ÉVOLUTION DU RECOUVREMENT VÉGÉTAL DANS UN BASSIN VERSANT : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE AUX BROCHETS AU QUÉBEC

Youssef DEHBI, Ferdinand BONN, Dong-Chen HE et André LAVOIE

Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1.
Téléphone 819-821-7180 ; télécopieur : 819-821-7944 ; courriel : Youssef.Dehbi@USherbrooke.ca ;
Dong-Chen.He@USherbrooke.ca ; Andre.Lavoie@USherbrooke.ca

Soumis le 19 décembre 2006 ; révisé le 13 avril 2007 ; accepté le 25 septembre 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 185-201

Résumé

L'érosion des sols du bassin versant de la rivière aux Brochets est considérée comme une source importante de phosphore dans la baie Missisquoi, du côté québécois du lac Champlain. Nous supposons que cette érosion est à l'origine des problèmes d'eutrophisation que connaît cette baie depuis quelques années. L'objectif de l'étude est de mettre en évidence l'évolution du recouvrement végétal au printemps durant les dernières décennies, c'est-à-dire entre 1979 et 2004. Cet élément est considéré comme un des indicateurs possibles de la vulnérabilité des sols à l'érosion dans ce bassin versant. Le travail s'appuie sur une méthode qui combine : a) l'approche par comparaison en post-classification de cartes provenant de classifications, b) l'utilisation de l'indice de recouvrement végétal (Fcover) et c) des équations polynomiales utilisant des indices de végétation. Ainsi, on a pu mettre en évidence une diminution d'environ 20 % du recouvrement végétal général du bassin versant de la rivière aux Brochets. Cette diminution est inversement proportionnelle à une augmentation considérable de 22 % de la superficie en sols nus au printemps, ce qui se traduit au plan spatial par une expansion des sols nus vers le milieu du bassin versant de la rivière aux Brochets.

Mots clés : Suivi spatio-temporel, bassin versant, recouvrement végétal, sol nu, indices de végétation, Fcover.

Evolution of the vegetation cover in a watershed: case of the Pike River watershed in Québec

Soil erosion in the Pike River watershed is considered as being an important source of phosphorus in Missiquoi Bay on the Québec side of Lake Champlain. We suppose that this erosion is at the origin of the eutrophication problems that have been affecting Missisquoi Bay over the last few years. The goal of this study is to highlight the evolution of the vegetation cover during the spring period over the last decades (between 1979 and 2004). This feature is regarded as one of the possible indicators of the vulnerability of soils to erosion in this particular watershed. Our work is based on a method which combines: a) the post-classification comparison of classification maps, b) the use of the vegetation cover index (Fcover) and c) the use of polynomial equations using vegetation indices. We have noted a decrease of 20 % in the global vegetation cover in the Pike River watershed. This decrease is inversely proportional to the considerable increase of 22 % in bare soil surfaces during the spring time, which translates at the spatial level into an extension of bare soils in the middle of the Pike River watershed.

Keywords : Spatial-temporal evolution, watershed, vegetation cover, bare soil, *Fcover*, vegetation index.

1. INTRODUCTION

L'eutrophisation est l'un des problèmes majeurs dont souffre une grande partie des cours d'eau et des lacs dans le monde. Ce phénomène naturel est dû à l'abondance des matières en suspension et des éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore, qui causent une prolifération extensive des algues et des végétaux aquatiques menant ainsi à la dégradation du système aquatique considéré (CNRS, 2005). Dans les dernières décennies, on a connu une augmentation du taux d'eutrophisation dans le monde et cette eutrophisation est surtout due aux actions anthropiques à différentes échelles (CNRS, 2005 ; Syndic-Rivières, 2005). L'intervention de l'humain sur ce phénomène peut se faire, d'une façon directe, par un rejet localisé d'eaux usées surchargées en éléments nutritifs dans le réseau hydrographique.

L'intervention peut aussi être indirecte, par le biais des parcelles agricoles, à partir desquelles les nutriments et les sédiments sont acheminés vers le milieu aquatique à la suite de l'érosion hydrique. Ce dernier phénomène se définit comme une pollution diffuse et est considéré comme un facteur très important dans la dégradation des cours d'eau et des lacs. La présence d'un bon recouvrement végétal limite l'apport des éléments nutritifs par pollution diffuse et la diminution de ce recouvrement pourrait donc expliquer en partie le déclenchement de l'eutrophisation d'un lac.

Durant les deux dernières décennies, le Québec a connu certains problèmes liés à la dégradation des sols et des rives par l'érosion hydrique (MDDEP, 2004). Ces problèmes engendrent, entre autre, une dégradation accélérée de certains cours d'eau du Québec. Le lac Champlain est reconnu comme un plan d'eau important du continent nord américain. La baie Missisquoi occupe la partie nord de ce lac située au Québec. Elle connaît depuis quelques années de graves problèmes environnementaux liés à la pollution diffuse, lesquels se manifestent par une eutrophisation des eaux. Plusieurs études (Blais, 2002 ; Cattaï, 2004 ; Deslandes, 2003 ; Lévesque, 2003) ont démontré que, du côté québécois, la principale source qui alimente la baie en éléments nutritifs, surtout en phosphore, est le bassin versant de la rivière aux Brochets. En effet, cette partie du bassin versant se trouve en partie dans la région naturelle des Basses-terres du Saint-Laurent où l'on rencontre une concentration des terres en cultures annuelles plus intensives par rapport aux autres régions naturelles du Québec (MDDEP, 2004). Le travail conventionnel des sols en cultures annuelles laisse le sol à nu au printemps, augmentant ainsi le temps d'exposition des sols aux facteurs d'érosion hydrique, ce qui agit tant sur la dégradation des rives et des berges que sur la qualité des sols et des cours d'eau situés dans ce bassin. L'étude ou la gestion d'un tel phénomène environnemental doit considérer l'ensemble des éléments qui l'influencent. Ainsi, la pollution diffuse qui affecte un système aquatique réunit trois éléments : la source des agents polluants (provenant des usages agricoles et des autres types d'usages anthropiques), les facteurs de transport (érosion et ruissellement) et le récepteur final (la rivière et la baie).

Dans cette recherche, on vise à étudier l'évolution d'un élément source de pollution diffuse soit l'occupation des terres. L'objectif est de mettre en évidence l'évolution spatio-temporelle du recouvrement végétal au printemps pour les dernières décennies, c'est-à-dire entre 1979 et 2004. L'évolution du recouvrement végétal est considérée comme un indicateur de la vulnérabilité à l'érosion dans le bassin versant considéré. Le travail s'appuie sur une méthode qui allie l'approche par comparaison en post-classification de cartes provenant d'une classification, sur l'utilisation de l'indice de recouvrement végétal (*Fcover*) et sur des équations polynomiales utilisant des indices de végétation.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de la rivière aux Brochets se situe dans les Basses-terres du Saint-Laurent, au sud-ouest du Québec, dans une zone de forte concentration de terres agricoles. Il s'étend sur une superficie de 630 km^2, dont 85 % se trouve sur le sol québécois (figure 1). Ce bassin peut être divisé en deux sous-bassins d'à peu près égale superficie, en fonction de leurs caractéristiques lithologiques, topographiques et anthropiques. La partie amont du bassin est localisée dans le Piedmont appalachien. En plus de la portion américaine, cette partie s'étend de la frontière canado-américaine jusqu'à la ville de Bedford. L'altitude varie de 20 à 710 m. Les sols de ce secteur sont principalement formés par des loams sableux (série de Milton) et schisteux (série de Shefford) (Cann *et al*., 1947). La partie aval du bassin s'étend de la ville de Bedford jusqu'à la baie Missisquoi. Elle est caractérisée par territoire en cultures annuelles intensives. Le sol de cette région est surtout formé d'un loam argileux (série de Sainte–Rosalie) (Cann *et al*., 1947) et l'altitude varie de 20 à 130 m.

Tableau 1 : Caractéristiques des images multidates utilisées dans l'étude*. Characteristics of the multitemporal images used.*

Date des images	Capteur	Couverture nuageuse (%)
19 mai 1979	MSS de Landsat	20
17 juin 1984		25
17 juin 1984	TM de Landsat-5	25
16 juin 1987		20
16 juin 1995		0
11 juin 1999		0
8 juin 2001	ETM+ de Landsat-7	0
24 juin 2004	TM de Landsat-5	0

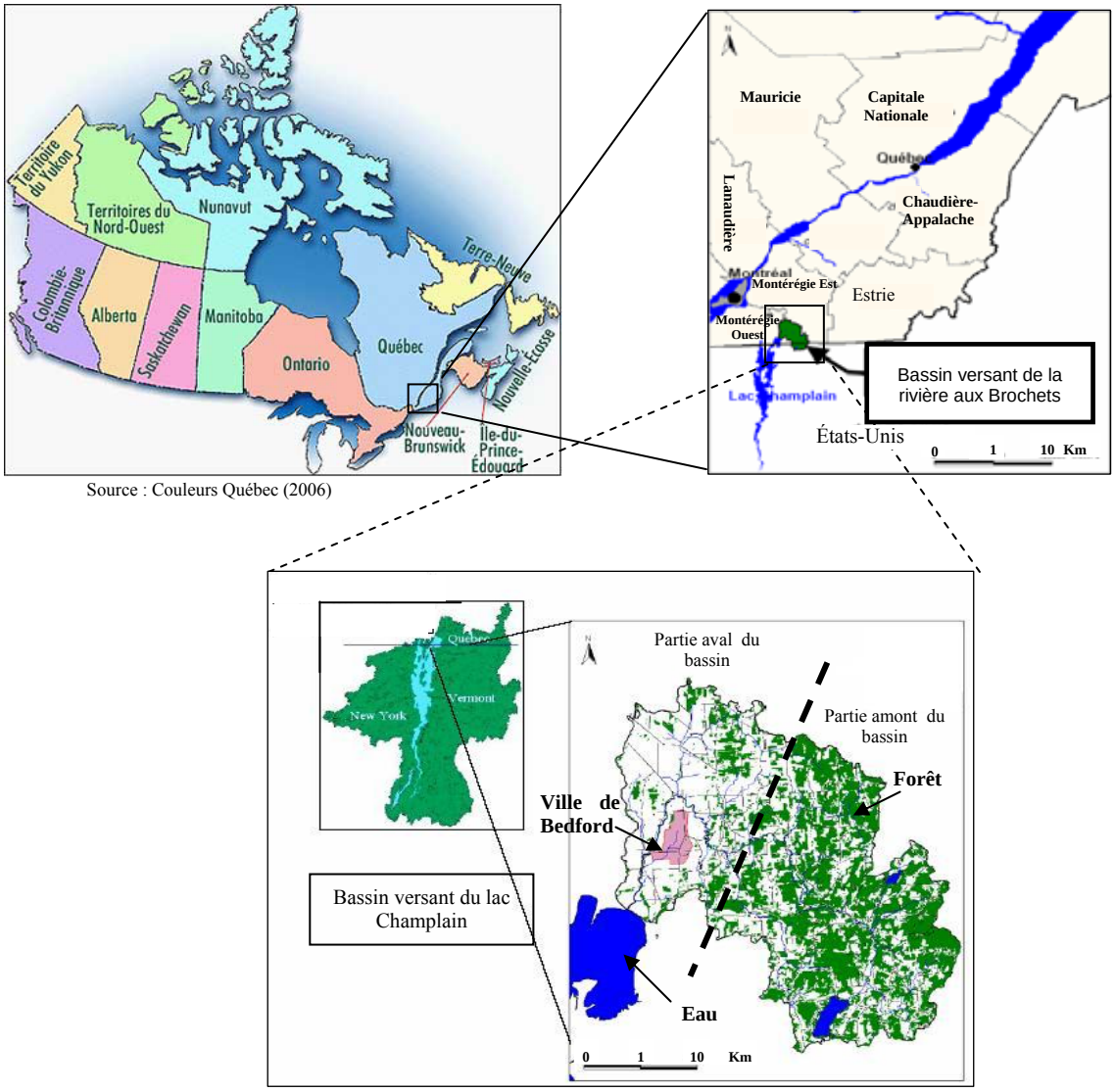


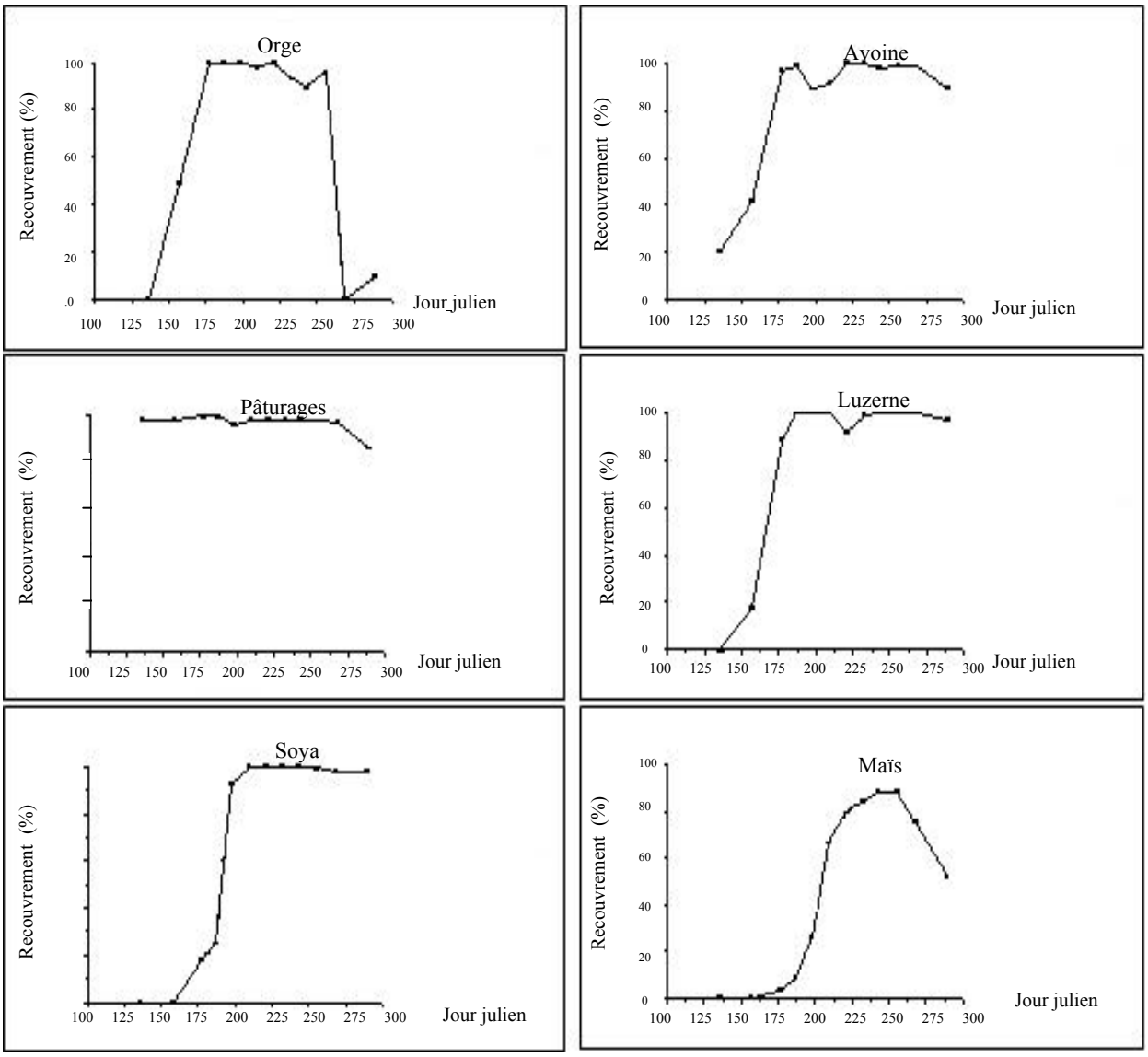
Figure 1 : Localisation du bassin versant de la rivière aux Brochets. *Location of the Pike River watershed*.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans les sous-sections qui suivent, on fait état des données satellitaires qui ont été utilisées pour réaliser le travail, de même que des diverses étapes méthodologiques depuis le traitement des images satellitaires jusqu'à leur classification et à l'extraction de l'information sur le recouvrement végétal par le biais des indices de végétation.

3.1. Données utilisées

L'imagerie satellitaire est un outil très intéressant de cartographie et de suivi de l'évolution d'un bassin. Il existe maintenant des archives d'images satellitaires qui remontent jusqu'aux années 1970 grâce à la série de capteurs à bord des satellites Landsat. Ceci permet de faire un suivi spatio-temporel de l'évolution du recouvrement végétal du bassin versant durant les 25 dernières années. Cette période coïncide avec une forte augmentation de la superficie des terres en cultures annuelles au Québec (MDDEP, 2004). L'évolution des surfaces concernées a donc pu faire l'objet d'un suivi en analysant des images satellitaires multidates choisies en fonction du taux de recouvrement végétal minimal, lequel dépend du calendrier phénologique des principales cultures de la région (figure 2).



Modifié de Cyr (1993)

Figure 2 : Évolution du recouvrement végétal des principales cultures dans le bassin versant de la rivière aux Brochets. *Evolution of the vegetation cover of the main crops in the Pike River watershed.*

Cette étude a exigé l'utilisation de nombreuses données de différentes natures. D'abord, nous avons utilisé un groupe d'images satellitaires multidates du bassin versant de la rivière aux Brochets, couvrant la période comprise entre 1979 et 2004, à un intervalle d'environ 4 à 5 ans (tableau 1). Dans le but de minimiser les différences au niveau de la sensibilité et de l'étalonnage de différents capteurs satellitaires entre eux, nous nous sommes restreints à une série d'images provenant des capteurs de Landsat uniquement. Il faut mentionner que l'image MSS de juin 1984 ne pouvait être utilisée à cause des fortes déformations qu'elle présente et aussi à cause du décalage horizontal de certaines lignes de l'image. Nous avons donc utilisé seulement l'image TM de la même date et fait la comparaison entre les images de deux capteurs (MSS pour 1979 et TM pour 1984).

Des données auxiliaires ont aussi complété les données images nécessaires à l'étude. Des travaux ont été effectués sur le terrain dans la partie québécoise du bassin durant l'été 2004, principalement en juin. Ces travaux, qui permettent de faire la correspondance avec les images utilisées, ont aussi permis de colliger les données nécessaires à l'établissement de la réalité de terrain pour les différentes occupations des terres. Des vérifications ont eu lieu sur une centaine de parcelles et une série de mesures spectrométriques a été colligée pour supporter la classification d'image et confirmer la couverture du sol. De plus, une vingtaine de points de contrôle a été colligé, pour servir aux corrections géométriques des images et pour localiser avec précision les endroits où ont été effectuées les vérifications. Les points retenus ont été choisis à des endroits facilement repérables sur les images. Des photographies aériennes prises en 1979, ainsi qu'une carte d'occupation des terres de l'été 1999 produite Cattaï (2004) ont complété les données auxiliaires nécessaires à l'achèvement de cette recherche.

3.2. Suivi du taux de recouvrement végétal

Les sols agricoles nus présentent une certaine sensibilité face à l'érosion hydrique. Cette situation favorise le transport d'éléments nutritifs (phosphore et azote) et certains polluants, qui sont en partie retenus par les sédiments, en direction des systèmes aquatiques à travers le réseau hydrographique. Une étude des pertes de sol passe nécessairement par une étude du taux de recouvrement végétal et de l'utilisation des terres. L'imagerie satellitaire est un outil très intéressant de cartographie et de suivi de l'évolution d'un bassin versant à cause de la couverture synoptique qu'elle offre. Elle permet aussi, par le biais des indices de végétation, d'obtenir une idée de la végétation (herbacée, arbustive et arborescente) qui occupe le territoire étudié.

Notre travail consiste à faire un suivi, à l'aide de l'imagerie satellitaire, du taux de recouvrement végétal durant la saison printanière. Cette saison est caractérisée par un faible recouvrement végétal, surtout pour les herbacées dans les parties agricoles du bassin versant. Le suivi du recouvrement végétal du bassin versant durant cette saison devait permettre d'obtenir des données qui pourront servir à la modélisation de la vulnérabilité à l'érosion. En se basant sur la figure 2 et en tenant compte des dates d'acquisition des images du printemps, nous avons fixé la limite pour considérer un sol comme étant nu à un maximum de 5 % de recouvrement végétal. Le choix de cette limite est justifié par le fait que, vers le début du mois de juin (jour julien 150), la plupart des cultures de la région possèdent un recouvrement végétal d'au moins 5 %, à l'exception des cultures à grand interligne (maïs et soya). Ces cultures laissent le sol à nu durant tout le printemps lorsque semées en travail conventionnel du sol (figure 2), augmentant ainsi le temps d'exposition des sols du bassin versant aux facteurs de l'érosion hydrique. À cet effet, nous avons proposé trois méthodes parallèles et complémentaires pour étudier le taux de recouvrement végétal du bassin : la classification, l'utilisation d'un modèle d'indice de végétation (R = f(I)) et le calcul de l'indice de recouvrement végétal.

3.3. Méthodologie de travail

L'étude entre dans le cadre de la compréhension des changements qu'a subis un des bassins versants les plus problématiques du Québec, et ceci par la mise en évidence de l'évolution de son taux de recouvrement végétal durant les 25 dernières années. Pour ce faire, une méthode simple et efficace de détection des changements a été choisie pour permettre de mener à terme cette étude. Ainsi, en tenant compte de la nature de l'étude, des objectifs fixés, des données utilisées ainsi que de la confrontation entre les différentes méthodes de détection des changements, une méthodologie a été construite. Elle allie l'approche par comparaison en post-classification de cartes provenant d'une classification, de l'utilisation de l'indice de recouvrement végétal et de l'utilisation des modèles polynomiaux des indices de végétation. Cette méthodologie permet de limiter les erreurs reliées à la comparaison de classifications indépendantes tout en considérant la nature des changements. Une explication des différents concepts adoptés dans cette méthodologie est présentée ici, mais pour des explications plus complètes, il faut consulter Dehbi (2006).

3.3.1. Prétraitements des images multidates

Le suivi du recouvrement végétal exige que le signal des images soit calibré de manière à assurer la comparaison des données entre elles. À cette fin, diverses corrections (radiométriques, géométriques et atmosphériques) sont appliquées à toutes les images utilisées.

A) Corrections géométriques

Ces corrections assurent le géopositionnement commun aux images multidates. Elles consistent en une rectification de type image à carte. La référence utilisée est la banque nationale de données topographiques (BNDT) à une échelle de 1 : 50 000 en projection UTM (*Universal Tansverse Mercator*). Des points de contrôle, qui ont été colligés sur le terrain, sont aussi utilisés comme référence. Le rééchantillonnage des niveaux de gris a été effectué par la méthode du plus proche voisin en utilisant un polynôme de second degré. L'erreur quadratique moyenne (RMS : *root mean square*) était comprise entre 0,5 et 0,7 pixel.

B) Corrections radiométriques

Les pixels des images brutes affichent des valeurs en niveau de gris entre 0 et 255 pour les images codées à 8 bits, sauf pour les images MSS de Landsat qui sont codées sur 6 bits et qui présentant donc 64 niveaux de gris. Afin que la valeur des pixels corresponde à la valeur de la réflectance aux capteurs, des étalonnages radiométriques ont été réalisés pour permettre le passage des niveaux de gris en luminance apparente, puis en réflectance apparente. Les paramètres d'étalonnage sont tirés des fichiers de métadonnées de chaque image.

C) Corrections atmosphériques

Le signal reçu par le capteur est affecté par les effets de l'épaisseur optique de l'atmosphère. Les données de télédétection sont généralement corrigées de ces effets atmosphériques avant d'être utilisées dans une étude de cartographie du recouvrement végétal du sol ou de détection des changements. Des indices de végétation, sensibles aux effets atmosphériques, ont été utilisés au cours de la présente étude. Pour cette raison, des corrections atmosphériques relatives par la méthode des cibles obscures (Chavez, 1988) ont été réalisées afin d'éviter toute ambiguïté causée par l'atmosphère. Les valeurs de pixels les plus sombres utilisés dans le processus de correction ont été prélevées au-dessus des parties profondes du lac Champlain.

D) Application des masques

Les zones à l'extérieur du bassin versant et les routes ne représentant aucun intérêt pour l'étude, nous avons donc appliqué un masque à toutes les images multidates. Le masque a été construit à partir des fichiers vectoriels de la BNDT (Banque nationale de données topographiques du Canada) pour les routes et d'un tracé numérisé manuellement de la limite du bassin.

3.3.2. Extraction du pourcentage de recouvrement végétal

Cette partie de l'étude consiste à déterminer, pour chacune des dates retenues, les pourcentages de sols nus (0 à 5 % de recouvrement végétal), de recouvrement végétal moyen (5 à 80 % de recouvrement végétal) et de fort recouvrement (plus de 80 %) pendant la saison printanière. Cette saison est caractérisée par un faible recouvrement végétal surtout dans les parties agricoles du bassin versant. Chacune des trois méthodes proposées permet d'obtenir une ou plusieurs de ces classes de recouvrement végétal. Ainsi, la classification et les modèles polynomiaux permettent d'obtenir les classes des sols nus et du recouvrement végétal général. L'application de l'indice de recouvrement végétal permet d'obtenir la classe de fort recouvrement végétal. La combinaison des résultats des trois méthodes permet d'obtenir des données complètes sur le recouvrement végétal.

A) Classification

La classification permet de transformer les images sous forme thématique. Elle se base sur les propriétés spectrales pour rassembler les différents objets de l'image en classes thématiques. Pour la présente étude, le choix s'est porté sur une classification dirigée par maximum de vraisemblance. Chaque image est classifiée en trois classes principales : eau, sol nu et sol recouvert de végétation. Le but est de minimiser les erreurs de classification afin que la comparaison en post-classification permette de discerner l'évolution de la classe des sols nus. La superficie couverte par l'eau ne varie pas considérablement durant une période de 25 années. Pour cette raison, cette classe a été incluse pour vérifier l'efficacité de la classification par l'obtention de proportions stables de cette classe d'une année à l'autre. Certaines des données d'occupation des terres colligées sur le terrain pour l'année 2004 ont été utilisées comme référence pour le choix des sites d'entraînement, ainsi qu'à titre de test pour les autres années. Afin d'assurer l'indépendance entre les zones d'entraînement et les zones de vérification pour les années antérieures aux images multidates utilisées, les zones d'entraînement et de vérification de 2004 ont servi de référence à l'élaboration des zones d'entraînement et de vérification des autres années. Pour l'élaboration des zones d'entraînement, le choix des polygones a été effectué en fonction de l'uniformité de leur réponse spectrale. Ces polygones ont été répartis sur l'ensemble du bassin versant, couvrant environ 3 à 5 % de la superficie totale du bassin pour chacune des classes d'occupation des terres considérées. La séparabilité entre les différentes classes considérées dans cette classification est parfaite (égale à 2). L'évaluation de la précision des différentes classifications est effectuée par le calcul de la matrice de confusion et du coefficient Kappa.

B) Application de l'indice de recouvrement végétal

L'indice de recouvrement végétal, aussi appelé dans la littérature « fraction du recouvrement végétal » est défini par Carlson et Ripley (1997) comme la partie de la couverture végétale ne présentant aucune trace de sol nu entre les plantes de la canopée sur une image satellitaire. Les petits espacements dans le recouvrement végétal sont cependant négligeables. En d'autres termes, il est possible de définir l'indice de recouvrement végétal comme la proportion de la surface qui possède un fort recouvrement de végétation vivante (plus de 80 % de recouvrement végétal). Cet indice est en relation étroite avec l'indice de végétation normalisé (NDVI) et l'indice de densité foliaire (LAI).

La portion de recouvrement végétal peut être calculée à partir des indices de végétation, puisque le principe de ces derniers est de définir une relation simple entre la réflectance mesurée par les capteurs et le paramètre d'intérêt (North, 2002). Dans le cas de l'indice de recouvrement végétal, le paramètre d'intérêt est le taux de fort recouvrement végétal. Pour le calcul de cet indice, nous avons opté pour la méthode du NDVI normalisé (N°). L'avantage d'utiliser la N° est qu'elle ne nécessite aucune correction atmosphérique préalable au calcul du NDVI pour identifier la classe de recouvrement végétal, puisque les valeurs de la N° sont presque les mêmes qu'on utilise un NDVI corrigé ou non corrigé (Carlson and Ripley, 1997). Cette méthode a d'abord été décrite par Choudhury *et al.* (1994), puis confirmée par Carlson et Ripley (1997). Elle utilise l'interdépendance qui existe entre l'indice de recouvrement végétal et le NDVI. Carlson et Ripley (1997) ont utilisé un modèle de transfert radiatif simple utilisant la végétation, le sol et les composantes atmosphériques pour mettre en évidence cette relation qui relie le NDVI, le LAI et l'indice de recouvrement végétal. Ils proposent l'équation 1 qui permet d'obtenir la fraction de recouvrement végétal (indice de recouvrement végétal) à partir du NDVI normalisé (N°) :

$$\textit{Indice de recouvrement végétal} = N°^2 = \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0} \right)^2 \quad (1)$$

où :

- NDVI est la valeur moyenne du NDVI ;

- $NDVI_0$ est la valeur minimale du NDVI correspondant à un sol nu (LAI = 0) ;

- NDVIs est la valeur maximale du NDVI correspondant à une surface de recouvrement végétal total (indice de recouvrement végétal de 100 %).

L'intérêt d'utiliser l'indice de recouvrement végétal réside dans la possibilité d'estimer la classe de fort recouvrement végétal. Cet indice peut être appliqué à deux échelles principales : une échelle générale qui s'applique à l'ensemble de l'image et une autre plus fine qui s'applique au pixel. La méthode de calcul adoptée dans la présente étude permet d'obtenir une estimation sur une échelle générale. Ainsi, pour chacune des images multidates, on calcule la valeur du NDVI pour l'image printanière. Le calcul des statistiques de chaque application du NDVI permettra de connaître les valeurs maximale, moyenne et minimale de cet indice sur l'ensemble de l'image. Ces valeurs serviront à l'identification de la classe de recouvrement végétal (indice de recouvrement végétal).

C) Application des indices de végétation *f (I)*

Dans les deux dernières sections, nous avons exposé deux méthodes pour évaluer le recouvrement végétal en utilisant une classification, puis l'indice de recouvrement végétal. Nous désirons ici mettre à l'essai une troisième méthode, suggérée par Purevdorrj *et al.*, (1998), soit les modèles d'indices basées sur des équations polynomiales ayant pour intrants des indices de végétations traditionnels.

Les indices de végétation tirés des images permettent d'obtenir une idée de la végétation qui occupe le territoire étudié. Dans la littérature, on propose un grand nombre d'indices, dont les propriétés et les sensibilités aux facteurs externes diffèrent considérablement. La relation entre le taux de recouvrement végétal et les indices de végétation peut être identifiée à l'aide de plusieurs méthodes. D'après Purevdorrj *et al.* (1998), de nombreuses études ont trouvé une relation linéaire entre les indices de végétation et les caractéristiques biophysiques de la végétation. Cependant, Cyr (1993) a montré que chaque indice est un bon indicateur de la présence de la végétation verte vivante à sa façon, mais que chaque indice peut surestimer ou sous-estimer le taux de recouvrement en fonction du stade végétatif de l'espèce. Pour cette raison, nous avons opté pour la méthode proposée par Purevdorrj *et al.* (1998). Ces auteurs ont prouvé que la meilleure relation que l'on puisse obtenir entre le pourcentage de recouvrement végétal et les indices de végétation est une fonction polynomiale de second ordre (équation 2). Il faut noter aussi que, dans le cas de la présente étude, nous ne cherchons pas le pourcentage de recouvrement pour chaque espèce végétale qui est présente dans le bassin. Nous cherchons plutôt le taux de recouvrement général. Pour cette raison, nos calculs seront effectués avec les valeurs moyennes pour les taux de recouvrement et les indices de végétation. L'équation suivante donne la forme générale de la fonction qui relie le taux de recouvrement végétal (R) et les indices de végétation (I) :

$$R = aI^2 + bI + c \qquad (2)$$

où a, b et c sont les coefficients du polynôme (nombres réels).

Le traitement consistera à calculer la valeur des constantes a, b et c pour chaque indice et à valider chaque équation avant de choisir l'indice le plus approprié pour cette étude. Les indices de végétation suivants, utilisés dans l'étude de Purevdorrj *et al.* (1998), ont été testés : NDVI, SAVI, TSAVI et MSAVI. Les critères de sélection sont basés sur les caractéristiques de chaque indice (sensibilité face au sol sous-jacent et à la biomasse végétale) et sur les résultats présentés par les différentes études dans la littérature (Purevdorrj *et al.*, 1998 ; Bannari *et al.*, 1995 ; Caloz et Collet, 2001 ; Cyr, 1993).

Le calcul des constantes de l'équation (2) nécessite un certain nombre d'images avec un taux de recouvrement végétal et une valeur de l'indice connus. Pour cette raison, une trentaine de sous-images de 100 × 100 pixels ont été tirées de l'image TM de juin 2004 (image corrigée des effets radiométriques et atmosphériques, et dont la date coïncide avec celle les travaux sur le terrain). Ces sous-images seront désignées par la suite comme des imagettes. Des imagettes, dépourvues des classes d'eau et de milieu urbain, ont été choisies avec différents pourcentages de sol nu et de végétation. Douze de ces imagettes ont servi à calculer les fonctions polynomiales par méthode des moindres carrés. Ces 12 imagettes présentaient différents taux de recouvrement végétal, allant du minimum jusqu'au maximum. Le choix des douze imagettes s'est fait après le calcul des taux de recouvrement sur les 33 imagettes afin de connaître la valeur minimale et maximale de recouvrement végétal. Afin de compléter les données nécessaires pour le calcul et la validation des modèles, il était nécessaire de disposer des valeurs moyennes des indices et du taux de recouvrement végétal pour les imagettes. Le calcul des indices de végétation a été réalisé sur les valeurs moyennes des réflectances dans les bandes utilisées pour le calcul de chaque indice. Le calcul du taux réel de recouvrement des pixels pourvus de végétation a été réalisé par une classification dirigée (par maximum de vraisemblance), par comptage manuel (par la méthode de la grille, 0,5 mm par unité de grille) et par informatique (par un programme de comptage). L'identification et la validation des taux réels de recouvrement végétal calculé pour chaque imagette ont été basées sur les travaux

des taux réels de recouvrement végétal calculé pour chaque imagette ont été basées sur les travaux réalisés sur le terrain. La performance de chaque indice a été calculée à l'aide de l'erreur standard SE (équation 3). Cette méthode de calcul de la précision a été adoptée en se basant sur la méthodologie suivie par Purevdorrj *et al.* (1998). La comparaison des modèles est aussi basée sur les coefficients de corrélation entre le taux de recouvrement végétal réel et celui calculé par les modèles. À la suite de cette validation, le modèle qui donne les meilleurs résultats a été retenu pour être appliqué aux images multidates :

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Yr - Yc)^2}{n-2}} \qquad (3)$$

où :

- Y_r est le pourcentage réel de recouvrement végétal ;

- Y_c est le pourcentage estimé par la fonction ;

- n est le nombre d'applications = 21.

4. RÉSULTATS

4.1. Classification

La classification consiste à mettre en évidence, pour chacune des images des printemps retenus, la répartition, le taux et la superficie moyenne des sols nus et recouverts de végétation (figure 3). Cependant, l'image MSS de l'année 1979 ne couvre que 77 % du bassin versant. Toutefois, la comparaison des parties couvertes par cette image avec la portion correspondante de l'image TM du printemps 1984 montre qu'elle peut être utilisée pour l'étude des changements malgré la différence de résolution. Pour cette raison, nous l'avons incluse dans notre étude.

La cartographie, par classification, de la répartition des sols nus durant la saison printanière dans le bassin versant de la rivière aux Brochets donne des bons résultats. Ceci s'explique par le nombre restreint des classes considérées dans cette classification. De plus, ces classes sont très distinctes, avec une séparabilité parfaite des zones d'entraînement égale à 2. En effet, les classes considérées, sol nu et recouvrement végétal, ont des réflectances très différentes contrairement à la réflectance d'autres classes qui sont proches, comme la végétation pérenne et le foin, dont la séparabilité est presque nulle. L'analyse statistique de la précision des classifications confirme le potentiel de cette méthode à cartographier les sols nus dans les conditions de cette étude. Toutes les classifications présentent une marge d'erreur inférieure à 10 % (tableau 2).

La classification a permis d'obtenir le taux de recouvrement végétal moyen et la superficie de sols nus pour chaque printemps considéré (tableau 3).

Les résultats présentés sur le tableau 3 montrent une stabilité dans les superficies des plans d'eau du bassin durant les 25 dernières années. Cette situation est normale vu la courte durée de l'étude et l'absence de modifications d'origine anthropique de ces cours d'eau. Sur le tableau 3, on montre aussi une tendance à l'augmentation interannuelle de la superficie des sols nus inversement proportionnelle au recouvrement végétal pendant la saison printanière, de 1979 à 2004.

Tableau 2 : Précision et coefficient Kappa pour l'extraction des sols nus par classification. *Precision and Kappa coefficient for bare soil extraction by classification.*

Printemps	Précision générale (%)	Coefficient Kappa
1979	92	0,86
1984	95	0,89
1987	93	0,91
1995	96	0,93
1999	90	0,81
2001	92	0,86
2004	96	0,90

Tableau 3 : Recouvrement végétal moyen et superficies des sols nus au printemps obtenus par classification. *Vegetation cover and bare soil areas obtained by classification during the spring season.*

Superficie considérée	Date	Superficies des classes (km^2)			Recouvrement végétal général (%)
		Sols nus	Zones recouvertes de végétation	Eau	
77 % du bassin (485 km^2)	19 mai 1979	109	369	6	76
	17 juin 1984	59	419	6	86
Bassin entier (630 km^2)	17 juin 1984	104	519	5	82
	16 juin 1987	123	500	5	79
	16 juin 1995	175	448	6	71
	11 juin 1999	210	415	6	65
	8 juin 2001	193	432	6	68
	24 juin 2004	223	402	6	63

4.2. Application des indices de végétation

Les indices utilisés dans cette étude sont des fonctions polynomiales du second ordre. Le calcul des fonctions adoptées s'est fait à l'aide de la méthode des moindres carrés. Douze des 33 imagettes ont été utilisées dans l'intervalle entre le minimum et le maximum de recouvrement végétal (%). Les équations 4 à 7 donnent les expressions des indices utilisés :

- pour le NDVI : Recouvrement = $-0{,}31\ (NDVI)^2 + 2{,}05\ (NDVI) - 0{,}43$ (4)

- pour le SAVI : Recouvrement = $-\ 0{,}01(SAVI)^2 + 0{,}67\ (SAVI)$ (5)

- pour le TSAVI : Recouvrement = $-0{,}93\ (TSAVI)^2 + 1{,}49\ (TSAVI) - 0{,}31$ (6)

- pour le MSAVI : Recouvrement = $-2{,}16\ (MSAVI)^2 + 3{,}18\ (MSAVI) - 0{,}48$ (7)

Chacun de ces indices a été appliqué aux imagettes restantes puis testé et comparé pour leur validation par le biais de l'erreur standard (SE) et du coefficient de corrélation entre les recouvrements végétaux réel et calculé. L'indice de recouvrement végétal a aussi été appliqué sur ces imagettes pour qu'il soit testé avec les autres indices et ainsi vérifier son efficacité. Il faut mentionner que la validation et la comparaison de la performance des indices testés ont été faites pour le recouvrement végétal général moyen (tableau 4) et pour un recouvrement végétal faible à moyen (≤ 50 %) et un recouvrement végétal moyen à fort (≥ 50 %).

En considérant les coefficients de corrélation et les erreurs standard de chaque modèle, dans les trois cas de comparaison cités précédemment, le choix s'est porté sur le modèle du NDVI. Ce modèle peut s'adapter au cadre de cette étude et donner des résultats satisfaisants lors de l'estimation du taux de recouvrement végétal dans le bassin versant étudié au printemps.

Les coefficients de l'indice retenu ont été ensuite calculés avec la même méthode décrite précédemment pour chacune des images multidates. La figure 4 est une représentation graphique des modèles d'indices pour les différentes dates des images utilisées. Les courbes des indices confirment le choix du NDVI comme meilleur indice d'estimation dans le cadre de cette étude puisqu'elles sont similaires pour l'ensemble des dates retenues. De plus, la concavité des courbes prouve la limitation du NDVI, affirmé par Cyr (1993), pour une estimation de très forts recouvrements végétaux. Pour plus de détails, il faut consulter Dehbi (2006). Les équations 8 à 14 donnent les expressions des modèles pour chacune des dates retenues :

- printemps 1979 : $R = -1{,}36\ (NDVI)^2 + 2{,}45\ (NDVI) - 0{,}19$ (8)

- printemps 1984 : $R = -2{,}29\ (NDVI)^2 + 4{,}40\ (NDVI) - 1{,}15$ (9)

- printemps 1987 : $R = -2{,}09\ (NDVI)^2 + 4{,}22\ (NDVI) - 1{,}11$ (10)

- printemps 1995 : $R = -\ 1{,}71\ (NDVI)^2 + 3{,}79\ (NDVI) - 0{,}93$ (11)

- printemps 1999 : $R = - 0,29 (NDVI)^2 + 2,32 (NDVI) - 0, 65$ (12)

- printemps 2001 : $R = -0,13 (NDVI)^2 + 1,77 (NDVI) - 0,41$ (13)

- printemps 2004 : $R = -0,31 (NDVI)^2 + 2, 05 (NDVI) - 0,43$ (14)

Le NDVI utilisé dans ces modèles représente la moyenne des valeurs du NDVI calculées sur chacun des pixels de l'image considérée. L'application de ces modèles aux images des années retenues a permis de faire une estimation des taux de recouvrement végétal et des superficies des sols nus dans le bassin versant de la rivière aux Brochets (tableau 5).

Les résultats obtenus en appliquant le NDVI concordent avec ceux obtenus précédemment à l'aide de la classification. La moyenne des différences entre le taux de recouvrement végétal calculé à l'aide du NDVI et celui qui a été obtenu à l'aide de la classification est d'environ 6 %. Ceci confirme le choix du NDVI par rapport aux autres indices. Les résultats confirment une tendance à l'augmentation interannuelle de la superficie des sols nus durant la saison printanière.

La combinaison des résultats obtenus à l'aide de la classification et de l'application du modèle du NDVI nous a permis de faire une estimation des superficies des sols nus et du taux de recouvrement végétal moyen. Ces estimations représentent la moyenne des résultats des deux méthodes (tableau 6). Les valeurs des superficies des sols nus sont obtenues en considérant les moyennes de recouvrement général calculées à partir des résultats des deux méthodes.

Les résultats de l'estimation du taux de recouvrement végétal moyen et des superficies des sols nus au printemps sont complétés par l'estimation de la classe de fort recouvrement végétal. Cette classe est obtenue par application de l'indice de recouvrement végétal.

Tableau 4 : Valeurs de l'erreur standard pour chacun des modèles calculés. *Standard errors for each polynomial model.*

Taux de recouvrement végétal (%)	Coefficients de validation	Indices de végétation				
		NDVI	SAVI	TSAVI	MSAVI	*Fcover*
Recouvrement général	Erreur standard (SE)	6	6	9	19	17
	Coefficient de corrélation (R^2)	0.94	0,93	0,83	0,39	0,7
Recouvrement ≤ 50 %	Erreur standard (SE)	6	7	11	24	46
	Coefficient de corrélation (R^2)	0,54	0,54	0,65	0,65	0,3
Recouvrement ≥ 50 %	Erreur standard (SE)	6	6	8	12	19,4
	Coefficient de corrélation (R^2)	0,79	0,82	0,59	0,1	0,6

Tableau 5 : Proportions et superficies des sols nus et pourcentage du recouvrement végétal obtenus par le modèle du NDVI. *Proportions and areas of bare soil and percentages of the vegetation cover obtained by the NDVI model.*

Superficie considérée	Printemps	Recouvrement végétal (%)	Proportion des sols nus (%)	Superficie des sols nus (km^2)
77 % du bassin (485 km^2)	19 mai 1979	61	39	189
	17 juin 1984	80	20	97
Le bassin entier (630 km^2)	17 juin 1984	81	19	120
	16 juin 1987	83	17	107
	16 juin 1995	71	29	183
	11 juin 1999	74	26	164
	8 juin 2001	67	33	160
	24 juin 2004	54	46	290

Tableau 6 : Recouvrement végétal moyen et superficies des sols nus dans le bassin versant de la rivière aux Brochets entre 1979 et 2004. *Vegetation cover and bare soil areas in the Pike River watershed between 1979 and 2004.*

Superficie considérée	Printemps	Recouvrement végétal (%)		Recouvrement végétal moyen (%)	Superficie des sols nus (km^2)
		Classification	Modèle (NDVI)		
77 % du bassin (485 km^2)	19 mai 1979	76	61	68	155
	17 juin 1984	86	80	83	107
Le bassin entier (630 km^2)	17 juin 1984	82	81	81	120
	16 juin 1987	79	83	81	120
	16 juin 1995	71	71	71	183
	11 juin 1999	65	74	73	170
	8 juin 2001	68	67	67	208
	24 juin 2004	63	54	58	265



Figure 3 : Cartes de répartition des sols nus et recouverts de végétation dans le bassin versant de la rivière aux Brochets entre 1979 et 2004. *Distribution maps of the bare soils and uncovered soils in the Pike River watershed between 1979 and 2004.*

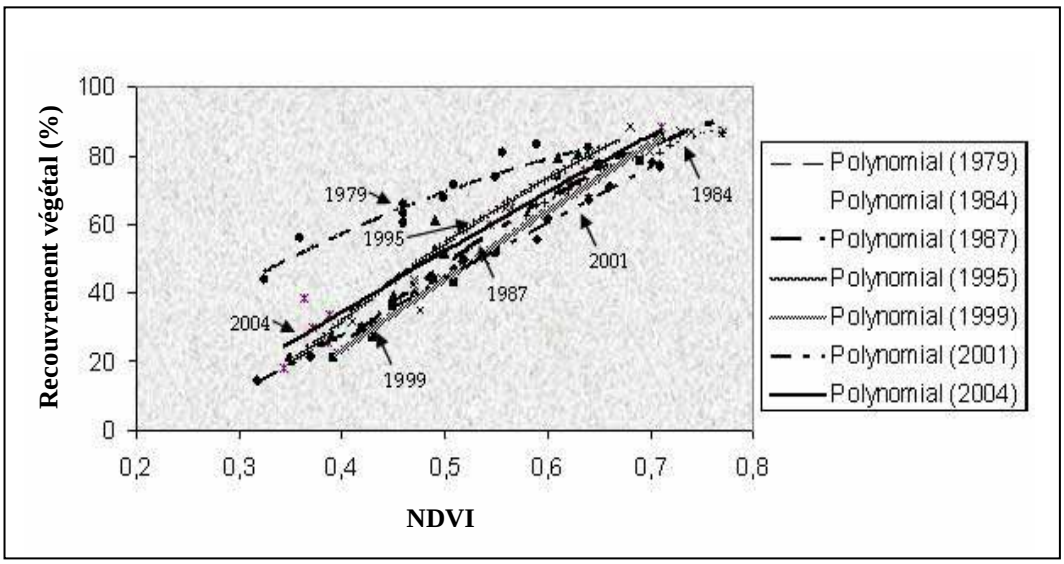


Figure 4 : Représentation graphique des modèles polynomiaux pour les différentes dates des images utilisées. *Chart of the polynomial models for the considered dates.*

4.3. Calcul de l'indice de recouvrement végétal

Les taux calculés par l'indice de recouvrement végétal représentent la moyenne du fort recouvrement végétal sur l'ensemble du bassin pour chacune des images multidates. Les résultats de cette application (tableau 7) permettent d'obtenir le pourcentage et la superficie des zones de fort recouvrement végétal.

La formule de Carlson et Ripley (1997) a aussi été appliquée sur chacun des pixels des images. Des cartes de recouvrement végétal (figure 4) ont ainsi été obtenues. Ces cartes offrent une vue générale sur la répartition et le taux de recouvrement végétal.

4.4. Combinaison des trois méthodes

La combinaison des résultats des trois méthodes (classification, modèle d'indice et indice de recouvrement végétal) donne une estimation sur les proportions de recouvrement végétal. Ainsi, trois estimations sont obtenues : celle du recouvrement général, celle du fort recouvrement et celle du recouvrement partiel. Cette dernière est obtenue par la différence entre les deux premières estimations. Sur le tableau 8, on donne les pourcentages de chaque proportion de recouvrement végétal pour les sept images de la présente étude.

L'analyse des cartes obtenues (figures 3 et 5) ainsi que le tableau 8 montrent que presque la moitié du bassin versant présente un fort recouvrement végétal. Ce recouvrement est principalement formé de boisés qui occupent une grande partie de la zone étudiée, surtout dans la partie amont du bassin versant. Le reste est partagé entre un recouvrement végétal moyen et les sols nus. Ces parties moins recouvertes de végétation se localisent dans la partie aval du bassin versant où l'on rencontre une activité agricole intensive.

Tableau 7 : Calcul du NDVI normalisé et de l'indice de recouvrement végétal pour les dates retenues. *Calculation of the normalized NDVI and Fcover for each selected date.*

Superficie considérée	Printemps	NDVI normalisé	*Fcover*	Fort recouvrement végétal (km^2)
77 % du bassin ($485\ km^2$)	19 mai 1979	0,78	0,62	300
	17 juin 1984	0,86	0,64	310
Le bassin entier ($630\ km^2$)	17 juin 1984	0,80	0,64	403
	16 juin 1987	0,73	0,54	340
	16 juin 1995	0,74	0,54	340
	11 juin 1999	0,69	0,48	302
	8 juin 2001	0,62	0,39	245
	24 juin 2004	0,67	0,45	283

Tableau 8 : Proportion du recouvrement végétal dans le bassin versant de la rivière aux Brochets entre 1979 et 2004. *Vegetation cover proportions in the Pike River watershed between 1979 and 2004.*

Superficie considérée	Date	Recouvrement végétal général (%)	Sols nus (%)	Recouvrement végétal partiel (%)	Fort recouvrement végétal (%)
77 % du bassin (485 km^2)	19 mai 1979	68	32	6	62
	17 juin 1984	80	20	16	64
Le bassin entier (630 km^2)	17 juin 1984	81	19	17	64
	16 juin 1987	81	19	27	54
	16 juin 1995	71	29	17	54
	11 juin 1999	73	27	25	48
	8 juin 2001	67	33	28	39
	24 juin 2004	58	42	13	45

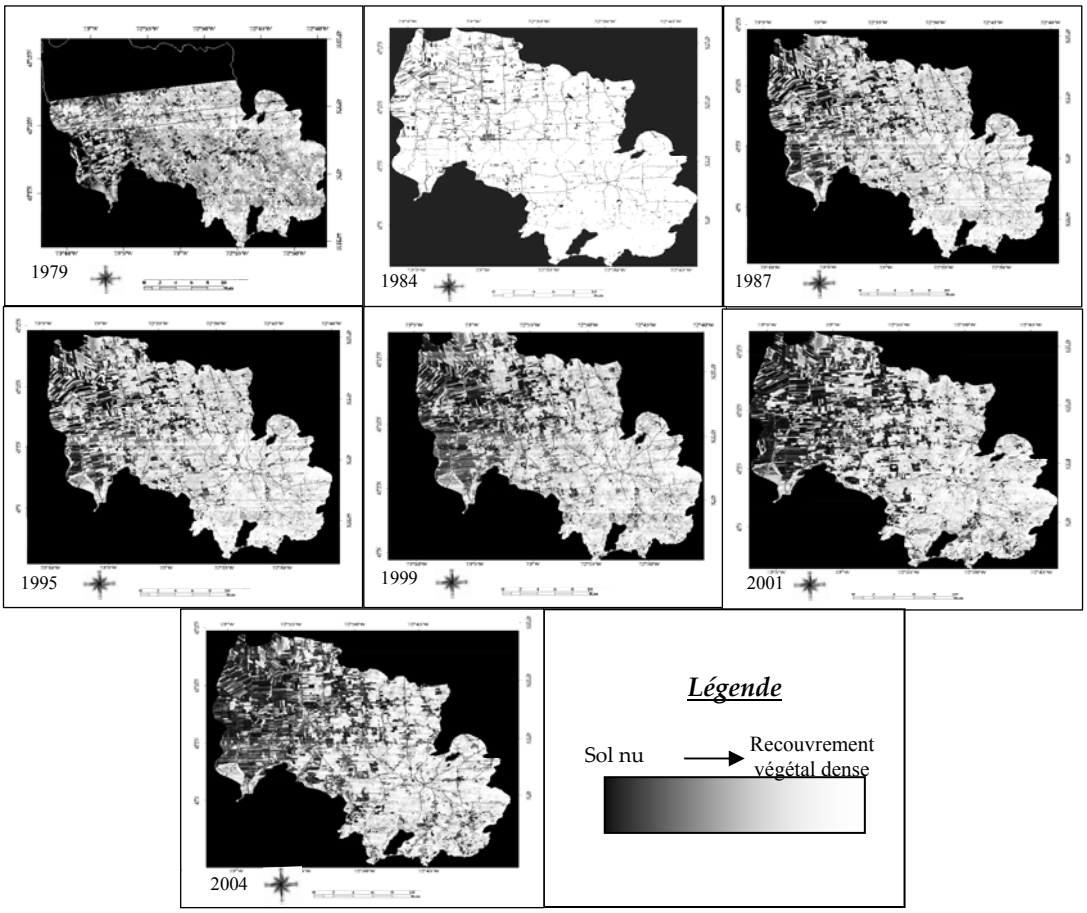


Figure 5 : Cartes de densité du recouvrement végétal dans le bassin versant de la rivière aux Brochets entre 1979 et 2004. *Distribution maps of the vegetation cover in the Pike River watershed between 1979 and 2004.*

4.5. Validation des résultats

Les données de vérification proviennent de trois sources : les données sur le terrain pour l'année 2004, celles de la carte d'occupation des terres pour l'année 1999 produite par Cattaï (2004) et les photographies aériennes de 1979. Il a été possible de prouver, par cette validation, l'efficacité de la méthode utilisée et, par la même occasion, de valider indirectement les résultats pour lesquels des données réelles n'existaient pas.

La validation des cartes provenant de l'image MSS à l'aide de la photographie aérienne s'est avérée très difficile vu l'énorme écart entre les résolutions spatiales de ces deux types de données. Pour cette raison, nous avons opté pour la méthode de la grille afin de calculer le pourcentage approximatif des classes d'occupation des terres considérées sur chacune des cartes et sur la photographie aérienne. L'unité de la grille utilisée est de 5 mm pour permettre un comptage efficace. Ce dernier a donné un pourcentage de concordance entre la réalité de terrain et la carte des sols nus d'environ 79 % pour les sols nus et de 97 % pour les zones recouvertes de végétation.

La validation de la carte des sols nus de l'année 1999 a été effectuée en superposant cette dernière sur la carte de d'occupation des terres produite par Cattaï, (2004), et ce en considérant les cultures à grand interligne comme des sols nus à la fin du printemps. Le pourcentage de concordance entre la réalité de terrain et les cartes de sol nu pour 1999 est de 85 %.

Les données collectées sur le terrain en 2004 ainsi que les données de cultures fournies par la Financière agricole du Québec nous ont permis de produire une carte de validation pour l'année 2004. Nous avons ainsi superposé la carte de validation sur la carte des sols nus pour l'année 2004. Cette superposition est précise à plus de 90 %.

En se basant sur les trois validations qui ont démontré la précision des cartes, il est possible de considérer que les cartes obtenues lors de cette étude sont représentatives de la réalité de terrain. Chacune de ces cartes a cependant une marge d'erreur propre à chacune des classifications qui ont servi à leur élaboration. En ce qui concerne les résultats obtenus par le NDVI et par application de l'indice de recouvrement végétal, la marge d'erreur pour chacun de ces deux indices est celle obtenue par calcul de l'erreur standard lors de la validation des modèles d'indices (tableau 4). Ces marges d'erreurs sont, respectivement, de 6 % et de 17 % pour le modèle du NDVI et l'indice de recouvrement végétal.

4.6. Évolution du recouvrement végétal de 1979 à 2004

La combinaison et la comparaison des résultats obtenus permettent de faire le suivi spatio-temporel de l'évolution du recouvrement végétal, par comparaison, en post-classification. La faiblesse de cette méthode de suivi réside dans le fait qu'elle multiplie les erreurs des résultats comparés. Ainsi, la comparaison de tous les résultats simultanément donnerait une estimation avec une erreur supérieure à 90 %. Pour éviter cette accumulation d'erreurs et afin que la précision des résultats de la comparaison soit acceptable, chaque couple d'images (1979/1984 ; 1984/1987, etc.) a été comparé. Ainsi, la précision de chaque comparaison est le produit des précisions de chacune des deux dates. Elle est de l'ordre de 80 % pour le recouvrement général et de 70 % pour le fort recouvrement (obtenue à l'aide de l'indice de recouvrement végétal). Les résultats de la comparaison des pourcentages de recouvrement végétal obtenus à partir des trois méthodes sont résumés sur le tableau 9. Il faut noter que le pourcentage de variation d'une date à l'autre représente l'augmentation ou la diminution par rapport au pourcentage de la même classe d'occupation des terres pour la date précédente.

En considérant les données des extractions du taux de recouvrement végétal (tableau 8) ainsi que les données de comparaison (tableau 9), les courbes d'évolution du taux de recouvrement végétal ont été tracées pour le bassin durant les 25 dernières années (figure 6). Sur la figure 6, on constate une diminution interannuelle du recouvrement végétal général, accompagnée d'une augmentation des sols nus et des recouvrements végétaux moyen ou partiel entre 1984 et 2004. Ainsi, nous remarquons, qu'à partir de la fin des années 1980 et jusqu'à 2004, la superficie non recouverte par la végétation vivante durant le printemps se propage continuellement et commence à gagner du terrain au centre du bassin versant (figures 3 et 5). La proportion de ces terres a augmenté d'environ 5 % par rapport à la superficie totale du bassin tous les 5 ans durant les années 1980, puis elle est passée à environ 10 % à partir des années 1990. Cette tendance à l'augmentation est observée à partir de chacune des trois méthodes utilisées pour estimer le taux des sols nus. Les zones de fort recouvrement, elles, ont diminué de façon très importante, passant d'environ 65 % à 45 % de la superficie totale du bassin entre 1994 et 2004.

5. DISCUSSION

La méthodologie proposée pour réaliser le suivi spatio-temporel de l'évolution du recouvrement végétal dans le bassin versant de la rivière aux Brochets a donné des résultats avec une précision satisfaisante (à plus de 80 %).

L'étude a permis de mettre en évidence la tendance à la diminution du recouvrement végétal général du bassin versant entre 1979 et 2004. Cette tendance est surtout due à la diminution du fort recouvrement végétal aux dépens du recouvrement moyen. Ce dernier est en relation étroite avec les activités agricoles pratiquées dans la région. Le taux de recouvrement qu'offrent les cultures pratiquées est considéré comme moyen par rapport à celui de la végétation pérenne (prairies et pâturages) et des boisés. Ainsi, l'explication de l'évolution du recouvrement végétal dans le bassin de la

rivière aux Brochets se développerait nécessairement à l'aide de l'analyse des courbes d'évolution des catégories de cultures dans le même bassin et durant la même période et ceci en exploitant la relation qui existe entre les différentes classes d'occupation des terres considérées et le taux de recouvrement végétal que représente chaque classe. L'étude de l'évolution des catégories de culture dans le même bassin versant durant les 25 dernières années faisait l'objet de la deuxième partie de l'étude menée par Dehbi (2006). Pour une explication plus approfondie sur cette étude et sur la relation entre l'évolution du recouvrement végétal et la dynamique des activités agricoles (l'évolution des catégories de cultures), on peut se référer à l'étude mentionnée.

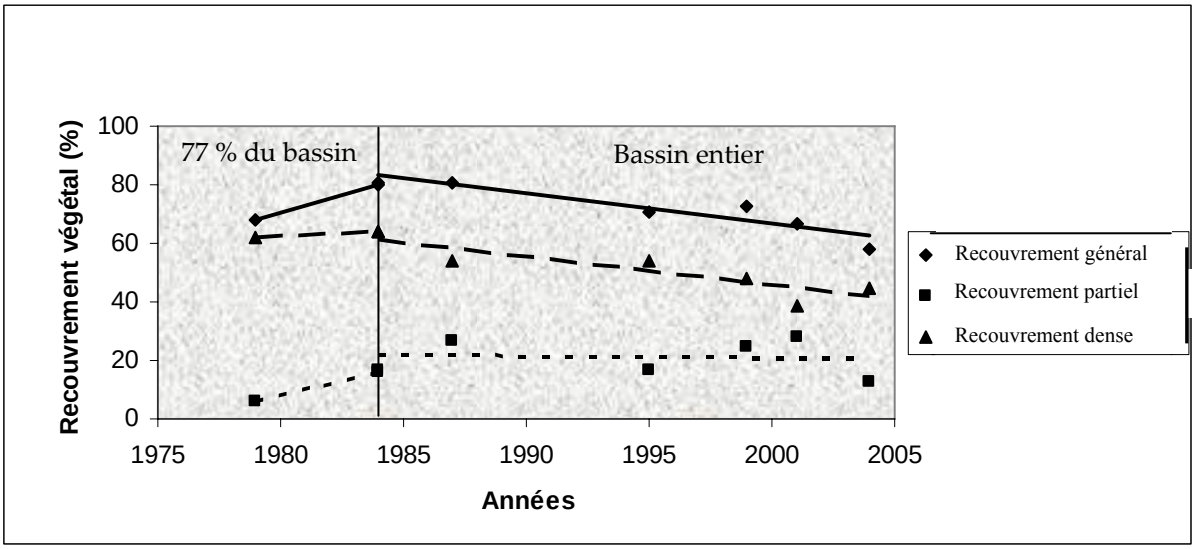


Figure 6 : Évolution de la répartition du recouvrement végétal dans le bassin versant de la rivière aux Brochets entre 1979 et 2004. *Evolution of the vegetation cover in the Pike River watershed between 1979 and 2004.*

Tableau 9 : Évolution des proportions du recouvrement végétal dans le bassin versant de la rivière aux Brochets entre 1979 et 2004. *Evolution of the vegetation cover proportions in the Pike River watershed between 1979 and 2004.*

Période	Δ du recouvrement végétal général (%)	Δ des zones de sols nus (%)	Δ du recouvrement végétal partiel (%)	Δ du fort recouvrement végétal (%)	Précision moyenne (%)
77 % de la superficie totale du bassin (485 km^2)					
1979 **à** 1984	+ 12	– 8	+ 10	+ 2	90
Superficie totale du bassin (630 km^2)					
1984 à 1987	0	0	+ 10	– 10	90
1987 à 1995	– 10	+ 10	– 10	0	90
1995 à 1999	+ 2	– 2	+ 8	– 6	88
1999 à 2001	– 6	+ 6	+ 3	– 9	85
2001à 2004	– 9	+ 9	– 15	+ 6	87

En ce qui concerne l'évolution du recouvrement végétal général entre 1979 et 1984, elle paraît être l'inverse de celle qui a été observée entre 1984 et 2004. Ceci peut être expliqué par le fait que cette période (1979 à 1984) est représentée seulement par deux images de dates différentes, ce qui ne permet pas d'obtenir la vraie tendance de l'évolution des différents paramètres considérés. De plus, les images qui couvrent cette période ne représentent que 77 % de la superficie du bassin : l'ensemble de l'information n'était donc pas disponible surtout dans la partie agricole d'intérêt. Cependant, en considérant les recouvrements moyen et fort, il apparaît que les deux périodes (1979 à 1984 et 1984 à 2004) affichent la même tendance, à savoir une diminution du recouvrement végétal moyen, accompagnée d'une faible augmentation du fort recouvrement végétal.

Les cartes de répartition des zones recouvertes de végétation (figure 3) montrent que le recouvrement végétal du bassin était important durant les printemps de 1987 et de 1995. Pour expliquer ce fort recouvrement végétal, nous avons

considéré les degrés-jours de croissance (DJ) pour chacune des années considérées. La notion de degré-jour fait référence à l'accumulation de la chaleur au cours de la saison de croissance des plantes (MAPAQ, 2006). Étant donné que chaque plante doit recevoir une somme d'énergie suffisante prodiguée par une certaine quantité de chaleur pour atteindre le stade de croissance suivant (OMAFRA, 2005), les degrés-jours de croissance sont un bon indicateur des phases de croissance des végétaux.

Le nombre de degrés-jours accumulés lors de ces printemps a ainsi été calculé à l'aide de la méthode décrite par OMAFRA (2005). Ainsi, nous pouvons expliquer, par exemple, le taux élevé des sols nus en mai 1979 (DJ = 241,2) par le nombre insuffisant d'unités thermiques accumulées. Ce taux d'unités thermiques ne permet pas le déclenchement de la croissance des cultures. Par exemple, le maïs, principale culture de la région, demande, en fonction de la catégorie de sols, entre 200 et 300 DJ (ou 330 unités thermiques de croissance) pour la sortie de ses premières feuilles (Edey, 1980 ; OMAFRA, 2005). L'année 1987, elle, a connu un printemps assez chaud (jusqu'au 17 juin DJ = 598,5), ce qui explique le taux élevé de recouvrement végétal durant ce printemps. Ce taux d'unités thermiques provoque le déclenchement avancé de la croissance des cultures de la région.

6. CONCLUSION

Il a été possible, à travers cette recherche, de mettre en évidence l'évolution, durant les 25 dernières années, du recouvrement végétal du bassin versant de la rivière aux Brochets, principal tributaire de la baie Missisquoi du côté québécois. Cela s'est fait par une méthodologie qui rassemble plusieurs approches d'extraction du taux de recouvrement végétal. L'estimation du taux de recouvrement végétal général, durant la saison printanière, a été réalisée à l'aide de la combinaison d'une classification et du NDVI. L'application de l'indice de recouvrement végétal a permis, quant à elle, d'identifier les zones de fort recouvrement végétal. La combinaison des résultats des deux estimations a permis d'identifier, en plus du recouvrement général, les zones de sols nus et celles des recouvrements végétaux moyen et fort.

La combinaison et la comparaison des résultats obtenus lors de l'extraction du taux de recouvrement végétal pour chacune des images multidates utilisées ont permis de mettre en évidence l'évolution spatio-temporelle de ce paramètre par comparaison en post-classification. L'analyse de cette évolution montre une diminution du recouvrement végétal général du bassin versant à cause de l'importante diminution du fort recouvrement végétal.

L'analyse présentée dans cet article fait partie d'une étude qui a aussi englobé une étude sur l'évolution des catégories de cultures dans le but de faire un suivi spatio-temporel de l'évolution des tendances agricoles pratiquées dans la région. Les résultats de cette recherche ouvrent certaines perspectives pour l'étude et la modélisation de l'évolution de la vulnérabilité à l'érosion du bassin de la rivière aux Brochets. Cette érosion participe, en partie, à l'enrichissement en phosphore de la baie Missisquoi causant ainsi la dégradation de ses eaux. Cependant, l'étude de la vulnérabilité à l'érosion du bassin doit aussi considérer les autres facteurs inclus dans l'équation universelle de pertes de sol. Ainsi, on peut approfondir la présente étude en poussant plus loin le degré de détails des paramètres étudiés en utilisant des images satellitaires d'une résolution spatiale plus fine et en réduisant les intervalles entre les dates des images en fonction de la disponibilité des données.

La présente étude pourrait aussi inclure ultérieurement un volet supplémentaire qui traiterait du suivi des pratiques agricoles dans le bassin étudié. Les dernières années ont connu un changement dans les pratiques agricoles dans la région. Les agriculteurs se tournent vers des techniques de conservation du sol, comme le travail réduit et le semis direct. Ces pratiques consistent à laisser une partie ou la totalité des résidus des cultures sur le sol pour le protéger contre les facteurs d'érosion hydrique. Frère (2005) a étudié le potentiel des images TM pour l'observation des pratiques de conservation dans le même bassin. Le jumelage de notre méthodologie avec celle proposée par Frère (2005) pourrait donner une meilleure estimation des superficies sans recouvrement végétal quel que soit l'état physiologique de ce dernier.

Remerciements

Cet article est dédié à la mémoire du directeur de recherche de l'auteur principal, le professeur Ferdinand Bonn, décédé au Maroc (pays d'origine de l'auteur principal), à la suite d'un tragique accident. Le professeur Bonn a efficacement dirigé le travail qui a mené à cet article et il souhaitait qu'il soit connu de la communauté scientifique. Les quelques lignes exprimées dans ces remerciements ne seront jamais à la hauteur de l'impact positif de ce chercheur de marque sur la vie personnelle et professionnelle de l'auteur principal.

Références

Bannari, A., Morin, D. and Bonn, F. (1995) A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95-120.

Blais, S. (2002) La problématique des cyanobactéries (algues bleu-vert) à la baie Missisquoi en 2001. Agrosol, vol. 13, n° 2, p. 103-110.

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de télédétection, volume 3, Traitement numérique d'image de télédétection. Agence universitaire de la francophonie (AUF) et Presses de l'université du Québec, Montréal, 386 p.

Cann, D.B., Lajoie, P. and Stobbe, P.C. (1947) Soil survey of Shefford, Brome and Missisquoi counties in the province of Quebec. Experimental farms service, Dominion department of agriculture, Ottawa, 84 p.

Carlson, T.N. and Ripley, D.A. (1997) On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. Remote Sensing of Environment, vol. 62, p. 241-252.

Cattaï, J. (2004) La détection de contours dans l'approche stratifiée par champs pour la classification d'un milieu agricole à l'aide de données Landsat TM : cas du bassin versant de la rivière aux Brochets, sud du Québec. Mémoire de Maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 120 p.

CNRS (Centre National de Recherches Scientifiques) (2005) Écosystème aquatique : eutrophisation. Internet: www.cnrs.fr/cw/dossiers /doseau/decouv/ecosys/eutrophisat.

Chavez, P.S. (1988) An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, vol. 24, p. 459-479.

Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, K.J. and Daughtry, C.S.T. (1994) Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. Remote Sensing of Environment, vol. 50, p. 1-17.

Couleurs Québec (2006) Informations générales sur le Canada. Internet : www.couleurs-quebec.com/decouverte-canada /informations-generales-canada.php

Cyr, L. (1993) Apport des indices de végétation pour l'évaluation de la couverture du sol en vue d'une modélisation spatiale de l'érosion. Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 160 p.

Dehbi, Y. (2006) Suivi spatio-temporel de l'évolution du recouvrement végétal moyen et des catégories de cultures dans le bassin versant de la rivière aux Brochets. Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 147 p.

Deslandes, J. (2003) Apport de la géomatique et de la télédétection au développement d'indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore sur un grand bassin versant : le cas de la rivière aux Brochets, Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 58 p.

Edey, S.N. (1980) Degrés-jours de croissance et production des cultures au Canada. Agriculture Canada, Research Branch, Ottawa, publication ID 1635F, 62 p.

Frère, G.-Y. (2005) Observation spatiale des résidus de culture appliqués comme pratiques agricoles antiérosives dans le bassin versant de la rivière aux Brochets à l'aide d'images Landsat 5 TM et de mesures de terrain. Maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, 90 p.

Lévesque, G. (2003) Mise en oeuvre du modèle SWAT sur le bassin versant de la rivière aux Brochets. Rapport de stage de DESS (Université Jean Monnet de Saint-Étienne, France) effectué à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, p. 18-34.

MAPAQ (Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation du Québec) (2006) Les degrés-jours et le stade de maturité. Gouvernement du Québec, Internet, www.mapaq.gouv.qc.ca/ degrés-jours.

MDDP (Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec) (2004) Portrait global de la qualité des eaux au Québec. Internet : www.mddep.gouv.qc.ca/eau/sys-image/global/global3.htm

North, P. (2002) Estimation of f_{APAR}, LAI, and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery. Remote Sensing of Environment, vol. 80, p. 114-121.

OMAFRA (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario) (2006) Utilisation des degrés-jours (DJ) et des unités thermiques de croissance (UTC). Gouvernement de l'Ontario, Internet, www.omafra.gov.on.ca/french/crops /pub811/1gddchu

Purevdorrj, T., Tateishi, R., Ishiyama, T. and Honda, Y. (1998) Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n^{o} 18, p. 3519-3535.

Scanlon, T.M., Albertson, J.D., Caylor, K.K. and Williams, C.A. (2002) Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savannah ecosystem. Remote Sensing of Environment, vol. 82, p. 376-388.

Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B. and Gillespie, A.R. (1990) Vegetation in deserts : I. A regional measure of abundance from mutispectral images. Remote Sensing of Environment, vol. 31, p. 1-26.

Syndic-Rivières (2005) Eutrophisation. Internet : www.syndic-rivieres.org/dysf7

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D (1978) Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. U.S Department of Agriculture. Agriculture Handbook, n^{o} 537. Washington, D.C, 58 p.