Télédétection, 2006, Vol. 6, n° 1, p. 9-17
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION ET DE L'UTILISATION DU SOL PAR IMAGERIE SATELLITAIRE LANDSAT EN HYDROGÉOLOGIE

Stéphane Chalifoux [1], Miroslav Nastev[2], Charles Lamontagne[3], Rasim Latifovic[4], Richard Fernandes[5],

[1] *Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada,*
6767, route de l'Aéroport, Saint-Hubert, Québec, Canada, J3Y 8Y9 ;
Téléphone : (450) 926-6749 ; Télécopieur : (450) 926-4449 ;
courriel : Stephane.Chalifoux@CCT.RNCan.gc.ca

[2] *Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada,*
490, rue de la Couronne, Québec, Québec, Canada, G1K 9A9 ;
Téléphone : (418) 654-2682 ; Télécopieur : (418) 654-2615 ;
courriel : Miroslav.Nastev@CGC.RNCan.gc.ca

[3] *Service de l'aménagement et des eaux souterraines,*
Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs,
675, boul. René-Lévesque Est, Québec, Québec, G1R 5V7
Téléphone : (418) 521-3885 poste 4814 ; Télécopieur : (418) 644-2003 ;
courriel : Charles.Lamontagnes@mddep.gouv.qc.ca

[4] *Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada,*
588, rue Booth, Ottawa, Ontario, K1A 0Y7
Téléphone : (613) 947-1816 ; Télécopieur : (613) 947-1385 ;
courriel : Rasim.Latifovic@CCT.RNCan.gc.ca

[5] *Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada,*
588, rue Booth, Ottawa, Ontario, K1A 0Y7
Téléphone : (613) 947-1292 ; Télécopieur : (613) 947-1385 ;
courriel : Richard.Fernandes@CCT.RNCan.gc.ca

Soumis le 23 juin 2005 ; révisé le 13 janvier 2006 ; accepté le 17 mars 2006

Dans le cadre de son programme sur les eaux souterraines, Ressources naturelles Canada en collaboration avec les provinces vise à faire la cartographie des principaux aquifères du Canada et à étudier leur dynamique. L'utilisation des données d'observation de la Terre est une solution intéressante car, à moyenne résolution spatiale, elles couvrent une grande superficie à un faible coût d'achat et de traitement comparativement aux méthodes traditionnelles utilisant des photographies aériennes. L'étude démontre le potentiel des images Landsat comme source de données utile en hydrogéologie.
La présente étude vise à évaluer la précision de deux cartographies de l'occupation et de l'utilisation du sol (OSUS) générées au moyen d'images Landsat et également à définir un système de classification adapté à l'analyse de la recharge d'un aquifère. Le territoire d'étude correspond à la partie canadienne du bassin versant de la rivière Châteauguay.
Les résultats de l'analyse de fiabilité des deux cartes sont très similaires avec une précision variant de 68 % à 72 % et des valeurs d'indices Kappa de modéré à substantiel. Les classes agricole et tourbière obtiennent d'excellents taux de précision. La majorité des confusions est associée aux classes négligées dans le processus de cartographie, qui se retrouvent en petite superficie. Un système de classification de l'OSUS, pertinent pour analyser la recharge au moyen du modèle hydrologique HELP, a été élaboré.
Les images optiques Landsat permettent une cartographie homogène de l'OSUS, avec l'avantage d'évoluer dans un environnement numérique facilitant ainsi la modélisation spatiale.

Mots-clefs : Télédétection – Landsat – Occupation et utilisation du sol – Hydrogéologie – Recharge d'aquifère

LAND COVER AND LAND USE MAPPING USING LANDSAT IMAGERY IN HYDROGEOLOGY

In the scope of its research activities related to groundwater, Natural Resources Canada in collaboration with the provinces and other stakeholders plan to assess major Canadian aquifers and study aquifer dynamics. The use of Earth Observation data for land cover and land use mapping is a practical approach because of their large extensive coverage and relatively low purchase and processing costs,

comparatively to traditional methods using aerial photographs. The study presents the potential of Landsat images for land cover and land use mapping in hydrogeology.
The primary objective of this project is the evaluation of the accuracy of two land use and land cover maps generated using Landsat imagery. In addition, it aims at defining a classification scheme adapted to aquifer recharge modeling. The study area is the Canadian part of the Châteauguay River watershed straddling southwestern Québec (Canada) and northeastern New York State (United States).
The results of the precision analysis for both maps are very similar with an accuracy varying from 68 % to 72 % and Kappa indexes from moderate to substantial. Excellent accuracy rates were obtained for agricultural and wetland classes. The main confusions are associated with neglected classes in the mapping process that cover small areas within the study area. A hydrogeological land cover and land use classification scheme, relevant to recharge analysis using the HELP hydrological model, was developed.
Landsat optical images allow homogeneous mapping of the current land cover and land use, with the advantage of evolving in a digital environment thus facilitating spatial modeling.

Keywords : Remote Sensing – Landsat – Land Cover and Land Use – Hydrogeology – Aquifer Recharge

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Dans le cadre de son programme sur les eaux souterraines, Ressources naturelles Canada (RNCan) vise à produire la cartographie des principaux aquifères du Canada et à étudier leur dynamique. La présente étude s'inscrit dans un projet global du programme sur les eaux souterraines (Ressources naturelles Canada, 2005) qui porte sur la télédétection au service de la surveillance de ces ressources et de l'évaluation de leur vulnérabilité.
La cartographie hydrogéologique nécessite une connaissance de plusieurs domaines dont l'hydrogéologie, la géologie, l'hydrologie et l'environnement. Une fois les aquifères cartographiés, l'analyse de leur recharge peut alors être effectuée. Cette recharge vient des précipitations et des eaux de surface. Cette analyse multicritères considère les précipitations (gain d'eau à la recharge), le ruissellement et l'évapotranspiration (perte d'eau à la recharge). Le ruissellement de surface et l'évapotranspiration sont estimés à partir d'informations telles que la distribution spatiale de l'occupation des sols en surface et de leur utilisation. Dans le contexte de la présente étude, l'occupation du sol (OS) est définie comme une description du couvert biophysique du sol, par exemple la végétation et l'eau, et l'utilisation du sol (US) est définie comme une description du développement anthropique du territoire, par exemple l'agriculture et l'espace urbain. La recharge des aquifères régionaux du secteur étudié a été estimée en utilisant le modèle hydrologique HELP (Hydrological Evaluation of Landfill Performance) (Schroeder *et al.*, 1994).
Le problème principal de la télédétection en hydrogéologie est la méconnaissance du potentiel des données de télédétection par les hydrogéologues (Hoffmann, 2005). Le lien entre les images et l'eau souterraine est indirect. En effet, l'image ne cartographie pas les eaux souterraines mais plutôt des éléments d'intérêt pour caractériser la présence de cette ressource (Chalifoux *et al.*, 2005). L'imagerie optique acquise par les satellites de la série Landsat permet une cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol (OSUS). Cependant, une interrogation se pose : est-ce que ce type d'image convient pour une utilisation en hydrogéologie ?

Les images acquises par des capteurs satellitaires sont employées depuis plus de 15 ans en hydrogéologie de manière sporadique. La cartographie de l'OSUS en hydrogéologie est principalement utilisée lors de modélisation exigeant non seulement cette carte mais plusieurs autres thématiques. L'imagerie satellitaire a été employée pour cartographier l'occupation du sol (OS) et la géomorphologie dans un projet d'évaluation et d'exploitation des eaux souterraines afin de faciliter et activer des travaux sur le terrain (Travaglia and Dainelli, 2003). La cartographie de l'utilisation du sol (US) a été employée pour détecter des changements d'usage des terres dans une étude d'impact de l'expansion urbaine sur la qualité de l'aquifère (Barber *et al*, 1996). Le capteur TM de Landsat a permis la détection de certains types de végétation fortement corrélés à la présence d'eaux souterraines (Koch and Mather, 1997). Les données de télédétection, lorsque acquises après une saison pluvieuse, ont donné une estimation de la capacité de drainage des sols (Finch, 1997) caractérisant les types de dépôt de surface nécessaire lors d'une cartographie hydrogéologique. Les images satellitaires ont permis la détection et l'interprétation des linéaments traduisant, à la surface du sol, la présence de structures géologiques (failles, fractures) profondes susceptibles d'emmagasiner de l'eau (Feder, 1987 ; Gustafsson, 1994 ; Mabee *et al.*, 1994 ; Nalbant and Alptekin, 1995 ; Rowan and Bowers, 1995 ; Teeuw, 1995 ; Kirshnamurthy *et al.*, 1996 ; Mahmood, 1996 ; McGregor *et al.*, 1997). Des images Landsat et RADARSAT fusionnées ont permis de discriminer et de délimiter certaines unités lithologiques (Abdelhamid, 1997). De plus, des images RADARSAT ont été utilisées avec succès pour mettre en évidence les contrastes morphologiques qui peuvent être associés à différentes unités géologiques (Azzibrouck *et al.*, 1997).

1.2. Objectifs

Deux objectifs distincts sont visés dans cette étude. L'objectif principal consiste à évaluer la précision thématique de deux cartes d'OSUS disponibles et produites dans différents contextes mais ayant un point en commun : l'utilisation de l'imagerie satellitaire optique à moyenne résolution spatiale. Le second objectif vise à définir au moyen des deux cartes d'OSUS, un système de classification adapté pour analyser la recharge d'aquifère au moyen du modèle HELP.

2. SITE D'ÉTUDE

Le bassin versant transfrontalier de la rivière Châteauguay, situé au sud de Montréal, Québec, Canada (figure 1), constitue le territoire d'une étude hydrogéologique effectuée en partenariat entre la Commission géologique du Canada et le Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs du Québec avec une participation de la U.S. Geological Survey (USGS). Il occupe une superficie approximative de 2 540 km², dont environ 55 % en territoire canadien. Seulement une image Landsat (résolution spatiale de 25 mètres) est nécessaire pour couvrir l'ensemble du bassin. Ses aquifères régionaux transfrontaliers sont compris dans les roches sédimentaires paléozoïques des Basses-Terres du Saint-Laurent (grès, dolomies et calcaires). Ses roches sédimentaires sont recouvertes de dépôts glaciaires et fluvioglaciaires (till, sable et gravier) et de dépôts marins fins (silt et argile). En général, les aquifères régionaux sont recouverts de sédiments glaciaires peu perméables qui ne permettent qu'une infiltration limitée des précipitations. La recharge régionale s'effectue dans les parties élevées du bassin où l'écoulement se fait dans des conditions de nappe libre. Le bassin est localisé dans une région principalement agricole, pour la partie canadienne, et forestière pour la partie américaine. Les terres agricoles occupent plus de 40 % du bassin. La partie forestière, qui occupe plus de 50 % du territoire, est composée à 75 % de jeunes peuplements, à savoir les groupements feuillus ou mélangés à dominance de feuillus. La région est relativement populeuse et compte environ 100 000 habitants dont 65 % dépend de l'eau souterraine comme unique source d'approvisionnement en eau. Les aquifères du bassin subissent donc des pressions importantes au niveau de l'utilisation agricole (cultures diverses et vergers), domestique (expansion urbaine) et industrielle (commerce de l'eau embouteillée). La zone d'étude retenue correspond à la partie canadienne du bassin versant.

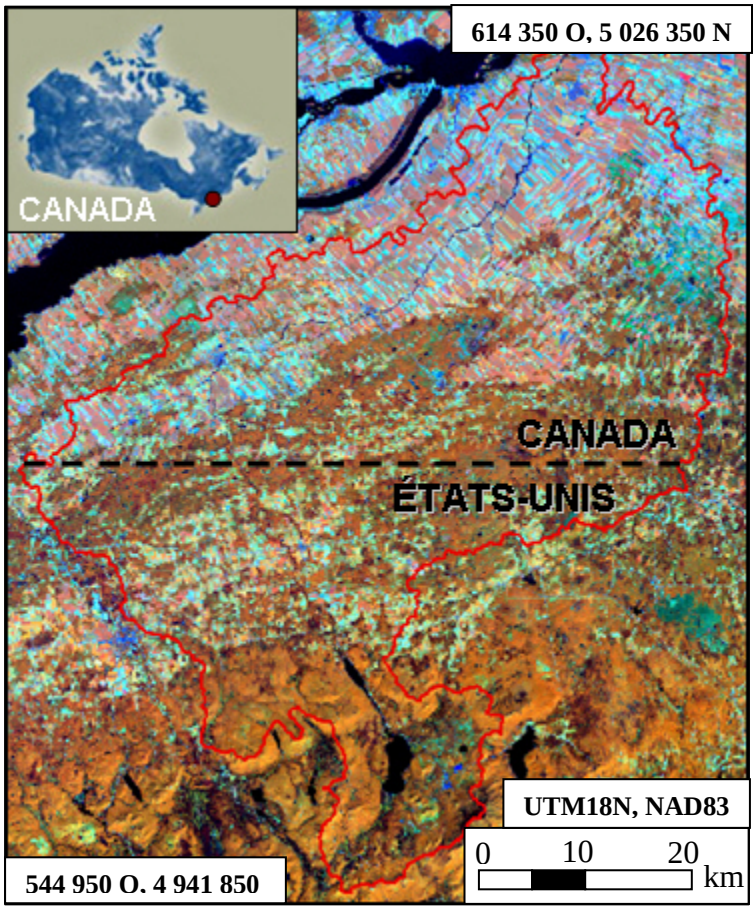


FIGURE 1 : Limite du bassin versant de la rivière Châteauguay (rouge) superposée à une image Landsat (bandes spectrales TM4, TM5 et TM3 affichées en rouge, vert et bleu). *Châteauguay River watershed (red) superimposed on a Landsat image (TM4, TM5 and TM3 Landsat spectral bands displayed as red, green and blue).*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les bases de données cartographiques ont été générées indépendamment les unes des autres et de la présente étude.

3.1. Cartographies de l'occupation et de l'utilisation du sol (OSUS)

Deux cartes ont été produites dans le cadre du projet hydrogélogique du bassin versant de la rivière Châteauguay. Pour des fins d'analyse de la précision thématique, ces deux cartes ont été généralisées à un classificateur de synthèse commun ayant 9 classes thématiques : Agricole (Ag) ; Conifères (Co) ; Forêt mixte (Mi) ; Feuillus (Fe) ; Arbustes (Ar) ; Herbacées (He) ; Sol à nu (So) ; Urbain (Ur) ; et Tourbière (To). Ce classificateur n'est pas un système de classification optimal pour analyser la recharge et il a été élaboré pour des fins de comparaison. Les cartes intégrales (sans généralisation) ont été employées pour définir un système de classification adapté au modèle HELP d'analyse de la recharge qui considère l'évapotranspiration et le ruissellement.

3.1.1. Cartographie I : méthode générique pour cartographier l'ensemble du Canada

La première cartographie, générée par RNCan, se base sur le système américain de classification FGDC (Federal Geographic Data Committee). Cette carte, pouvant contenir jusqu'à 48 classes thématiques pour la Canada, a été générée par classification non dirigée d'une image Landsat (image acquise le 8 juin 2001) et par étiquetage des regroupements spectraux obtenus. La méthodologie est générique (Cihlar *et al*., 2003) et peut facilement être réutilisée dans d'autres secteurs d'intervention. Cette méthode a été employée pour produire une cartographie de l'OSUS du bassin versant de la rivière Châteauguay. Au total 19 classes y ont été rencontrées.

3.1.2. Cartographie II : méthode spécifique pour cartographier le bassin versant de la rivière Châteauguay

La seconde cartographie, utilisant un système de classification établi en fonction de la diversité de la zone étudiée, a été générée par interprétation visuelle de plusieurs images Landsat accentuées (différentes compositions colorées et dates d'acquisition : 8 juin 2001 et 10 septembre 2003) (Tecsult Inc., 2005). L'interprétation visuelle considère non seulement les valeurs de réflectance de chacun des pixels de l'image, mais également les informations spatiales des images (distribution des patrons de tonalité, texture, forme et taille), les informations auxiliaires (données recueillies sur le terrain ainsi que sur la carte topographique) et le contexte. Il s'agit d'un produit pouvant contenir jusqu'à 59 classes thématiques. Toutefois, contrairement à la classification d'images (méthode retenue pour la production de la cartographie I), cette classification détaillée requiert l'expertise d'un spécialiste en végétation pour l'interprétation qui est effectuée manuellement au moyen d'un système d'information géographique. Au total 50 classes ont été rencontrées.

3.2. Produits d'évaluation de la précision thématique des cartographies d'OSUS

Deux bases de données (BD) de vérité sur le terrain ont été utilisées pour analyser la fiabilité des cartes. En fait, il s'agit des BD utilisées pour générer les cartographies respectives. Elles ne couvrent que la partie canadienne du bassin versant de la rivière Châteauguay. La BD I, qui contient 123 points de contrôle, a été utilisée pour valider la cartographie II et la BD II, ayant 201 points de contrôle, a été employée pour valider la cartographie I. Une référence géographique a été acquise pour chacun des points de contrôle au moyen d'un GPS.

La BD I contient des contrôles majoritairement forestiers et donne seulement une classe d'occupation du sol sans autre description. La BD II décrit en détail le milieu et elle donne des informations sur les espèces végétales dans toutes les strates de végétation (arborescente, arbustive, etc.), le stade de développement, l'origine ou la perturbation, le type de milieu ainsi que le type de culture pour certains points. Les bases de données ont été généralisées au classificateur commun ayant 9 classes (section 3.1).

3.3. Méthodes

Les méthodes conventionnelles d'évaluation de la précision thématique d'une carte ont été employées. Il s'agit de la matrice de confusion et de l'indice Kappa (Congalton, 1991). La matrice de confusion donne une évaluation de la précision globale de la cartographie et des résultats de classification pour chacune des classes thématiques. L'indice Kappa évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus (carte) et la vérité sur le terrain (BD). Il s'étend de 0 à 1 et il se divise en cinq catégories : accord très faible de 0 à 0,20 ; accord faible de 0,21 à 0,40 ; accord modéré de 0,41 à 0,60 ; accord substantiel de 0,61 à 0,80 ; accord presque parfait de 0,81 à 1. L'indice Kappa (équation 1) est exprimé en terme de précision globale observée (équation 2) et de précision prévue (équation 3).

$$\hat{\kappa} = \frac{a-b}{1-b} \qquad (1)$$

$$a = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{Nc} x_{ii} \qquad (2)$$

$$b = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{Nc}\left(x_{+i} \cdot x_{i+}\right) \qquad (3)$$

Nc = Nombre de classes

N = Nombre total d'observations

x_{ii} = Nombre d'observations dans la colonne i ligne i (diagonale de la matrice)

x_{+i} = Total des observations dans la colonne i (total à droite dans la matrice)

x_{i+} = Total des observations dans la ligne i (total en bas de la matrice)

Au moyen d'un système d'information géographique, les BD ont été superposées aux cartes pour extraire la classe d'OSUS correspondant aux points de contrôle. Pour chacun des points, une validation visuelle des zones et pixels contiguës a été réalisée afin de minimiser les erreurs de localisation géographique.

4. RÉSULTATS

4.1. Analyse de la précision thématique des produits cartographiques

Les résultats de l'analyse de fiabilité sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Ces tableaux montrent, pour chacune des classes, le niveau de fiabilité moyen et les principales confusions observées. La majorité des confusions apparaissent entre les classes négligées dans le processus de cartographie, qui ne représentent que de petites superficies sur le territoire à l'étude, et les classes surévaluées.

TABLEAU 1 : Matrice de confusion et indice Kappa : Cartographie I (Classification). *Confusion Matrix and Kappa Index: Mapping I (Classification)*

Terrain	Cartographie I									Total	Précision
(BD II)	Ag	Co	Mi	Fe	Ar	He	So	Ur	To		
Ag	81	-	-	-	2	-	-	-	-	83	98 %
Co	1	10	-	-	-	-	1	-	-	12	83 %
Mi	-	1	16	1	1	1	-	-	-	20	80 %
Fe	-	3	28	19	4	-	-	-	-	54	35 %
Ar	-	-	1	-	9	-	-	-	-	10	90 %
He	3	-	1	-	2	1	-	1	1	9	11 %
So	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0 %
Ur	3	-	-	-	-	-	-	6	-	9	67 %
To	-	-	-	-	1	-	-	-	3	4	75 %
Total	88	14	46	20	19	2	1	7	4	201	
Précision globale de la cartographie										72 %	
Indice Kappa										0,63	

TABLEAU 2 : Matrice de confusion et indice Kappa : Cartographie II (Interprétation visuelle). *Confusion Matrix and Kappa Index: Mapping II (Visual Interpretation)*

Terrain	Cartographie II									Total	Précision
(BD I)	Ag	Co	Mi	Fe	Ar	He	So	Ur	To		
Ag	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	100 %
Co	-	1	4	-	-	-	-	-	-	5	20 %
Mi	-	2	15	2	-	-	-	-	-	19	79 %
Fe	5	2	22	63	-	-	-	-	-	92	68 %
Ar	2	-	-	-	2	-	-	-	-	4	50 %
He	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0 %
So	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0 %
Ur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0 %
To	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	100 %
Total	9	5	41	65	2	0	0	0	1	123	
Précision globale de la cartographie										68 %	
Indice Kappa										0,42	

Les résultats de l'analyse de fiabilité sont dans l'ensemble très similaires avec des précisions variant de 68 % à 72 % et des indices Kappa de modéré à substantiel.
On observe que la classe agricole influence grandement l'évaluation globale de la précision car elle obtient une précision élevée (facile à cartographier). Le fait qu'elle soit sous représentée dans la BD I (2 %) comparativement à la BD II (41 %), rend les comparaisons difficiles. L'évaluation globale a donc été recalculée en éliminant la classe agricole. Les résultats sont toujours similaires, avec des précisions se situant entre 54 % et 68 % et avec un indice Kappa présentant un accord modéré. Cependant, sans la classe agricole, c'est la cartographie II qui obtient la meilleure précision.

4.1.1. Analyse des confusions thématiques

De manière générale les cartes obtiennent d'excellents taux de précision pour les classes agricole et tourbière. Toutefois, on observe que la classe agricole est surévaluée dans les cartographies car elle est en confusion avec plusieurs classes.
En ce qui concerne la cartographie I, la classe d'arbustes a bien été classifiée avec une précision de 90 %. La classe urbaine a relativement bien été classifiée avec une précision de 67 %. Dans ce cas, elle est en confusion avec la classe agricole probablement en raison de pixels mixtes composés d'agriculture et de milieux urbains ou tout simplement dû à une méconnaissance du terrain (autres milieux non considérés comme les dépôts de pneus). Deux classes étaient sous représentées : la classe d'herbacées avec un taux de précision de 11 % et la classe de feuillus avec 35 % de précision.
La confusion entre les herbacées et la classe agricole est possiblement liée au fait que la cartographie utilisait une image acquise au printemps, période où la biomasse de ces milieux se ressemble. Il est important de préciser que 89 % des erreurs associées à la classe de feuillus constituent une confusion avec la classe de forêt mixte et correspondent à la classe de forêt mixte avec une dominance de feuillus sur la cartographie intégrale. La figure 2 présente un exemple de confusion détectée sur la cartographie produite par classification.

En ce qui concerne la cartographie II, la classe d'arbustes obtient une précision de 50 % et elle est en confusion avec la classe agricole, possiblement des friches agricoles. La confusion entre la classe de feuillus et la classe de forêt mixte sur la cartographie I a également été observée, mais dans ce cas 69 % des erreurs sont associées à un polygone ayant un attribut de classe de forêt mixte avec dominance de feuillus sur la cartographie non généralisée. Lors de l'interprétation visuelle, la composition de la classe de forêt mixte peut être une mosaïque de petites superficies de conifères et de feuillus ou alors d'un mélange de ces deux types de végétation. La figure 3 donne un exemple d'un polygone interprété comme forêt mixte qui est composé de petites sous-zones de forêt de feuillus et de forêt mixte. On remarque également que les points de contrôle de conifères sont souvent confondus avec la classe de forêt mixte. Cette confusion peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit de peuplements ouverts où la composante du sous-bois, constituée majoritairement de plantes à feuilles, a été négligée lors des observations sur le terrain.

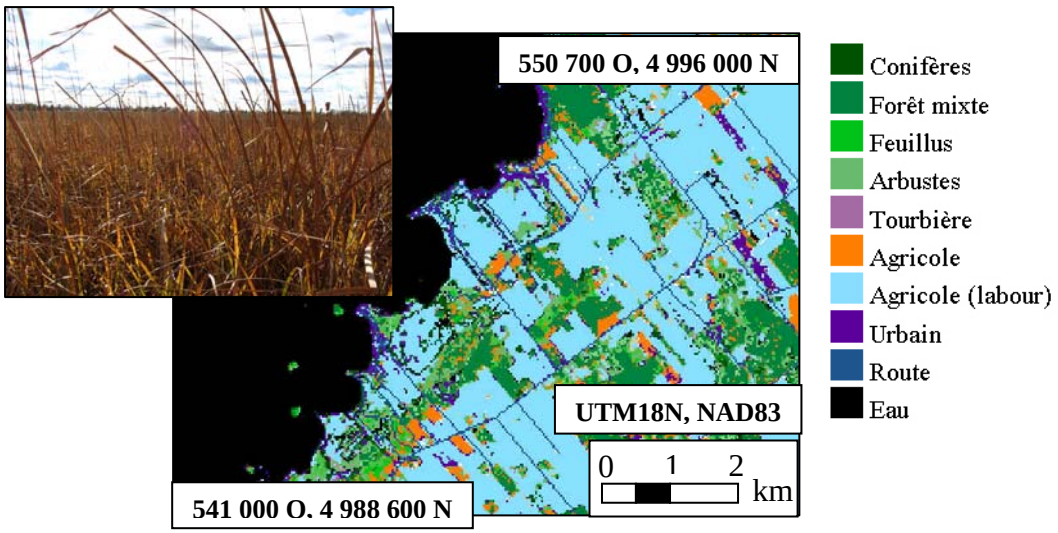


FIGURE 2 : Confusion entre la classe d'herbacées (point d'observation) et la classe agricole. *Confusion between herbaceous class (control point) and agricultural class.*

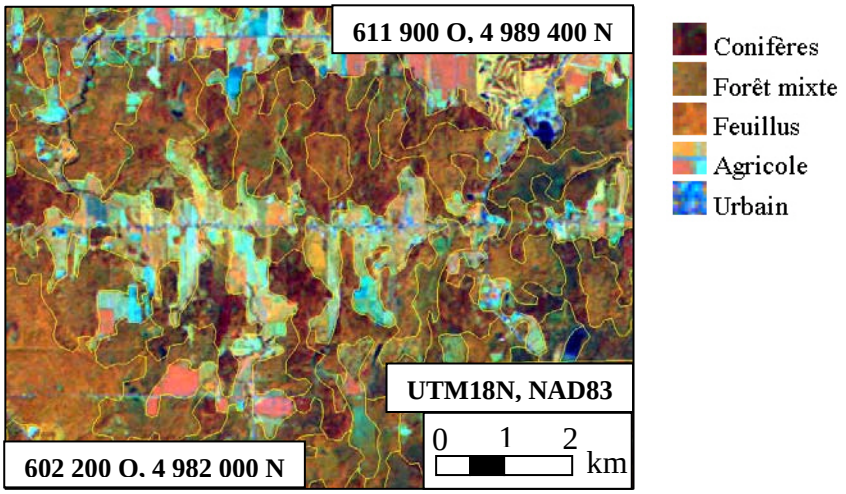


FIGURE 3 : Confusion entre la classe de feuillus (point d'observation) et la classe de forêt mixte (polygone avec le point d'observation), les bandes spectrales TM4, TM5 et TM3 de Landsat sont affichées respectivement en rouge, vert et bleu. *Confusion between deciduous class (control point) and mixed forest class (polygon with a white point), TM4, TM5 and TM3 Landsat spectral bands are displayed in red, green and blue respectively.*

4.2. Développement d'un système de classification des produits cartographiques d'OSUS

En fonction du contenu thématique des deux cartes intégrales et des besoins en information sur l'OSUS du modèle HELP lors d'une analyse de la recharge, un système de classification a été élaboré. Il est présenté dans le tableau 3. En plus des liens entre l'OSUS et les variables du modèle HELP, ce tableau précise la méthode de cartographie optimale pour extraire les informations recherchées.

TABLEAU 3 : Système de classification de l'occupation et l'utilisation du sol lors de l'analyse de la recharge d'aquifère. *Land Cover and Land Use Classification Scheme in Aquifer Recharge Modeling*

Analyse de la recharge	Variable	Thématique	Méthode de cartographie[2]
Ruissellement	Coefficient de ruissellement	Bois	Classification
		Culture intensive	Interprétation[3]
		Culture extensive	Interprétation[3]
		Urbain	Classification
		Autres milieux[1]	Interprétation
	Distance au drain	Bois	Classification
		Culture intensive	Interprétation[3]
		Culture extensive	Interprétation[3]
		Urbain	Classification
		Autres milieux[1]	Interprétation
Évapotranspiration	Profondeur d'évaporation	Couvert forestier vieux à mature	Classification
		Couvert forestier jeune à moyen	Classification
		Végétation arbustive	Classification
		Verger	
		Affleurement rocheux et faible végé-	Classification

		Agriculture – Culture maraîchère	Interprétation[3]
		Agriculture – Grande culture	Interprétation[3]
		Urbain	Classification
	Indice de surface foliaire	Couvert forestier de feuillus	Classification
		Couvert forestier de conifères	Classification
		Agriculture – Culture maraîchère	Interprétation[3]
		Agriculture – Grande culture	Interprétation[3]
		Agriculture – Fourrage	Interprétation[3]
		Couvert de végétation éparse	Classification

[1] Verger, golf, carrière, gravière, etc.
[2] Classification = Classification ou interprétation / Interprétation = Interprétation seulement
[3] Approche multidates (printemps et été)

5. DISCUSSION

La cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol (OSUS) n'est pas une représentation parfaite de la réalité au terrain. Comme il y a toujours des erreurs dans les cartes, avant de les utiliser, il est important d'avoir une idée de la précision de ces dernières pour s'assurer qu'elles répondent aux besoins et exigences de l'utilisateur. L'approche d'évaluation de la précision a consisté à utiliser des informations supplémentaires à celles employées dans la production de la carte. La connaissance de la précision d'un document cartographique est un élément d'intérêt surtout lors d'une analyse multicritères car elle fiabilise l'ensemble de la modélisation.

L'évaluation de fiabilité des cartes d'OSUS peut être influencée par plusieurs paramètres de qualité. Au nombre de ceux-ci on retrouve la précision des observations au terrain (BD), la précision des coordonnées géographiques des observations sur le terrain (BD), la diversité thématique des points de contrôle de la BD et finalement, la méthodologie de production des cartographies. Les résultats de l'analyse de fiabilité sont similaires pour les deux cartographies. La majorité des confusions apparaissent entre les classes négligées dans le processus de cartographie et les classes surévaluées. Une confusion systématique entre la classe de feuillus et celle de forêt mixte a également été notée. L'identification sur le terrain de la classe de forêt mixte est souvent subjective puisqu'il s'agit d'une interprétation visuelle à distance. En regroupant cette classe à celle de forêt de feuillus lors de l'analyse de fiabilité, les précisions globales pour les cartographies I et II se hausse à 87 % et 88 % respectivement, ce qui confirme possiblement un problème d'identification dans les BD.

Le système de classification a été établi en fonction des intrants nécessaires au modèle HELP d'analyse de la recharge utilisé en hydrogéologie. Il a été élaboré en considérant l'ensemble du contenu thématique des deux cartes. L'OSUS influence deux paramètres essentiels à l'analyse de la recharge, à savoir le ruissellement et l'évapotranspiration. Plus précisément, l'indice de surface foliaire, dérivé de la carte d'OSUS (Fernandes *et al.*, 2003), influence l'évapotranspiration puisqu'il quantifie le feuillage des végétaux. La profondeur d'évapotranspiration, déterminée en fonction de la profondeur maximale des racines (type de végétation), influence également l'évapotranspiration. Le coefficient de ruissellement est évalué à partir de 4 critères, soit la classe hydrologique de sol, la texture, la pente et l'utilisation du sol. Finalement, la distance au drain, qui influence le ruissellement de surface, est établie en fonction des types d'agriculture. C'est donc sur ces bases scientifiques que le développement du système a été fait. La cartographie I est efficace principalement pour cartographier l'occupation du sol (OS). En plus de l'OS, la cartographie II permet une cartographie partielle de l'utilisation du sol. La méthode de production cartographique influence la disponibilité d'un produit, en effet la classification d'image se fait plus rapidement que l'interprétation visuelle. Finalement, la période d'acquisition des images a eu un impact sur le développement du système de classification. L'utilisation des images acquises au printemps et à l'été a permis de distinguer les cultures maraîchères des grandes cultures agricoles.

6. CONCLUSION

La présente étude démontre le potentiel des images Landsat comme source de données utile pour cartographier l'OSUS en hydrogéologie (King, 2002 ; Olioso, 2002). L'imagerie permet une cartographie homogène pour un grand territoire et sa caractéristique numérique facilite la modélisation spatiale. Les deux produits cartographiques, généralisés à un classificateur de synthèse commun pour des fins de comparaison, offrent des précisions thématiques similaires. La cartographie I, générée par classification d'image, obtient une précision 72 % avec un Kappa substantiel tandis que la cartographie II, générée par interprétation visuelle d'images, obtient une précision de 68 % avec un Kappa modéré. La grande différence entre les deux cartes est le niveau de détail du système de classification. Pour optimiser l'utilisation des images Landsat lors d'une analyse multicritères de la recharge au moyen du modèle HELP, un système de classification de l'occupation et de

l'utilisation du sol a dû être élaboré. Les images Landsat fournissent donc des informations utiles sur l'OSUS pour analyser la recharge.
L'évaluation de la fiabilité d'une carte produite au moyen de ce système de classification constituerait une activité future. Ce système pourrait être amélioré en considérant l'utilisation d'autres types d'images comme celles acquises par capteur optique à haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre) pour faciliter la détection de certains milieux anthropiques (vergers, types de cultures, etc.) et celles acquises par capteur radar, sensible à la rugosité de surface et à l'humidité du sol, pouvant possiblement améliorer la discrimination entre les différentes cultures.

Remerciements

Les auteurs veulent remercier les partenaires du projet hydrogéologique du bassin versant de la rivière Châteauguay et en particulier Sébastien Boudreau de la compagnie Tecsult Inc. pour avoir mis à disposition des données de terrain et de cartographie de l'utilisation du sol. Nous remercions également Ruth Boivin de la Commission géologique du Canada pour ses commentaires sur l'aspect géomatique ainsi qu'Anne Croteau de l'Institut national de la recherche scientifique pour ses commentaires sur les besoins en matière d'occupation et d'utilisation du sol lors d'un bilan hydrique. Nous profitons de l'occasion pour remercier les critiques internes du Secteur des sciences de la Terre. Finalement, nous remercions l'Agence spatiale canadienne pour son support financier dans le cadre du Programme d'initiatives gouvernementales en observation de la Terre et du Programme de développement d'applications en observation de la Terre.

Références

Abdelhamid G. (1997) RADARSAT Investigation of Circular Feature in East Central Jordan. La géomatique à l'ère de RADARSAT (GER'97), Symposium international, Ottawa, Canada, 25 au 30 mai 1997 (Comptes rendus numériques).

Azzibrouck, G.A., Saint-Jean, R. et Prévost, C. (1997) Analyse de la texture d'une image RADARSAT pour la cartographie géologique dan la forêt équatoriale de Ngoutou, Est du Gabon. La géomatique à l'ère de RADARSAT (GER'97), Symposium international, Ottawa, Canada, 25 au 30 mai 1997 (Comptes rendus numériques).

Barber, C., Otto, C. J., and Bates, L. E. (1996) Evaluation of the Relationship Between Land-Use Changes and Groudwater Quality in a Water-Supply Catchment, using GIS Technology: The Gwelup Wellfield, Western Australia. Hydrogeology Journal, vol 4, n°1, p. 6-19.

Chalifoux, S., Nastev, M., Lamontagne, C., Latifovic, R. et Fernandes, R. (2005) La télédétection en hydrogéologie, vers une approche intégrée. Compte rendu du 12e Congrès de l'AQT, Chicoutimi, 10-12 mai 2005, Association québécoise de télédétection, Canada, Compte rendu numérique, 8 p.

Cihlar, J., Guidon, B., Beaubien, J., Latifovic, R., Peddle, D., Wulder, M., Fernandes, R. and Kerr, J. (2003) From Need to Product: A Methodology for Completing a Land Cover Map of Canada with Landsat Data. Journal canadien de télédétection, vol. 29, n°2, p. 171-186.

Congalton, R. G. (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, vol. 37, n°1, p. 35-46.

Feder, M. A. (1987) Advanced Remote Sensing Approaches in Groundwater Exploration. Water Resources Related to Mining and Energy – Preparing the Future, American Water Resources Association, Salt Lake City, USA, November 1-6, 1987, p. 13-38.

Fernandes, R. A., Butson, C., Leblanc, S. and Latifovic, R. (2003) Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ based accuracy assessment of leaf area index products for Canada derived from SPOT-4 Vegetation data. Journal canadien de télédétection, vol. 29, n°2, p. 241-258.

Finch, J.W. (1997) Monitoring small dams in semi-arid regions using remote sensing and GIS. Journal of Hydrology, vol. 195, n°1 – 4, p. 335-351.

Gustafsson, P. (1994) Spot Satellite Data for Exploration of Fractures Aquifers in a Semi-arid Area in Southern Botswana. Applied Hydrogeology, vol. 2, n°2, p. 9-18.

Hoffman, J. (2005) The Future of Satellite Remote Sensing in Hydrogeology. Hydrogeology Journal, vol. 13, n° 1, p. 247-250.

King, C. (2002) États de surface et ruissellement, l'approche par télédétection. La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau, n°1-2002, p. 41-48.

Kirshnamurthy, J., Venkatesa Kuma, N., Jayaraman, V. and Manivel, M. (1996) An Approach to Demarcate Ground Water Potential Zones Through Remote Sensing and a Geographical Information System. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n°10, p. 1867-1884.

Koch M. and Mather, P. M. (1997) Lineament Mapping for Groundwater Resource Assessment: a Comparison of Digital Synthetic Aperture Radar (SAR) Imagery and Stereoscopic Large Format Camera (LFC) Photographs in the Red Sea Hill, Sudan. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n°7, p. 1465-1482.

Mabee, S.B., Hardcastle, K.C., and Wise, D.U. (1994) A Method of Collecting and Analyzing Lineaments for Regional-Scale Fractured-Bedrock Aquifer Studies. Groudwater, vol. 16, n°13, p. 884-894.

Mahmood, A. (1996) Lineaments as Groundwater Exploration Guides in Hard-rock Terranes of Arid Region. Journal canadien de télédétection, vol. 22, n°1, p. 108-116.

McGregor, R.G., Bruton, P. and Singhroy, V.H. (1997) A GIS Methodology for Geological Site Characterization of Canadian Shield Terrain. La géomatique à l'ère de RADARSAT (GER'97), Symposium international, Ottawa, Canada, 25 au 30 mai 1997 (Comptes rendus numériques).

Nalbant, S.S. and Alptekin, Ö (1995) The use of Landsat Thematic Mapper imagery for analysing lithology and structure of Korucu-Dugle area in western Turkey. International Journal of Remote Sensing, vol. 16, n°13, p. 2357-2374.

Olioso, A. et Jacob, F. (2002) Estimation de l'évapotranspiration à partir de mesure de télédétection. La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau, n°1-2002, p. 62-67.

Ressources naturelles Canada (2005) Les eaux souterraines. http://pes.rncan.gc.ca.

Rowan, L.C. and Bowers, T.L. (1995) Analysis of Linear Features Mapped in Landsat Thematic Mapper and Side-Looking Airborne Radar Images of the Reno 1°b y 2° Quadrangle, Nevada and California : Implications for Mineral Resource Studies. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 61, n°6, p. 749-759.

Schroeder, P. R., Lloyd, C. M. and Zappi, P. A. (1994) The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, User's guide for version 3. EPA/600/R-94/168a, U.S. Environmental Protection Agency Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, USA.

Teeuw, R.M. (1995) Groundwater Exploration Using Remote Sensing and a Low-Cost Geographical Information System. Hydrogeology Journal, vol. 3, n°3, p. 21-30.

Tecsult Inc. (2005) Intégration des données d'observation de la Terre à la cartographie hydrogéologique, Rapport intérimaire. Publication interne, 51 p.

Travaglia, C. and Dainelli, N. (2003) Groundwater Search by Remote Sensing: A Methodological Approach. Environment and Natural Resources Working Paper FAO, n°13, 41 p.