LES CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CÂU (VIÊT-NAM). Essai sur une approche diachronique

Kim Huong HOANG, Monique BERNIER et Jean-Pierre VILLENEUVE

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS),
Centre Eau, Terre et Environnement (ETE)
490 rue De la Couronne, Québec, QC,
G1K 9A9, Canada
kim_huong_hoang@ete.inrs.ca, monique_bernier@ete.inrs.ca,
jean-pierre_villeneuve@ete.inrs.ca

Soumis le reçu le 14 avril 2008, accepté le 9 septembre 2009 - © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 4, p. 227-236

Résumé

Les objectifs de notre recherche étaient la détection des changements de l'occupation du sol à partir de données satellitaires multidates et de l'estimation générale de l'impact de ces changements sur la qualité des ressources en eau dans le bassin versant. La méthode de comparaison diachronique de classifications a été utilisée. L'approche de classification orientée-objets (contextuelle) à partir de pseudo-bandes (ACP, NDVI) a été retenue. Les précisions globales obtenues sont de 69 % (1993), 80 % (1999) et 78 % (2003). Ces résultats ont permis d'identifier l'évolution temporelle et spatiale de l'occupation du sol du bassin versant pour une période de dix ans (de 1993 à 2003). Il ressort une expansion spatiale et une augmentation importante de la densité du milieu urbain. Il ressort également une diminution des milieux agricoles et forestiers. Les premiers résultats de l'analyse de l'impact du changement de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau de surface ont montré un lien qualitatif entre ces deux grandeurs.

Mot clés : détection des changements, classification orientée-objets, analyse en composantes principales, qualité de l'eau, bassin versant Câu.

Land-cover changes in the Câu river watershed (Vietnam). Testing a diachronic approach

Abstract

The objectives of our research were to detect changes in land cover from multi-temporal remote sensing data and to estimate the impact of these changes on the quality of water resources in the watershed. The diachronic method of comparison of classifications was used. An object-oriented classification approach (contextual) from pseudo-bands (PCA, NDVI) was applied. The overalls accuracies obtained are 69% (1993), 80% (1999) and 78% (2003). These results allowed identifying the spatio-temporal evolution of land cover in the watershed for a period of ten years (1993 to 2003). It shows a spatial expansion and a significant increase in the density of urban areas. It also proves a decrease of agricultural and forest lands. First analysis of the impact of land cover changes on the surface water quality confirms a qualitative relationship between these two quantities.

Key words: change detection, object-oriented classification, principal component analysis, water quality, Câu river watershed.

1. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Après le renouveau (Doi Moi) du pays en 1986, la libéralisation économique et l'ouverture du Vietnam aux marchés internationaux entraînent le remplacement des types d'utilisation du sol dans les espaces agricoles par des zones industrielles, nombreux commerces, bâtiments résidentiels, appartement de haut standing. Tout cela produit plusieurs déchets chimiques qui sont rejetés dans les rivières et influencent non seulement la qualité de l'eau de l'ensemble du bassin versant d'une rivière mais encore la qualité de vie et la santé humaine. Dans ce contexte, nous avons besoin de contrôler ou de planifier le mode d'occupation et aussi d'utilisation des terres en raison de leurs impacts sur la qualité de l'eau de surface afin de conserver sain l'environnement et la qualité de l'eau des bassins versants (Bernier et al, 2007). Pour ce faire, une vérification quantitative des changements spatio-temporels dans l'occupation du sol est nécessaire.

Les informations obtenues à partir de la surveillance de l'occupation du sol via les images satellitaires sont toujours utiles dans l'identification les stratégies appropriées à mieux gérer l'état de l'utilisation des terres. Plusieurs méthodes ont été inventées et appliquées pour détecter les changements avec des niveaux divers d'efficacité (Mas, 2000; Lu et al, 2004). Néanmoins, les mutations de la mise en culture, comme celles du bassin versant de la rivière Câu se passent au niveau de parcelles dont la taille est souvent inférieure à la résolution spatiale des images satellitaires généralement disponibles (TM de Landsat-5 et ETM+ de Landsat-7, 30m). Cela nous rend difficile la classification. Au niveau de traitement d'image, il demande nécessairement de chercher des méthodes appropriées pour qu'on puisse extraire un maximum d'information depuis des images dont la résolution spatiale est souvent supérieure à la taille des objets changeant dans le temps ainsi qu'analyser et interpréter ces changements à partir des images diachroniques.

Dans ce contexte, les objectifs scientifiques poursuivis sont de détecter des changements de l'occupation du sol à partir de données satellitaires diachroniques et d'estimer l'impact de ces changements sur la qualité des ressources en eau dans le bassin versant.

2. ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant à l'étude se situe au nord du Vietnam entre 21,07o et 22,18o de latitude nord et entre 105,28o et 106,08o de longitude est, c'est le bassin versant de la rivière Câu. Sa superficie totale est de 6 030 km2, il inclut le territoire (entier ou partiel) de six provinces au nord-est du Vietnam: Bac Kan, Thai Nguyen, Vinh Phuc, Bac Giang, Bac Ninh et Ha Noi. Avec une longueur de 288,5 km, la rivière Câu est la plus grande, la plus importante dans le système du fleuve Thai Binh. La rivière est alimentée par cinq principaux affluents qui sont, de l'amont vers l'aval, la rivière Cho Chu, la rivière Nghinh Tuong, la rivière Du, la rivière Công et la rivière Ca Lô. Le bassin versant de la rivière Câu est constitué de 68 sous-bassins de dimension variables. La région est caractérisée par un climat tropical de mousson avec un hiver (de novembre à mars) froid et sec et un été (de mai à octobre) chaud, humide et pluvieux. La température est différenciée par l'altitude et les saisons (Nguyen et al, 2003). Le régime hydrologique varie suivant deux saisons : la saison des pluies (la saison d'inondation) et la saison sèche (la saison de faible débit). L'humidité de l'air varie de 81 % à 87 % en moyenne annuelle. Pour développer la méthodologie, un sous-bassin en aval de ce bassin versant a été choisi (fig. 1), incluant le territoire entier de deux districts Soc Son (de la province de Hanoi), Yên Phong (de la province de Bac Ninh) et un partiel de la ville de Bac Ninh (de la province de Bac Ninh).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La méthode de comparaison des classifications (Mas, 2000 ; Lu *et al*, 2004) a été choisie pour détecter des changements de l'occupation du sol. Le principe de cette méthode est basé sur la classification de deux scènes acquises à des dates différentes. Elle assigne d'abord des classes et détecte ensuite le changement. Cette méthode permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement (Yaun *et al*, 2005).

Afin de mieux séparer des objets ainsi que diminuer des confusions, l'approche de classification orientée-objets de pseudo-bandes (ACP, NDVI) a été appliquée sur trois images Landsat (TM 1993, ETM+ 1999 et ETM+ 2003) à l'aide du logiciel de traitement d'image eCognition (Definiens Imaging, 2004). Les éléments de base de l'analyse orientée objets sont des objets ou des segments d'image (un groupe des pixels) et non le pixel isolé. Autrement dit, l'approche orientée objets se base sur l'hypothèse que l'information sémantique nécessaire à l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans les pixels individuels, mais dans des objets d'image significatifs et leurs relations mutuelles (Definiens Imaging, 2004). Le processus de la méthodologie comprend six étapes qui sont représentées à la figure 2.

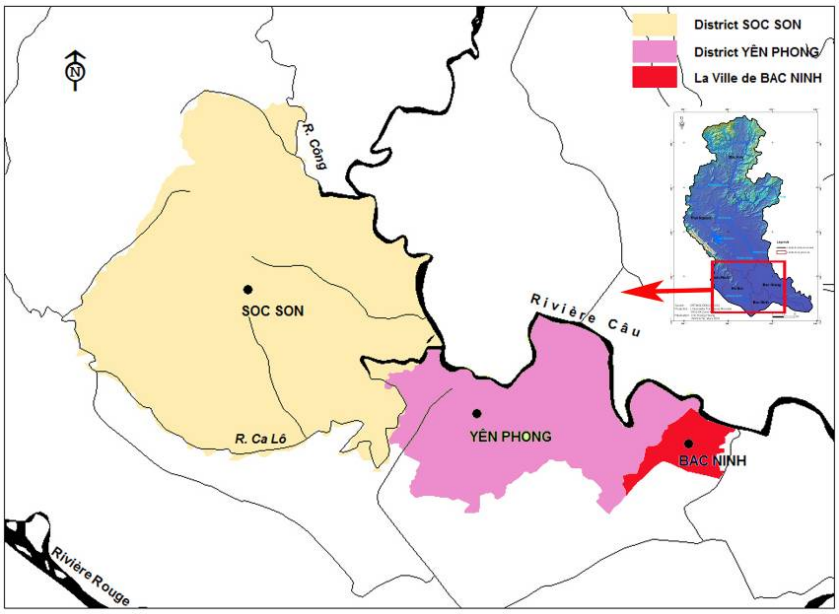


Figure 1 : Localisation des régions administratives retenues pour l'étude sur le bassin versant de la rivière Câu. L'encadré illustre les limites du sous-bassin étudié.

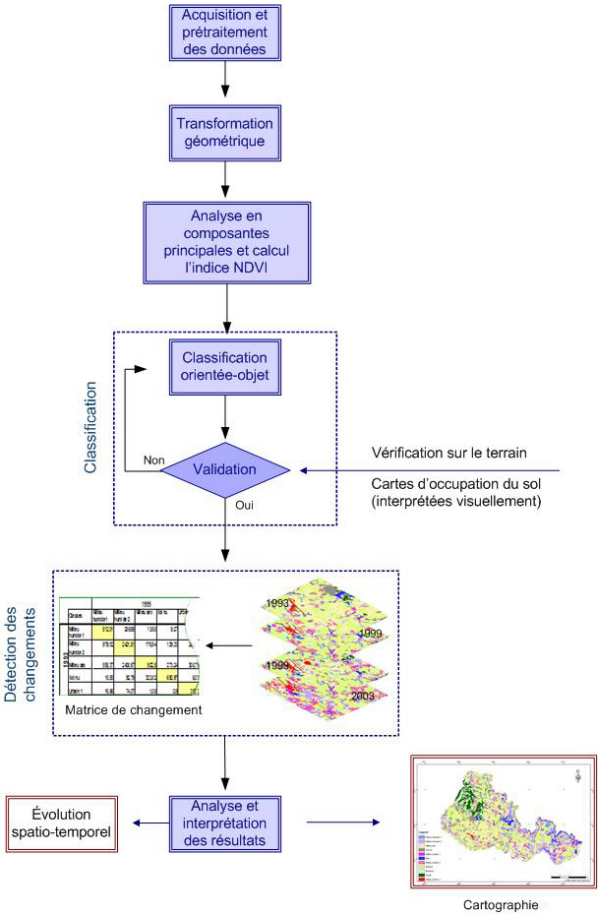


Figure 2 : Organigramme de la démarche méthodologique.

3.1. Correction géométrique

Une correction géométrique a été effectuée sur trois images Landsat. La méthode de transformation globale par polynôme du premier degré avec ré-échantillonnage du plus proche voisin a été choisie. Parmi les images utilisées, l'image de 2003 a déjà été corrigée selon le système de projection UTM (WGS 84) zone 48 nord, celle-ci a été considérée pour corriger les images de 1993 et de 1999 avec 32 points d'appui sur l'ensemble de l'image. La moyenne quadratique (RMS) des erreurs est 0,41/0,35.

3.2. Sélection des bandes spectrales pour la segmentation

L'analyse en composantes principales (ACP) et l'indice de végétation (NDVI) sont mis en œuvre dans le cas présent afin de sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part, et d'augmenter le contraste sol-végétation d'autre part, et cela dans le but de faciliter l'étape de segmentation. En effet, l'ACP réduit le bruit de l'image et crée une image sur laquelle chaque bande est peu corrélée aux autres et contient des informations uniques (Jensen, 1996; Caloz et Collet, 2001). L'indice NDVI réduit les effets d'éclairement ou de pente sur la réflectance des couverts végétaux (Bonn, 1996; Lau, 1997; Centre Canadien de Télédétection) et permet de mieux séparer la végétation (forêts, cultures) des sols nus et des surfaces urbanisées. À l'aide de la fonction PCA du logiciel PCI Geomatica, une analyse en composantes principales a été appliquée à chacune des images en vue d'obtenir la synthèse des différentes bandes informatives (tabl.2). En effet, l'ACP est une transformation basée sur les vecteurs propres (*eigenvectors*) orthogonaux de la matrice de covariance (tabl.1) produite d'un groupe de pixels pour l'ensemble des canaux spectraux de l'image initiale. Le résultat montre que les trois premières composantes principales expliquaient l'essentiel de la variance des bandes informatives pour chaque image. Les zones d'un même thème dans ces composantes sont donc plus homogènes. Ce caractère sera utile lorsqu'on réalise la première phase de l'approche orientée-objets (voir la section 3.3). Ces trois premières composantes et une pseudo-bande de NDVI ont donc été utilisées pour segmenter l'image (Savary et al, 2006).

Tableau 1 : Matrice de covariance des canaux d'entrée (image 2003)

	1	2	3	4	5	6
1	1799.54					
2	1444.83	1165.34				
3	1412.78	1143.06	1132.59			
4	1009.33	807.53	785.30	606.83		
5	1280.12	1025.78	1013.33	781.10	1115.07	
6	863.05	693.83	692.23	516.00	755.27	526.05

Tableau 2 : Le pourcentage cumulé de la variance des composantes retenues

Composante principale	Contenu informatif		
	TM 1993	ETM+ 1999	ETM+ 2003
1	95,28 %	95,76 %	95,61 %
2	3,42 %	2,86 %	3,58 %
3	1,07 %	1,24 %	0,61%
4	0,15 %	0,09 %	0,13 %
5	0,07 %	0,04 %	0,06 %
6	0,01 %	0,01 %	0,01 %
Total	100	100	100

3.3. Segmentation et classification d'images

L'approche orientée-objets a été choisie. Elle s'effectue selon deux phases principales (Willhauck et al, 2000; Jensen, 2005). La première est la création des régions individuelles ou le groupement des éléments d'image par certains critères d'homogénéité spectrale et spatiale, appelées segments. Ces segments sont considérés comme des objets totalement indépendants. Cette phase s'appelle la segmentation. La seconde est la classification (étiquetage) des segments à l'aide des attributs spectraux, spatiaux, structuraux et d'autres variables géographiques. Ces deux phases ont été réalisées à l'aide du logiciel eCognition (Definiens Imaging, 2004). Le processus de ce traitement est présenté à la figure 3.

La segmentation de l'image permet de diviser l'image en des objets homogènes. Les pixels sont groupés en objets significatifs. Pour obtenir les segments adaptés à la classification désirée, le procédé de segmentation a été effectué en définissant les paramètres suivants : le poids des couches (bandes) employées, l'échelle, et les critères d'homogénéité. Cette phase est effectuée sur les pseudo-bandes spectrales (composantes principales et NDVI). Le poids est déterminé par le pourcentage de la variance (Savary et al, 2006) de chaque composante principale et de 1 pour l'indice NDVI. L'échelle est une valeur abstraite qui détermine l'hétérogénéité maximum permise pour les objets résultants d'image. Après avoir testé quelques valeurs, la valeur de 20 est attribuée au facteur d'échelle. Les critères d'homogénéités sont définis au moyen des quatre paramètres suivant : la couleur, la forme, la compacité et le lissage. Dans cette étude, la valeur de forme est de 0,1 (couleur 0,9), celle de compacité est de 0,9 et celle de lissage est de 0,1. Bien que le logiciel permette de segmenter l'image selon plusieurs niveaux des objets image (Dissanska et al, 2008), pour l'instant, avec tous les paramètres choisis, la segmentation a été effectuée à un seul niveau.

Quant à la classification, le logiciel eCognition permet la classification d'images segmentées en se basant sur l'exécution d'outils de classification réalisée selon le système logique floue (*fuzzy logic*). Pour réaliser cette phase, il est important de construire d'abord une hiérarchie des classes. C'est une base de connaissance pour la classification des objets images. Elle contient l'ensemble de toutes les classes avec leur description spécifique. Une hiérarchie simple de 11 classes thématiques a été établie (tabl. 3) en consultant le système de classification d'utilisation et d'occupation du sol d'Anderson et al (1976) et les résultats des études antérieures (Nguyen et al, 2003).

Ce logiciel offre deux techniques fondamentales pour classifier des images (technique de classification dirigée et de non-dirigée) et aussi une variété de méthodes pour la définition de classes thématiques : soit le plus proche voisin, soit des fonctions d'appartenance (*membership function*) ou une combinaison de ces deux méthodes.

Lorsque des échantillons sont choisis, l'image est classifiée, et dans une étape suivante, des objets assignés incorrectement ou ceux non-classifiés sont assignés aux classes correctes. Cette étape peut être répétée si nécessaire. Pour avoir de l'information additionnelle pour la classification, un outil inclus dans eCognition a été utilisé, celui faisant appel à «*Feature Space Optimization*». L'idée de cet outil est de calculer la distance entre les échantillons de classes dans l'espace des couches utilisées, et de choisir les combinaisons de couches qui engendrent la meilleure distance de séparation de classe.

La validation des classifications a été réalisée à l'aide d'un outil statistique inclus dans le logiciel eCognition. La démarche consiste à établir un certain nombre de sites de vérité-terrain pour chacune des classes. En se basant sur ces sites de validation, on établi un matrice d'erreurs. Cette matrice est un tableau de chiffres qui identifient le nombre d'objets assigné à une catégorie de la classification, relativement au nombre actuel de cette catégorie, mais vérifié par des données de référence. Nous obtenons ainsi la précision (du producteur et d'utilisateur) de chaque classification, la précision globale ainsi que l'indice Kappa (K).

3.4. Évaluation de changements de l'occupation du sol

Suite à l'application de la méthode en aval du bassin versant à l'étude, les résultats de la classification orientée-objets ont été comparés, classe par classe, afin d'évaluer les changements. L'évaluation de changement est faite sur une base de pixel-par-pixel à l'aide d'un tableau de statistiques faisant appel à une matrice de changement.

Les colonnes de la matrice représentent la superficie de chaque classe de l'année plus récente alors que les lignes représentant celle de l'année antérieure. L'analyse des matrices nous donne l'évolution spatio-temporelle de changement de l'occupation du sol de 1993 à 2003. Les cartes des changements ont été produites en utilisant la matrice de changement où en ce moment au lieu de la superficie dans chaque case, sa valeur représente un type de changement. La figure 4 est un exemple d'une carte des changements de l'occupation du sol de 1993 à 1999. Elle montre la récurrence et l'expansion des groupes de l'occupation du sol. Pour mettre en évidence la dynamique du milieu urbain, nous avons présenté sur ces cartes des informations concernant la contribution des autres classes à ce milieu.

4. RÉSULTATS

4.1. L'évolution temporelle et spatiale des changements de l'occupation du sol

Trois classifications ont permis d'évaluer l'évolution (temporelle et spatiale) de l'occupation du sol de la zone d'étude pour une période de dix ans (1993-2003). Pour faciliter et synthétiser l'analyse de l'évolution globale de l'occupation du sol, les classes thématiques ont été regroupés en cinq classes: milieu agricole, milieu forestier et arbustif, milieu urbain et les deux autres étant eau et sol nu (tabl. 3).

Tableau 3 : Classes thématiques appliquées pour la classification.

Classes thématiques	Groupes	Description
Milieu humide 1	Milieu agricole	Milieu agricole très humide
Milieu humide 2		Milieu agricole humide
Milieu sec		Milieu agricole sec, sans récolte
Rizières		Rizières
Milieu urbain 1	Milieu urbain	Urbain forte densité : la ville ou centre ville des districts
Milieu urbain 2		Urbain faible densité (les villages, incluent des jardins)
Milieu urbain 3		Constructions, routes, zones industrielles
Forêt	Milieu forestier Arbustif	Les feuillus, les plantations d'acacia, d'eucalyptus et de pin
Buisson, herbage		Les buissons, les herbages et les arbustes
Eau	Eau	Rivières, lacs et zones inondées
Sol nu	Sol nu	Les sables, les chemins en terre, terres agricole en friche, etc.

Tableau 4 : Pourcentage et superficie de l'occupation du sol pour chacune des 12 classes thématiques.

Groupes	Classes thématiques	1993 Ha	1993 %	1999 ha	1999 %	2003 ha	2003 %
Milieu Agricole	Milieu humide 1	1 797,48	3,43	2 993,58	5,71	5 090,94	9,72
	Milieu humide 2	7 936,65	15,15	7 223,04	13,79	6 310,89	12,05
	Milieu sec	10 266,21	19,60	1 885,05	3,60	1 759,14	3,36
	Rizière	19 404,81	37,04	1 9611,09	37,44	18 959,4	36,19
	sous-total	*39 405,15*	*75,22*	*31 712,76*	*60,54*	*32 120,37*	*61,32*
Milieu Forestier et arbustif	Buisson, herbage	1 830,69	3,49	4 458,42	8,51	2 835	5,41
	Forêt	2 223,9	4,25	2 915,1	5,56	2 950,83	5,63
	sous-total	*4 054,59*	*7,74*	*7 373,52*	*14,08*	*57 85,83*	*11,04*
Milieu Urbain	Urbain 1	606,06	1,16	2 029,5	3,87	2 693,88	5,14
	Urbain 2	3 230,01	6,17	4 004,19	7,64	6 645,15	12,69
	Urbain 3	88,38	0,17	540,99	1,03	1 019,43	1,95
	sous-total	*3 924,45*	*7,49*	*6 574,68*	*12,55*	*10 358,46*	*19,77*
Autres	Sol nu	2 504,25	4,78	1 564,92	2,99	810,27	1,55
	Eau	2 497,05	4,77	5 159,61	9,85	3 310,56	6,32
Total		52 385,49	100,00	52 385,49	100,00	52 385,49	100,00

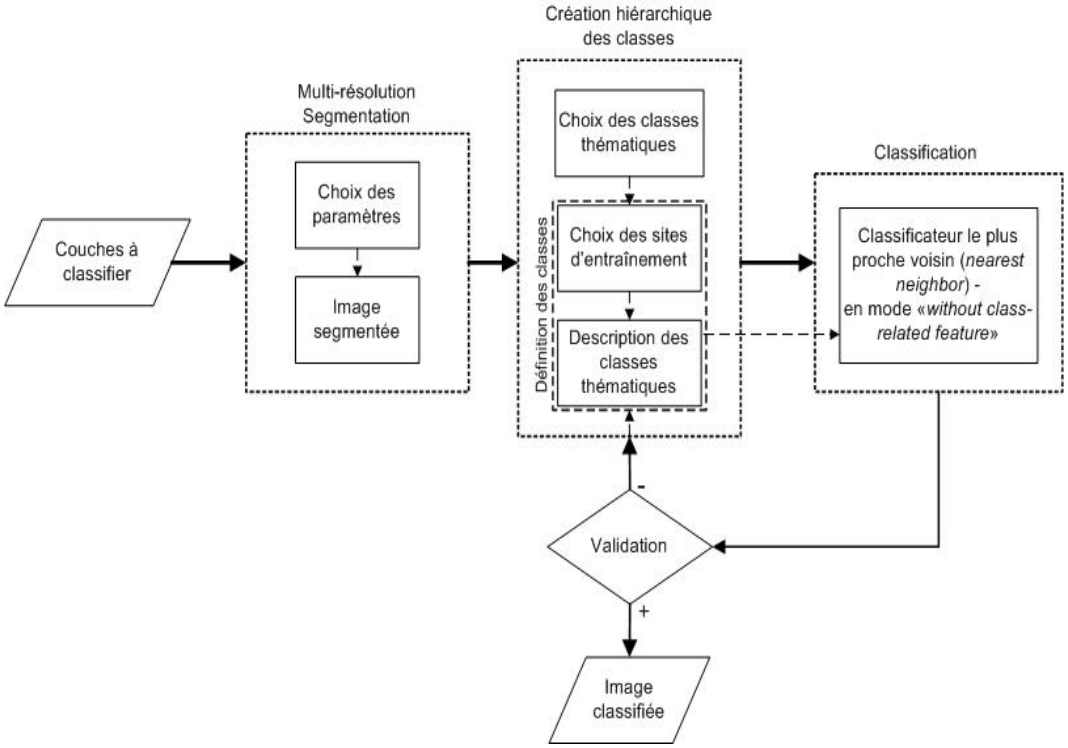


Figure 3: Organigramme pour la classification orientée objets.

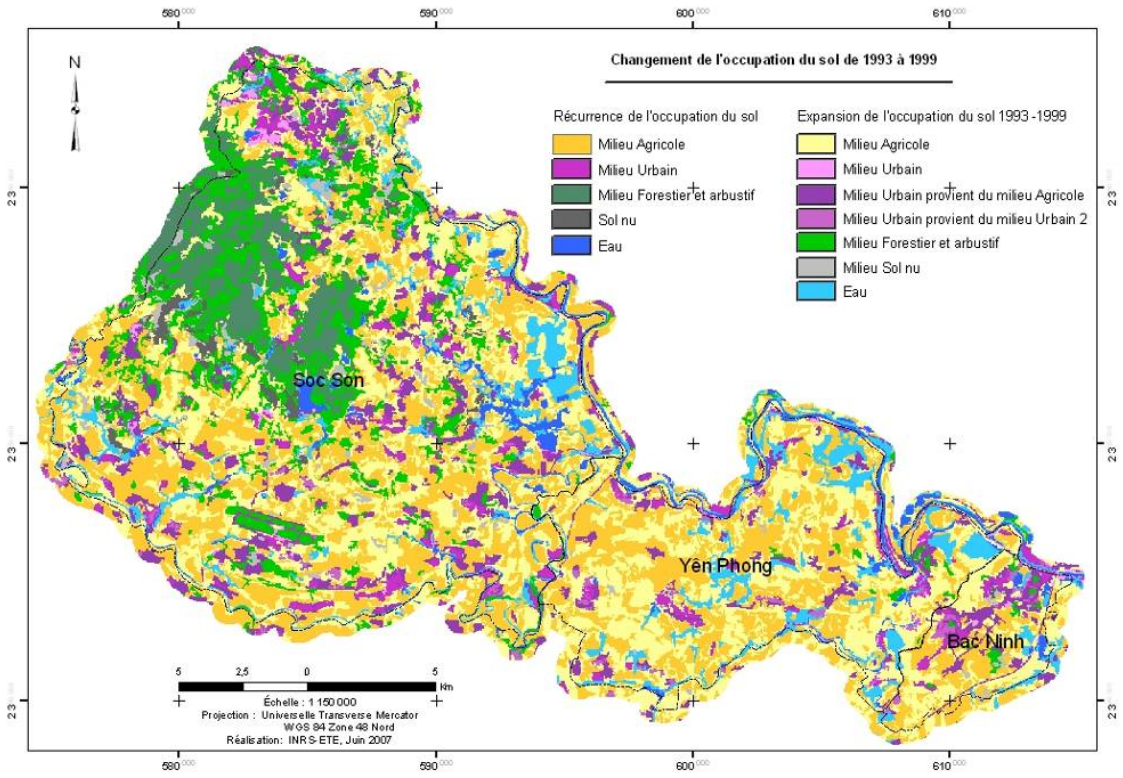


Figure 4 : Changement de l'occupation du sol entre 1993 et 1999.

L'évolution temporelle est représentée sous forme graphique. L'analyse des graphiques et le tableau 4 montrent tout d'abord une baisse du milieu agricole (14 % (7 284 ha) de la superficie totale, 18 % de celle du groupe) pour la période 1993-2003. C'est le résultat de la fluctuation des milieux sec, humide 2 et humide 1. En réalité, la diminution de superficie de ce milieu se fait au profit des zones urbaines par l'accroissement de la population er du développement de l'infrastructure.

Ensuite, la surface du milieu forestier et arbustif est passée de 7,7 % à 11 %, soit une augmentation de presque 3,5 %, caractérisée par des fluctuations liées à la variabilité de la classe buisson et herbage. L'augmentation de la sous-classe forêt (1,4 %) peut être liée à la politique du gouvernement de la plantation forestière après la résolution 10 NQ/TW en 1988 sur la rénovation de la gestion de l'agriculture (Boissau et al, 2003).

Depuis 1993, la superficie du milieu urbain a augmentée au dépens de la classe rizière. Malgré une récurrence stable, une portion de 13% de la superficie des rizières en 1993 et 16 % de celle de 1999 est devenue milieu urbain. On observe également une augmentation de la densité. Les statistiques montrent que 24 % de la surface de la classe urbain 2 (faible densité) en 1993 et 14 % de celle-ci en 1999 a été transformée en classe urbain 1 (forte densité). Malgré ceci, la superficie de la classe urbain 2 est passée de 6,2 % (en 1993) à 12,7 % (en 2003), soit une augmentation de 6,5 % (3 415 ha). Pour la classe urbain 3, elle a connu l'augmentation la plus importante de 88,38 ha à 1 019 ha environ (six fois plus par rapport à l'année 1999 et deux fois pour l'année 2003). L'augmentation de ce milieu peut également être liée à l'incertitude de la classification à cause des similitudes des signatures spectrales. Néanmoins, cette évolution est réaliste puisqu'elle se conforme à la stratégie d'expansion de la province de Hanoi jusqu'à 2020. Les zones à la périphérie de cette province sont donc en train de se transformer d'une structure d'économie de type « agriculture - industrie - service » à celle de type « industrie - service - agriculture ».

La superficie de l'eau fluctue d'une année à l'autre. En 1999, il y a deux fois plus d'eau qu'en 1993. La période suivante (de 1999 à 2003), la surface de cette classe diminue. Néanmoins, elle est encore plus importante qu'en 1993, à cause de l'apparition de nouveaux lacs qui servent à l'irrigation ou bien de nouvelles mares pour le développement de l'aquaculture. Pour les sols nus, le changement de ce milieu est beaucoup moins important que les autres. Cependant, il présente une faible récurrence et une baisse de 5 (2 504 ha) à 2 % (810 ha).

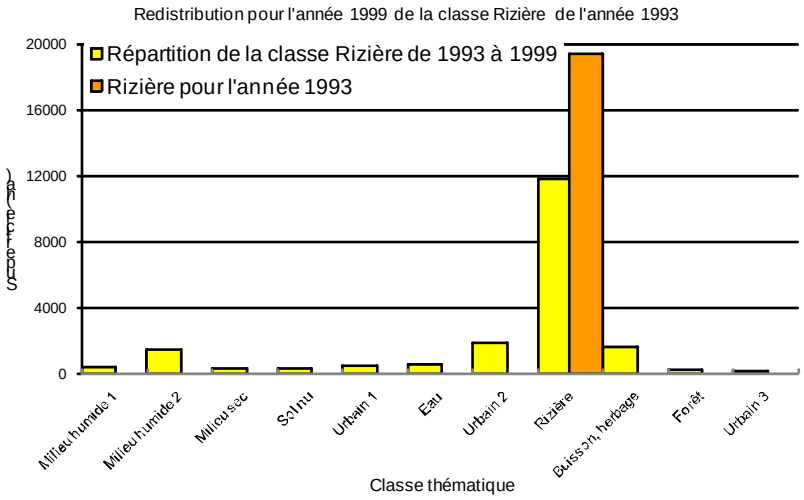


Figure 5 : Redistribution de la classe rizières (de 1993 à 1999).

L'évolution spatiale est réalisée à l'aide de la matrice de changement entre les images consécutives. Ces matrices présentent l'évolution de la distribution des classes thématiques entre les différentes dates d'acquisition d'image. On pourrait analyser l'évolution spatiale selon deux approches : soit la redistribution d'une classe aux autres (1), soit l'inverse (2). Par exemple, selon la première approche, la figure 5 montre la perte des rizières de l'année 1993 et indique où sont allées ces dernières. La plupart des rizières deviennent des milieux urbains 2, des zones humides et des buissons. Par contre, l'analyse de l'évolution spatiale selon l'approche 2 permet de savoir la contribution des différentes classes d'occupation à l'expansion d'une autre classe (urbaine de forte densité par exemple) entre 1933 et 2003. Cette augmentation provient pour plus de 50 % du milieu agricole, et pour plus de 20 % de la classe urbain faible densité (milieu urbain 2) ce qui traduit une densification des zones déjà existantes.

Tableau 5 : Norme A pour six paramètres

Paramètre	Valeur limite	Unité
pH	6 -8,5	$mg.l^{-1}$
DO	≥ 6	$mg.l^{-1}$
COD	< 10	$mg.l^{-1}$
BOD_5	< 4	$mg.l^{-1}$
SS	20	$mg.l^{-1}$
NO^{2-}	0,01	$mg.l^{-1}$

(TCVN 5942:1995)

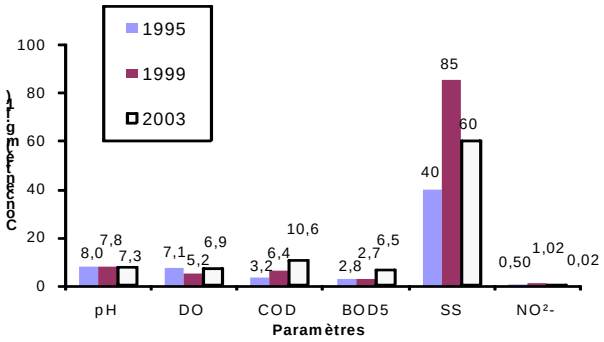


Figure 6 : Évolution des paramètres de la qualité de l'eau pour la saison sèche de 1995, 1999 et 2003 (Station Pont Dap Cau).

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Grâce à l'analyse orientée objets qui permet de contrôler le processus de classification, nous avons eu des résultats convenables. Une amélioration significative des résultats a été obtenue par rapport à l'utilisation des méthodes de classification traditionnelle. Les précisions globales obtenues sont de 69 % (1993), 80 % (1999) et 78 % (2003). De plus, la méthode de comparaison des classifications a témoigné de l'utilité d'une approche simple pour détecter des changements de l'occupation du sol et de sa facilité à créer des cartes de changements. Elle a fourni 121 combinaisons des occupations changées «de - a» à partir de 11 classes thématiques. Ces informations sont très utiles dans un contexte

de gestion intégrée des ressources naturelles au Viêt-nam. Nous avons ainsi obtenu des données quantitatives sur l'occupation du sol de l'ensemble du bassin pour une période de 10 ans et sur l'évolution temporelle et spatiale de cette occupation dans la partie aval du bassin versant. Il ressort en premier lieu une expansion importante du milieu urbain associée à une densification des zones existantes puis une expansion spatiale de ce milieu. Il résulte également une diminution significative des espaces agricoles.

Cependant, par rapport à une région où l'occupation du sol est complexe et entremêlée comme celle de la zone d'étude, les images de résolution spatiale grossière (30 m) montrent quelques limites. Avec cette résolution spatiale, certaines classes n'ont pas bien été discriminées, la confusion est inévitable. D'ailleurs, les données restreintes concernant le bassin versant de la rivière Câu (y compris des cartes thématiques, des données références sur le terrain pour la validation la classification et des données statistiques de la qualité de l'eau) n'ont pas permis une analyse détaillée des impacts de changement de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau. Pour les prochaines études, il est recommandé d'organiser des campagnes de terrain. Les informations obtenues sur le terrain nous permettront de bien comprendre les types d'occupation du sol du territoire et de créer une hiérarchie appropriée des classes pour la classification orientée objets, tout en permettant une meilleure validation des classifications. Les images de haute résolution aideraient aussi pour obtenir des informations détaillées (les bâtiments, les zones industrielles, les habitations isolées, etc.).

Quant aux impacts de l'occupation du sol sur la qualité des eaux de surface, l'idée de cette évaluation est de chercher un lien quantitatif et qualitatif entre la qualité de l'eau et les changements de l'occupation du sol. Cependant, l'absence actuelle d'une base de données détaillées et consécutives des stations d'observation ne permet pas de réaliser une analyse quantitative mais une évaluation qualitative. Les données mesurées en saison sèche (pH, DO, COD, BOD_5, SS et NO^{2-}) du IWARP sur trois ans (1995, 1999 et 2003) de la station pont Dap Cau (de la ville de Bac Ninh) montrent que l'eau de surface dans la zone d'étude est polluée par le SS et le NO^{2-} par rapport à la norme A (tabl. 5). La concentration de SS est très élevée, elle dépasse la limite de la norme A de 2 à 4 fois. Malgré une baisse importante en 2003, la concentration de NO^{2-} est encore supérieure au double de la norme. Il est intéressant de constater que la fluctuation de ces deux paramètres ainsi que leur concentration plus élevée en 1999 (4 fois et 100 fois la norme A) semblent liées à celle de la superficie en eau (terres inondées). On trouve une relation logique entre la tendance élevée du milieu urbain et du milieu agricole et celle du SS et le NO^{2-}. L'augmentation du SS peut être liée à la densification du milieu urbain de 1993 à 2003. La fluctuation du NO^{2-} correspond à celle de la surface de l'eau. La baisse de ce paramètre pourrait s'expliquer par la diminution du milieu agricole de 1999 à 2003. Pour le COD et le BOD_5, leur concentration ne dépasse presque pas la limite de la norme A, sauf celle de 2003. Mais, ces paramètres augmentent avec le temps (fig. 6). Ce sont des paramètres concernant les eaux usées municipales. Ceci serait un impact de l'urbanisation. Il faut noter qu'avec seulement un point d'observation, il est hasardeux de vouloir tirer des conclusions pertinentes, puisque les changements de qualité de l'eau peuvent être dus à des changements ailleurs dans le bassin versant ou à des changements autres que l'utilisation du sol.

Enfin, cette étude offre des perspectives très encourageantes pour des travaux plus orientés vers le développement de systèmes automatisés de gestion intégrée et d'outils pour mieux évaluer les impacts des changements de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau d'un bassin versant (Bernier et al, 2007, Rousseau et al, 2000). Cette analyse donnera aux gestionnaires du bassin versant une idée du comportement de l'utilisation du sol et des pressions anthropiques sur la qualité de l'eau. Elle permettra d'établir, d'archiver et de mettre à jour une base de données numériques diachroniques.

6 - BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON, J.R., HARDY E.E., ROACH J.T., WITMER R.E., 1976. *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data.* U.S. Geological Survey Professional Paper No. 964. USGS, Washington, D.C., 41 p.

BERNIER M., DUCHESNE S., NGUYEN T. D., PHAM Q. S., TRAN M. Y., DANG L. A., VILLENEUVE J-P., 2007 - "Gestion intégrée du bassin de la rivière Câu (Vietnam)". *In : Gestion intégrée des eaux et des sols*, pré-actes du colloque des journées scientifique inter-réseaux AUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007, Pré-Actes JSIRAUF : 281-286.

BOISSAU S., CASTELLA J-C., NGUYEN H.T., 2003 - La distribution des terres de forêt au nord du Vietnam 1 : droits d'usage et gestion des ressources. *Cahiers d'étude et de recherches francophones/Agricultures (Cah. Étu. Rech. Franco/Arg.)*, 12 (5) : 297-305.

BONN, F., 1996 - *Précis de Télédétection, II - Applications thématiques*. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, vol. II, 633 p.

CALOZ R., COLLET C., 2001 - *Précis de Télédétection, III - Traitement numériques d'image de télédétection*. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 386 p.

CENTRE CANADIEN DE TÉLÉDÉTECTION. *Tutoriels, Notions fondamentales de télédétection*. (http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter4/06_f.php).

DEFINIENS IMAGING, 2004 - *eCognition Professional, User Guide 4.0*. Germany, 486 p.

DEFINIENS PROFESSIONAL 5, 2005 - *eCognition Reference Book*. Germany, 122 p.

DISSANSKA M., BERNIER M., PAYETTE S., 2008 - Adaptation of an object-oriented classification approach to evaluate the spatiotemporal development of peat-lands from very high resolution panchromatic images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, soumis le18 janvier 2008.

IWARP (Institut de la planification de ressources en eau), 2003 - *Rapport hydraulique agricole*. Rapport MADR, Hanoi, 111 p.

JENSEN, J. R., 1996 - Introductory Digital Image Processing - A remote sensing perspective, 2nd edition. Prentice Hall, Upper Saddle River (N.J.), 316 p.

JENSEN, J.R., 2005 - Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, 3rd edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 526 p.

LAU, C.-C., 1997 - "Geomorphologic Distribution of Normalized Difference Vegetation Index". Proceedings online of the Asian Conference on Remote Sensing(ACRS), (http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ts10/ts10004.asp).

LU D., MAUSEL P., BRONDIZIO E., MORAN E., 2004 - Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (12) : 2365-2407.

MAS, J.F., 2000 - Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Journal Canadien de Télédétection*, 26 (4) : 349-362.

NGUYEN V.C, MAI T.T., NGUYEN Q.T., 2003 - Environnement du bassin versant de la rivière Câu. Rapport ASTV et MST, Hanoi, 422 p.

ROUSSEAU, N.A., MAILHOT A., TURCOTTE R., DUCHEMIN M., BLANCHETTE C., ROUX M., ETONG N., DUPONT J., VILLENEUVE J-P., 2000 - GIBSI-An integrated modelling system prototype for river basin management. *Hydrobiologia*, 422/423 : 465-475.

SAVARY S., DOLBEC J.F., ROUSSEAU A.N., 2005 - Description d'un processus de classification orientée objet pour la cartographie et la détection des changements de l'occupation du sol à l'aide d'images satellitaires du bassin versant de la rivière Chaudière pour la période de 1970 à 2000. Rapport FACC A9446- Programme Impacts et Adaptation, INRS-ETE, 89 p.

YUAN F., SAWAYA K.E., LOEFFELHOLZ B.C, BAUER M.E., 2005 - Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2-3) : 317-328.

WILLHAUCK G., SCHNEIDER T., DE KOK R., AMMER U., 2000 - "Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos". In: XIX ISPRS Congress, Amsterdam, ISPRS Archives, vol. XXXIII.