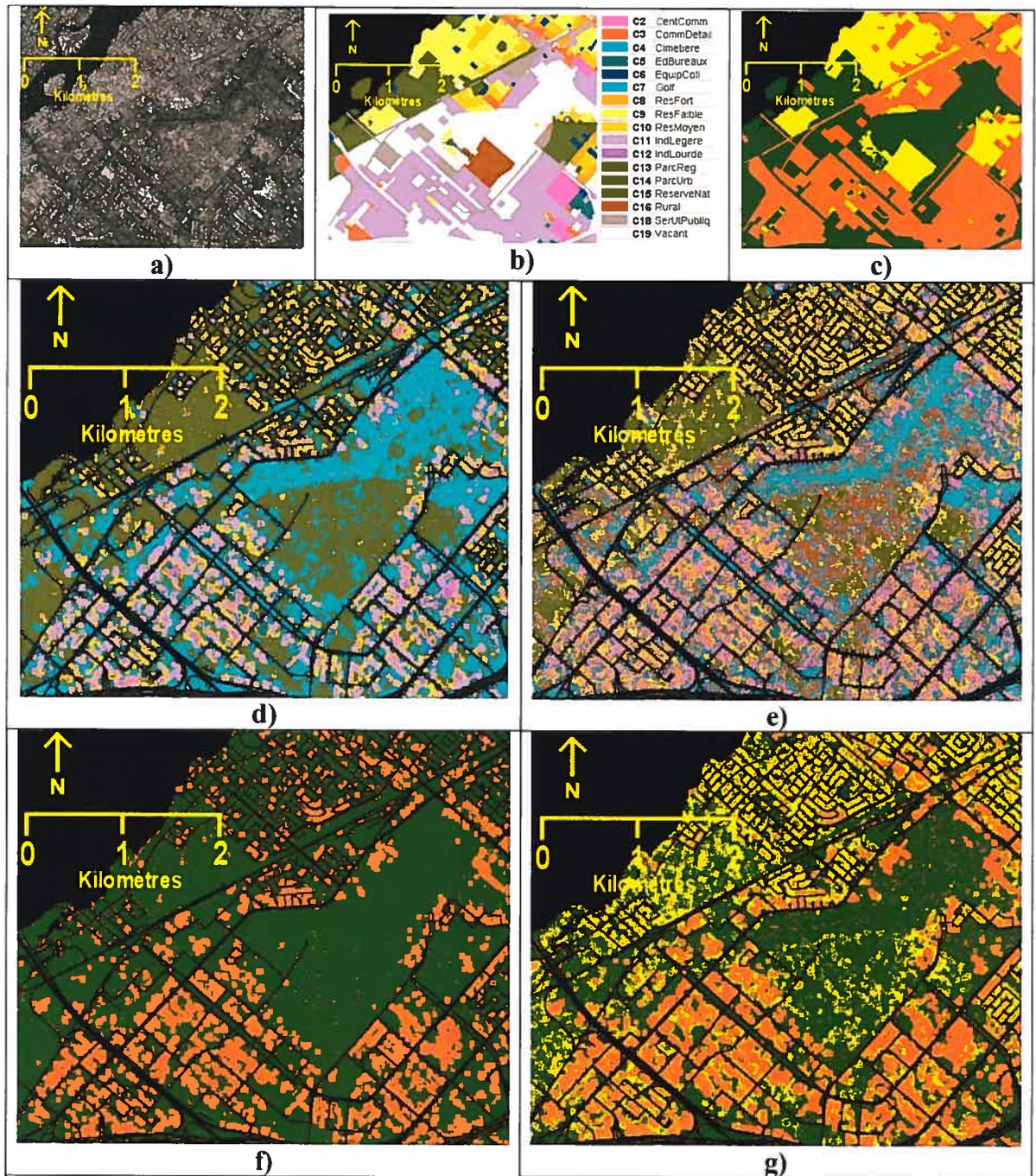


Figure 54- Résultats de classification pour une portion de l'arrondissement de Saint-Laurent.

a) Image RADARSAT 8 bits d'origine employée pour le calculs des textures b) Carte d'occupation du sol de la CUM à 17 taxons, c) Carte d'occupation du sol à 3 taxons, d) Classification par maximum de vraisemblance à 17 taxons, e) Classification KNN à 17 taxons, f) Classification par maximum de vraisemblance à 3 taxons, et g) Classification KNN à 3 taxons.

5.5- Conclusion sur l'identification des changements

Tous les tests effectués, que ce soit avec les statistiques de 1^{er} ou 2^{ième} ordre par îlot urbain ou les statistiques de 2^{ième} ordre par pixel, montrent clairement que l'image RADARSAT-1 a un potentiel très limité pour identifier le type de changement. Nous revenons au même résultat que dans le cas de la détection des changements où on peut distinguer uniquement entre ce qui est bâti de ce qui n'est pas bâti. Encore une fois, nous avons la preuve qu'avec les images de télédétection en général, la classification traditionnelle basée sur les taxons de l'occupation du sol est une opération vaine. Comme dans le cas de l'optique à haute résolution, nous avons besoin de systèmes de compréhension de l'image avec des règles de regroupement des différentes composantes détectées. À titre d'exemple, un taxon de service d'utilité publique peut inclure des postes de distribution électrique, des cours de triage ferroviaire et autres activités où l'espace possède une forte densité de bâti. D'un autre côté, un aéroport appartient aussi à cette classe et bien que d'immenses hangars et terminaux de voyageurs s'y trouvent, des superficies bien plus importantes sont occupées par les pistes d'atterrissage qui ne contiennent bien évidemment aucune construction. Même avec une thématique plus simple basée sur la densité du bâti, les variations à l'intérieur d'un polygone d'une telle classe peuvent donner de très mauvais résultats.

Au vu de tout ceci, il apparaît utopique et contre productif de tenter de classifier des jeux de données de texture obtenus des images RADARSAT afin d'identifier la nature des changements détectés. Ce qui nous amène, dans le chapitre qui suit, à proposer un système prototype où seule la détection des changements s'opère de manière automatique. Dans l'état actuel des choses, l'identification des changements nécessite des données d'autres sources et l'intervention de l'opérateur.

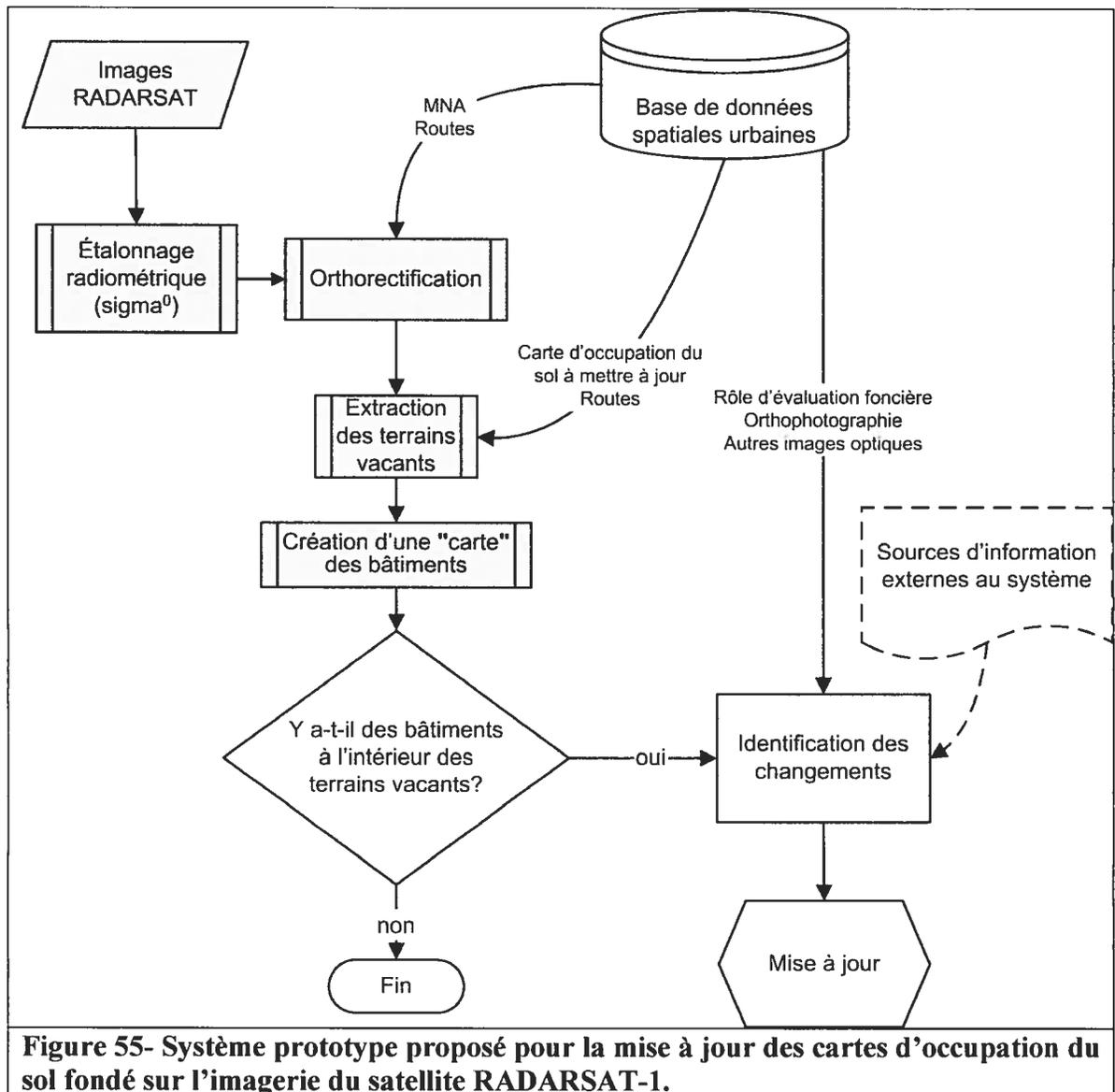
CHAPITRE 6- Conception d'un système prototype

6.1- Méthode proposée

La revue des divers travaux avec les images radars et les tests effectués aux deux chapitres précédents ont montré les choses suivantes :

- 1) Les coefficients de rétrodiffusion des images RADARSAT-1 ne peuvent être employés tels quels pour caractériser les surfaces à la manière des images optiques.
- 2) Les mesures de texture calculées avec la méthode rapide de Unser (1986) donnent plus d'information pour chaque pixel en tenant compte des valeurs des pixels du voisinage. Ceci a aussi pour effet d'amoinrir les changements trop brusques qui surviennent d'un pixel à l'autre sur les images radar.
- 3) Les mesures de texture ne contiennent pas assez d'information pour caractériser les occupations du sol en fonction des classes de la CUM. Elles constituent toutefois un bon outil pour détecter rapidement les bâtiments en milieu urbain.
- 4) En employant la carte d'occupation du sol pour indiquer où se trouvent les terrains vacants, la propriété démontrée de détecter la présence des bâtiments devient un atout majeur pour localiser rapidement les endroits où les changements sont présents.
- 5) Même en détectant la présence de nouveaux bâtiments, il est difficile d'employer cette information pour caractériser la nouvelle occupation du sol (résidentiel, commercial, industriel, etc.).

Ces considérations nous amènent à proposer un système prototype qui fait usage des images RADARSAT-1 en milieu urbain dans un cadre pratique pour la mise à jour des cartes d'occupation du sol en zones vacantes. La figure 55 montre l'organigramme du système proposé. On distingue deux sous-systèmes. Le premier, montré en fond ombré, s'occupe uniquement de la détection des changements en appliquant le processus de traitement des images RADARSAT-1 selon la méthode développée au chapitre 4.



Les étapes montrées schématiquement incluent 1) l'intégration de l'image en employant les prétraitements habituels, soit les corrections radiométriques, l'orthorectification et le rééchantillonnage sur 8 bits, 2) le prétraitement des données cartographiques, c'est-à-dire la création des polygones vacants numérotés avec les données des routes et la carte d'occupation du sol à mettre à jour, 3) l'application de l'algorithme de calcul des textures, 4) le seuillage des mesures localisant les bâtiments. Le choix des seuils appropriés peut s'effectuer de manière interactive en examinant les valeurs des mesures sur quelques zones déjà bâties, telles qu'identifiées par la carte d'occupation du sol. Le deuxième sous-système consiste à identifier la nature des changements. Si des nouveaux bâtiments sont signalés à l'intérieur des terrains vacants, l'opérateur enclenche une recherche d'autres données afin

d'identifier le type des changements. Ces données correspondent à des orthophotographies numériques, à toute autre image satellitale de haute résolution disponible ou encore au rôle d'évaluation foncier, si disponible. Si l'on ne peut identifier le changement avec aucune de ces sources d'information, l'opérateur devra avoir recours à d'autres moyens de validation externes au système (p.ex. sorties terrain, renseignement via d'autres services municipaux, etc.). Lorsque la confirmation et l'identification des changements sont réalisées, l'opérateur procède à la mise à jour de la carte. Il est à noter qu'étant donné l'usage du format vectoriel dans les opérations courantes de géomatique, le contour des zones construites détectées est identifié (format matriciel) et converti par la suite en vecteurs selon des procédures connues de conversion matriciel/vectoriel.

6.2- Application dans un cas réel

Afin de tester le système, nous l'appliquons à un site différent pour lequel nous disposons de données plus récentes : une mosaïque d'orthophotographies couleur de très haute résolution (11 cm) acquise en avril 2002 et une image RADARSAT-1 acquise le 19 novembre 2003 en orbite descendante avec un faisceau F4n.

La portion testée (Figure 56) est située dans la municipalité de Kirkland à l'ouest de l'île de Montréal (Figure 18, page 52) et contient 125 polygones vacants selon la carte MAMM. Les orthophotographies de référence révèlent qu'en 2002, 91 de ces terrains ont subi un changement de l'occupation du sol. Les mesures d'entropie et de contraste ont été calculées à l'intérieur des terrains vacants avec TEXEL (fenêtres de 11 pixels et un pas d'échantillonnage $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel). Les seuils choisis de manière interactive en observant des zones déjà construites montrent que les valeurs d'entropie de 6,5 ou plus et de contraste de 250 ou plus parviennent à localiser assez bien le bâti. L'évaluation des résultats de détection des changements donne une exactitude globale de 91%, avec seulement 4 polygones omis sur 91 et 7 polygones de fausse alarme sur 34 (Tableau XXXIV).

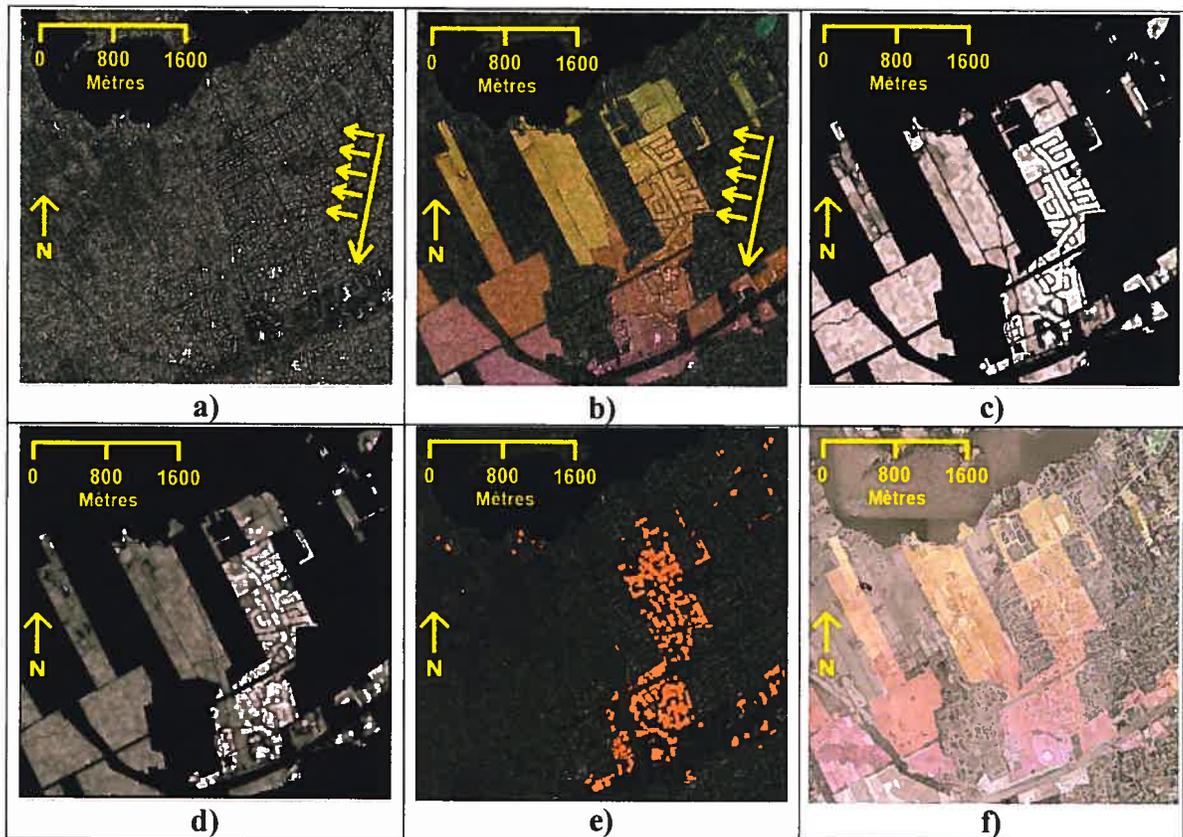


Figure 56- Zone d'application du système prototype à la municipalité de Kirkland.
 a) Image RADARSAT-1 du 19 novembre 2003, b) Polygones vacants, c) Entropie, d) Contraste, e) Résultat du seuillage, et f) Orthophotographie servant à l'identification.

Nombre de polygones vacants correctement classifiés : 114 sur 125.

Exactitude 91.2 %

Nombre de polygones omis 4 sur 91

Erreur d'omission 4.4 %

Nombre de polygones de fausse alarme 7 sur 34

Erreur de fausse alarme 20.6 %

Algorithmme Photo	Bâti	Vacant	Total
Bâti	87	4	91
Vacant	7	27	34
Total	94	31	125

Exactitude globale = 91,2%

Classe bâti :

Exactitude du producteur (erreur d'omission) = 95,6% (4,4%)

Exactitude de l'utilisateur (erreur de commission) = 92,5% (7,5%)

Classe vacant :

Exactitude du producteur (erreur d'omission) = 79,4% (20,6%)

Exactitude de l'utilisateur (erreur de commission) = 87,1% (12,9%)

Coefficient kappa = 0,773

Tableau XXXIV- Erreurs d'omission/commission pour le test de Kirkland.

La figure 57 montre un exemple d'application du système prototype proposé avec les données utilisées pour nos tests. Les figures 57a et c montrent les contours des zones de changements détectés (en rouge) à l'intérieur des terrains vacants (en bleu). Ces contours sont transférés à l'opérateur qui peut les superposer sur les autres données disponibles, en l'occurrence les orthophotographies couleur (Figures 57b et d). L'opérateur peut alors procéder à l'identification des nouveaux taxons et apporter les changements qui s'imposent à la carte d'occupation du sol (mise à jour).

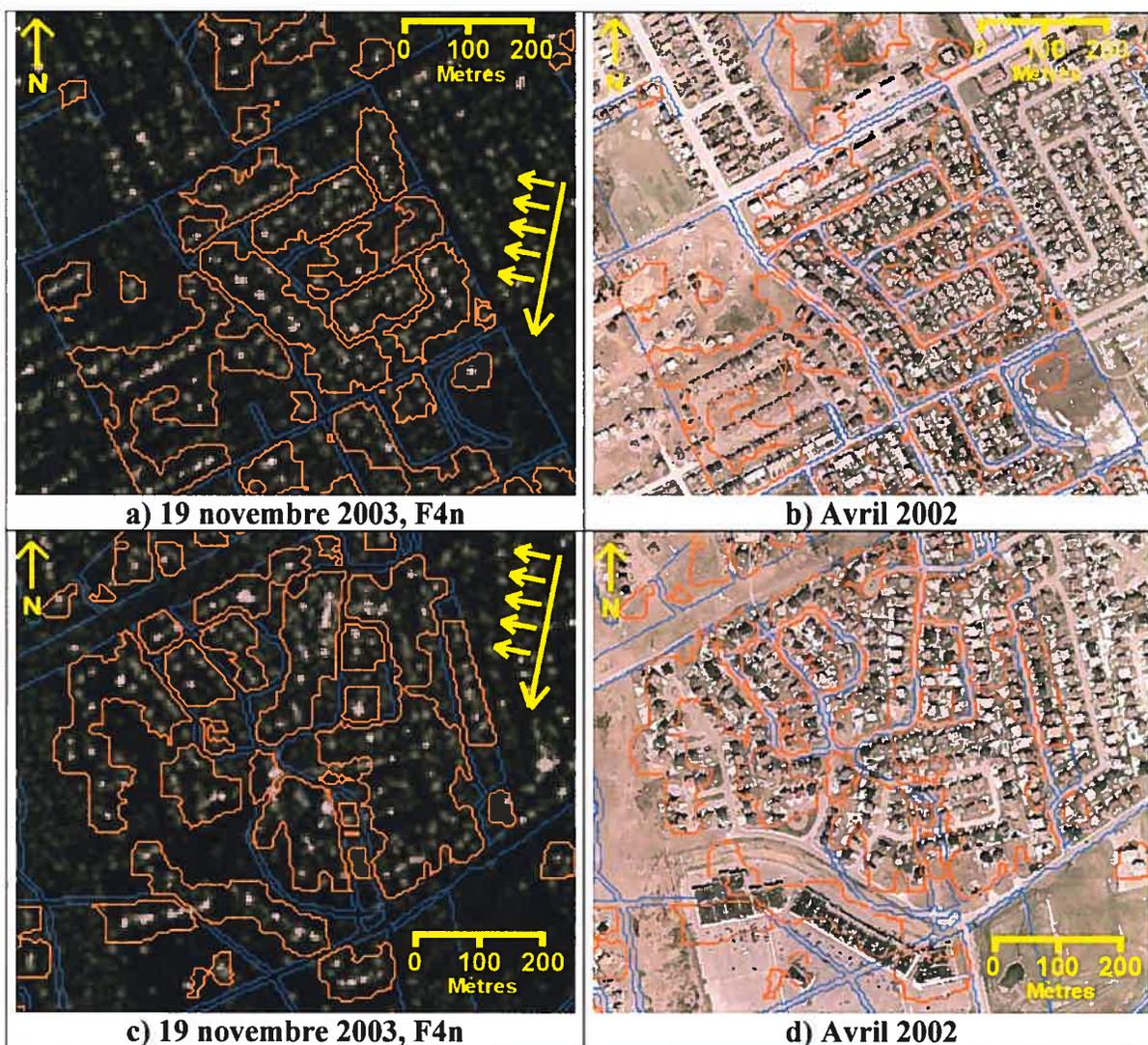


Figure 57- Zones détectées correctement pour le test de Kirkland.

Résultat du seuillage des images de contraste et d'entropie (fenêtre de 11 pixels, $dx = 1$ et $dy = 0$ pixel) superposés à: a) et c) L'image RADARSAT-1, et b) et d) L'orthophotographie de référence. Les contours en bleu définissent les polygones vacants et les contours rouges correspondent aux changements détectés.

La photo de la figure 57b montre clairement que les nouvelles constructions sont en majorité des habitations unifamiliales (résidentiel faible densité) avec plusieurs maisons de rapport (résidentiel moyenne densité). La portion montrée aux figures 57c et d délimite une zone où l'on retrouve un quartier résidentiel de faible densité et un centre commercial (bas de l'image).

Dans les sections qui suivent nous voyons plus en détails les cas d'omission et de fausse alarme obtenus.

6.2.1- Erreurs d'omission

Deux polygones ont été omis dû à la combinaison de deux facteurs d'atténuation du signal radar : l'angle d'orientation des bâtiments face au faisceau et la présence d'arbres faisant écran (Figure 58).

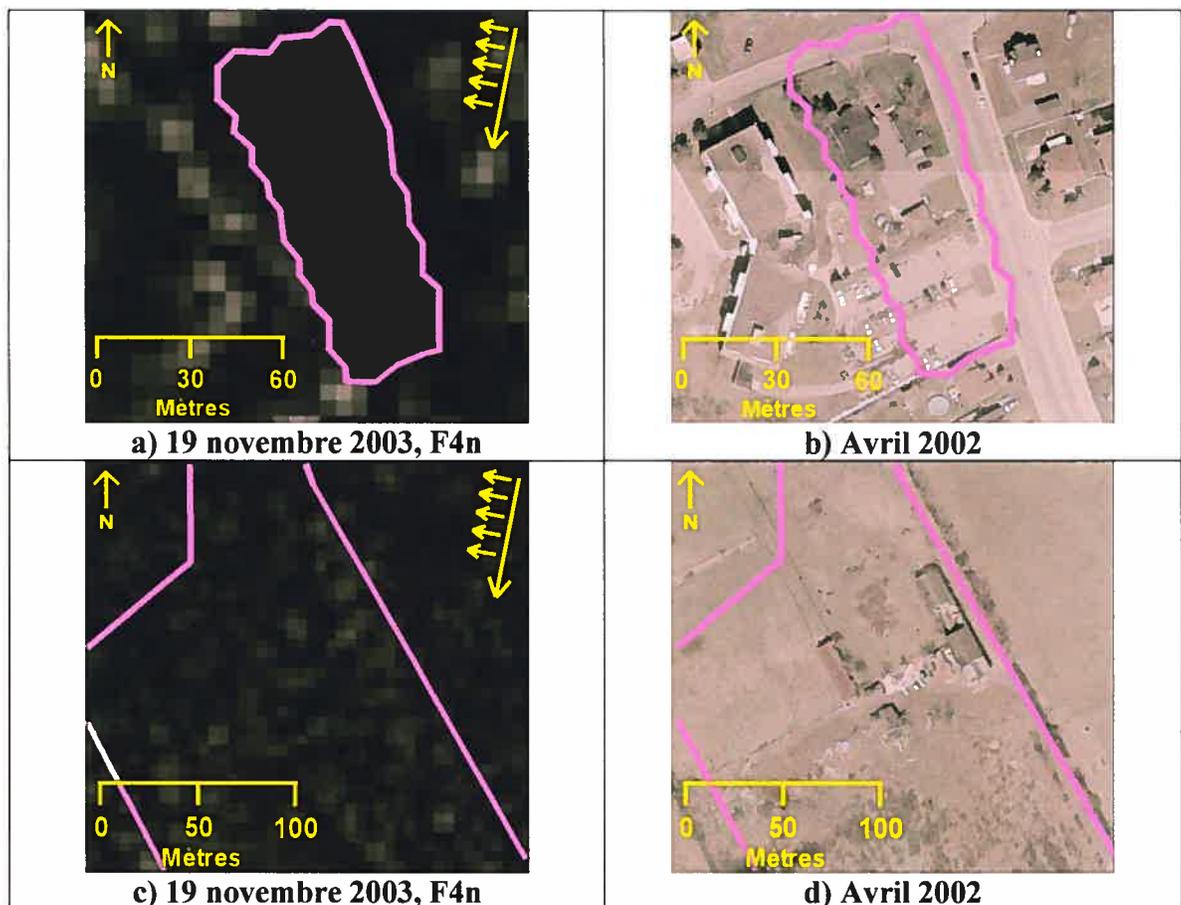


Figure 58- Erreurs d'omission dues à l'orientation des bâtiments et la présence d'arbres.

a) et c) Image RADARSAT-1, b) et d) Orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants.

Généralement, on observe que les coefficients de rétrodiffusion des bâtiments non détectés sont faibles. Les valeurs d'entropie aux environs des bâtiments sont supérieures à 7 dans les deux cas, mais les contrastes atteignent difficilement 150.

Un polygone sur lequel ne se trouve qu'une seule maison n'a pas été détecté puisque celle-ci est cachée dans l'ombre du bâtiment voisin situé dans un polygone non vacant (Figure 59).

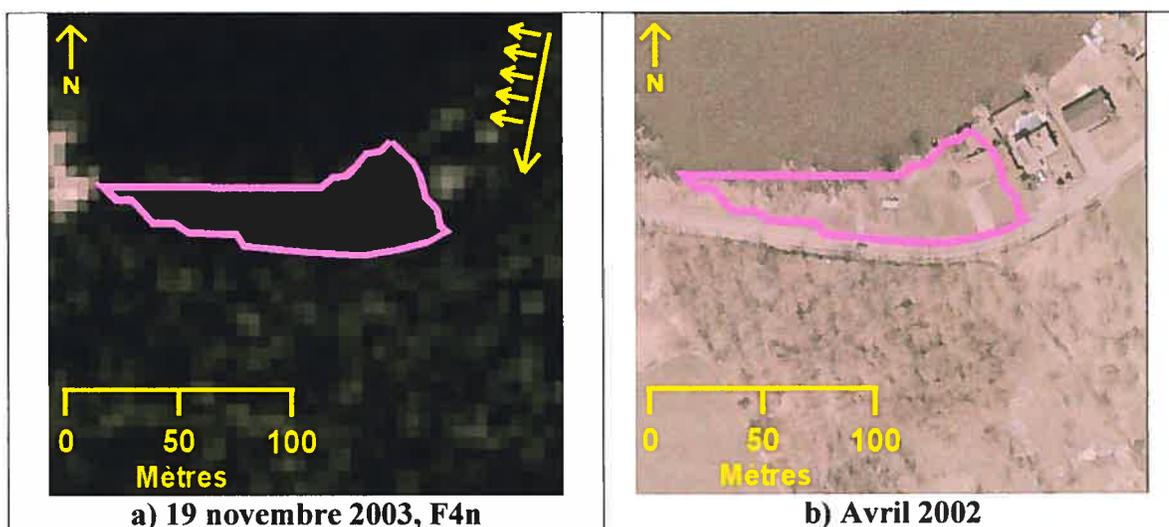
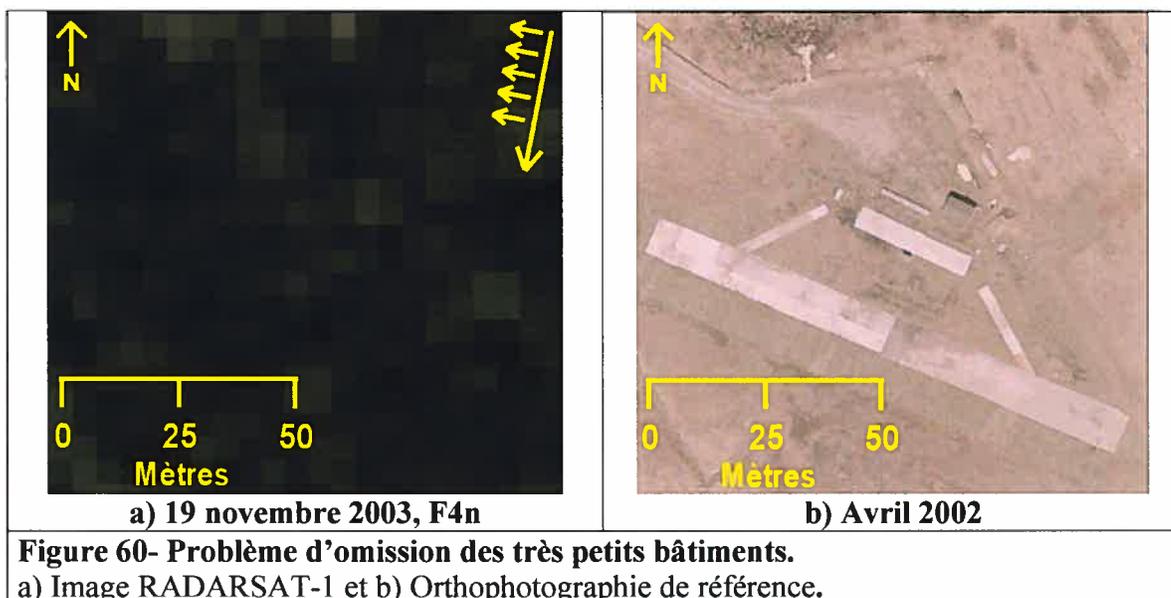


Figure 59- Problème d'omission entraîné par l'ombrage d'un bâtiment voisin.

a) Image RADARSAT-1 et b) Orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants.

La seule autre omission est occasionnée par un bâtiment de très petite taille éclairé en coin (Figure 60). Les grandes structures rectangulaires de couleur blanche que l'on observe juste en dessous ne sont pas surélevées comme l'indique l'absence de tout ombrage sur l'orthophotographie. Si elles sont encore présentes en 2003, il apparaît que le signal y est réfléchi de manière spéculaire et qu'il n'y a aucune rétrodiffusion significative au capteur.

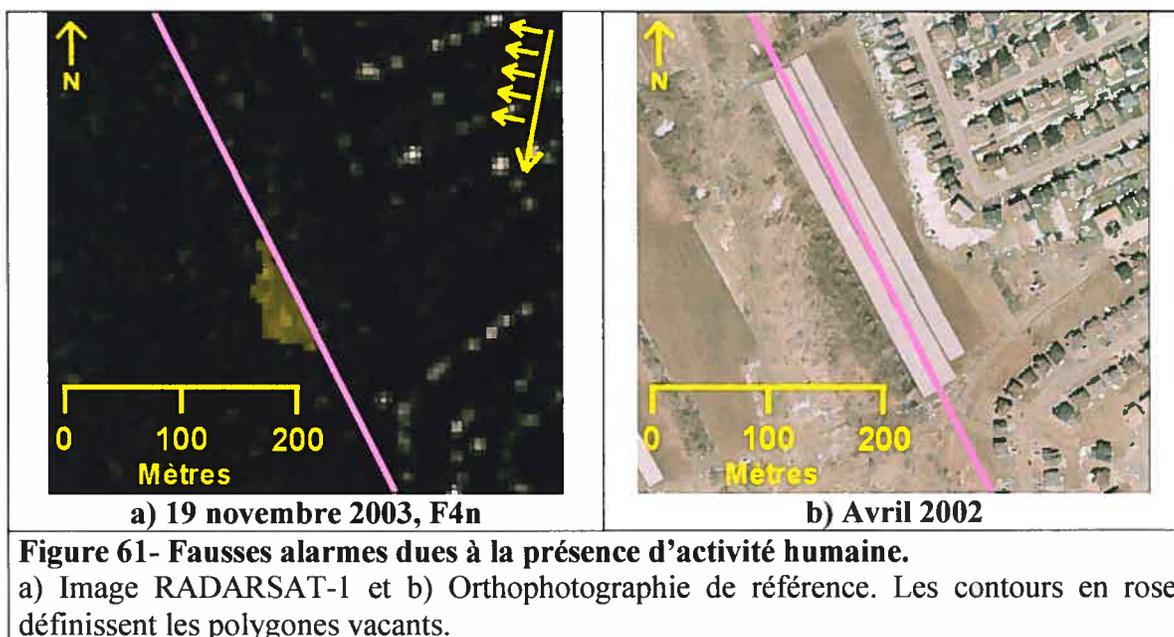


6.2.2- Les fausses alarmes.

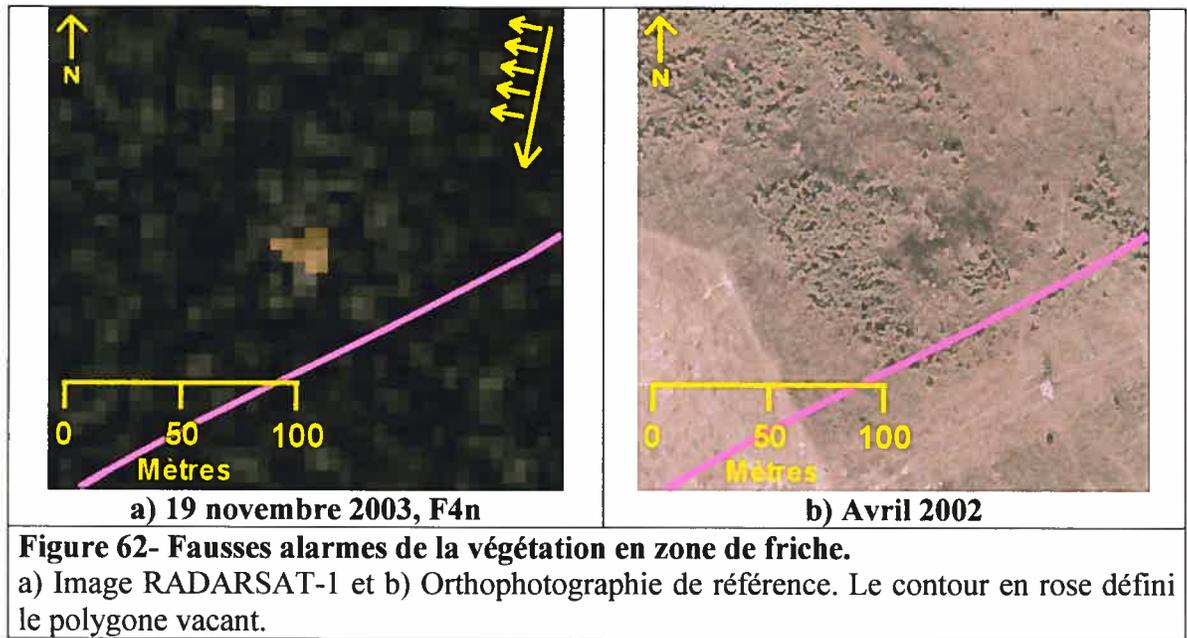
Les exemples qui suivent permettent d'aborder un aspect que nous avons déjà mentionné auparavant, c'est-à-dire la sévérité de la méthode d'évaluation des résultats. Un seul pixel est suffisant pour déclencher une fausse alarme. Dans la plupart des cas, le nombre de pixels faussement détectés est insignifiant face à la taille du polygone inspecté (Tableau XXXV). On constate que dans le pire des cas, les 73 pixels erronés du polygone 7 352 ne représentent que 5% de la superficie totale et sont tous situés au même endroit (Figure 61). Il n'est d'ailleurs pas certain que la portion détectée soit vraiment libre de toute construction. On observe sur la photo prise environ 18 mois auparavant au même endroit qu'il y avait de grandes toiles blanches dénotant une activité qui semble être de type agricole.

Numéro de polygone	Nombre de pixels détectés	Nombre de pixels par polygone	Superficie des fausses alarmes
7 352	73	1 407	5,2%
7 632	12	4 002	0,3%
7 952	19	17 848	0,1%
8 948	13	12 961	0,1%
9 152	20	4 664	0,4%
9 558	18	8 771	0,2%

Tableau XXXV- Nombre de pixels de fausse alarme dans chaque polygone pour le test de Kirkland.



La figure 62 montre une fausse détection que l'on aurait pu s'attendre à obtenir plus souvent étant donné les conditions climatiques. Il s'agit d'un champ en friche apparemment marécageux. Il est possible que la pluie tombée au cours des heures précédentes soit responsable de cette fausse alarme. En effet, l'acquisition de l'image a eu lieu une journée où il est tombé 26 mm de pluie, mais le satellite est fort heureusement passé le matin. Les observations horaires font état uniquement de conditions nuageuses à 5 et 6 heures du matin (Environnement Canada). Il y a eu des averses de pluie aux observations de 2 à 4 heures et des vents de près de 40 km/h ont été observés à 5 et 6 heures, ce qui a probablement eu pour effet d'assécher le terrain avant le passage du satellite. De plus, toutes les observations horaires subséquentes de 7 heures à minuit rapportent de la pluie. Ainsi, bien que les quantités tombées ne soient pas disponibles sur une base horaire, il est très raisonnable de supposer que la plus grosse partie des précipitations est tombée après le passage du satellite. Les précipitations ne semblent donc pas avoir causé beaucoup de fausses alarmes, tel qu'observé précédemment pour les images de 1999 au chapitre 4.



Nous avons déjà mentionné que l'application de la méthode de calcul de texture par polygone pouvait avoir tendance à surestimer légèrement les valeurs de la mesure de contraste à leur pourtour lorsque le nombre de paires est réduit. Ainsi, on remarque quelques exemples où ce phénomène se produit (Figure 63). Il est possible aussi que ces fausses détections de bordure soient dues au fait qu'il s'agit de l'orée du boisé (Figures 63a et b) ou que le découpage de l'image ne soit pas parfait et que les terrains voisins empiètent légèrement. Les 12 pixels détectés dans le polygone 7 632 (Figures 63c et d) peuvent être le résultat combiné de la présence de végétation et de la surestimation du contraste en bordure. Une situation similaire est observée pour le polygone 7 952 pour lequel 19 pixels sont faussement détectés (Figures 63e et f).

Finalement, le dernier polygone que nous présentons ne constitue probablement pas une fausse alarme, comme en témoignent l'image radar d'origine (Figure 64). Il ne faut pas oublier que l'image a été acquise près de 18 mois après la prise des photographies aériennes et que le développement résidentiel s'est effectué à un rythme effréné sur l'île de Montréal au cours des 5 dernières années. L'image RADARSAT montre clairement la présence de nouvelles maisons, alors qu'elles n'ont pas encore été construites lors du survol aérien de 2002 (Figure 64a et b).

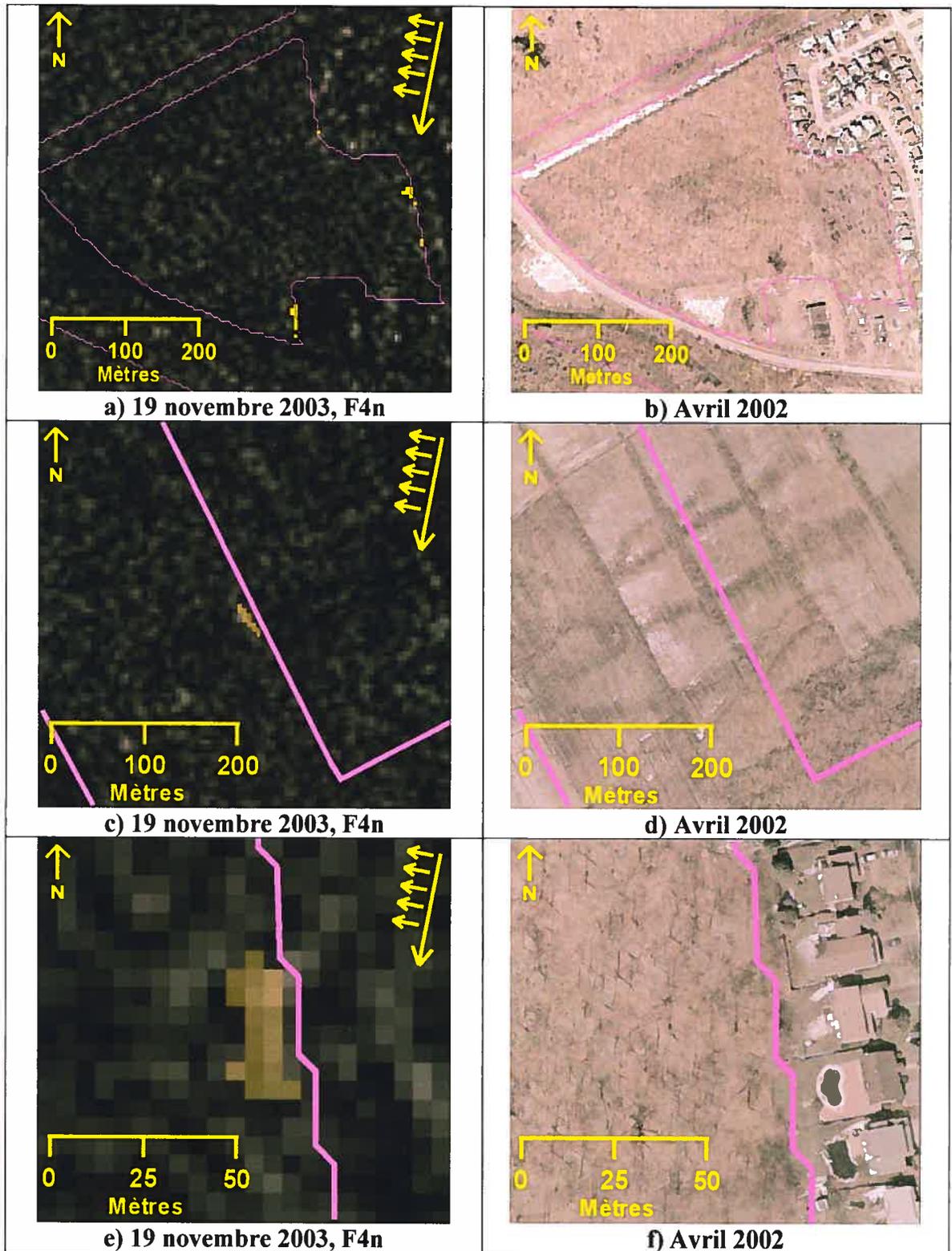
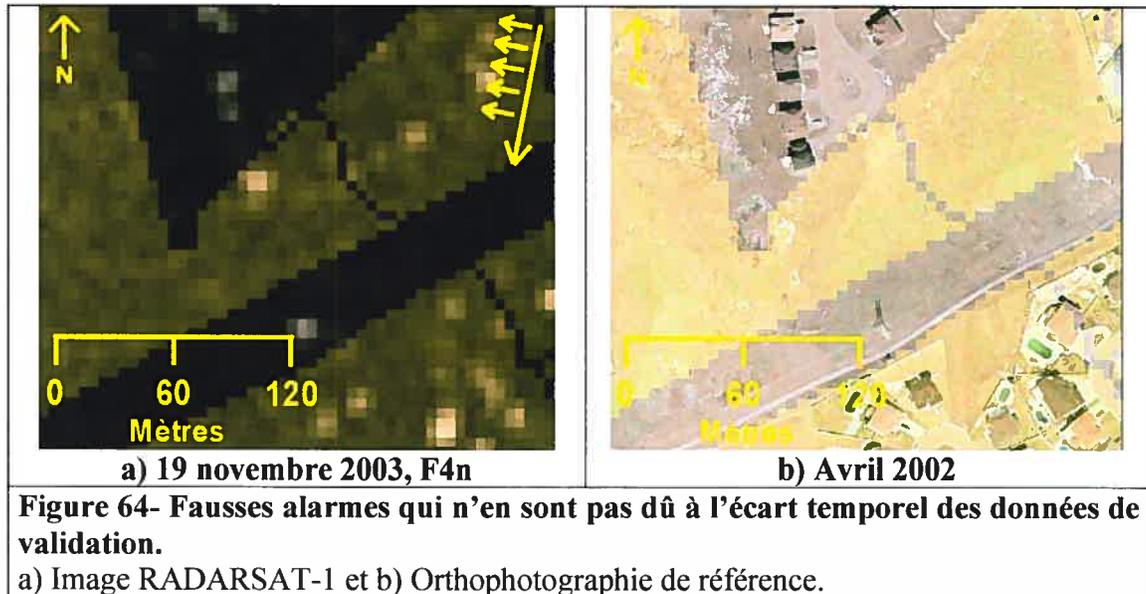


Figure 63- Fausses alarmes en bordure des polygones couverts de boisés.

a), c) et e) Image RADARSAT-1, b), d) et f) Orthophotographie de référence. Les contours en rose définissent les polygones vacants.



6.3- Conclusion sur l'application du système prototype

Les résultats de l'application du système prototype avec des nouvelles données démontrent clairement l'utilité d'une telle approche. Avec la couverture étendue du territoire de l'imagerie RADARSAT-1 acquise en mode fin, il est possible de scruter rapidement une surface de 2 500 km². Cette rapidité est en grande partie due au fait que l'on guide l'analyse de l'image aux endroits les plus susceptibles d'avoir subi des changements. La texture avec une simple opération de seuillage permet d'atteindre des résultats probants de détection des changements. Les contours des zones détectés superposés aux autres documents existants accélèrent la procédure d'identification des changements. Le système met à profit le potentiel réel des images radar qui est limité à la détection et non à l'identification des changements en milieu urbain.

Pour apprécier davantage l'utilité du système, nous avons utilisé l'ensemble des polygones vacants de la carte MAMM soit plusieurs milliers de polygones. La mosaïque des images RADARSAT-1 de 1999 couvrant l'ensemble de la CMM (Figure 10a, page 36) a été traitée avec l'algorithme TEXEL afin de détecter les changements. La figure 65 montre les contours des zones de changement détectées (en vert) superposés sur la mosaïque des orthophotographies de 1999. Pour cette opération, incluant la localisation des terrains vacants, l'application de l'algorithme TEXEL, l'opération de seuillage et l'extraction des

contours, le temps requis se compte en heures et non en jours. Si on inclut les opérations de prétraitement des images RADARSAT-1, la détection des changements sur un territoire aussi vaste que celui de la région métropolitaine (plus de 3 000 km²) peut se faire en quelques jours. L'opérateur possède donc une carte de base qui accélère substantiellement le travail d'identification pour la mise à jour finale.

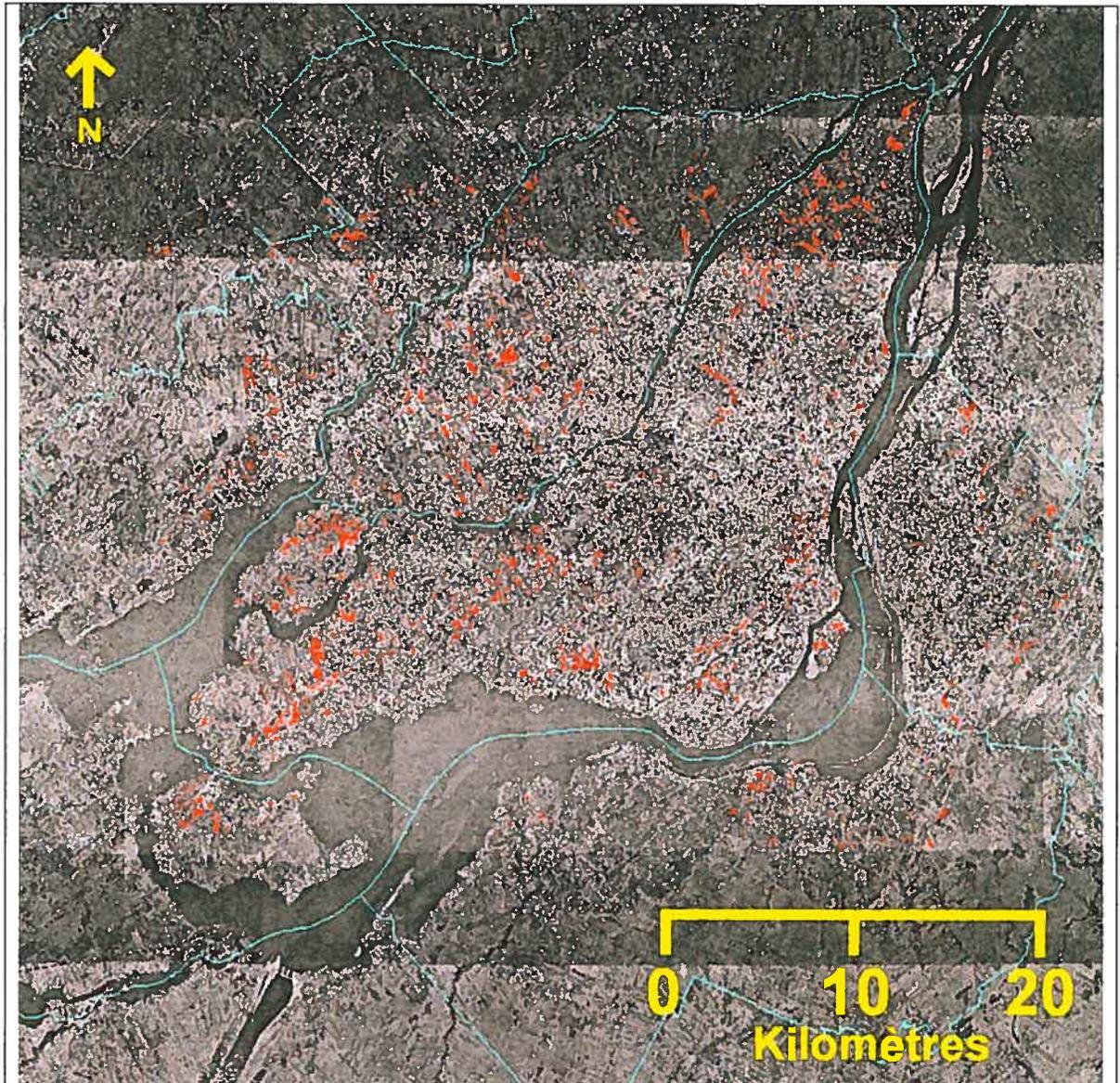


Figure 65- Test de détection des changements pour l'ensemble des terrains vacants de la région métropolitaine.

Les contours en rouge correspondent aux bâtiments détectés. Les résultats sont superposés à la mosaïque d'orthophotographies de référence.

CONCLUSIONS

L'objectif de cette thèse était de vérifier le potentiel des images RADARSAT-1 en mode fin pour la mise à jour des cartes d'occupation du sol en milieu urbain. Nous avons adopté une stratégie d'analyse des images guidée par la carte à mettre à jour. Dans notre cas, cette carte nous a fourni la position des terrains vacants, là où les changements d'occupation du sol se produisent le plus souvent en milieu urbain. L'utilisation de la texture obtenue à partir d'une technique qui approxime les matrices de cooccurrences a permis de concevoir une méthode rapide de détection des changements. Cette méthode tire profit de la sensibilité des images RADARSAT-1 aux structures surélevées, particulièrement les bâtiments. Leur présence signifie forcément que le terrain n'est plus vacant et la carte nécessite donc une mise à jour à cet endroit précis. La détection des changements a montré que dans les meilleurs des cas (milieu urbain dense), nous pouvons obtenir une exactitude de 90% et plus dans la détection des changements, tandis que dans le pire des cas (milieu accidenté et boisé en frange urbaine) cette exactitude pour se situer aux alentours de 75%.

Les analyses ont montré qu'en choisissant judicieusement les paramètres d'acquisition des images radar (angle d'incidence, orbite, saison d'acquisition) on maintient l'exactitude des détections à un niveau plus qu'acceptable. Un autre facteur qui contribue à maintenir cette exactitude à un niveau élevé est le choix judicieux des mesures de texture ainsi que des seuils employés afin de distinguer les zones bâties et non bâties.

Nous avons par la suite essayé d'évaluer la possibilité d'identifier les nouveaux taxons avec l'image radar. Les résultats ont confirmé nos appréhensions quant aux limitations sévères des images radar monopolarisées, et en général des images de télédétection optiques à haute résolution, traitées avec des méthodes standard de classification/segmentation d'image. Traduire les valeurs numériques en taxons d'occupation du sol d'une façon automatique passe par d'autres philosophies d'approches (compréhension d'image) qui pour le moment sont encore dans une phase primaire de développement.

Pour palier ces problèmes, nous avons proposé un système qui sépare la mise à jour en deux étapes essentielles : la détection des changements et l'identification de leur nature. Le

système est donc composé de deux sous-systèmes. Le premier se charge d'indiquer rapidement où les changements se sont opérés depuis l'ancien inventaire de l'occupation du sol. Le second emploie tous les documents disponibles sur le territoire afin d'identifier la nature de ces changements et d'apporter les corrections qui s'imposent sur la carte périmée.

L'hypothèse posée au départ était que les principes de l'analyse d'image guidée par les données cartographiques permettent d'employer les images du satellite RADARSAT-1 dans un cadre opérationnel en milieu urbain pour la mise à jour des cartes d'occupation/utilisation du sol. À la lumière des résultats obtenus, nous pouvons dire que cette hypothèse s'est avérée juste en ce qui a trait à l'une des étapes de la mise à jour, soit la détection des changements. Tout de même, la rapidité et la justesse avec laquelle cette détection est réalisée constituent un grand pas en avant dans le domaine des applications de l'imagerie radar en milieu urbain. De ce point de vue, notre recherche a contribué significativement à l'avancement des connaissances dans un domaine dont l'application de l'imagerie radar était impensable jusqu'à présent.

L'arrivée des images ENVISAT en polarisation alternée et prochainement des images RADARSAT-2 avec des capacités accrues (résolution spatiale plus fine, polarisation simple, alternée ou quadruple) aidera à s'approcher encore plus de l'automatisation complète du processus de mise à jour. Du point de vue de la détection des changements, il serait plus facile de distinguer les bâtiments des autres cibles pouvant causer des confusions (arbres, pylônes électriques, etc.). Du point de vue de l'identification des taxons, on serait à même de mieux caractériser les différentes composantes d'un taxon (constructions, surfaces boisées ou gazonnées, routes, etc.) ce qui faciliterait l'interprétation par un système automatique.

Baudouin Y., **Développement d'un système d'analyse d'images satellites pour la cartographie de l'occupation du sol en milieu urbain**, Thèse de doctorat, Département de Géographie, Université de Montréal, 265 pages, 1992.

Baudouin, Y., F. Cavayas et C. Marois, **Vers une nouvelle méthode d'inventaire et de mise à jour de l'occupation/utilisation du sol en milieu urbain**, Journal Canadien de Télédétection, vol. 21, no.1, pp. 28-42, 1995.

Beaulieu F., **Développement d'un système automatique d'inventaire et de suivi des coupes forestières à l'aide d'images du satellite SPOT**, Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Montréal, 116 pages, 1991.

Bianchin A., H. Maitre, J.M. Nicolas et F. Tupin, **Monitoring urban areas (Paris) with multitemporal multiincidence ERS images**, 6 pages, CEOS, 1999.

Bujor, F.T., L. Valet, E. Trouvé, G. Mauris, N. Classeau J. P. Rudant, **Data fusion approach for change detection in multi-temporal ERS-SAR images**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 6, pp. 2590-2592, 2001.

Bujor, F.T.; Valet, L.; Trouve, E.; Mauris, G.; Bolon, Ph., **An interactive fuzzy fusion system applied to change detection in SAR images**, Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 2, pp. 932-937, 2002.

Bujor, F.T., J. M. Nicolas, E. Trouve, et J. P. Rudant, **Application of log-cumulants to change detection on multi-temporal SAR images**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 2, pp. 1386-1388, 2003.

Bujor, F., E.Trouve, L.Valet, J.-M.Nicolas et J.-P.Rudant, **Application of log-cumulants to the detection of spatiotemporal discontinuities in multitemporal SAR images**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 10, pp. 2073-2084, 2004

Cavayas F. et A. Francoeur, **Système expert pour la mise à jour des cartes forestières à partir des images satellites**, Association québécoise de télédétection, Télédétection des ressources, vol. 7, pp. 169-178, 1991.

Caves, R.G. et S. Quegan, **Segmentation based change detection in ERS-1 SAR images**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.4 , pp. 2149 - 2151, 1994.

Caves, R.G., I. McConnell, R. Cook et S. Quegan, **Multi-channel SAR segmentation: algorithms and applications**, IEE Colloquium on Image Processing for Remote Sensing, pp. 2/1-2/6, 1996.

Chalifoux, S., F. Cavayas, et J. T. Gray, **Map-guided approach for the automatic detection on Landsat TM images of forest stands damaged by the Spruce Budworm**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 64, no. 6, pp. 629-636, 1998.

CMM, Site Internet de la Communauté Métropolitaine de Montréal, <http://www.cmm.qc.ca/carte/index.asp#>, consulté en 2005.

Cohen J., **A coefficient of agreement for nominal scales**, Educational and Psychological Measurement, vol. 20, pp. 27-46, 1960.

Coulon, M. et J. Y. Tournet, **Bayesian change detection for multi-temporal SAR images**, Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 2, pp. 1285-1288, 2002.

Dekker, R.J., **Texture analysis of urban areas in ERS SAR imagery for map updating**, IEEE/ISPRS Joint Workshop: Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, pp. 226-230, 2001.

Dekker R. J., **Texture Analysis and Classification of ERS SAR Images for Map Updating of Urban Areas in The Netherlands**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 9, pp. 1950-1958, 2003.

Dell'Acqua F. et P. Gamba, **Texture-based characterization of urban environments on satellite SAR images**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 1, pp. 153-159, 2003a.

Dell'Acqua, F. et P. Gamba, **Discriminating urban environments using multi-scale texture and multiple SAR images**, IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data, pp. 308 – 314, 2003b.

Dierking, W. et H. Skriver, **Change detection for thematic mapping by means of airborne multitemporal polarimetric SAR imagery**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 3, pp. 618-636, 2002.

Dong, Y., Forster, B., Ticehurst, C., **Radar Backscatter-Analysis for Urban Environments**, Int. Journal of Remote Sensing, vol. 18, No. 6, pp. 1351-1364, 1997.

Dong, Y., Forster, B.C., Milne A.K. et Morgan G.A., **Speckle suppression using recursive wavelet transforms**, Int. Journal of Remote Sensing, vol. 19, No. 2, pp. 317-330, 1998.

Dousset, B., **Synthetic aperture radar imaging of urban surfaces: a case study**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 3 , pp. 2092 - 2096, 1995.

Duda R. O. et P. E. Hart, **Pattern Classification and Scene Analysis**, John Wiley and Sons, 1973.

Env. Can., Site Internet d'Environnement Canada,
http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/dailydata_f.html?timeframe=2&Prov=XX&StationID=5415&Year=1999&Month=3&Day=1, consulté en 2005.

Esch, T., A. Roth and S. Dech, **Robust approach towards an automated detection of built-up areas from high resolution radar imagery**, Proceedings of the ISPRS WG VII/1 "Human Settlements and Impact Analysis" 3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas (URBAN 2005) and 5th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas (URS 2005). Tempe , AZ, USA, 2005.

Fiset R., **Procédure d'extraction automatique des routes des images du satellite SPOT à l'aide des données cartographiques à l'échelle 1:50 000**, Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Montréal, 123 p., 1993.

Fiset R. and F. Cavayas, **Automatic comparison of a topographic map with remotely sensed images in a map updating perspective: the road network case**, International journal of remote sensing, vol. 18, no. 4, pp. 991-1006, 1997.

Fiset R., F. Cavayas, M. C. Mouchot, B. Solaiman et R. Desjardins, **An automatic road extraction method using a map-guided approach combined with neural networks for cartographic database validation purposes**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.1 , pp. 236 - 238, 1996a.

Fiset R., F. Cavayas, M. C. Mouchot, B. Solaiman and R. Desjardins, **Map-guiding and neural networks: a new approach for high accuracy automatic road extraction**, Proceedings of the IAPR TC-7 workshop, Mapping buildings, roads and other man-made structures from images, pp. 293-308, 1996b.

Fiset R., F. Cavayas, M. C. Mouchot, B. Solaiman et R. Desjardins, **Map-image matching using a multi-layer perceptron : the case of the road network**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 53, pp. 76-84, 1998.

Fukunaga. K., **Introduction to statistical pattern recognition**, Academic Press, Boston, MA, 2^{ième} édition, 1990.

Gouv.-Qc, Site Internet du Gouvernement du Québec,
(http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/profil06/econo_fin/conj_econo/investis/permis06.htm), consulté en 2005.

Haralick R.M., Shanmugan K. & Dinstein I., **Textural Features for Image Classification**. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-3, No. 6, pp. 610-621, 1973.

Henderson, F. M. et A.J. Lewis, **Principles and Applications of Imaging Radar; Manual of Remote Sensing**, 3^{ième} édition, vol. 2., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 866 pages, 1998.

Henderson, F.M. et Z.G. Xia, **SAR applications in human settlement detection, population estimation and urban land use pattern analysis: a status report**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 1, pp. 79-85, 1997.

Henderson F. M. et Z.G. Xia, **Radar Applications in Urban Analysis, Settlement Detection and Population Estimation**, dans Manual of Remote Sensing, 3^{ième} édition, vol. 2, Principles and Applications of Imaging Radars in the Geosciences, F.M. Henderson and A.J. Lewis, Editors, Bethesda, Maryland : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 733-768, 1998.

Horgan, G.W., **Wavelets for SAR data smoothing**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 64, pp. 1171-1177, 1998.

Horgan, G.W., **Using wavelets for data smoothing: a simulation study**, Journal of Applied Statistics, vol. 26, no. 8, pp. 923-932, 1999.

Huertas A. et R. Nevatia, **Detecting Changes in Aerial Views of Man-Made Structures**, Sixth International Conference on Computer Vision (ICCV'98), Bombay, India, 1998.

Hung M. C., **Urban land cover analysis from satellite images**, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings, 2002.

Hurd J. D., E. Hoffhine Wilson, S. G. Lammey et D. L. Civco, **Characterization of forest fragmentation and urban sprawl using time sequential landsat imagery**, ASPRS 2001 Annual Convention, St. Louis, MO, 2001

Inglada, J., **Change detection on SAR images by using a parametric estimation of the Kullback-Leibler divergence**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.6 , pp. 4104 - 4106, 2003.

Jensen J. R., **Urban/Suburban Land Use Analysis**, Manual of Remote Sensing, 2nd edition, (R. N. Colwell ed.), Chapter 30, Falls Church, American Society of Photogrammetry, pp. 1571-1666, 1983.

Ji C.Y., Q. Liu, D. Sun, S. Wang, P. Lin, et X. Li, **Monitoring urban expansion with remote sensing in China**, International Journal of Remote Sensing, vol. 22, no. 8, pp. 1441-1455, 2001.

Karathanassi, V., Iossifidis, Ch., Rokos. D., **A texture based classification method for classifying the built areas according to their density**, International Journal of Remote Sensing, vol. 21, no. 9, 2000.

Karjalainen M., J. Hyypä et Y. Devillairs, **Urban change detection in the Helsinki Metropolitan Region using RADARSAT-1 fine beam SAR images**, 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data fusion and remote sensing over urban areas, pp.273-277, 2003.

Kurosu T., S. Yokoyama, M. Fujita; K. Chiba, **Land use classification with textural analysis and the aggregation technique using multi-temporal JERS-1 L-band SAR images**, *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 4, pp. 595-613, 2001.

Leduc F., **Développement d'un système expert pour l'analyse de l'imagerie satellitale dans un contexte de mise à jour des cartes de l'inventaire forestier**, Thèse de doctorat, Département de Géographie, Université de Montréal, 231 pages, 2003.

Lee J. S. , **Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images**, *Computer Graphic and Image Processing*, vol. 17, pp. 24-32, 1981.

Lee K.Y., S.C. Liew, L.K. Kwoh, M. Nakayama, **Land Cover Classification Using NASA/JPL Polarimetric Synthetic Aperture Radar (Polsar) Data**, *Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore, vol. 2, pp. 1049-1054, 2001.

Lewis, A. J., P. M. Henderson et D.W. Holcomb, **Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective**, *Principles and Applications of Imaging Radar* (F.M. Henderson and A.J. Lewis, eds.), Chapter 2. New York, pp. 131-181, 1998.

Liu, X. et R.G. Lathrop, **Urban change detection based on an artificial neural network**, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 12, pp. 2513-2518, 2002.

Lo, C. P. , **Applications of Imaging Radar to Land Use and Land Cover Mapping**. *Principles and Applications of Imaging Radar* (F.M. Henderson and A.J. Lewis, eds.), Chapter 14. New York, pp. 705-732, 1998.

Lombardo, P. et C.J Oliver, **Maximum likelihood approach to the detection of changes between multitemporal SAR images**, *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, vol. 148, no. 4, pp. 200-210, 2001.

Lombardo, P. et T.M. Pellizzeri, **Localization of step changes in multitemporal SAR images**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, no. 4, pp. 1256-1275, 2002a.

Lombardo P., et T.M. Pellizzeri, **Maximum likelihood signal processing techniques to detect a step pattern of change in multitemporal SAR images**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 4, pp. 853-870, 2002b.

Lu D., P. Mausel, E. Brondi'zio et E. Moran, **Change detection techniques**, Int. Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 12, pp. 2365–2407, 2003.

Maillard P., **La télédétection et les techniques numériques de traitement d'image appliquées à la mise à jour cartographique**, Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Montréal, 135 pages, 1989.

Maillard P., **Comparing Texture Analysis Methods through Classification**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 69, no. 4, pp. 357-367, 2003.

Maillard P. et F. Cavayas, **Automatic map-guided extraction of roads from SPOT imagery for cartographic database updating**, International journal of remote sensing, vol. 10, no. 11, pp. 1775-1787, 1989.

Mercier, G. et S. Derrode, **SAR image change detection using distance between distributions of classes**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.6 , pp. 3872 - 3875, 2004.

Onana V.P., E.Trouve, G.Mauris, J.P.Rudant, P.L.Frison, **Change detection in urban context with multitemporal ERS-SAR images by using data fusion approach**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 6, pp. 3650-3652, 2003.

ONU, Site Internet de l'Organisation des Nations Unies,

<http://www.un.org/esa/population/publications/wup2003/2003UrbanAgglomeration2003>

[Web.xls](#), consulté en 2005..

Parker , J. R., **Algorithms for Image Processing and Computer Vision**, John Wiley & Sons Publishers, 417 pages, 1996.

Paudyal, D. R. , A. Eiumnoh, J. Aschbacher, J. , **Textural information in SAR images for land-cover applications**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 2, pp. 1020 - 1022, 1995.

Pellizzeri, T.M., P. Lombardo, P. Gamba, F. dell'Acqua, **Multisource urban classification: joint processing of optical and SAR data for land cover mapping**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 2, pp. 1044 - 1046, 2003.

Petit C., T. Scudder et E. Lambin, **Quantifying processes of land-cover change by remote sensing : resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia**, International Journal of Remote Sensing, vol. 22, no. 17, pp. 3435-3456, 2001.

Polidori, L. S. Caillault, J.-L.Canaud, **Change detection in radar images: methods and operational constraints**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.2 , pp. 1529–1531, 1995.

Priess, M., D. Gray, N. Stacy, **A change detection technique for repeat pass interferometric SAR** , Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.2 , pp. 938 - 940, 2003.

Qong M., **Polarization state conformation and its application to change detection in polarimetric SAR data**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 1, no. 4, pp. 304 – 308, 2004.

Raney, R.K., **Radar Fundamentals : Technical Perspective**. Principles and Applications of Imaging Radar (F.M. Henderson and A.J. Lewis, eds.), Chapter 2. New York, pp. 9-130, 1998.

Rajesh K., C. V. Jawahar, S. Sengupta and S. Sinha, **Performance analysis of textural features for characterisation and classification of SAR images**, International Journal of Remote Sensing, Vol 22, No. 8, pp 1555-1569, 2001.

Rao P. V. N., M. V. R. S. Sai, K. Sreenivas, M. V. K. Rao, B. R. M. Rao, R. S. Dwivedi, L. Venkataratnam, **Textural analysis of IRS-1D panchromatic data for land cover classification**, International Journal of Remote Sensing, vol. 23, no. 17, pp. 3327-3345, 2002.

Reed T.R. and H. Buf, **A Review of Recent Texture Segmentation and Feature Extraction Techniques**, CVGIP: Image Understanding, vol. 57, no. 3, pp. 359-372, 1993.

Rignot, E. et R. Chellappa, **A Bayes classifier for change detection in synthetic aperture radar imagery**, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-92, vol. 3, pp. 25 – 28, 1992.

Rignot, E.J.M. et J.J. van Zyl, **Change detection techniques for ERS-1 SAR data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, no. 4, pp. 896 – 906, 1993.

Richards, J. A., **Remote sensing digital image analysis**. Springer-Verlag. New York. pp. 206-225, 1986.

Rocha, J. et J. A. Tenedório, **Integrating Demographic GIS and Multisensor Remote Sensing Data in Urban Land Use/Cover Maps Assembly**, IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Áreas, Novembro, Roma, pp. 46-51, 2001.

Schneider R. Z. et D. Fernandes, **Entropy Among a Sequency of SAR Images for Change Detection**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.2 , pp. 1389 - 1391, 2003.

Schowengerdt R. A., **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Academic Press, Orlando, 1983.

Sciences Po, Site Internet de Sciences Po, http://www.sciences-po.fr/cartographie/cartotheque/cartotheques/cartes_diagrammes/monde/population/agglomerat_1950_2015.jpg, consulté en 2005.

Seto K.C., C.E. Woodcock, C. Song, X. Huang, J. Lu et R.K. Kaufmann, **Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM**, International Journal of Remote Sensing, vol. 23, no. 10, pp. 1985-2004, 2002.

Shaban, M. A. et O. Dikshit, 2001, **Improvement of classification in urban areas by the use of textural features: the case study of Lucknow city, Uttar Pradesh**, International Journal of Remote Sensing, vol. 22, no. 4, pp. 565-593, 2001.

Smith A.J.E., A.C. van den Broek et R.J. Dekker, **Landuse classification using PHARUS polarimetric SAR**, Retrieval of Bio and Geo Physical Parameters from SAR Data for Land Applications Workshop, ESTEC, 1998.

Solaiman B., R. Fiset et F. Cavayas, **Automatic road extraction using fuzzy mask concepts**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.2, pp. 894-896, 1998.

Statistiques Canada, **Rural and Small Town Canada Analysis Bulletin**, Catalogue no. 21-006-XIE, vol. 3, no. 2, 13 pages, 2001.

TCEEA, Site Internet du Topic Centre of European Environment Agency, <http://terrestrial.eionet.eu.int/CLC2000/classes>, consulté en 2005.

Thibault D., **Clé d'interprétation numérique des images SPOT pour la mise à jour des cartes d'occupation du sol en milieu urbain**, Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Montréal, 185 pages, 1990.

Thibault D. et F. Cavayas, **Extraction automatique des données cartographiques des images SPOT pour la mise à jour des inventaires d'utilisations/occupations des sols en milieux urbain et périurbain**, Association québécoise de télédétection, Télédétection et gestion des ressources, vol 6, pp. 83-101, 1989.

Unser M., **Sum and Difference Histograms for Texture Classification**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No.1, pp. 92-105, 1986.

Weydahl, D.J., **Identifying urban features using RADARSAT images taken at multiple incidence angles**, IEEE, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 1, pp. 287-289, 1997.

Weydahl D. J., **Backscatter changes of urban features using multiple incidence angle RADARSAT images**, Can. J. Remote Sensing, Vol. 28, No. 6, pp. 782-793, 2002

White, R.G., **Change detection in SAR imagery**, IEE Colloquium on Synthetic Aperture Radar, pp. 5/1 - 5/3, 1989.

White R.G. et C.J. Oliver, **Change detection in SAR imagery**, Record of the IEEE 1990 International Radar Conference, pp. 217-222, 1990.

Xia Z. G., **Applications of Multi-Frequency, Multi-Polarization and Multi-Incident Angle SAR Systems in Urban Land Use and Land Cover Mapping**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 4, pp. 2310-2314, 1996.

Xiuwan C., **Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development**, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 1, pp. 107-124, 2002.

Zhang Y., **Detection of urban housing development by fusing multisensor satellite data and performing spatial feature post-classification**, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 17, pp. 3339-3355, 2001.

Zhang Q., J. Wang, P. Gong et P. Shi, **Study of urban spatial patterns from SPOT panchromatic imagery using textural analysis**, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 21, pp. 4137–4160, 2003.

ANNEXES

ANNEXE I

21 juillet						
3X3	124,25 Forêt2	126,07 Forêt1	154,74 Forêt3	483,93 Bâti1	837,31 Bâti3	1248,67 Bâti2
5X5	124,14 Forêt2	125,71 Forêt1	154,99 Forêt3	459,57 Bâti1	808,85 Bâti3	1163,23 Bâti2
7X7	124,03 Forêt2	125,37 Forêt1	155,21 Forêt3	431,88 Bâti1	773,08 Bâti3	1073,29 Bâti2
9X9	123,95 Forêt2	124,95 Forêt1	155,52 Forêt3	395,32 Bâti1	730,56 Bâti3	965,13 Bâti2
11X11	123,84 Forêt2	124,43 Forêt1	155,86 Forêt3	361,60 Bâti1	687,06 Bâti3	877,66 Bâti2
13X13	123,71 Forêt2	124,00 Forêt1	156,09 Forêt3	336,61 Bâti1	649,57 Bâti3	816,94 Bâti2
15X15	123,60 Forêt2	123,69 Forêt1	156,24 Forêt3	316,27 Bâti1	618,95 Bâti3	775,42 Bâti2
17X17	123,38 Forêt1	123,48 Forêt2	156,35 Forêt3	299,45 Bâti1	594,23 Bâti3	744,67 Bâti2
19X19	123,04 Forêt1	123,37 Forêt2	156,48 Forêt3	283,91 Bâti1	573,83 Bâti3	719,02 Bâti2
12 août						
3X3	109,13 Forêt3	110,24 Forêt1	124,25 Forêt2	329,81 Bâti1	420,23 Bâti2	596,43 Bâti3
5X5	109,00 Forêt3	109,78 Forêt1	124,14 Forêt2	308,39 Bâti1	391,41 Bâti2	577,03 Bâti3
7X7	108,97 Forêt3	109,17 Forêt1	124,03 Forêt2	276,76 Bâti1	360,46 Bâti2	556,24 Bâti3
9X9	108,60 Forêt1	109,06 Forêt3	123,95 Forêt2	249,16 Bâti1	327,93 Bâti2	533,27 Bâti3
11X11	108,03 Forêt1	109,19 Forêt3	123,84 Forêt2	226,50 Bâti1	300,11 Bâti2	509,99 Bâti3
13X13	107,43 Forêt1	109,39 Forêt3	123,71 Forêt2	209,11 Bâti1	278,63 Bâti2	490,24 Bâti3
15X15	106,80 Forêt1	109,61 Forêt3	123,61 Forêt2	196,14 Bâti1	262,89 Bâti2	475,73 Bâti3
17X17	106,11 Forêt1	109,84 Forêt3	123,49 Forêt2	186,43 Bâti1	250,73 Bâti2	464,54 Bâti3
19X19	105,39 Forêt1	110,07 Forêt3	123,38 Forêt2	179,44 Bâti1	240,65 Bâti2	455,19 Bâti3

Tableau Annexe I- Valeurs moyennes de la mesure de contraste triées en ordre croissant.

ANNEXE II

21 juillet						
3X3	11,30 Forêt1	11,81 Forêt2	12,96 Forêt3	20,63 Bâti1	27,57 Bâti3	32,53 Bâti2
5X5	13,52 Forêt1	13,99 Forêt2	15,37 Forêt3	26,19 Bâti1	35,78 Bâti3	40,55 Bâti2
7X7	14,36 Forêt1	14,78 Forêt2	16,25 Forêt3	28,28 Bâti1	39,19 Bâti3	43,07 Bâti2
9X9	14,76 Forêt1	15,15 Forêt2	16,67 Forêt3	28,72 Bâti1	40,40 Bâti3	43,10 Bâti2
11X11	14,96 Forêt1	15,37 Forêt2	16,90 Forêt3	28,48 Bâti1	40,61 Bâti3	42,29 Bâti2
13X13	15,10 Forêt1	15,50 Forêt2	17,04 Forêt3	28,03 Bâti1	40,46 Bâti3	41,57 Bâti2
15X15	15,19 Forêt1	15,59 Forêt2	17,13 Forêt3	27,53 Bâti1	40,23 Bâti3	41,13 Bâti2
17X17	15,27 Forêt1	15,66 Forêt2	17,20 Forêt3	26,97 Bâti1	40,01 Bâti3	40,82 Bâti2
19X19	15,32 Forêt1	15,70 Forêt2	17,25 Forêt3	26,38 Bâti1	39,78 Bâti3	40,53 Bâti2
12 août						
3X3	10,88 Forêt1	11,20 Forêt3	11,81 Forêt2	16,57 Bâti1	18,92 Bâti2	22,58 Bâti3
5X5	13,06 Forêt1	13,39 Forêt3	13,99 Forêt2	20,94 Bâti1	23,49 Bâti2	29,11 Bâti3
7X7	13,92 Forêt1	14,19 Forêt3	14,78 Forêt2	22,61 Bâti1	25,01 Bâti2	31,97 Bâti3
9X9	14,35 Forêt1	14,56 Forêt3	15,15 Forêt2	23,06 Bâti1	25,21 Bâti2	33,18 Bâti3
11X11	14,60 Forêt1	14,76 Forêt3	15,37 Forêt2	22,92 Bâti1	24,89 Bâti2	33,70 Bâti3
13X13	14,75 Forêt1	14,90 Forêt3	15,50 Forêt2	22,57 Bâti1	24,57 Bâti2	34,00 Bâti3
15X15	14,84 Forêt1	14,99 Forêt3	15,59 Forêt2	22,22 Bâti1	24,30 Bâti2	34,21 Bâti3
17X17	14,88 Forêt1	15,07 Forêt3	15,66 Forêt2	21,97 Bâti1	24,03 Bâti2	34,37 Bâti3
19X19	14,91 Forêt1	15,13 Forêt3	15,71 Forêt2	21,80 Bâti1	23,78 Bâti2	34,45 Bâti3

Tableau Annexe II- Valeurs moyennes de la mesure d'écart type triées en ordre croissant.

ANNEXE III

21 juillet						
3X3	20,47 Forêt1	21,34 Forêt2	23,29 Forêt3	28,10 Bâti1	36,76 Bâti3	46,27 Bâti2
5X5	20,46 Forêt1	21,33 Forêt2	23,30 Forêt3	27,46 Bâti1	36,03 Bâti3	44,64 Bâti2
7X7	20,45 Forêt1	21,32 Forêt2	23,31 Forêt3	26,60 Bâti1	34,94 Bâti3	41,90 Bâti2
9X9	20,43 Forêt1	21,31 Forêt2	23,31 Forêt3	25,67 Bâti1	33,62 Bâti3	39,03 Bâti2
11X11	20,40 Forêt1	21,30 Forêt2	23,32 Forêt3	24,87 Bâti1	32,33 Bâti3	36,74 Bâti2
13X13	20,36 Forêt1	21,30 Forêt2	23,32 Forêt3	24,24 Bâti1	31,20 Bâti3	35,20 Bâti2
15X15	20,33 Forêt1	21,29 Forêt2	23,33 Forêt3	23,75 Bâti1	30,27 Bâti3	34,20 Bâti2
17X17	20,30 Forêt1	21,28 Forêt2	23,32 Bâti1	23,33 Forêt3	29,52 Bâti3	33,51 Bâti2
19X19	20,27 Forêt1	21,27 Forêt2	22,93 Bâti1	23,33 Forêt3	28,90 Bâti3	32,96 Bâti2
12 août						
3X3	19,45 Forêt1	20,33 Forêt3	21,34 Forêt2	23,02 Bâti1	27,76 Bâti2	31,22 Bâti3
5X5	19,40 Forêt1	20,34 Forêt3	21,33 Forêt2	22,16 Bâti1	26,94 Bâti2	30,67 Bâti3
7X7	19,35 Forêt1	20,36 Forêt3	21,20 Bâti1	21,32 Forêt2	25,68 Bâti2	29,97 Bâti3
9X9	19,30 Forêt1	20,38 Forêt3	20,39 Bâti1	21,31 Forêt2	24,35 Bâti2	29,16 Bâti3
11X11	19,24 Forêt1	19,75 Bâti1	20,41 Forêt3	21,30 Forêt2	23,22 Bâti2	28,39 Bâti3
13X13	19,20 Forêt1	19,25 Bâti1	20,43 Forêt3	21,30 Forêt2	22,42 Bâti2	27,78 Bâti3
15X15	18,89 Bâti1	19,15 Forêt1	20,46 Forêt3	21,29 Forêt2	21,88 Bâti2	27,32 Bâti3
17X17	18,67 Bâti1	19,10 Forêt1	20,48 Forêt3	21,28 Forêt2	21,51 Bâti2	26,96 Bâti3
19X19	18,52 Bâti1	19,05 Forêt1	20,50 Forêt3	21,22 Bâti2	21,27 Forêt2	26,65 Bâti3
Tableau Annexe III- Valeurs moyennes de la mesure de moyenne triées en ordre croissant.						

ANNEXE IV

21 juillet						
3X3	0,049 Bâti2	0,076 Bâti3	0,089 Bâti1	0,101 Forêt3	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
5X5	0,053 Bâti2	0,078 Bâti3	0,094 Bâti1	0,102 Forêt3	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
7X7	0,059 Bâti2	0,081 Bâti3	0,097 Bâti1	0,102 Forêt3	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
9X9	0,064 Bâti2	0,084 Bâti3	0,1 Bâti1	0,102 Forêt3	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
11X11	0,067 Bâti2	0,087 Bâti3	0,102 Forêt3	0,103 Bâti1	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
13X13	0,071 Bâti2	0,09 Bâti3	0,102 Forêt3	0,105 Bâti1	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
15X15	0,073 Bâti2	0,092 Bâti3	0,102 Forêt3	0,107 Bâti1	0,109 Forêt1	0,114 Forêt2
17X17	0,074 Bâti2	0,094 Bâti3	0,102 Forêt3	0,109 Forêt1	0,109 Bâti1	0,114 Forêt2
19X19	0,076 Bâti2	0,096 Bâti3	0,102 Forêt3	0,109 Forêt1	0,11 Bâti1	0,114 Forêt2
12 août						
3X3	0,083 Bâti2	0,087 Bâti3	0,114 Forêt2	0,116 Forêt1	0,117 Bâti1	0,119 Forêt3
5X5	0,086 Bâti2	0,09 Bâti3	0,114 Forêt2	0,117 Forêt1	0,119 Forêt3	0,12 Bâti1
7X7	0,092 Bâti2	0,093 Bâti3	0,114 Forêt2	0,117 Forêt1	0,119 Forêt3	0,123 Bâti1
9X9	0,096 Bâti3	0,097 Bâti2	0,114 Forêt2	0,117 Forêt1	0,119 Forêt3	0,127 Bâti1
11X11	0,099 Bâti3	0,102 Bâti2	0,114 Forêt2	0,117 Forêt1	0,119 Forêt3	0,13 Bâti1
13X13	0,101 Bâti3	0,106 Bâti2	0,114 Forêt2	0,118 Forêt1	0,119 Forêt3	0,132 Bâti1
15X15	0,103 Bâti3	0,109 Bâti2	0,114 Forêt2	0,118 Forêt1	0,119 Forêt3	0,133 Bâti1
17X17	0,105 Bâti3	0,111 Bâti2	0,114 Forêt2	0,118 Forêt1	0,119 Forêt3	0,134 Bâti1
19X19	0,107 Bâti3	0,113 Bâti2	0,114 Forêt2	0,119 Forêt1	0,12 Forêt3	0,134 Bâti1

Tableau Annexe IV- Valeurs moyennes de la mesure d'homogénéité triées en ordre croissant.

ANNEXE V

21 juillet						
3X3	0,0347 Forêt3	0,0350 Forêt2	0,0350 Bâti1	0,0350 Bâti3	0,0380 Bâti2	0,0410 Forêt1
5X5	0,0044 Bâti3	0,0046 Bâti2	0,0048 Forêt3	0,0048 Bâti1	0,0051 Forêt2	0,0059 Forêt1
7X7	0,0016 Bâti2	0,0016 Bâti3	0,0018 Bâti1	0,0019 Forêt3	0,0020 Forêt2	0,0023 Forêt1
9X9	0,0008 Bâti2	0,0009 Bâti3	0,0011 Forêt3	0,0011 Bâti1	0,0012 Forêt2	0,0014 Forêt1
11X11	0,0006 Bâti2	0,0006 Bâti3	0,0008 Forêt3	0,0008 Bâti1	0,0009 Forêt2	0,0010 Forêt1
13X13	0,0004 Bâti2	0,0005 Bâti3	0,0006 Forêt3	0,0007 Bâti1	0,0007 Forêt2	0,0008 Forêt1
15X15	0,0004 Bâti2	0,0004 Bâti3	0,0006 Forêt3	0,0006 Bâti1	0,0007 Forêt2	0,0007 Forêt1
17X17	0,0003 Bâti2	0,0004 Bâti3	0,0005 Forêt3	0,0006 Bâti1	0,0006 Forêt2	0,0006 Forêt1
19X19	0,0003 Bâti2	0,0004 Bâti3	0,0005 Forêt3	0,0006 Bâti1	0,0006 Forêt2	0,0006 Forêt1
12 août						
3X3	0,035 Forêt2	0,036 Forêt3	0,036 Bâti3	0,037 Bâti1	0,041 Bâti2	0,042 Forêt1
5X5	0,0048 Bâti3	0,0051 Forêt2	0,0053 Forêt3	0,0055 Bâti1	0,0056 Bâti2	0,0062 Forêt1
7X7	0,0018 Bâti3	0,0020 Forêt2	0,0021 Forêt3	0,0022 Bâti2	0,0023 Bâti1	0,0025 Forêt1
9X9	0,0010 Bâti3	0,0012 Forêt2	0,0013 Bâti2	0,0013 Forêt3	0,0014 Bâti1	0,0015 Forêt1
11X11	0,0007 Bâti3	0,0009 Forêt2	0,0009 Bâti2	0,001 Forêt3	0,001 Forêt1	0,001 Bâti1
13X13	0,0006 Bâti3	0,0007 Forêt2	0,0008 Bâti2	0,0008 Forêt3	0,0009 Forêt1	0,0009 Bâti1
15X15	0,0005 Bâti3	0,0007 Forêt2	0,0007 Bâti2	0,0007 Forêt3	0,0008 Forêt1	0,0009 Bâti1
17X17	0,0005 Bâti3	0,0006 Forêt2	0,0006 Bâti2	0,0006 Forêt3	0,0007 Forêt1	0,0008 Bâti1
19X19	0,0005 Bâti3	0,0006 Forêt2	0,0006 Bâti2	0,0006 Forêt3	0,0007 Forêt1	0,0008 Bâti1

Tableau Annexe V- Valeurs moyennes de la mesure d'énergie triées en ordre croissant.

ANNEXE VI

21 juillet						
3X3	0,194 Bâti2	0,2 Bâti3	0,204 Bâti1	0,211 Forêt3	0,214 Forêt2	0,217 Forêt1
5X5	0,091 Bâti2	0,101 Bâti3	0,103 Bâti1	0,112 Forêt3	0,115 Forêt1	0,115 Forêt2
7X7	0,063 Bâti2	0,07 Bâti3	0,071 Bâti1	0,077 Forêt3	0,08 Forêt2	0,081 Forêt1
9X9	0,05 Bâti2	0,056 Bâti3	0,059 Bâti1	0,061 Forêt3	0,063 Forêt2	0,065 Forêt1
11X11	0,043 Bâti2	0,048 Bâti3	0,052 Forêt3	0,052 Bâti1	0,054 Forêt2	0,055 Forêt1
13X13	0,039 Bâti2	0,044 Bâti3	0,046 Forêt3	0,048 Forêt2	0,048 Bâti1	0,05 Forêt1
15X15	0,035 Bâti2	0,04 Bâti3	0,042 Forêt3	0,044 Forêt2	0,046 Forêt1	0,047 Bâti1
17X17	0,033 Bâti2	0,038 Bâti3	0,039 Forêt3	0,041 Forêt2	0,042 Forêt1	0,045 Bâti1
19X19	0,031 Bâti2	0,036 Forêt3	0,036 Bâti3	0,038 Forêt2	0,040 Forêt1	0,044 Bâti1
12 août						
3X3	0,204 Bâti3	0,21 Bâti1	0,21 Bâti2	0,214 Forêt2	0,216 Forêt3	0,219 Forêt1
5X5	0,106 Bâti3	0,11 Bâti1	0,11 Bâti2	0,115 Forêt2	0,116 Forêt3	0,118 Forêt1
7X7	0,074 Bâti3	0,078 Bâti2	0,08 Forêt2	0,08 Forêt3	0,08 Bâti1	0,083 Forêt1
9X9	0,059 Bâti3	0,063 Forêt2	0,063 Bâti2	0,064 Forêt3	0,066 Bâti1	0,067 Forêt1
11X11	0,051 Bâti3	0,054 Forêt2	0,055 Forêt3	0,056 Bâti2	0,057 Forêt1	0,058 Bâti1
13X13	0,046 Bâti3	0,0479 Forêt2	0,0486 Forêt3	0,051 Forêt1	0,051 Bâti2	0,053 Bâti1
15X15	0,0424 Bâti3	0,0438 Forêt2	0,0446 Forêt3	0,046 Forêt1	0,047 Bâti2	0,0497 Bâti1
17X17	0,0398 Bâti3	0,0408 Forêt2	0,0417 Forêt3	0,043 Forêt1	0,044 Bâti2	0,0475 Bâti1
19X19	0,0378 Bâti3	0,0384 Forêt2	0,0395 Forêt3	0,041 Forêt1	0,042 Bâti2	0,0454 Bâti1

Tableau Annexe VI- Valeurs moyennes de la mesure de probabilité maximum triées en ordre croissant.

ANNEXE VII

21 juillet						
3X3	3,17 Bâti2	3,19 Forêt1	3,36 Bâti1	3,38 Bâti3	3,41 Forêt2	3,43 Forêt3
5X5	5,13 Forêt1	5,20 Bâti2	5,41 Bâti1	5,45 Forêt2	5,48 Bâti3	5,50 Forêt3
7X7	6,09 Forêt1	6,28 Bâti2	6,44 Bâti1	6,46 Forêt2	6,54 Forêt3	6,59 Bâti3
9X9	6,63 Forêt1	6,93 Bâti2	7,01 Bâti1	7,01 Forêt2	7,13 Forêt3	7,24 Bâti3
11X11	6,96 Forêt1	7,34 Forêt2	7,34 Bâti2	7,34 Bâti1	7,48 Forêt3	7,64 Bâti3
13X13	7,16 Forêt1	7,54 Forêt2	7,55 Bâti1	7,61 Bâti2	7,69 Forêt3	7,90 Bâti3
15X15	7,30 Forêt1	7,68 Bâti1	7,68 Forêt2	7,80 Bâti2	7,84 Forêt3	8,07 Bâti3
17X17	7,40 Forêt1	7,76 Bâti1	7,77 Forêt2	7,93 Bâti2	7,94 Forêt3	8,19 Bâti3
19X19	7,47 Forêt1	7,81 Bâti1	7,84 Forêt2	8,01 Forêt3	8,03 Bâti2	8,28 Bâti3
12 août						
3X3	3,17 Forêt1	3,19 Bâti2	3,35 Bâti1	3,38 Bâti3	3,40 Forêt3	3,41 Forêt2
5X5	5,10 Forêt1	5,16 Bâti2	5,34 Bâti1	5,43 Forêt3	5,45 Forêt2	5,46 Bâti3
7X7	6,04 Forêt1	6,16 Bâti2	6,31 Bâti1	6,42 Forêt3	6,46 Forêt2	6,53 Bâti3
9X9	6,57 Forêt1	6,72 Bâti2	6,82 Bâti1	6,96 Forêt3	7,01 Forêt2	7,15 Bâti3
11X11	6,88 Forêt1	7,06 Bâti2	7,12 Bâti1	7,28 Forêt3	7,34 Forêt2	7,53 Bâti3
13X13	7,08 Forêt1	7,27 Bâti2	7,29 Bâti1	7,48 Forêt3	7,54 Forêt2	7,77 Bâti3
15X15	7,22 Forêt1	7,40 Bâti1	7,41 Bâti2	7,61 Forêt3	7,68 Forêt2	7,93 Bâti3
17X17	7,31 Forêt1	7,48 Bâti1	7,51 Bâti2	7,70 Forêt3	7,77 Forêt2	8,05 Bâti3
19X19	7,37 Forêt1	7,53 Bâti1	7,58 Bâti2	7,76 Forêt3	7,84 Forêt2	8,13 Bâti3
Tableau Annexe VII- Valeurs moyennes de la mesure d'entropie triées en ordre croissant.						

ANNEXE VIII

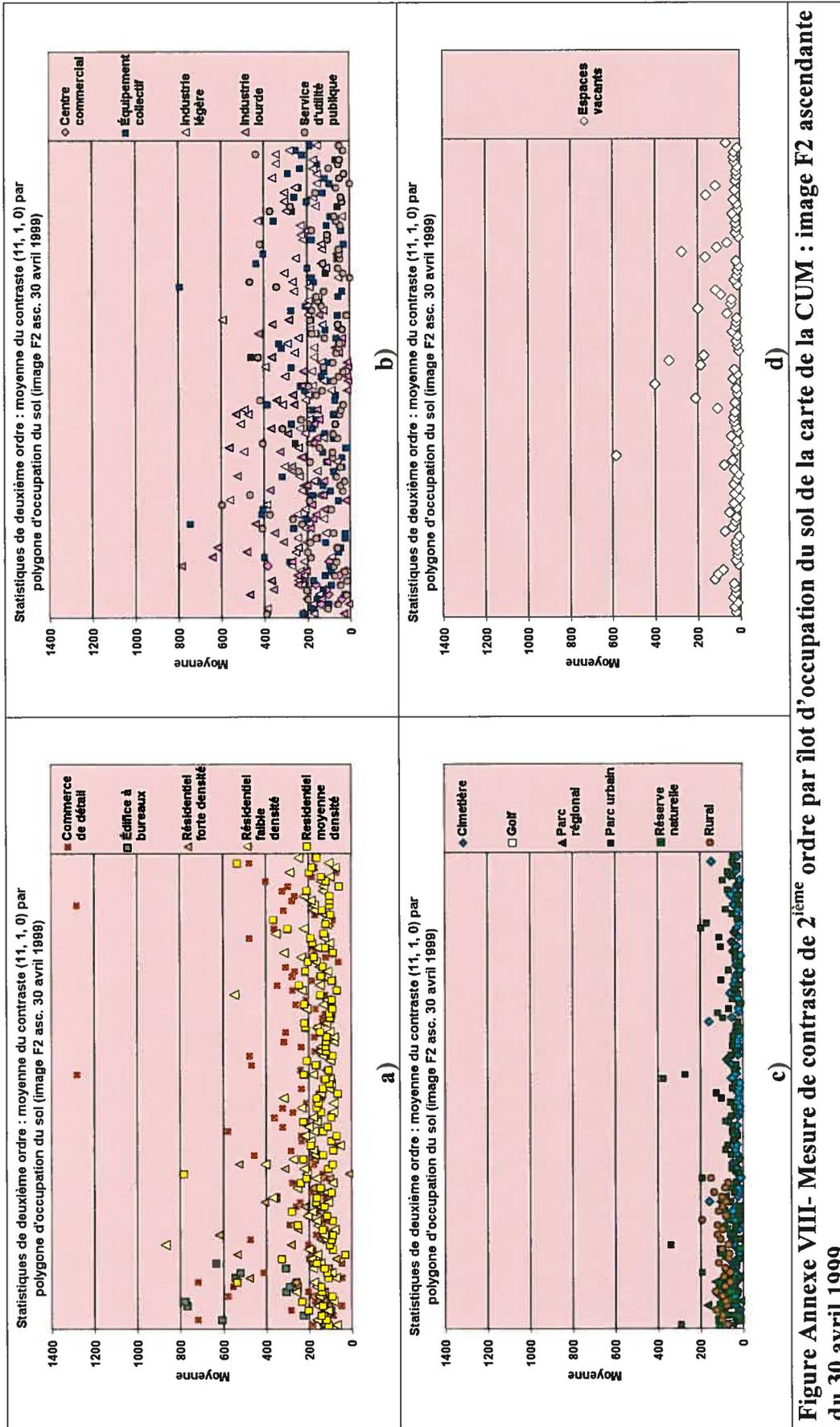


Figure Annexe VIII- Mesure de contraste de 2^{ème} ordre par flot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

ANNEXE IX

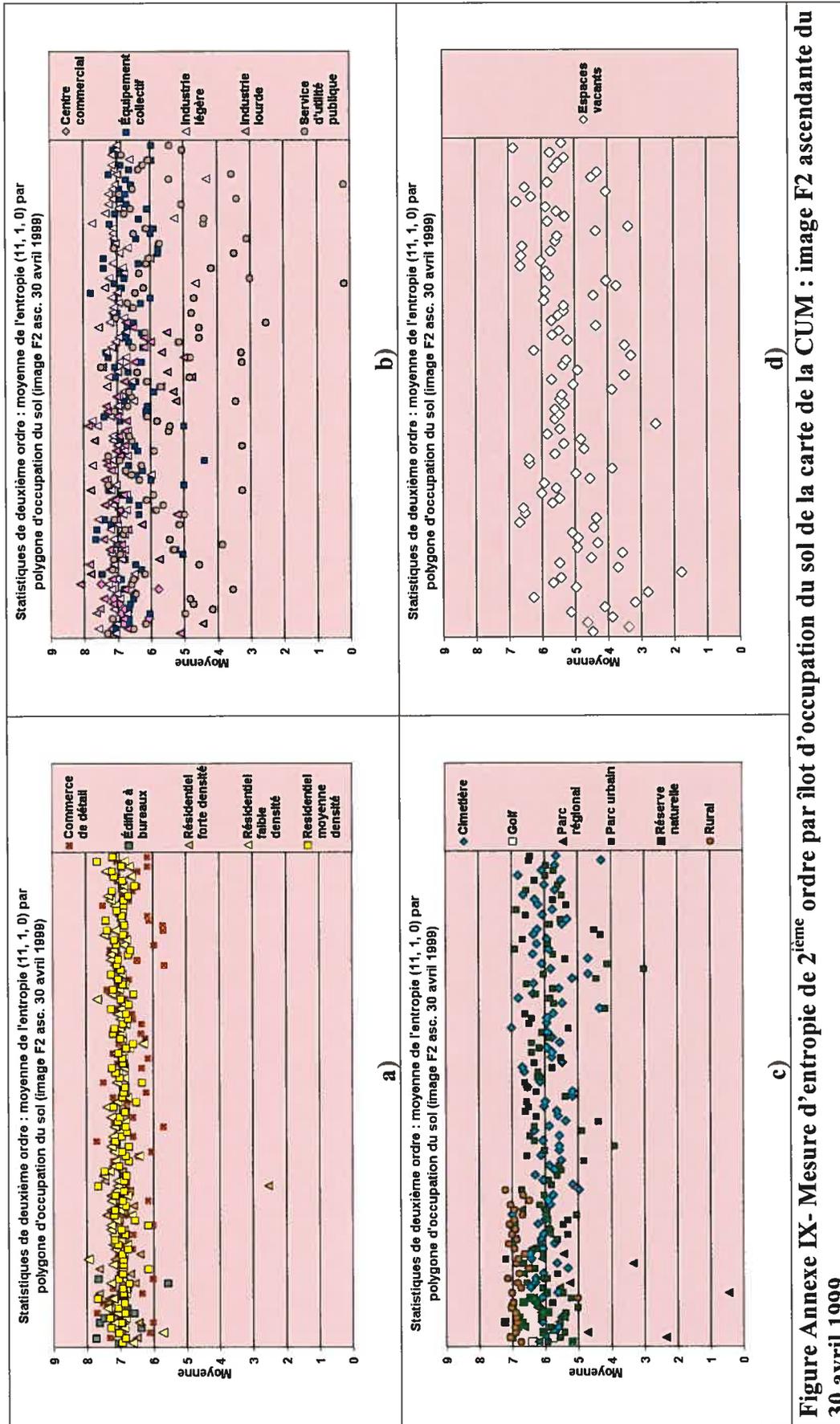


Figure Annexe IX- Mesure d'entropie de 2^{ème} ordre par filot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

ANNEXE X

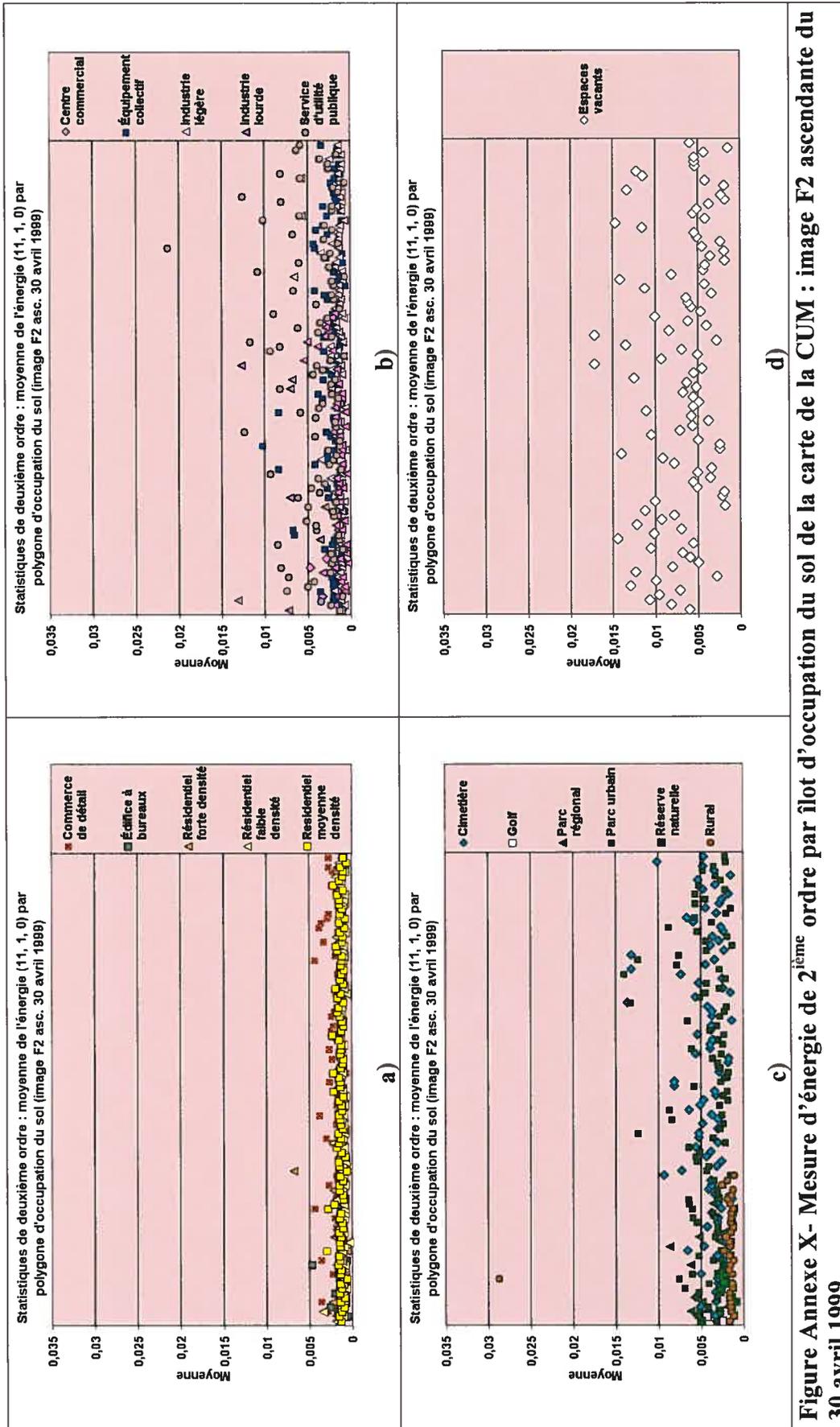


Figure Annexe X- Mesure d'énergie de 2^{ème} ordre par filot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

ANNEXE XI

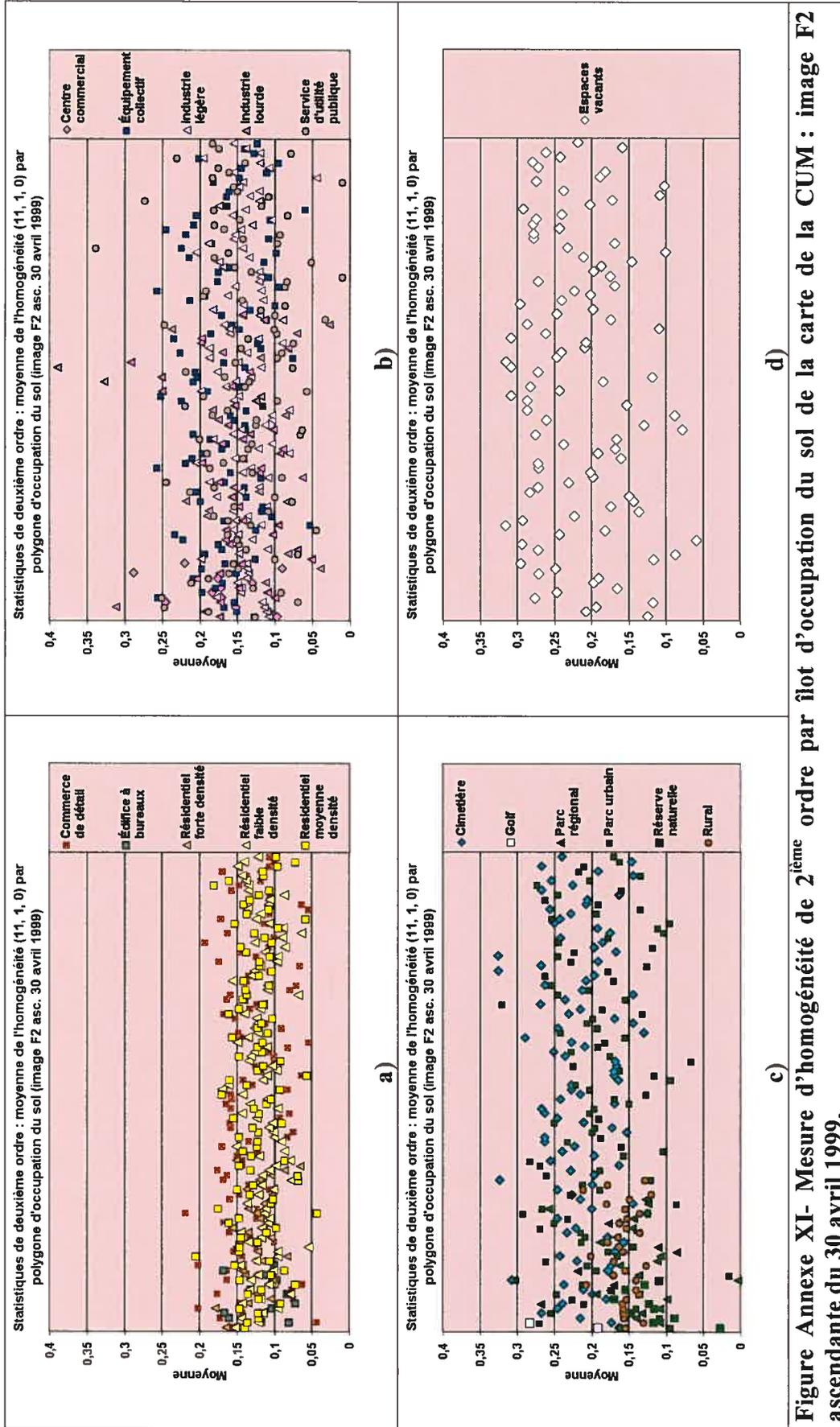


Figure Annexe XI- Mesure d'homogénéité de 2^{ème} ordre par flot d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

ANNEXE XII

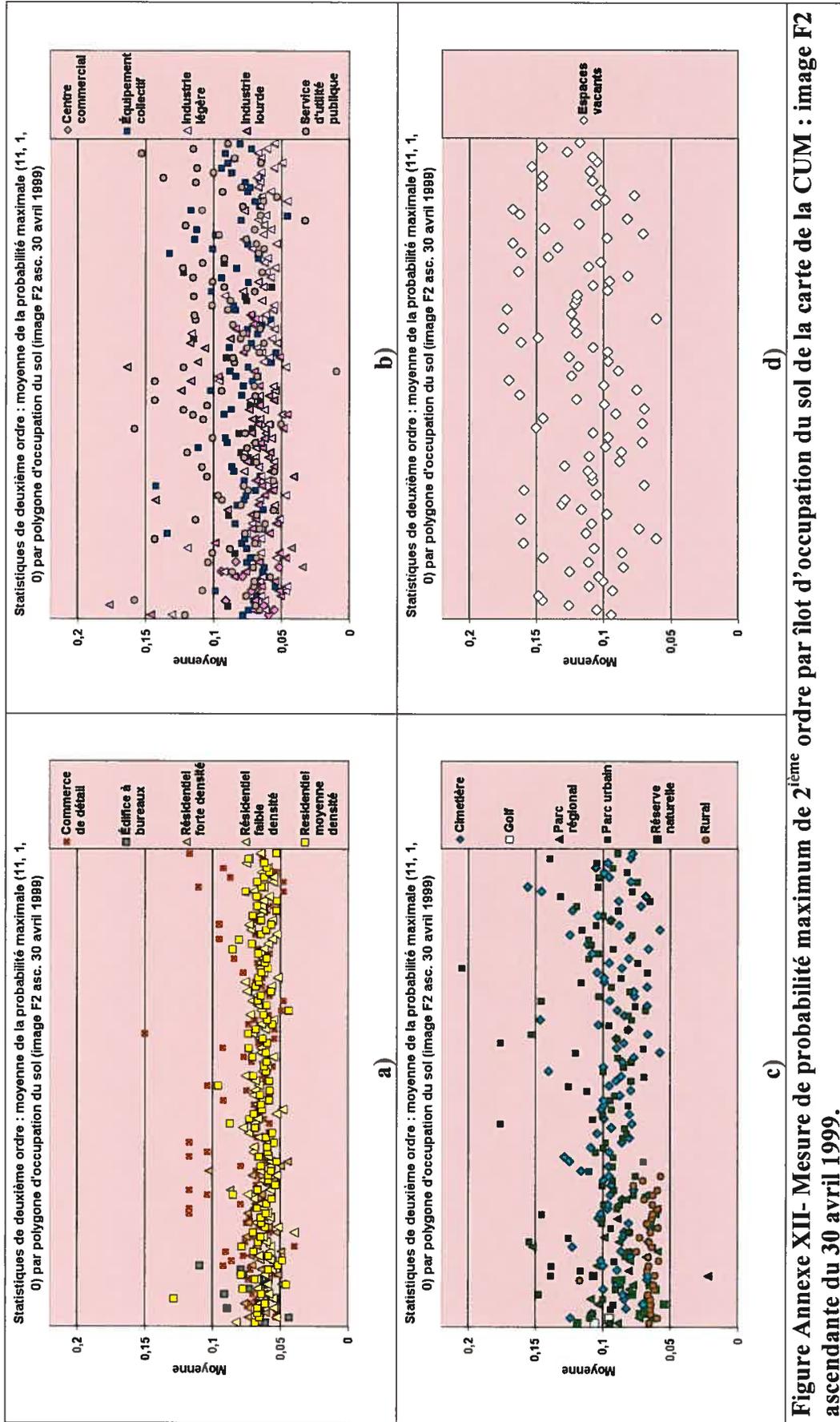


Figure Annexe XII- Mesure de probabilité maximum de 2^{ème} ordre par flôt d'occupation du sol de la carte de la CUM : image F2 ascendante du 30 avril 1999.

RÉFÉRENCES

Anderson, J. R., **Land use classification schemes used in selected recent geographic applications of remote sensing**, Photogrammetric Engineering, vol. 37, no. 4, pp. 379-387, 1971.

Anderson, J. R., E. E. Hardy, et J. T. Roach, **A land-use classification system for use with remote-sensor data**, U.S. Geological Survey Cire 671, 16 pages, 1972.

Anderson J. R., E. E. Hardy, J. T. Roach et R. E. Witmer, **A land use and land cover classification system for use with remote sensor data**, The U.S. Geological Survey professional paper 964, 41 pages, 1976.

ASC, Site Internet de l'Agence Spatiale Canadienne,
<http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/radarsat1/default.asp>, consulté en 2005.

Argialas, D.P. and C.A. Harlow, **Computational image interpretation models: an overview and a perspective**, Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 56, no. 6, pp. 871-886, 1990.

Bao M., **Backscattering change detection in SAR images using wavelet techniques**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 3 , pp. 1561-1563, 1999.

Baronti, S., R. Carla, S. Sigismondi, L. Alparone, **Principal component analysis for change detection on polarimetric multitemporal SAR data**, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 4 , pp. 2152-2154, 1994.

Bazi, Y., L. Bruzzone et F. Melgani, **An Unsupervised Approach Based on the Generalized Gaussian Model to Automatic Change Detection in Multitemporal SAR Images**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 4, pp. 874-887, 2005.