Institut de recherche en biologie végétale IRBV

JARDIN BOTANIQUE DE MONTRÉAL

Université de Montréal

DÉTECTION DE L'ÉVOLUTION DES SUPERFICIES FORESTIÈRES EN MONTÉRÉGIE ENTRE JUIN 1999 ET AOÛT 2002 À PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES *LANDSAT-TM*

Rapport présenté à l'Agence forestière de la Montérégie (AFM)
Directeur : Luc Dumouchel

Par

Nicolas Soucy-Gonthier[1], Danielle Marceau[1], Marc Delage[2], Alain Cogliastro[3], Gérald Domon[4] et André Bouchard[3]

[1] Département de géographie (Université de Montréal) ; [2] Réseau Ligniculture Québec (RLQ) et Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) ; [3] Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) ; [4] Faculté de l'aménagement (Université de Montréal)

Photo : Luc Normandin

Octobre 2003

AGENCE FORESTIÈRE DE LA MONTÉRÉGIE

RÉSEAU LIGNICULTURE QUÉBEC

Table des matières

Page

Liste des tableaux et des figures 2
1. Introduction 3
2. Méthodologie 4
2.1 Source des données 4
2.2 Étapes méthodologiques 5
2.2.1 Corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique 5
2.2.2 Création d'indices de végétation 6
2.2.3 Application d'un masque 6
2.2.4 Classification, détection des changements et validation des résultats 7
3. Résultats 11
3.1 Évolution des superficies forestières 11
3.2 Fiabilité des résultats 15
4. Conclusion 19
Remerciements 20
Références 21

Annexe 1 : Détails techniques de la méthodologie 23
1. Corrections radiométriques 23
1.1 Normalisation de l'image *Landsat 5 TM* 23
1.2 Conversion des images en mesures de réflectance 23
2. Correction atmosphérique de l'image *Landsat 7 ETM+* 24
3. Corrections géométriques 25
4. Création d'indices de végétation 26
4.1 Indice de végétation par différence normalisée (*NDVI*) 26
4.2 *Tasseled Cap* (*TC*) 27
5. Application d'un masque 27

Annexe 2 (disque compact en pochette) Pour chacune des 15 MRC : image de 1999, de 2002, des gains et des pertes

Liste des tableaux

Page

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs *Landsat 5 TM* et *Landsat 7 ETM+* 4

Tableau 2 : Superficies forestières et non forestières par MRC et pour l'ensemble de la Montérégie en 1999 11

Tableau 3 : Superficies forestières et non forestières par MRC et pour l'ensemble de la Montérégie en 2002 12

Tableau 4 : Évolution des superficies forestières par MRC et pour la Montérégie entre 1999 et 2002 13

Tableau 5 : Vérification de l'exactitude des classifications des deux images *Landsat* par MRC 16

Tableau 6 : Valeurs de pente et d'interception 25

Liste des figures

Page

Figure 1 : Exemple de correction d'une surestimation des gains dans la MRC Les Jardins-de Napierville 9

Figure 2 : Exemple de correction d'une surestimation des pertes dans la MRC d'Acton 10

Figure 3 : Illustration de pertes importantes de superficies forestières (en rouge) dans les municipalités de Saint-Jude et de Saint-Bernard-de-Michaudville, dans la MRC Les Maskoutains, et dans la MRC Le Haut-St-Laurent 14

Figure 4 : Exemples de sous-évaluation, de surévaluation et de correspondance quasi- parfaite pour le couvert forestier en 1999 comparés aux cartes topographiques à 1/50 000 18

1. Introduction

La question de l'évolution des superficies forestières dans le Sud du Québec est un sujet brûlant d'actualité. Qui n'a pas constaté, au cours d'une balade en campagne, ces monticules de débris forestiers, ces andains, là où peu de temps auparavant vivait une forêt ? Plusieurs s'inquiètent de la perte d'importantes surfaces de couvert forestier, alors que d'autres affirment que ce qui est déboisé est compensé par la plantation de superficies équivalentes.

Il est donc impératif d'obtenir un portrait juste et récent de la couverture forestière et de pouvoir la comparer avec sa situation passée. Les images satellitaires sont les seuls outils disponibles qui permettent, à des coûts relativement faibles et en peu de temps, d'obtenir des images d'un grand territoire et de suivre son évolution dans le temps. L'objectif de ce projet consiste donc à quantifier, à partir de deux images satellitaires *Landsat-TM*, l'évolution du couvert forestier entre juin 1999 et août 2002 pour l'ensemble de la Montérégie et pour chacune des municipalités régionales de comté (MRC) composant ce territoire.

Il est important de noter que le but de ce projet est de mettre en évidence les tendances générales dans l'évolution des superficies forestières en Montérégie. À cause de la résolution spatiale relativement grossière des images *Landsat-TM* (30 m), les résultats obtenus comportent une certaine marge d'erreur liée intrinsèquement aux limites du capteur. Ainsi, ces résultats n'offrent pas un niveau de précision suffisant pour être utilisés à des fins d'aménagement du territoire. Par contre, comme il est démontré dans ce rapport, les données *Landsat-TM* ont permis de faire ressortir un portrait de l'évolution des superficies forestières qui s'est avéré, suite à une vérification sur le terrain, d'une exactitude élevée dans de nombreux secteurs de la Montérégie.

La méthodologie retenue repose sur une méthode de détection de changements communément utilisée qui consiste à classifier les images de télédétection acquises à des dates différentes au-dessus d'un même territoire et à comparer les résultats pour en extraire les changements. Les avantages de cette approche sont qu'elle permet d'obtenir un portrait complet de la région d'étude à des dates différentes et d'identifier non seulement tous les pixels qui ont changé d'état entre les deux dates, mais aussi la nature de ces changements. Cependant, pour fournir des résultats optimaux, cette méthode requiert que des pré-traitements soient apportés aux différentes images pour les rendre le plus comparable possible et que des sites d'entraînement

et de validation de qualité soient disponibles pour assurer l'exactitude des classifications obtenues (Jensen, 1996).

Ce rapport est organisé de la manière suivante. Une synthèse des étapes méthodologiques est présentée à la section 2. Pour ne pas alourdir la rédaction du texte et en faciliter la lecture, les informations techniques détaillées associées à certaines de ces étapes ont été placées dans l'Annexe 1. Les données quantitatives obtenues concernant l'évolution des superficies forestières et l'exactitude des résultats sont décrits à la section 3. Des secteurs du territoire de la Montérégie sont utilisés pour illustrer des coupes forestières importantes ainsi que la fiabilité des résultats. Des questions importantes pour l'avenir de la forêt en Montérégie sont soulevées dans la conclusion qui complète le rapport.

2. Méthodologie

2.1 Source des données

Les données proviennent de deux images satellitaires multispectrales. La première image a été captée le 11 juin 1999 à 11h08 par le satellite *Landsat 5 TM (Thematic Mapper)*. L'acquisition de la deuxième image s'est effectuée le 14 août 2002 à 10h26 par le satellite *Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)*. Les résolutions spectrale et spatiale des cinq bandes considérées pour l'étude sont présentées au tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs *Landsat 5 TM* et *Landsat 7 ETM+*

Landsat 5 (TM)* et *Landsat 7 (ETM+)		
Fauchée : 185 km		
Bande spectrale	**Résolution spectrale (µm)**	**Résolution spatiale (m)**
Bande 1 (bleu)	0,45 – 0,52	30
Bande 2 (vert)	0,52 – 0,60	30
Bande 3 (rouge)	0,63 – 0,69	30
Bande 4 (IR)	0,76 – 0,90	30
Bande 5 (IR)	1,55 – 1,75	30

En complément aux images satellitaires, les sources d'information suivantes ont été utilisées. Les cartes topographiques à 1/250 000 de Trois-Rivières, Montréal et Ottawa (Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1992; Ressources naturelles Canada, 1995, 1996) ont servi à géoréférencer et corriger géométriquement les deux images de télédétection. Les cartes topographiques à 1/50 000 couvrant l'ensemble du territoire de la Montérégie ont été utilisées pour le choix des sites d'entraînement et de validation de la classification (Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1988; Ressources naturelles Canada, 1998, 1999, 2000, 2002). Finalement, une couche vectorielle des limites des municipalités régionales de comté de la Montérégie, fournie par l'Agence forestière de la Montérégie (AFM), a été utilisée pour le découpage des images *Landsat* afin de calculer les changements de superficie forestière par MRC.

2.2 Étapes méthodologiques

La méthodologie comporte les étapes suivantes: 1) les corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique des images, 2) la création d'indices de végétation, 3) l'application d'un masque, 4) la classification des images suivie par la détection des changements et la validation des résultats. L'objectif et l'approche générale utilisée pour chacune de ces étapes sont décrits dans cette section. Une description technique complète des étapes 1, 2 et 3 est présentée dans l'Annexe 1.

2.2.1 Corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique

Dans une étude de détection de changements, les images utilisées doivent présenter des caractéristiques les plus homogènes possibles de sorte que les différences provenant de leur comparaison puissent être associées à de réels changements d'état du territoire et non à des artéfacts liés aux images. Idéalement, les images doivent provenir du même capteur et la date d'acquisition doit varier le moins possible. En raison de considérations physiques et économiques, ces conditions idéales n'ont pu être rencontrées. Afin de contrer ces lacunes, les images ont d'abord fait l'objet de corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique.

La méthode employée pour la correction radiométrique a été empruntée au *National Aeronautics and Space Administration* (*NASA*), au *United States Geological Survey* (*USGS*) et à Jensen (1996). L'objectif est de normaliser l'image selon les propriétés du capteur *Landsat 7 ETM+*, de convertir les valeurs numériques des deux images en valeurs de réflectance selon les

paramètres du capteur *Landsat 7 ETM+* et de minimiser l'impact des conditions non-surfaciques sur les valeurs de l'image de 2002.

La correction atmosphérique a pour but de corriger certaines variations de la distribution des données causées par le décalage temporel dans l'acquisition des images. En effet, les facteurs comme l'angle d'élévation du soleil, la distance terre-soleil, le calibrage des capteurs, les conditions atmosphériques et la géométrie de visée affectent la valeur numérique des pixels (Eckhardt *et al*., 1990). En raison de la difficulté à obtenir une information fiable sur ces différents paramètres lors de la prise des images, une correction atmosphérique basée sur une normalisation empirique d'image à image a été appliquée (Jensen, 1996).

Finalement, des corrections géométriques ont été appliquées aux images afin de les géoréférencer dans le système de coordonnées UTM et de les rendre superposables pour permettre la comparaison des classifications et la détection des changements entre les deux dates. Un fait à noter est que la portion sud de la MRC Le Haut-St-Laurent ainsi que la portion ouest de celle de Vaudreuil-Soulanges étaient tronquées sur l'image de 1999. Elles ont dû être soustraites également de l'image 2002.

2.2.2 Création d'indices de végétation

Cette étape a pour objectifs d'augmenter la sensibilité des images aux composantes végétales et d'exprimer la variance des images selon un nombre minimal de bandes spectrales afin d'augmenter le pouvoir de discrimination entre les classes. Ces deux objectifs ont été accomplis grâce à l'application d'un indice de végétation par différence normalisée (*NDVI* ou *Normalized Difference Vegetation Index*) et d'une transformation *Tasseled Cap* (*TC*).

2.2.3 Application d'un masque

La fonction d'un masque est d'éliminer les zones de l'image qui n'ont aucun intérêt et qui pourraient influer sur les résultats des classifications finales. Un masque a été créé pour éliminer la zone à l'extérieur des limites de la Montérégie ainsi que l'ensemble des classes non végétales, c'est-à-dire le contour des images, les zones nuageuses, l'eau et le cadre bâti incluant les bâtiments et les routes.

2.2.4 Classification des images, détection des changements et validation des résultats

L'objectif de cette étude étant la quantification de l'évolution des superficies forestières, les différentes utilisations du sol du territoire à l'étude ont été regroupées en deux grandes classes : le forestier et le non forestier. Le forestier est, comme son nom l'indique, le couvert arboré. Le non forestier correspond aux zones de sol nu ou à végétation basse, aux sols en culture, aux friches basses, aux vergers et aux milieux humides. Tout ce qui n'est pas pertinent à la présente étude, soit l'hydrographie, le cadre bâti, les zones nuageuses et le pourtour des images, a été masqué tel que précédemment décrit et n'est pas inclus dans la classification et le calcul des superficies.

Une analyse des bandes spectrales du bleu (bande 1), du vert (bande 2) et du rouge (bande 3) des deux images a révélé que ces bandes présentent un faible niveau de corrélation entre des cibles de même nature. Ceci réduit considérablement leur utilité pour effectuer une détection de changements. Pour cette raison, la classification de l'image de 1999 a été effectuée à partir des bandes du proche infrarouge (bande 4), du moyen infrarouge (bande 5) et du *NDVI*, alors que l'image de 2002 a été classifiée en se basant sur les bandes du proche infrarouge (bande 4), du moyen infrarouge (bande 5), de brillance, de végétation et d'humidité provenant du *Tasseled Cap* (*TC*) et du *NDVI*. Les trois bandes du *TC* n'ont pas été utilisées pour la classification de l'image de 1999 car elles semblaient être affectées par un taux d'humidité au sol élevé.

La classification des images et la détection des changements ont été réalisées en deux étapes. La première étape a été réalisée au cours de l'hiver 2003, date à laquelle il était impossible de visiter le terrain. Des sites d'entraînement ont donc été identifiés à l'aide d'experts de l'Agence Forestière de la Montérégie, du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (bureau de Marieville) et d'une carte écoforestière fournie par l'AFM. À partir de ces données et d'un examen minutieux des deux images, l'image de 1999 a fait l'objet d'une classification automatisée par maximum de vraisemblance selon neuf classes. Le même algorithme de classification a été employé pour discriminer 11 classes dans l'image 2002. Suite à l'application d'une série de filtres modaux afin d'obtenir un minimum de pixels isolés, les classes des deux images ont été agrégées au nombre de deux, soit le forestier et le non forestier. Enfin, le masque a été soustrait des deux classifications afin d'obtenir des superficies comparables pour les deux images.

La détection des changements a été obtenue en comparant la classification des deux images au sein d'une matrice de contingence. Les résultats ont été générés pour l'ensemble de la

Montérégie et pour chacune des MRC. L'analyse de ces premiers résultats suite à des visites sur le terrain a révélé une surestimation considérable de la perte des superficies forestières pour le territoire de la Montérégie. Cette surestimation est principalement due au fait que des superficies appréciables de l'image 1999 ont été classifiées comme étant de la forêt alors qu'elles n'en étaient pas. De plus, un examen des résultats par MRC a révélé que la présence de zones humides dans plusieurs MRC a engendré une surévaluation des superficies forestières sur l'image de 2002. Après plusieurs tentatives de correction de ces biais en utilisant des sites d'entraînement plus précis, il s'est avéré qu'il devenait impossible d'obtenir des résultats fiables en appliquant la classification sur l'ensemble du territoire et une approche différente a dû être testée qui constitue la seconde étape de classification et de validation des résultats.

Pour cette deuxième étape de classification, le territoire de la Montérégie a été découpé par MRC en appliquant la carte vectorielle des limites des MRC fournie par l'AFM sur les deux images *Landsat*. En raison de la nature des deux documents superposés, il subsiste un très léger décalage entre les images satellitaires et le découpage territorial des MRC.

Pour chaque MRC, des cartes de gain et de perte de superficies forestières provenant des résultats de l'étape précédente ont été générées et imprimées. Une procédure exhaustive de validation sur le terrain, appuyée par des cartes topographiques détaillées à l'échelle 1/50 000, a été réalisée pour systématiquement identifier les erreurs apparentes sur ces cartes. Cette vérification s'est effectuée en automobile (environ 5 000 km ont été parcourus) et s'est étalée sur trois semaines. Un total de 574 sites répartis dans toutes les MRC et distribués de manière à couvrir un maximum de variabilité spatiale ont été visités. Ces sites ont été sélectionnés en partie au hasard, en partie pour vérifier les zones les plus problématiques et en partie afin de tester la précision des classifications en fonction de la taille des parcelles visibles sur le terrain. La validation a porté autant sur les très petits bois que sur les grands massifs forestiers. Pour les bois n'ayant subi aucune transformation depuis leur cartographie par le Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (1988) et Ressources naturelles Canada (1998, 1999, 2000, 2002), les contours sur les images classifiées devaient correspondre à ceux observés sur le terrain et à ceux des cartes topographiques afin d'être considérés comme exacts. Quant aux pertes et aux gains de superficie forestière, les vestiges de coupe et la non correspondance des contours forestiers des images avec ce qui pouvait être observé sur le terrain et sur les cartes topographiques permettait de vérifier l'exactitude de l'information présente sur les images satellitaires.

Les superficies classifiées de façon erronée sur les images *Landsat* ont été re-classifiées dans chacune des MRC prises individuellement afin d'éviter que la correction d'une erreur dans un secteur de l'image n'entraîne une autre erreur dans un secteur différent. Des exemples de correction d'une surestimation des gains et d'une surestimation des pertes sont fournis sur les figures 1 et 2, respectivement. Un taux de fiabilité des résultats a finalement été calculé pour chacune des MRC.

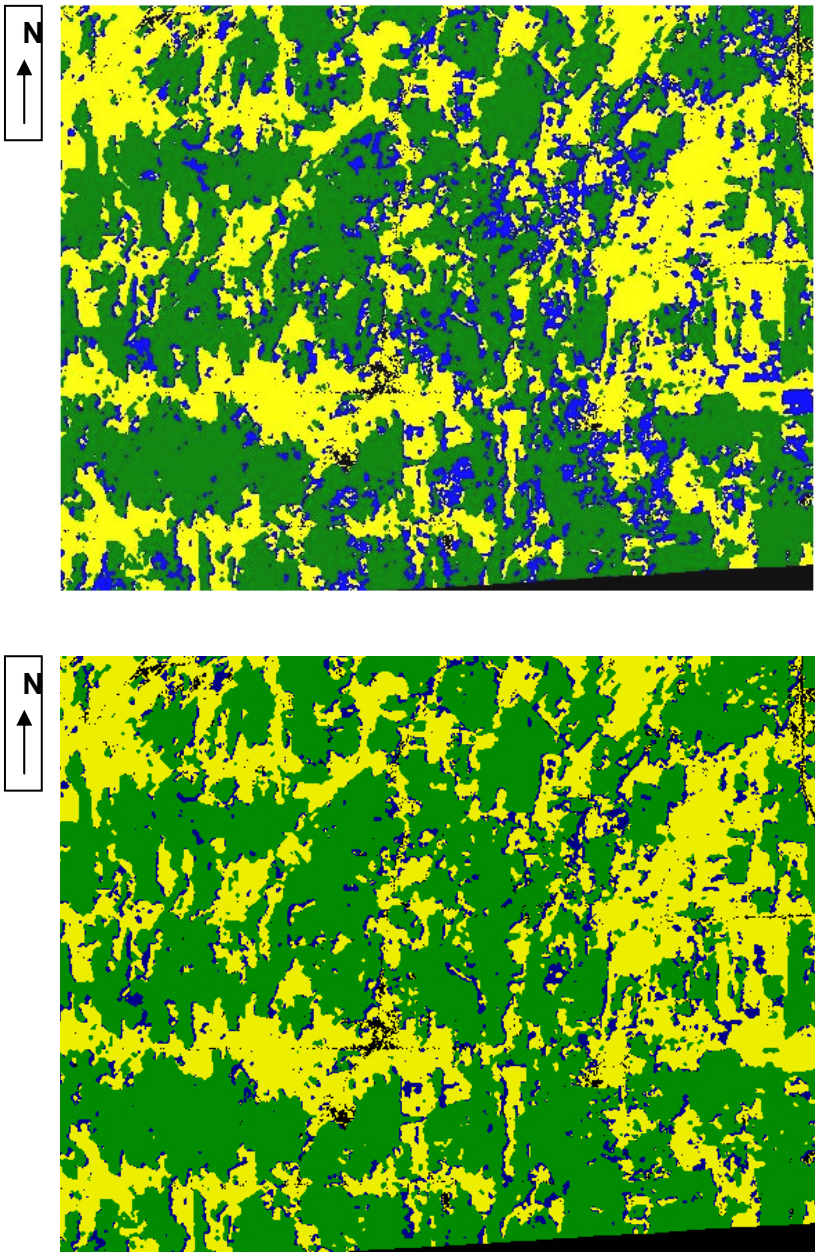


Figure 1 : Exemple de correction d'une surestimation des gains (en bleu) dans la MRC Les Jardins-de-Napierville, région de Hemmingford. Cette surestimatioin (figure du haut) était due à une sous-évaluation de la forêt sur la classification précédente de l'image 1999. La nouvelle classification (figure du bas) a considérablement réduit le problème.

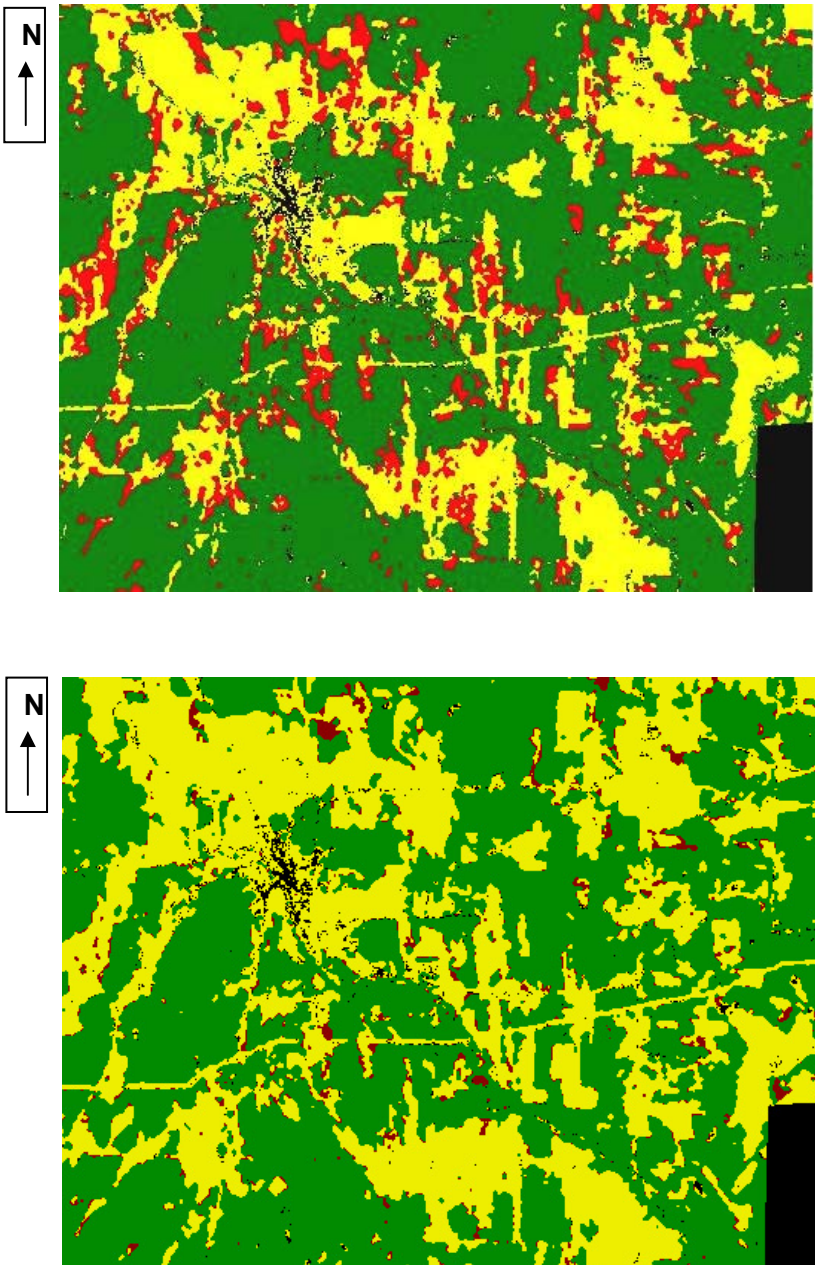


Figure 2 : Exemple de correction d'une surestimation des pertes (en rouge) dans la MRC d'Acton, région de Roxton Falls. Cette surestimatioin (figure du haut) était due à une surévaluation de la forêt sur la classification précédente de l'image 1999. La nouvelle classification (figure du bas) a considérablement réduit le problème.

3. Résultats

3.1 Évolution des superficies forestières

Les superficies forestières et non forestières calculées pour l'ensemble de la Montérégie et pour chacune des MRC pour les années 1999 et 2002 sont présentées dans les tableaux 2 et 3, respectivement. Les chiffres présentés dans les colonnes 'non classifié' incluent les superficies masquées précédemment décrites qui n'ont pas été prises en compte lors des classifications.

Tableau 2 : Superficies forestières et non forestières par MRC et pour l'ensemble de la Montérégie en 1999

MRC/CLASSES	Forestier (ha)	Forestier (%)	Non forestier (ha)	Non forestier (%)	Non classifié (ha)	Non classifié (%)	Total (ha)
Acton	24 956	42,88	32 199	55,32	1 046	1,80	58 201
Beauharnois-Salaberry	3 713	6,73	38 737	70,19	12 743	23,09	55 193
Brome-Missisquoi	94 768	59,74	50 248	31,68	13 609	8,58	158 625
La Haute-Yamaska	41 347	54,11	30 091	39,38	4 974	6,51	76 412
La Vallée-du-Richelieu	11 596	17,90	45 020	69,48	8 178	12,62	64 794[1]
Lajemmerais	7 868	15,99	28 083	57,06	13 268	26,96	49 218[1]
Le Bas-Richelieu	10 899	17,10	38 670	60,68	14 154	22,21	63 723
Le Haut-Richelieu	11 355	11,41	78 006	78,41	10 126	10,18	99 487
Le Haut-Saint-Laurent	36 571	28,81	61 496	48,45	28 854	22,73	126 921
Les Jardins-de-Napierville	21 749	27,04	56 873	70,71	1 809	2,25	80 431
Les Maskoutains	21 841	16,64	104 475	79,59	4 946	3,77	131 262
Longueuil	3 079	17,64	4 472	25,63	9 901	56,73	17 452[1]
Roussillon	6 155	12,50	29 049	59,00	14 031	28,50	49 235
Rouville	8 227	16,85	38 361	78,58	2 233	4,57	48 821
Vaudreuil-Soulanges	17 964	17,80	48 927	48,48	34 033	33,72	100 924
Total	**322 088**	**27,28**	**684 707**	**57,99**	**173 904**	**14,73**	**1 180 699**

[1] Ces superficies ont été modifiées par les fusions.

Tableau 3 : Superficies forestières et non-forestières par MRC et pour l'ensemble de la Montérégie en 2002

MRC/CLASSES	Forestier (ha)	Forestier (%)	Non forestier (ha)	Non forestier (%)	Non classifié (ha)	Non classifié (%)	Total (ha)
Acton	24 077	41,37	33 078	56,83	1 046	1,80	58 201
Beauharnois-Salaberry	3 580	6,49	38 870	70,43	12 743	23,09	55 193
Brome-Missisquoi	93 142	58,72	51 874	32,70	13 609	8,58	158 625
La Haute-Yamaska	40 237	52,66	31 200	40,83	4 974	6,51	76 412
La Vallée-du-Richelieu	11 761	18,15	44 855	69,23	8 178	12,62	64 794[2]
Lajemmerais	7 695	15,63	28 256	57,41	13 268	26,96	49 218[2]
Le Bas-Richelieu	10 422	16,36	39 147	61,43	14 154	22,21	63 723
Le Haut-Richelieu	9 824	9,87	79 537	79,95	10 126	10,18	99 487
Le Haut-Saint-Laurent	35 320	27,83	62 747	49,44	28 854	22,73	126 921
Les Jardins-de-Napierville	20 429	25,40	58 193	72,35	1 809	2,25	80 431
Les Maskoutains	19 538	14,88	106 778	81,35	4 946	3,77	131 262
Longueuil	2 997	17,17	4 555	26,10	9 901	56,73	17 452[2]
Roussillon	6 068	12,32	29 136	59,18	14 031	28,50	49 235
Rouville	7 102	14,55	39 486	80,88	2 233	4,57	48 821
Vaudreuil-Soulanges	17 384	17,23	49 506	49,05	34 033	33,72	100 924
Total	**309 577**	**26,22**	**697 218**	**59,05**	**173 904**	**14,73**	**1 180 699**

Ces deux tableaux révèlent que les MRC de la Montérégie dont la superficie du territoire est la plus boisée sont celles de Brome-Missisquoi (59,74 % en 1999 et 58,72 % en 2002), La Haute-Yamaska (54,11 % en 1999 et 52,66 % en 2002) et Acton (42,88 % en 1999 et 41,37 % en 2002). Les MRC dont la superficie du territoire non forestier est la plus élevée sont Les Maskoutains (79,59 % en 1999 et 81,35 % en 2002), Rouville (78,58 % en 1999 et 80,88 % en 2002) et Le Haut-Richelieu (78,41 % en 1999 et 79,95 % en 2002).

Durant la période comprise entre 1999 et 2002, l'ensemble de la Montérégie a connu une perte de superficies forestières de 12 511 ha, correspondant à 3,88 % du territoire par rapport à 1999 (tableau 4). La perte de superficies forestières a eu lieu dans toutes les MRC, à l'exception de

[2] Ces superficies ont été modifiées par les fusions.

La Vallée-du-Richelieu qui aurait connu une faible hausse de 165 ha (1,42 %). Les MRC où la perte de forêts est la plus élevée en nombre d'hectares sont Les Maskoutains (2 303 ha), Brome-Missisquoi (1 626 ha)[3] et Le Haut-Richelieu (1 531 ha). Les MRC où le pourcentage de perte de forêts est le plus élevée relativement à ce qu'elle occupait en 1999 sont Rouville (13,68 %), Le Haut-Richelieu (13,49 %) et Les Maskoutains (10,54 %).

Tableau 4 : Évolution des superficies forestières par MRC et pour l'ensemble de la Montérégie entre 1999 et 2002

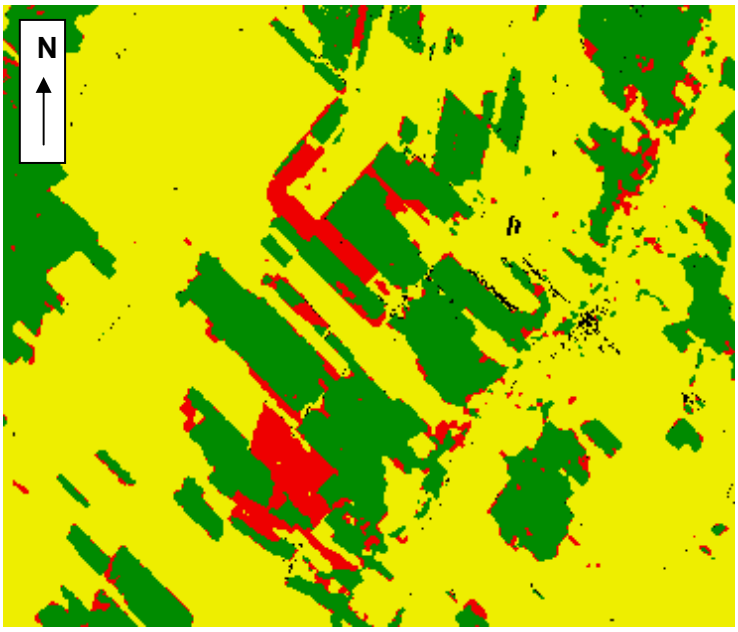
MRC	1999 (ha)	2002 (ha)	Différence (ha)	Différence (%)
Acton	24 956	24 077	-879	-3,52
Beauharnois-Salaberry	3 713	3 580	-133	-3,58
Brome-Missisquoi	94 768	93 142	-1 626	-1,72
La Haute-Yamaska	41 347	40 237	-1 110	-2,68
La Vallée-du-Richelieu	11 596	11 761	165	1,42
Lajemmerais	7 868	7 695	-173	-2,20
Le Bas-Richelieu	10 899	10 422	-477	-4,38
Le Haut-Richelieu	11 355	9 824	-1 531	-13,49
Le Haut-Saint-Laurent	36 571	35 320	-1 251	-3,42
Les Jardins-de-Napierville	21 749	20 429	-1 320	-6,07
Les Maskoutains	21 841	19 538	-2 303	-10,54
Longueuil	3 079	2 997	-82	-2,67
Roussillon	6 155	6 068	-87	-1,41
Rouville	8 227	7 102	-1 125	-13,68
Vaudreuil-Soulanges	17 964	17 384	-580	-3,23
Total	**322 088**	**309 577**	**-12 511**	**-3,88**

Afin d'illustrer l'importance des coupes forestières, deux secteurs particulièrement affectés sont illustrés (Figure 3a et b). Les grandes coupes (en rouge) observées dans les municipalités de Saint-Jude et de Saint-Bernard-de-Michaudville (MRC Les Maskoutains) sont parmi les plus importantes observées au cours de la validation. Elles sont liées à la production agricole et

[3] Chiffre certainement surestimé dans ce cas précis. Ceci est dû à la surévaluation forestière sur l'image 99 dans la partie est de la MRC. Bien que la nouvelle classification ait grandement réduit le problème, le cumul de petites surévaluations doit entraîner une exagération des pertes pour cette MRC plus particulièrement.

correspondent très fidèlement à ce qui peut être observé sur le terrain (Figure 3a). D'autres coupes d'importance ont été réalisées pour des fins agricoles dans la MRC Le Haut-Saint-Laurent près du *Large Tea Field* (Figure 3b). Les grandes zones de coupe au centre (en rouge) correspondent aussi très fidèlement à ce qui peut être observé sur le terrain.

a



b

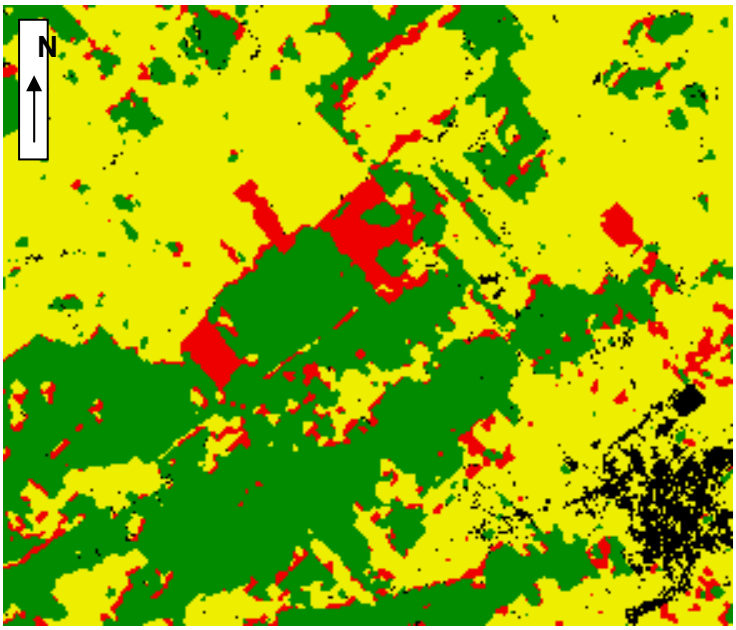


Figure 3 a : Illustration de pertes importantes de superficies forestières (en rouge) dans les municipalités de Saint-Jude et de Saint-Bernard-de-Michaudville, dans la MRC Les Maskoutains, et b : dans la MRC Le Haut-Saint-Laurent.

3.2 Fiabilité des résultats

Les classifications des superficies forestières obtenues à partir des deux images *Landsat* ont un taux d'exactitude élevé (tableau 5). Pour l'ensemble de la Montérégie, sur un total de 1 148 sites vérifiés (574 par image), seulement 132 sites ont présenté des erreurs de correspondance entre la classification et la réalité, ce qui correspond à un taux moyen d'exactitude de 88,5 %. Les erreurs de classification sont liées en grande partie à la qualité non optimale des images de départ (présence de nuages, voile atmosphérique), ainsi qu'aux différents moments d'acquisition des images dans l'année (11 juin 1999 et 14 août 2002). Le stade de développement de la végétation a été la cause de sous-représentation ou de sur-représentation de certains milieux. C'est le cas des zones humides (tourbières et marécages), par exemple dans la portion sud de la MRC Le Haut-Richelieu, qui ont occasionné une sous-évaluation en 1999 et une surévaluation en 2002 de la couverture forestière. Dans la classification finale, ces milieux humides ont été associés au non forestier.

Paradoxalement, à l'inverse des zones humides, et ce, bien que la végétation ait été plus vieille de trois ans et le développement des feuilles plus avancé en août qu'en juin, les friches arborées ont quelquefois été moins bien enregistrées dans la classe forestière en 2002 qu'en 1999. Dans la classification finale, les friches arborescentes des milieux humides ont été classées avec le non forestier, alors que celles des milieux secs ont été classées avec le forestier. Dans les secteurs forestiers matures non humides, apparaît quelquefois le phénomène inverse de ce qui a été observé dans les zones humides : les superficies forestières ont tendance à être surévaluées en 1999 et sous-évaluées en 2002. La dernière classification a largement réglé ces problèmes.

Tableau 5 : Vérification de l'exactitude des classifications des deux images *Landsat* par MRC

MRC	Image	Nombre total de secteurs visités	Nombre de secteurs bien classifiés	Nombre de secteurs incorrectement classifiés	Fiabilité des résultats (%)
Acton	1999	60	53	7	88,3
	2002	60	57	3	95,0
Beauharnois-Salaberry	1999	30	23	7	76,6
	2002	30	28	2	93,3
Brome-Missisquoi	1999	57	49	8	86,0
	2002	57	50	7	87,7
La Haute-Yamaska	1999	56	48	8	85,7
	2002	56	53	3	94,6
Lajemmerais	1999	35	32	3	91,4
	2002	35	32	3	91,4
La Vallée-du-Richelieu	1999	24	24	0	100,0
	2002	24	24	0	100,0
Le Bas-Richelieu	1999	35	27	8	77,1
	2002	35	30	5	85,7
Le Haut-Richelieu	1999	31	28	3	90,3
	2002	31	27	4	87,1
Le Haut-Saint-Laurent	1999	27	20	7	74,1
	2002	27	26	1	96,3
Les Jardins-de-Napierville	1999	61	52	9	85,2
	2002	61	55	6	90,2
Les Maskoutains	1999	38	32	6	84,2
	2002	38	37	1	97,4
Longueuil	1999	18	17	1	94,4
	2002	18	17	1	94,4
Roussillon	1999	34	30	4	88,2
	2002	34	27	7	79,4
Rouville	1999	36	26	10	72,2
	2002	36	31	5	86,1
Vaudreuil-Soulanges	1999	32	31	1	96,9
	2002	32	30	2	93,7
Total/moyenne		**1148**[4]	**1016**	**132**	**88,5**

De façon générale, la classification de l'image 1999 est plus fiable en zone non forestière qu'en zone forestière (là où la forêt est souvent surestimée), donc dans la portion ouest de la Montérégie. Celle de l'image 2002 est plus fiable en zone forestière (portion est de la Montérégie) qu'en zone non forestière où les superficies forestières sont parfois sous-évaluées.

Malgré ces imperfections, dans la majorité des cas, les contours forestiers déterminés par la classification sont souvent quasi parfaits. De plus, les gains forestiers ont souvent tendance à être contrebalancés par les gains non forestiers, ce qui nous porte à croire que les données obtenues fournissent une idée assez juste de l'échelle de grandeur du déboisement sur

l'ensemble du territoire de la Montérégie. La figure 4 fournit des exemples de sous-évaluation, de surévaluation et de correspondance parfaite entre les contours du couvert forestier sur l'image de 1999 et ceux des cartes topographiques.

[4] Comme les sites de validation sont les mêmes pour les deux images, on pourrait aussi diviser ce chiffre par 2, soit 574.

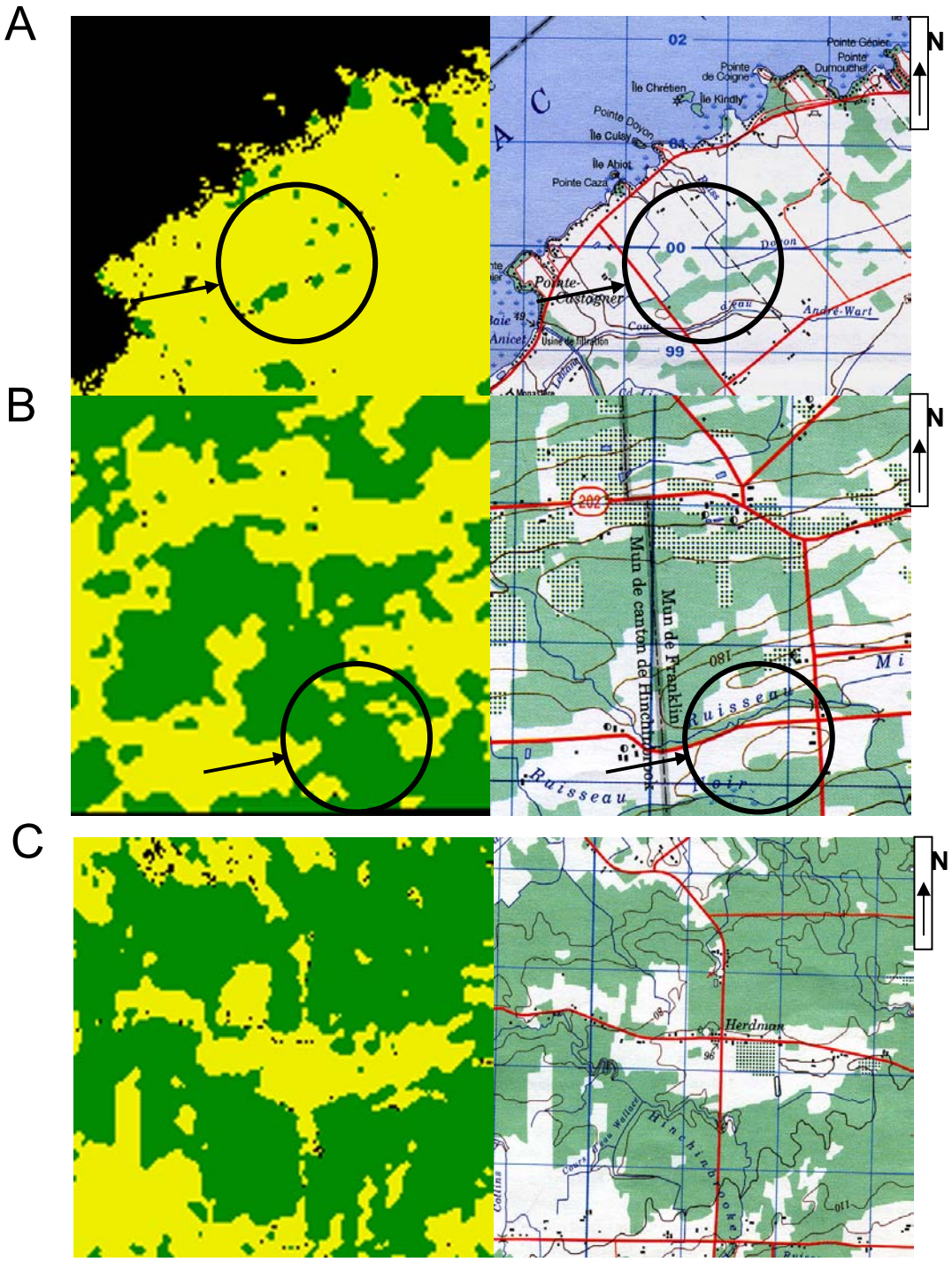


Figure 4 : Exemples de sous-évaluation (A – 31 G/1), de surévaluation (B – 31 H/4) et de correspondance quasi parfaite (C – G/1) pour le couvert forestier en 1999 comparés aux cartes topographiques à 1/50 000. La classe forestière n'inclut pas les vergers (en pointillés).

4. Conclusion

Estimer avec précision l'utilisation du sol d'un territoire fortement morcelé du point de vue forestier à partir d'images satellitaires ayant une résolution spatiale de 30 m constitue un défi. Ainsi, les petites superficies isolées ou les zones de contact entre deux occupations du sol, telles les lisières de forêt, peuvent être agglomérées aux ensembles voisins de plus grande superficie. L'exercice a néanmoins permis d'obtenir un portrait qui reflète très bien les grandes tendances de la réalité sur le territoire de la Montérégie.

Les résultats obtenus démontrent que le phénomène de déboisement en Montérégie est bien réel et atteint 12 500 ha, ce qui correspond à une perte de 3,88 % par rapport à 1999. Dans certaines MRC comme Les Maskoutains, la superficie forestière perdue atteint 2 300 ha, ce qui équivaut à une perte de 10 % du territoire forestier par rapport à 1999. Les visites sur le terrain indiquent que ces pertes sont principalement liées à des changements d'utilisation du sol, ce qui est inquiétant pour l'avenir de la forêt montérégienne. Cet aspect mériterait cependant d'être approfondi.

Ces résultats concordent avec ceux d'une étude récente réalisée par le ministère de l'Environnement du Québec (Li *et al*., 2003). Bien que les deux méthodologies adoptées soient un peu différentes, ces auteurs en arrivent à la conclusion que le déboisement totalise 9 775 ha dans l'ensemble de la région administrative de la Montérégie pour la même période d'étude. Ce chiffre est probablement sous-estimé, car selon la méthode de calcul employée, la superficie minimale de détection d'un peuplement forestier coupé est d'environ 3 000 m^2 (Li *et al*., 2003).

Cet état de fait soulève un certain nombre de questions pour le futur de la forêt en Montérégie :

- Combien de temps cette tendance à la déforestation se poursuivra-t-elle encore ?
- Certains secteurs de la Montérégie ne sont-ils pas en deçà d'un minimum de couverture forestière « optimale » ?
- Quel serait la superficie forestière optimale à conserver en Montérégie, en tenant compte des diverses utilisations possibles du territoire ?
- N'est-il pas souhaitable de conserver ce qui reste de superficie forestière ou même de l'accroître afin de favoriser la production de bois noble et la préservation de la biodiversité la plus riche au Québec ?
- Est-il acceptable de voir nos paysages, de variés qu'ils étaient, réduits à une succession de cultures monospécifiques ?

Il serait sans doute souhaitable que le gouvernement du Québec aborde rapidement ces questions en concertation avec les MRC, les municipalités et les intervenants préoccupés par l'avenir de la forêt en Montérégie.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Mme Miriane Tremblay, ingénieur forestier et détentrice d'une maîtrise en modélisation forestière, pour son aide précieuse lors de la validation des résultats sur le terrain. Cette étude a été financée par l'Agence forestière de la Montérégie, par le Réseau Ligniculture Québec, par le Fonds FCAR grâce à une subvention d'équipe accordée à A. Bouchard, G. Domon et D. Marceau et par le CRSNG par le biais d'une subvention de recherche accordée à D. Marceau.

Références

Crist, E.P., 1985. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17: 301-306.

Eckhardt, D.W., Verdin, J.P. and Lyford, G.R., 1990. Automated Update of an Irrigated Lands GIS Using SPOT HRV Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59 (11): 1515-1522.

Huang, C., Wylie, B., Homer, C., Yang, L., and Zylstra, G., 2002. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (8): 1741-1748.

Irish, R.R., 2000. Landsat 7 science data user's handbook: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook_toc.html. National Aeronautics and Space Administration.

Jensen, J.R., 1996. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. Prentice Hall, 318 p.

Kauth, R.J. and Thomas, G.S., 1976. The tasseled cap — a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat, p. 41-51. *In Proceedings on the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, Indiana, June 29 – July 1, 1976. LARS, Purdue University, Indiana.

Li, T., Beauchesne, P. et Osmann, M.-J., 2003. Portrait du déboisement pour les périodes 1990-1999 et 1999-2002 pour les régions administratives de la Chaudière-Appalaches, du Centre-du-Qjuébec, de la Montérégie et de Lanaudière (rapport synthèse), Ministère de l'Environnement du Québec, 35 p.

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressource, 1988. Carte topographique à 1/50 000 de la région de Lachine (feuillet 31 H/5), Ottawa.

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1992. Carte topographique à 1/250 000 de la région de Montréal (feuillet 31 H), Ottawa.

Ressources naturelles Canada. Cartes topographiques à 1/250 000 des régions de Trois-Rivières (feuillet 31 I, 1995) et d'Ottawa (feuillet 31 G, 1996), Ottawa.

Ressources naturelles Canada. Cartes topographiques à 1/50 000 des régions de Huntingdon (feuillet 31 G/1, 2002), de Vaudreuil (feuillet 31 G/8, 2000), de Cowansville (feuillet 31 H/2, 2000), de Lacolle (feuillet 31 H/3, 2000), de Saint-Chrysostome (feuillet 31 H/4, 2000), de Saint-Jean-sur-Richelieu (feuillet 31 H/6, 2000), de Granby (feuillet 31 H/7, 2002), de Richmond (feuillet 31 H/9, 1998), de Saint-Hyacinthe (feuillet 31 H/10, 2000), de Beloeil

(feuillet 31 H/11, 1999), de Verchères (feuillet 31 H/14, 2002) et de Saint-Guillaume-d'Upton (feuillet 31 H/15, 2002), Ottawa.

Richardson, A.J. and Everitt, J.H., 1992. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto International*, 1: 63-69.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C., 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation*. Maryland, USANASA/GSFC, Greenbelt.

Sabins, F.F., 1997. *Remote sensing: principles and interpretation*. W. H. Freeman and company, New York, 494 p.

Vogelmann, J.E., Helder, D., Morfitt, R., Choate, M.J., Merchant, J.W., and Bulley, H., 2001. Effects of Landsat 5 Thematic Mapper and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus Radiometric and Geometric Calibrations and Corrections on Landscape Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 78 (1-2): 55-70.

Annexe 1 : Détails techniques de la méthodologie

Cet annexe fournit les détails techniques entourant les principales étapes de la méthodologie utilisée dans ce projet, soit : les corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique, la création d'indices de végétation et l'application d'un masque.

1. Corrections radiométriques

Les corrections radiométriques comprennent la normalisation de l'image *Landsat 5 TM* et la conversion des images en mesure de réflectance.

1.1 Normalisation de l'image *Landsat 5 TM*

Puisqu'aucune image *Landsat 7 ETM+* de la Montérégie n'était disponible pour l'année 1999, une image en provenance du capteur *Landsat 5 TM* a été acquise. Les bandes 1 à 5 et 7 des deux images possèdent des résolutions spectrales, spatiales et radiométriques compatibles. Cependant, l'image de 1999 a fait l'objet d'une normalisation pour tirer profit des propriétés radiométriques supérieures du capteur *Landsat 7 ETM+*. L'équation suivante de Vogelmann *et al*. (2001) a été appliquée :

$$DN7_{\lambda} = DN5_{\lambda} * pente_{\lambda} + interception_{\lambda} \quad (1)$$

où : λ est le numéro de la bande ;

DN7 est la valeur numérique du pixel de l'image résultante ;

DN5 est la valeur numérique du même pixel de l'image *Landsat 5 TM*.

Les coefficients de pente et d'interception changent selon les bandes spectrales et sont disponibles dans l'article de Vogelmann *et al.* (2001).

1.2 Conversion des images en mesures de réflectance

Afin de comparer les images entre elles, une même échelle de mesure doit leur être attribuée. En conséquence, les valeurs numériques des pixels des images ont été converties en réflectance au niveau du capteur. Lorsque appliqué sur des images de grande superficie, ce type de transformation offre deux avantages principaux. D'abord, les facteurs de transformation en mesure de réflectance reposent sur des mesures de terrain échantillonnées lors d'excellentes conditions atmosphériques (Crist, 1985). Ensuite, la conversion des valeurs numériques en mesure de réflectance a pour effet de standardiser les impacts de la géométrie

de visée sur le signal reçu (Huang *et al*., 2002).

Les valeurs numériques des images ont d'abord été converties en radiance et ensuite en réflectance au niveau du capteur selon les propriétés de *Landsat 7 ETM+*. Les équations qui ont été utilisées sont les suivantes (Irish, 2000) :

$$L_\lambda = Gain_\lambda * DN_\lambda + Biais_\lambda \quad (2)$$

$$\rho_\lambda = \pi * L_\lambda * d^2 / ESUN_\lambda * \sin(\theta) \quad (3)$$

où : λ est le numéro de la bande spectrale ;

L est la radiance au niveau du capteur ;

ρ est la réflectance au niveau du capteur ;

d est la mesure entre la terre et le soleil en unités astronomiques ;

ESUN est l'irradiance exo-atmosphérique solaire moyenne ;

θ est l'angle d'élévation solaire.

Le gain, le biais et l'angle d'élévation solaire sont fournis dans le fichier d'en-tête relié aux images, alors que les coefficients des autres variables se retrouvent sur le site internet du *Landsat 7 Science Data User's Handbook* (Irish, 2000).

2. Correction atmosphérique de l'image *Landsat 7 ETM+*

Les deux images de cette étude ayant été captées à deux mois d'intervalle, une correction atmosphérique basée sur une normalisation empirique d'image à image a été appliquée (Jensen, 1996). La normalisation a été effectuée en appliquant une équation de régression, de manière à ajuster les valeurs numériques des bandes de l'image de 2002 en fonction des conditions non-surfaciques qui affectent les valeurs des bandes de l'image de 1999. L'image de 1999 a constitué la base de données de référence car elle contient peu de nuages, alors que l'image de 2002 est caractérisée par un important voile nuageux.

La régression a été appliquée sur les valeurs numériques appartenant à des cibles communes aux deux images. Ces dernières respectaient quatre critères de sélection d'après Eckhardt *et al*. (1990) : les cibles avaient approximativement la même élévation, elles ne provenaient pas d'un couvert végétal, elles étaient caractérisées par un relief plat et elles présentaient un patron semblable.

Un total de 40 cibles a été sélectionné (20 cibles en milieu humide [eau], 20 cibles en milieu sec [route]). Une fois la régression effectuée entre les cibles (valeur dépendante = 2002, valeur indépendante = 1999), les valeurs de pente et d'interception (tableau 6) ont permis de normaliser les bandes de l'image de 2002 par rapport aux bandes correspondantes de l'image de 1999.

Tableau 6 : Valeurs de pente et d'interception

	PENTE	INTERCEPTION	CORRÉLATION
BANDE 1	0,2936	0,1132	0,2200
BANDE 2	0,2407	0,0721	0,4994
BANDE 3	0,2599	0,0508	0,6307
BANDE 4	0,6123	0,0379	0,9353
BANDE 5	0,8982	0,0007	0,9514
BANDE 7	0,4714	0,0033	0,9401

La formule employée est la suivante (Jensen, 1996) :

$$DN1999_{\lambda} = DN2002_{\lambda} * pente_{\lambda} + interception_{\lambda} \quad (4)$$

où : λ est le numéro de la bande spectrale ;
DN1999 est la valeur numérique d'un pixel de l'image 2002 normalisée selon les paramètres de l'image 1999 ;
DN2002 est la valeur numérique du même pixel de l'image 2002.

Cette opération a permis de minimiser l'effet des paramètres non-surfaciques sur le signal capté. Ainsi, les variations entre les valeurs numériques des pixels des deux images ont pu être reliées aux changements de condition des surfaces tel que le passage d'une zone forestière à non forestière.

3. Corrections géométriques

Deux types de corrections géométriques ont été appliquées aux images. L'image de 1999 a fait l'objet d'une correction image à carte. Une relation géométrique a été établie entre la position de 30 pixels (points de contrôle) et de 30 coordonnées cartographiques (mètres) dérivées des cartes topographiques à 1/250 000 (Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1992 et Ressources naturelles Canada, 1995, 1996). L'image a été géoréférencée dans le système

de coordonnées UTM (NAD 83) et fait partie de la zone 18. Elle a subi une interpolation spatiale polynomiale de deuxième degré et un rééchantillonnage selon la méthode du plus proche voisin. L'indice de distorsion ou *Root Mean Square* (*RMS*) indique une erreur de 5,85 pixels.

Par la suite, une correction d'image à image a été appliquée sur l'image de 2002. Un total de 40 points de contrôle ont servi à établir une relation géométrique entre les pixels de l'image de 2002 par rapport à ceux de l'image de 1999. Le système de projection, le mode d'interpolation et la méthode de rééchantillonnage étaient identiques à ceux utilisés lors de la correction précédente. Le *RMS* présente une distorsion de 0,43 pixel entre les deux images ce qui est à l'intérieur de la limite requise (0,50 pixel) pour effectuer une détection de changements entre deux images satellitaires (Jensen, 1996).

Enfin, les images ont été découpées de manière à ce qu'elles représentent le même espace géographique. Le cadre des coordonnées géographiques commun aux deux images se situe entre les 44° 42' 51" et 46° 30'05" de latitude nord, et les 71° 47' 59" et 74° 33' 40" de longitude ouest.

4. Création d'indices de végétation

Deux indices de végétation ont été créés afin d'augmenter le pouvoir de discrimination entre les classes végétales, soit un indice de végétation par différence normalisée (*NDVI* ou *Normalized difference vegetation index*) et une transformation *Tasseled Cap* (*TC*).

4.1 Indice de végétation par différence normalisée (*NDVI*)

Parmi les huit indices de végétation les plus populaires identifiés par Richardson et Everitt (1992), le *NDVI* est de loin le plus utilisé en télédétection (Sabins, 1997). Développé par Rouse *et al*. (1974), le *NDVI* calcule la différence normalisée entre les valeurs numériques des bandes du rouge (bande 3) et du proche infrarouge (bande 4) et se calcule comme suit :

$$NDVI = \text{PIR} - \text{R} / \text{PIR} + \text{R} \quad (5)$$

où : *NDVI* est la valeur *NDVI* d'un pixel de l'image résultante ;

PIR est la valeur numérique originelle du même pixel dans la bande du proche infrarouge ;

R est la valeur numérique originelle du même pixel dans la bande du rouge.

Les valeurs se situent sur une échelle de -1 à 1 où la valeur des pixels augmente avec la présence de végétation.

4.2 *Tasseled Cap* (*TC*)

Un autre indice de végétation propre aux images *Landsat* et couramment utilisé dans les recherches en milieu agricole est celui du *Tasseled Cap*. Développé par Kauth et Thomas (1976), le *TC* est une transformation qui permet de créer trois axes ou bandes spectrales (bande 1 = indice de brillance ; bande 2 = indice de végétation ; bande 3 = indice d'humidité) pouvant expliquer 95 % à 98 % de la variance au sein des images (Jensen, 1996). Récemment, Huang *et al*. (2002) ont démontré que le *TC* appliqué aux valeurs de réflectance (*Tasseled Cap At Reflectance*) est plus robuste car il est moins influencé par les effets de la géométrie de visée. Facile à automatiser, les coefficients de la transformation du *Tasseled Cap At Reflectance* s'appliquent uniquement aux valeurs de réflectance dérivées du capteur *Landsat 7 ETM+*. Les formules qui permettent d'appliquer le *TC* sur les mesures de réflectance vont comme suit (Huang *et al*., 2002) :

$$\text{Brillance} = ((b1 + 0{,}3561) + (b2 + 0{,}3972) + (b3 + 0{,}3904) + (b4 + 0{,}6966) + (b5 + 0{,}2286) + (b7 + 0{,}1596)) \quad (6)$$

$$\text{Végétation} = ((b1 + -0{,}3344) + (b2 + -0{,}3544) + (b3 + -0{,}4556) + (b4 + 0{,}6966) + (b5 + -0{,}0242) + (b7 + -0{,}2630)) \quad (7)$$

$$\text{Humidité} = ((b1 + 0{,}2626) + (b2 + 0{,}2141) + (b3 + 0{,}0926) + (b4 + 0{,}0656) + (b5 + -0{,}7629) + (b7 + -0{,}5388)) \quad (8)$$

où : b1 à b5 et b7 est le numéro des bandes spectrales.

5. Application d'un masque

Un masque a été appliqué sur les images afin d'éliminer des zones ne présentant aucun intérêt et qui pourraient influer sur les résultats des classifications finales. Ce masque inclut la zone à l'extérieur des limites de la Montérégie ainsi que l'ensemble des classes non végétales, c'est-à-dire le contour des images, les zones nuageuses, l'eau et le cadre bâti incluant les bâtiments et les routes.

Le principal défi de cette étape était de s'assurer d'appliquer le même masque aux deux images de manière à ce que les classifications finales aient des superficies analogues. Ainsi, il a fallu isoler chaque classe au sein des deux images et unir les classes de même thématique entre elles pour obtenir un masque identique par catégorie. Par exemple, le masque des nuages est

le résultat de l'agglomération du masque des nuages de l'image de 1999 et de 2002. Les masques thématiques ont par la suite été agrégés en un seul masque global qui soustrait les mêmes pixels dans les deux images.

Les nuages ont été isolés manuellement en traçant des polygones autour de ces zones. La sélection des contours des images a été faite en regroupant automatiquement les pixels dont la valeur correspondait à celle des pixels situés en dehors des images. Le masque de l'eau a été réalisé à partir d'une classification non supervisée de type *Isodata* sur les trois bandes *TC* des deux images. Les sept paramètres utilisés pour la classification sont les suivants :

1) nombre de classes = 20 à 25
2) nombre d'itérations = 20
3) indice de chevauchement = 0,01
4) nombre minimal de pixels par classes = 1
5) écart-type = 4,5
6) distance minimale entre les classes = 3,0
7) nombre maximal de classes pouvant être agrégées = 2.

Le masque du cadre bâti a demandé plus de manipulations, car cette classe démontrait une confusion avec le sol à nu. Une première classification supervisée par maximum de vraisemblance a été effectuée selon quatre classes sur les deux images (cadre bâti, agricole, forêt, sol nu). Ces dernières ont été effectuées sur les bandes *TC* en se servant du masque des nuages, du contour des images et de l'eau. Les classes du cadre bâti des deux classifications ont été amalgamées pour créer un masque temporaire. Ensuite, une classification non supervisée *Isodata* selon trois classes (bâtiment, route, sol à nu) a été générée à partir des pixels des bandes *TC* de l'image 2002 situés à l'intérieur du masque temporaire du cadre bâti. L'algorithme a été exécuté selon les sept critères suivants :

1) nombre de classes = 3 à 3
2) nombre d'itérations = 10
3) indice de chevauchement = 0,01
4) nombre minimal de pixels par classes = 1
5) écart-type = 2,0
6) distance minimale entre les classes = 2,0
7) nombre maximal de classes pouvant être agrégées = 2.

Après avoir regroupé les bâtiments et les routes sous le qualificatif du cadre bâti, la classification *Isodata* a été répétée jusqu'à ce que les sols à nu soient suffisamment isolés. L'ensemble des masques a été fusionné et appliqué aux deux images. Enfin, la couche vectorielle des limites de la Montérégie a été superposée aux images afin d'exclure les pixels situés à l'extérieur de cette région administrative.