Université du Québec
INRS : Eau, Terre et Environnement

Les changements de l'occupation du sol et ses impacts sur les eaux de surface du bassin versant. Le cas du bassin versant de la rivière Câu (Viêt-nam)

Par
Kim Huong HOANG

Mémoire présenté
pour l'obtention
du garde de Maître ès Science (M.Sc.)
en Sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examinateur externe	Cu Van PHAM, Université Nationale de Hanoi, Université des Sciences naturelles Département de Géographie
Examinateur interne	Y Minh TRAN, ASTV : Institut de la Technologie Spatiale INRS : Centre Eau, Terre et Environnement
Directrice de recherche	Monique BERNIER, INRS : Centre Eau, Terre et Environnement
Codirecteur de recherche	Jean-Pierre VILLENEUVE, INRS : Centre Eau, Terre et Environnement

© droit réservés de Kim Huong Hoang, 2007

RÉSUMÉ

Le bassin versant de la rivière Câu est une région qui joue un rôle important dans l'économie du Nord du Viêt-nam. Depuis le renouveau (Dôi Moi) en 1986, les modes d'utilisation des terres du bassin versant, particulièrement au niveau des terres agricoles, ont subi des transformations importantes. Le développement économique a été accompagné du développement des zones industrielles et des bâtiments résidentiels. Toutefois, ce développement est en train de menacer l'environnement du bassin versant en général et de l'eau de surface et la santé humaine en particulier. Dans ce contexte, la télédétection se montre efficace pour le suivi des changements d'occupation du sol. Néanmoins, les approches de classification traditionnelles appliquées sur des images spectrales de moyenne résolution (Landsat de 25m, 30m) conduisent à des confusions importantes à cause du morcelé des modes d'occupation des sols.

La présente étude traite de la détection des changements de l'occupation du sol à partir de données satellitaires et multi-temporelles et de l'estimation générale de l'impact de ces changements sur la qualité des ressources en eau dans le bassin versant. Une méthode de comparaison diachronique de classifications a été utilisée. Une approche de classification orientée-objets (contextuelle) à partir de pseudo-bandes spectrales (ACP, NDVI) a été retenue. Pour ce faire, un sous bassin versant situé à l'aval du bassin versant de la rivière Câu a été choisi, celui 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). Ensuite, une classification orientée-objets a été appliquée sur trois images : une image TM de Landsat-5 (1993) et deux images ETM+ de Landsat-7 (1999, 2003). Les résultats des trois classifications ont ensuite été comparés, classe par classe, afin d'évaluer les changements.

Malgré des confusions à cause des similitudes entre les signatures spectrales de quelques classes thématiques, l'approche orientée objets a donné des résultats convenables et a montré son efficacité pour une région d'occupation du sol complexe. La précision globale moyenne de la classification est de 76 %. 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 (y compris

le milieu urbain forte densité, celui de faible densité, les zones industrielles, les constructions et les routes). Il ressort également une diminution des milieux agricoles et forestiers. Ces informations quantitatives ont ensuite été combinées aux données de la qualité de l'eau de surface pour estimer l'impact du changement de l'occupation du sol sur celle-ci. Les premiers résultats de cette analyse ont montré un lien qualitatif entre ces deux grandeurs. Cette relation pourra également être quantifiée lorsqu'on disposera des données statistiques complètes de la qualité de l'eau durant la période étudiée.

Étudiante

Directrice de recherche

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été effectué dans le cadre du projet de coopération entre l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) et l'Académie des Sciences et des Technologies du Viêt-nam (ASTV), financé par l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI), et je voulais remercier en premier lieu les responsables de deux Instituts pour m'avoir permis de réaliser ce travail au sein du laboratoire de Télédétection de l'INRS-ETE. Je souhaite aussi faire preuve de gratitude envers les professeurs Monique Bernier et Jean-Pierre Villeneuve et toutes les personnes qui ont permis l'aboutissement de ce mémoire, à travers les mois de réalisation, d'écriture et de correction.

Je tiens à remercier particulièrement ma directrice de recherche, la professeure Monique Bernier qui, en m'accordant sa confiance, m'a permis de réaliser cette étude. Je la remercie pour son soutien financier mais surtout pour son soutien scientifique, son suivi, ses conseils, ses directions tout au long de ce projet. Je la remercie aussi pour ses encouragements, sa patience, sa relecture et sa correction de la langue française. Tout cela m'a donné la motivation et l'énergie à travailler fort.

Je tiens à remercier mon co-directeur de recherche, le professeur Jean-Pierre Villeneuve, pour son suivi en silence et sa compréhension. Grâce à sa rigueur et son support, j'ai pu pas à pas améliorer mon français.

Je voudrais remercier ici les personnes qui, par leurs conseils et leurs discussions ont contribué à l'aboutissement de ce travail : la professeure Sophie Duchesne, le professeur Karem Chokmani, Yves Gauthier, Stéphane Savary, Maria Dissanska et Lisa-Marie Pâquet. Un grand merci au professeur Cu Van Pham de l'Université Nationale de Hanoi, pour la suggestion d'un sujet adapté à la réalité du Viêt-nam. Je le remercie aussi pour ses encouragements. Merci à Mme. Y Minh Tran de l'Institut de la Technologie Spatiale, les gens de l'Institut de la planification des ressources en eau et mes collègues du Centre de Télédétection et Géomatique (VTGEO), Institut de Géologie, Viêt-nam, pour leur support en données.

Je remercie aussi le jury d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail ceci malgré un emploi du temps certainement très chargé.

J'ai vraiment aimé les moments partagés dans la neige, sur la glace, en voyage ou dans les soupers familials avec : Laurie et Sébastien, Isabelle, Brigitte, Hugo, Gregory, Simon, Nicolas et tous les autres. Je suis chanceuse de vous avoir rencontrés et, que vous m'aillez accueillie à bras ouvert. Grâce à votre amitié, vos partages dans la vie, moi qui viens d'un lointain pays, j'ai adapté une nouvelle culture. Je tiens ici à vous remercier chaleureusement tous et toutes.

Pour finir, je remercie mes amis Vietnamiens à Québec et au Viêt-nam, et particulièrement mes parents et ma sœur pour leurs encouragements constants durant ma maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ iii
REMERCIEMENTS v
TABLE DES MATIÈRES vii
LISTE DES FIGURES ix
LISTE DES TABLEAUX xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS xv
1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS 1
1.1 Mise en contexte 1
1.2 Zone d'étude 2
1.3 Problématique 8
1.4 Objectifs et hypothèses 10
1.5 Plan du mémoire 11
2 DÉTECTION DES CHANGEMENTS PAR TÉLÉDÉTECTION 13
2.1 Les méthodes de détection des changements 13
2.2 Avantages et inconvénients des méthodes de détection du changement 22
2.3 Approches retenues 25
3 MÉTHODOLOGIE 27
3.1 Données utilisées 27
3.2 Analyse des 29
4 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS 53
4.1 Évolution temporelle 54
4.2 Évolution spatiale 64
4.3 Les facteurs influençant les changements de l'occupation du sol 69
4.4 Les impacts de changement de l'occupation du sol sur la qualité des eaux de surface 70
4.5 Discussion 74
5 CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL EN AMONT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CÂU 77
6 CONCLUSIONS 85

ANNEXE 1 RAPPORT SUR LE TERRAIN 89
ANNEXE 2 DESCRIPTION DES CLASSES THÉMATIQUES 93
ANNEXE 3 NORME DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE SURFACE 105
LISTE DES RÉFÉRENCES 107

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1- Représentation physiographique du bassin versant de la rivière Câu illustrant ses cinq affluents et les zones montagneuses (en vert). L'encadrer montre sa localisation au nord du Vietnam.....3

Figure 1.2 - Caractéristiques climatiques du bassin versant 5

Figure 1.3 - Les précipitations moyennes mensuelles de six provinces du bassin versant 6

Figure 1.4 - Localisation des régions administratives retenues pour l'étude sur le bassin versant de la rivière Câu. L'encadrer illustre les limites du sous-bassin étudié.....8

Figure 3.1 - Organigramme de la démarche méthodologique.....30

Figure 3.2 - Composition colorée à partir de la bande rouge (3) : a) en amont et b) en aval du bassin versant. Canal rouge : TM (1993), canal vert : ETM+ (1999), canal bleu : ETM+ (2003).....32

Figure 3.3 - Représentation graphique du processus de transformation ACP.....35

Figure 3.4 - Représentation des trois premières composantes principales calculées sur les six bandes spectrales d'un secteur de l'image ETM+ de Landsat 1999.....36

Figure 3.5 - Pseudo-bandes de NDVI d'un secteur de l'imange de a) 1993, b) 1999, c) 2003.....38

Figure 3.6 - Organigramme pour la classification orientée objets dans le logiciel eCognition.....39

Figure 3.7 - Les paramètres de segmentation pour l'image de 1999. 42

Figure 3.8 - Exemple de segmentation pour l'image 1999 42

Figure 3.9 - Description de la classe Milieu urbain 3 pour l'image 2003.....45

Figure 3.10 - Exemple de la matrice de changement codée et colorée pour produire des cartes de changement. 51

Figure 4.1 - Classification de l'occupation du sol pour l'année 1993 55

Figure 4.2 - Classification de l'occupation du sol pour l'année 1999 56

Figure 4.3 - Classification de l'occupation du sol pour l'année 2003 57

Figure 4.4 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour le milieu agricole. 59

Figure 4.5 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour le milieu forestier et arbustif 61

Figure 4.6 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour le milieu urbain 62

Figure 4.7 - Illustration de l'expansion du milieu urbain (niveau densité et niveau spatial) avec la contribution de la classe rizière (des cercles rouges). Composition colorée à partir de bande moyen infrarouge(R), infrarouge (V) et rouge (B) : a) 1993, b) 1999 et c) 2003. 62

Figure 4.8 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour l'eau et le sol nu. 64

Figure 4.9 - Redistribution de classe rizières (de 1993 à 1999) 65

Figure 4.10 - Contribution des différentes classes d'occupation du sol à l'expansion des surfaces urbaines de forte densité entre 1993 et 2003 66

Figure 4.11 - Changement de l'occupation du sol entre 1993 et 1999 67

Figure 4.12 - Changement de l'occupation du sol entre 1999 et 2003 68

Figure 4.13 - Évolution des paramètres de la qualité de l'eau pour la saison sèche de 1995, 1999 et 2003 72

Figure 4.14 - Évolution du paramètre NO^{2-} pour la saison sèche de 1995, 1999 et 2003 73

Figure 5.1 - Localisation et limite des sous-bassins en amont du bassin versant de la rivière Câu. 78

Figure 5.2 - Illustration du mélange de l'occupation du sol : a) terres agricoles, buissons, plantations et habitations; b) habitations et plantations sur les collines..... 79

Figure 5.3 - Trois niveaux différents de la segmentation..... 82

Figure 5.4 - L'occupation du sol des sous-bassins en amont du bassin versant de la rivière Câu. 83

Figure A1.1 - Les secteurs visités et les 20 points d'observation sur le terrain 89

Figure A1.2 - Exemple d'une fiche résumant les informations recueillies au point d'observation No.19 (marqué par un cercle rouge sur la figure A1.1) 91

Figure A2.1 - Photo du milieu humide 1 et ses sites d'entraînement..... 94

Figure A2.2 - Photo du milieu humide 2 et ses sites d'entraînement..... 95

Figure A2.3 - Illustration des sites d'entraînement du milieu sec..... 95

Figure A2.4 - Photo de la classe sol nu et ses sites d'entraînement..... 96

Figure A2.5 - Photo du milieu urbain 1 et ses sites d'entraînement 97

Figure A2.6 - Photo de la classe eau et ses sites d'entraînement..... 98

Figure A2.7 - Photo du milieu urbain 2 et ses sites d'entraînement 99

Figure A2.8 - Photo de la classe rizières et ses sites d'entraînement 100

Figure A2.9 - Photo de la classe buisson, herbages et ses sites d'entraînement 101

Figure A2.10 - Photo de la classe forêt et ses sites d'entraînement 102

Figure A2.11 - Photo du milieu urbain 3 et ses sites d'entraînement 103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système catégorisation de traitement d'images. 14

Tableau 2-2 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système catégorisation de technique et niveau de complexité..... 15

Tableau 2-3 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système de catégorisation de niveau de traitement. 16

Tableau 2-4 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de télédétection du changement. 23

Tableau 3-1 : Images Landsat utilisées dans le cadre de cette recherche..... 28

Tableau 3-2 : Pourcentage de l'information contenu dans chaque composante principale pour les trois images Landsat..... 36

Tableau 3-3 : Classes thématiques appliquées pour la classification 44

Tableau 3-4 : Matrice de changement de l'occupation du sol de 1993 à 1999 49

Tableau 3-5 : Matrice de changement de l'occupation du sol de 1999 à 2003 50

Tableau 4-1 : Le pourcentage de la précision de classification..... 53

Tableau 4-2 : Pourcentage et superficie de l'occupation du sol pour chacune des classes thématiques en 1993, 1999 et 2003..... 58

Tableau 4-3 : Norme A pour six paramètres 72

Tableau 5-1 : Classes thématiques appliquées pour les sous-bassins en amont du bassin versant 80

Tableau A1-1 : Résumé des informations des 20 points d'observation. 90

Tableau A3-1 : Norme de la qualité de l'eau de surface 105

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACDI :	Agence Canadienne de Développement International
ACP :	Analyse en Composantes Principales
APEV :	Agence de Protection de l'Environnement du Viêt-nam
ASTV :	Académie des Sciences et des Technologies du Viêt-nam
BM :	Bande Mondiale
CCT :	Centre Canadien de Télédétection
ETE :	Centre Eau, Terre et Environnement
GIBSI :	Gestion Intégrée des Bassin versants à l'aide d'un Système Informatisé
INRS :	Institut National de la Recherche Scientifique
IWARP :	Institut de la planification de ressources en eau (Viêt-nam)
MRE :	Ministère de Ressources et Environnement du Viêt-nam
MST :	Ministère des Sciences et Technologies du Viêt-nam
NDVI :	*Normalized Difference Vegetation Index*
SIG :	Système d'Information Géographique
VTGEO :	Centre de Télédétection et Géomatique

1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

1.1 Mise en contexte

Le bassin versant de la rivière Câu est un grand bassin versant situé au Nord du Vietnam où le relief et l'utilisation du sol sont complexes. Dans ce secteur, l'agriculture et la sylviculture sont les activités principales. Néanmoins, il existe également des usines importantes, des zones d'exploitation de mines et des villages traditionnels artisanaux qui se concentrent au centre et à l'aval du bassin versant.

Depuis la «politique de réforme» de l'économie au début les années 90, le système d'agriculture et les composantes économiques ont eu de nombreuses transitions, et deviennent de plus en plus multiformes et compliqués. Cette politique a apporté plusieurs avantages pour le développement et a permis d'améliorer rapidement le niveau de revenu de la population locale. Cependant, elle a aussi amené des questionnements sur la dégradation de l'environnement et la qualité de l'eau.

Plusieurs données récentes montrent l'accroissement de la contamination de l'eau de surface, de l'eau souterraine et de l'eau côtière. La contamination de l'eau de surface et de l'eau souterraine devient de plus en plus sérieuse (Ministère de Ressources et Environnement du Vietnam (MRE), Banque Mondiale (BM) et *Danish International Development Assistance* (DANIDA), 2003; MRE, 2005). L'eau est de faible qualité du centre vers l'aval. Tandis qu'en amont, la quantité d'eau, notamment dans les petits cours d'eau s'épuise peu à peu (Académie des Sciences et des Technologies du Vietnam (ASTV) et Ministère des sciences et technologies du Vietnam (MST), 2003; MRE, 2005).

En effet, l'urbanisation, l'explosion démographique, l'accroissement de l'économie et diverses causes anthropiques ont créés une grande pression sur les ressources naturelles en générale, la ressource en eau et l'utilisation des terres en particulier pour ce bassin versant. Le développement a rapidement dépassé la capacité de contrôle des bureaux de planification et d'administration. Dans ce contexte, la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) viennent les appuyer pour suivre ces processus dans leur ensemble. La télédétection

devient un outil particulièrement performant en fournissant des informations spatiales quantitatives pour le suivi des changements d'occupation du sol.

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du projet «Gestion intégrée du bassin versant de la rivière Câu», le projet de coopération entre l'ASTV et l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), financé par l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI).

1.2 Zone d'étude

1.2.1 Localisation géographie et caractéristique naturelle

Le bassin versant de la rivière Câu est situé au nord du Vietnam entre 21,07° et 22,18° de latitude nord et entre 105,28° et 106,08° de longitude est (figure 1.1). Sa superficie totale est de 6030 km^2, 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. Elle prend sa source sur le mont Van On (de la province de Bac Kan) en altitude de 1175m, coule en direction sud et se déverse dans le fleuve Thai Binh à Pha Lai. 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. Ceux-ci drainent environ 51,3 % de la superficie totale du bassin (Nguyen Viet Pho et al, 2001; ASTV et MST, 2003). Le bassin versant de la rivière Câu est constitué de 68 sous-bassins de dimension variables. La densité de drainage est d'environ 0,95 km/km^2.

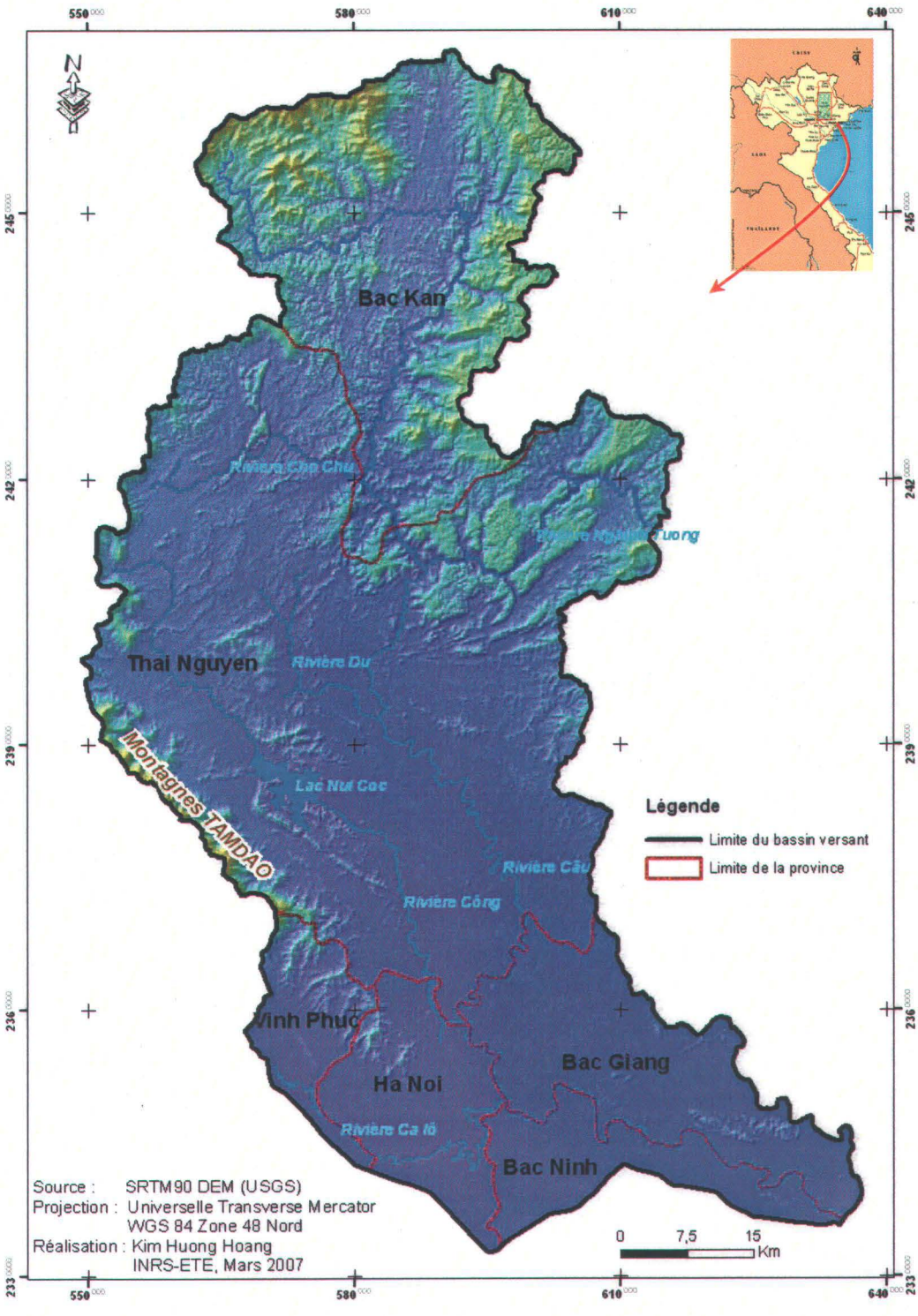


Figure 1.1

Figure 1.1- Représentation physiographique du bassin versant de la rivière Câu illustrant ses cinq affluents et les zones montagneuses (en vert). L'encadrer montre sa localisation au nord du Vietnam.

Le relief de ce bassin versant est complexe. Il va de la région montagneuse, (en vert sur la figure 1.1), à une région au relief modéré, à la plaine. Cependant, les collines et les montagnes représentent la majorité de la superficie du territoire.

À cause de sa position géographique, la zone d'étude est soumise à un climat tropical humide de mousson caractérisé par deux saisons principales: l'hiver (de novembre à mars) froid et sec, et l'été (de mai à octobre) chaud, humide et pluvieux. Alternant avec ces deux saisons, les deux périodes de transition tombent aux mois d'avril et d'octobre. Les caractéristiques climatiques du bassin versant sont présentées à la figure 1.2.

La température est différenciée par l'altitude et les saisons (ASTV et MST, 2003). Au niveau de l'altitude, les températures moyennes annuelles vont de 22,5 ^{o}C à 23,5 ^{o}C dans la plaine (< 100 m). Elles sont d'environ 20 ^{o}C de 100 m à 500 m et varient entre 18^{o}C et 19 ^{o}C à 1000 m. Néanmoins, les saisons amènent un décalage de la température en fonction de l'attitude: en hiver, les températures moyennes annuelles varient de 12 ^{o}C à 13 ^{o}C, et elles sont inférieures à 10 ^{o}C entre 500 m et 1000 m d'altitude. En été, à 100 m d'altitude, la température est souvent de 24 ^{o}C. La température minimum et maximum annuelle peut-être -1 ^{o}C à la province de Bac Kan et d'environ 40 ^{o}C à la province de Bac Giang (Institut de la planification de ressources en eau (IWARP)), 2003; ASTV et MST, 2003. L'humidité de l'air varie de 81 % à 87 % en moyenne annuelle. La figure 1.2 montre que la province de Bac Kan et la région montagneuse de Tam Dao (figure 1.1) sont les secteurs les plus humides.

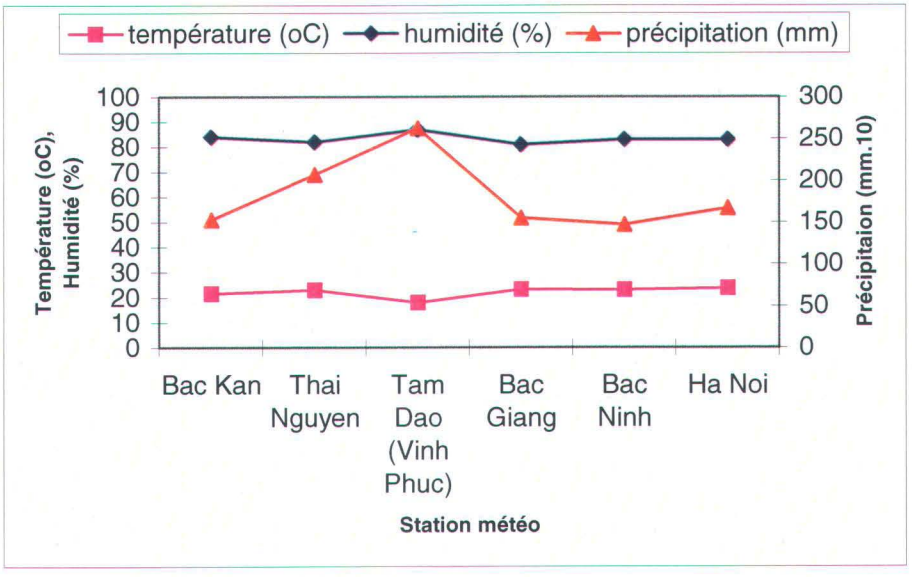


Figure 1.2 - Caractéristiques climatiques du bassin versant (Source: adapté d'IWARP, 2003; ASTV et MST, 2003)

Dans le bassin versant, la précipitation présente une grande fluctuation à cause de la distribution du relief. Les précipitations atteignent de 1500 à 2700 mm annuellement (figure 1.2). Parfois, celles-ci peuvent atteindre la forte intensité de 3000 mm. C'est le cas de la région montagneuse de Tam Dao. Elles varient d'une province à l'autre du bassin, mais en général, les précipitations sont surtout concentrées pendant les mois d'été, notamment aux mois de juillet et d'août (figure 1.3).

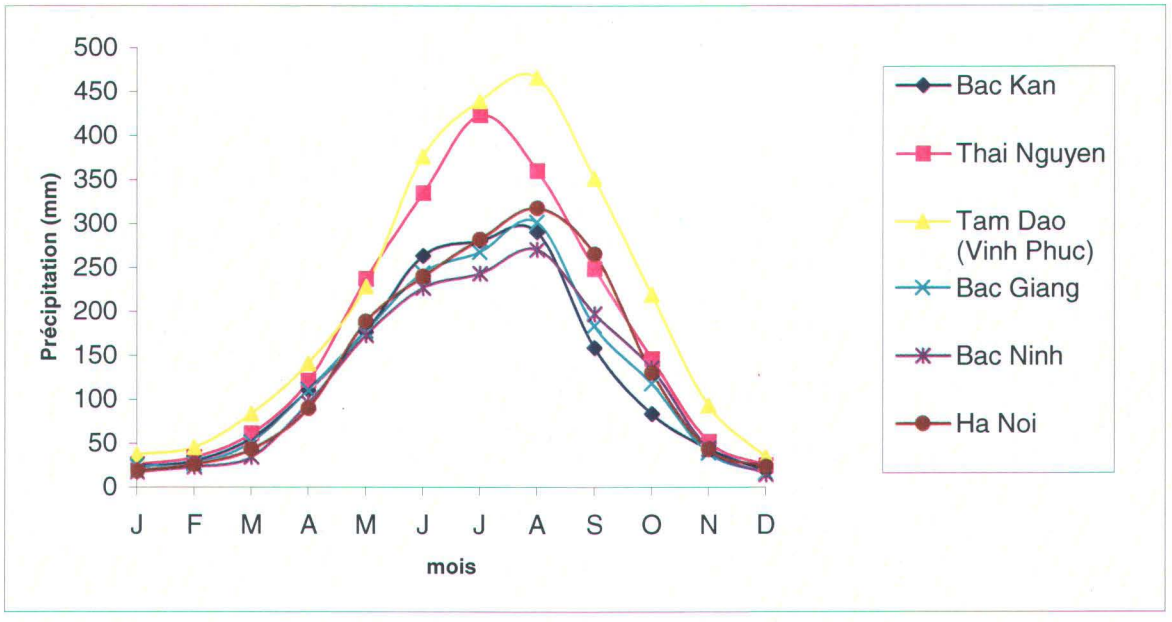


Figure 1.3 - Les précipitations moyennes mensuelles de six provinces du bassin versant (Source : adapté d'IWARP, 2003; ASTV et MST, 2003)

1.2.2 Régime hydrologique

Le bassin versant de la rivière Câu est grand où le réseau hydrographique complexe est de type dendritique. Ce réseau est développé par la rivière Câu. Il y a deux grands sous-bassins, le bassin versant de la rivière Công et celui de la rivière Ca Lô. Ces deux sous-bassins apportent environ 39,3 % du débit total de la rivière Câu. Sur tout le bassin versant, il y a 68 rivières et ruisseaux faisant une longueur totale de 1602 km. Chacune des rivières est d'une longueur d'au moins 9 km.

Le régime hydrologique varie suivant deux saisons : la saison des pluies (la saison d'inondation) et la saison sèche (la saison de faible débit). Le commencement de la saison des pluies est le mois de juin mais elle ne finit pas en même temps, soit en septembre, soit en octobre, sur les différentes régions ou provinces du bassin versant. Elle finit souvent plus tard aux secteurs de la rivière Công et la rivière Du. Durant cette saison (3 ou 4 mois), le débit représente environ de 80 % à 85 % du débit annuel total. Durant la saison sèche, d'octobre à mai (8 à 9 mois), le débit diminue, il ne compte que pour 20 % à 25 % du débit annuel total (Agence de protection de l'environnement du Viêt-nam (APEV); ASTV et MST, 2003).

À cause de l'influence de différentes conditions météorologiques extrêmes (tempête tropicale, basse pression, etc.) et des activités humaines (des coupes intenses de forêt pour le besoin en bois et en terres agricoles (brûlis), etc.), ce bassin versant devient un endroit susceptible de subir des crues importantes.

1.2.3 Sites retenus

Pour développer la méthodologie, un sous bassin versant a été choisi, incluant le territoire entier de deux districts Soc Son (de la province de Hanoi), Yên Phong (de la province de Bac Ninh) et une partie de la ville de Bac Ninh (de la province de Bac Ninh). Ce sous bassin versant est situé à l'aval du bassin versant de la rivière Câu (figure 1.4). Le choix des sites est expliqué en détail au chapitre 3-Méthodologie.

Le district Soc Son se trouve à 40 km au nord de la capitale de Hanoi où la rivière Câu et ses deux tributaires principaux (la rivière Công et la rivière Ca Lô) passent. Il était traditionnellement un district pauvre, l'agriculture étant l'activité principale sur le secteur. Cependant, à l'aide de la stratégie du développement de Hanoi, particulièrement le développement de l'aéroport international et de la zone industrielle Noi Bai, Soc Son devient un district développé depuis quelques années. Le district est dans le processus de transformer une structure de l'économie de type « Agriculture - Industrie - Service » à celui de « Industrie - Service - Agriculture ». Des données récentes (Centre de Télédétection et Géomatique (VTGEO), 2004) révèlent que la proportion de l'agriculture diminue de 25,08 % en 1996 à 19,29 % en 2000.

Bac Ninh et Yên Phong sont deux divisions administratives de la province de Bac Ninh, situé à 31 km au nord-est de Hanoi. On y trouve une région de culture folklorique traditionnelle avec un riche potentiel économique et culturel. Yên Phong est caractérisé par l'activité agricole et l'existence des villages traditionnels artisanaux. La ville de Bac Ninh est toutefois un des points principaux dans le triangle d'accroissement Ha Noi - Hai Phong - Quang Ninh.

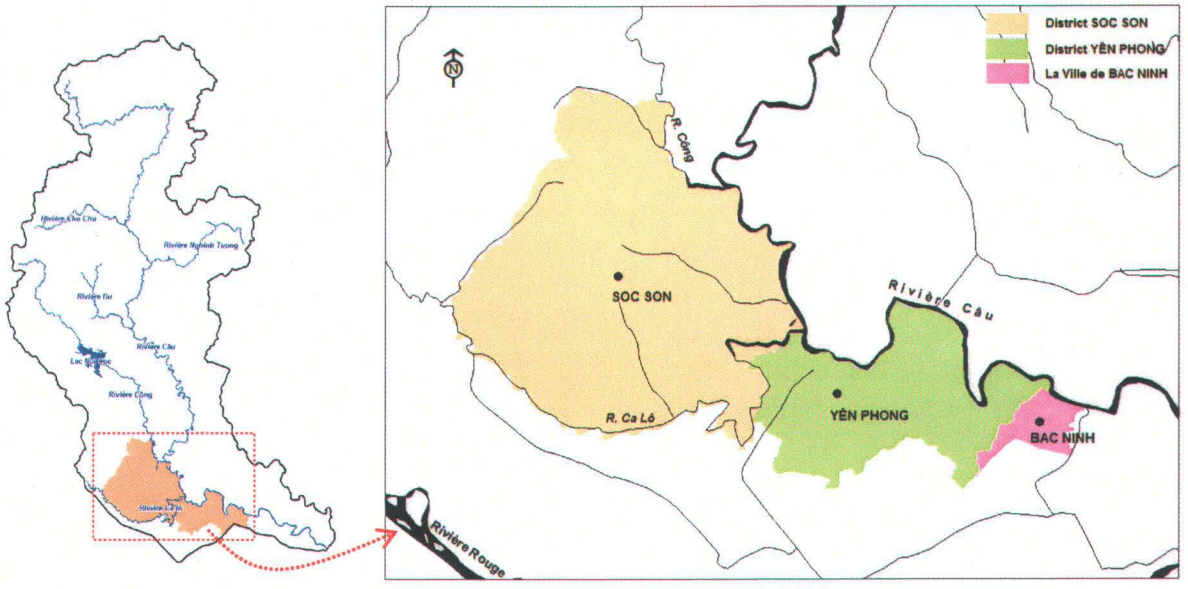


Figure 1.4 - Localisation des régions administratives retenues pour l'étude sur le bassin versant de la rivière Câu. L'encadrer illustre les limites du sous-bassin étudié.

Les caractéristiques générales de ce sous-bassin (figure 1.4) sont le développement rapide de l'économie, l'augmentation démographique, l'apparition des zones industrielles et de nouvelles zones urbaines.

1.3 Problématique

Ce projet de recherche a été établi à partir de l'état actuel de l'environnement du bassin versant de la rivière Câu et le besoin de contrôler les changements d'utilisation du sol intense sur ce secteur, ainsi que les difficultés rencontrées pour suivre ces changements par télédétection. Il s'appuie sur deux problématiques cruciales soient le développement économique et la technique de traitement d'images satellitaires.

Après le renouveau (Doi Moi) du pays en 1986, avec la libéralisation économique et l'ouverture du pays aux marchés internationaux, les modes d'utilisation des terres dans l'espace du bassin versant, particulièrement au niveau des terres agricoles, ont subi de nombreuses transformations. Cette ouverture économique entraîne 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 la rivière et influencent non seulement la qualité de l'eau du bassin versant de la rivière mais encore la qualité de vie et la santé humaine. Dans ce contexte, il est nécessaire 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 l'environnement et la qualité de l'eau du bassin versant. Pour le 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 et seront présentées au chapitre 2. 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, 25 m; ETM+ de Landsat-7, 30m). Le mixage spectral du pixel est une des contraintes que l'on rencontre dans la classification d'images en utilisant la méthode traditionnelle. Ceci rend l'identification des objets plus difficile et donne des résultats moins précis (VTGEO, 2004 et 2005). La précision de l'information extraite de l'image va aussi contribuer à la fiabilité des résultats d'analyse de l'impact de l'occupation du sol sur l'environnement.

Afin de diminuer la confusion à cause des similitudes entre les signatures spectrales de quelques classes thématiques et améliorer la précision globale de la classification, il est donc important de trouver une approche convenable de segmentation des images. Ensuite, c'est la mise en œuvre en choisissant les méthodes et techniques existantes les plus efficaces pour détecter des changements de l'occupation du sol des zones étudiées. En raison de cela, il y a deux questions qui se posent pour le suivi de ces changements:

1. Comment peut-on extraire un maximum d'information depuis des images dont la résolution spatiale est souvent supérieure à la taille des objets changeant dans le temps ?
2. Comment analyser et interpréter ces changements à partir des images diachroniques?

1.4 Objectifs et hypothèses

1.4.1 Objectifs

L'objectif scientifique poursuivi est la détection des changements de l'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Câu entre les années 1993 et 2003 en utilisant la télédétection. Il s'agit donc d'identifier les changements du bassin versant à différentes époques à l'aide de l'interprétation d'images captées par des satellites d'observation de la Terre. De ces analyses, il résultera des images satellitaires transformées en cartes thématiques de l'occupation du sol pour différentes années et ensuite en cartes de changement durant la période observée. Une relation entre le changement et la qualité de l'eau pourrait être établie. Pour y arriver, les trois sous objectifs suivants devront être atteints:

1- Établir une méthode pour détecter le changement de l'occupation du sol à partir des données satellitaires multi-sources et multi-temporelles disponibles.

2- Identifier les causes physiques et anthropiques de changement de l'occupation du sol.

3- Estimer l'impact du changement de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau dans le bassin versant.

En complément, la carte de l'occupation du sol des sous bassins en amont de la rivière Câu a été produite pour l'année 2003. Pour cela, l'image Landsat de 2003 et l'approche de classification développée pour atteindre l'objectif 1 ont été utilisés.

1.4.2 Hypothèses

Hypothèse scientifique de la recherche:

1- La qualité de l'eau de surface est reliée aux types d'occupation du sol du bassin versant. Nous faisons l'hypothèse qu'une relation quantitative pourrait être établie entre chaque type d'occupation du sol et certains paramètres de la qualité de l'eau. Ces sont des paramètres qui concernant l'activité agricole, les quartiers résidentiels, les zones industrielles.

Hypothèse de nature technique:

2- La classification orientée-objet (logiciel *e-Cognition*) permets de mieux classifier l'occupation du sol que l'approche traditionnelle par pixel, tel la classification supervisée par maximum de vraisemblance.

1.5 Plan du mémoire

Le présent mémoire traite de la détection des changements de l'occupation du sol par la méthode de comparaison de classifications diachroniques en utilisant l'approche orientée objets. Trois images de type Landsat ont été utilisées. Il présente également les impacts de ces changements sur la qualité de l'eau de surface d'un bassin versant. Celui-ci est divisé en cinq chapitres.

Le chapitre 1 est l'introduction. Il propose une mise en contexte et fait un survol de la problématique en plus de décrire les objectifs et les hypothèses de la recherche. Ce chapitre donne aussi une description de la région à l'étude. Le chapitre 2 résume les approches de détection des changements par télédétection et l'approche retenue. Le chapitre 3 décrit la méthodologie suivie pour détecter les changements de l'occupation du sol pour une période de dix ans. Le chapitre 4 comprend l'analyse et l'interprétation des changements selon l'évolution temporelle et spatiale à l'aide d'une matrice de changement. Il décrit aussi les facteurs influençant le changement de l'occupation du sol et leur lien avec la qualité de l'eau de surface. Les résultats obtenus y sont aussi discutés. Le chapitre 5 présente la carte de l'occupation du sol des sous-bassins en amont du bassin versant de la rivière Câu. Les conclusions sont présentées au chapitre 6.

2 DÉTECTION DES CHANGEMENTS PAR TÉLÉDÉTECTION

2.1 Les méthodes de détection des changements

La détection de changement est le processus identifiant des différences dans l'état d'un objet, d'une surface et d'un processus en l'observant en des temps différents (Abuelgasim et al., 1999)[1]. Plusieurs méthodes et techniques de détection des changements ont été développées depuis quelques décennies pour identifier des secteurs de changement avec le temps et pour caractériser la dynamique de paysage. Ces méthodes sont présentées dans quelques articles de synthèse comme : Coppin et Bauer (1996), Jensen (1996), Lunetta et Elvidge (1998), Mas (2000), Hall et Hay (2003), Coppin et al. (2004), Blaschke (2004), Desclée et al. (2004), Lu et al (2004) et Walter (2006),

Ces revues nous montrent qu'avec l'évolution des méthodes et des critères de classification forts différents dans le raffinement et la complexité, la façon de catégoriser varie d'un auteur à l'autre. On trouve trois principaux systèmes de catégorisation. Ils sont décrits ci-dessous. Le premier système classifie les principales méthodes de détection des changements en fonction des catégories de traitement d'images. Elles sont décrites par Jensen (1996, 2005), Lunetta et Elvidge (1998), Mas (2000) et sont présentées au tableau 2-1.

[1] Tiré de Singh, 1989

Tableau 2-1 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système catégorisation de traitement d'images.

Catégorie	Sous-catégorie	Technique
Préclassification (accentuation d'image)	Opération ponctuelle	Différence d'images Différence d'indices de végétation Division d'images Analyse par vecteur de changement
	Opération globale + ponctuelle	Régression d'images
	Opération globale	Transformation Tasseled Cap Analyse en composantes principales (ACP)
Classification multidate	Classification multidate directe	Classification non dirigée Classification dirigée Classification visuelle
Post-classification	Comparaison d'images classifiées indépendamment	Classification non dirigée Classification hiérarchique Classification dirigée Classification visuelle
	Images classées/autres sources	Comparaison avec cartes thématiques
Hybride	Combinaison de méthodes	
Autres approches	Systèmes-experts	

(Tiré de Mas, 2000, de Lunetta and Elvidge, 1998 et de Jensen, 1996)

Le second système groupe et catégorise les méthodes de détection des changements non seulement en six catégories principales de technique mais encore selon leur niveau de complexité (du niveau plus simple -1 au niveau plus complexe-5). Le tableau 2-2 illustre les catégories du second système (Lu et al, 2004).

Tableau 2-2 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système catégorisation de technique et niveau de complexité.

Catégorie	Technique	Niveau de complexité
Catégorie 1 : Algèbre	1. Différence d'images	1
	2. Régression d'images	1
	3. Division d'images	1
	4. Différence d'indices de végétation	1
	5. Analyse par vecteur de changement	3
	6. Soustraction de fond (*Background subtraction*)	1
Catégorie 2 : Transformation	7. Analyse en composantes principales	2
	8. Tasseled Cap	2
	9. Gramm-Schmidt	3
	10. Chi-square	3
Catégorie 3 : Classification	11. Post-classification	2
	12. Analyse combinée spectral-temporelle	3
	13. *Expectation-maximization (EM) detection*	3
	14. Détection de changement non dirigée	3
	15. Hybride	3
	16. Réseaux neuronaux artificiels (*artificial neural network- ANN)*	5
Catégorie 4 : Modèles avancées	17. Modèle de réflectivité de Li-Strahler	5
	18. Modèle des mélanges spectraux	5
	19. Méthode de paramètre biophysique	5
Catégorie 5 : SIG	20. Méthode d'intégration du SIG et de la télédétection	4
	21. Approche SIG	4
Catégorie 6: Analyse visuelle	22. Interprétation visuelle	1
Catégorie 7: Autres techniques	23. Mesure de la dépendance spatiale	
	24. Système basé sur la connaissance de vision	
	25. Méthode de production du secteur	
	26. Combinaison de trois indicateurs : l'indice de végétation, la température de surface de terre et la structure spatiale	
	27. Changement des courbes	
	28. Modèles linéaires généralisés	
	29. Approche basée-courbe-théorème	
	30. Approche basée-structure	
	31. Méthode basée-statistique spatiale	

(Tiré de Lu et al, 2004)

Le troisième système catégorise ces méthodes en trois niveaux de techniques de traitement : interprétation visuelle, les méthodes basées-pixel et les approches basées-objet (Desclée et al, 2006). En considération du système de catégorisation de Deer (1998), un résumé des méthodes en trois grands niveaux (tableau 2-3): *pixel*, *élément* et *objet* a été fourni par Hall et Hay (2003). Le niveau de *pixel* se rapporte aux valeurs numériques de chaque bande d'image, aux calculs simples entre les bandes correspondantes comme la différence ou le ratio d'image. Le niveau d'*élément* est un niveau avancé du traitement, qui implique de transformer les propriétés spectrales ou spatiales de l'image (l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse de texture, ou l'indice de végétation). L'objet est le niveau le plus avancé du traitement.

Tableau 2-3 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système de catégorisation de niveau de traitement.

Niveaux	Méthodes
Pixel	Analyse par vecteur de changement Analyse d'*endmember* Différence d'images Division d'images Régression d'images
Élément	Texture locale Analyse en composantes principales Analyse de forme Indice de végétation Ondelettes
Objet	Intelligence artificielle Réseaux neuronaux artificiels Classification directe de multi-temporelle Système expert Comparaison post-classification (logique floue) Comparaison post-classificatoire

(Modifié de Hall et Hay, 2003)

La description des méthodes selon la première catégorisation et quelques nouvelles méthodes de la deuxième catégorisation sont décrites ci-dessous.

2.1.1 Méthodes pré-classificatoires

La plupart des méthodes de détection de changement appartiennent à cette catégorie (tableau 2-1). Elles se basent sur les changements radiométriques entre deux images prises à des dates différentes. Afin que le processus d'extraction de l'information sur les changements devienne plus facile et plus efficace, les données diachroniques sont transformées en une nouvelle image. La distribution des valeurs radiométriques des pixels sur l'histogramme de cette image nous permet de trouver les pixels changés ou non changés. D'autre part, la nouvelle image peut être interprétée ou analysée soit visuellement soit numériquement pour extraire l'information sur les changements. La technique d'analyse numérique la plus utilisée à cette fin est celle du seuillage. Enfin, la carte des changements est établie par une classification. Selon Lunetta et Elvidge (1998) et Mas (2000), les méthodes dans cette catégorie, se divisent en général en deux types d'opération pour produire la nouvelle image de changements : les opérations ponctuelles (au niveau pixel à pixel) et les opérations globales (au niveau de toute l'image).

Les méthodes décrites ici-bas sont basées sur des opérations ponctuelles dont la différence d'images, la différence d'indices de végétation, la division d'images, et l'analyse par vecteur de changement. Elles font aussi appel à des méthodes algébriques :

- La différence d'image est une des méthodes les plus utilisées pour détecter des changements. Elle implique de soustraire les valeurs d'une image donnée à celles d'une deuxième image qui a été superposée à la première afin de produire une nouvelle image de changement où les valeurs positives et négatives représentent des pixels changés tandis que les valeurs zéros indiquent des pixels non changés. Généralement, cette méthode utilise une seule bande spectrale. Dans le cas où plusieurs bandes sont utilisées, elles sont soustraites deux par deux pour produire plusieurs bandes résiduelles qui sont analysées séparément (Nelson, 1983) ou bien une seule bande de sortie est créée et reçoit la valeur de la somme des différences radiométriques calculées pour chaque bande spectrale (Mas, 2000). Quelles seront les bandes utilisées? Celles-ci sont déterminées par la nature du changement que l'on veut mettre en valeur et dépendent de la zone d'étude. Par exemple, dans une étude sur la détection de la défoliation forestière, Nelson (1983) trouve qu'une différence de ratio MSS7/MSS5 donne de meilleurs résultats qu'avec les bandes spectrales originelles (Lu et

al, 2004). Par contre, Chavez et Mackinnon (1994) détectent mieux les changements de végétation en milieu aride et semi-aride en utilisant la bande visible rouge (Mas, 2000). Cependant, il y a quelques limites dans cette méthode: la difficulté de l'identification de la nature du changement, le seuil requis pour distinguer les pixels changés et non changés ainsi que la grande sensibilité à la qualité de la superposition des images.

- En divisant pixel à pixel deux images prises à deux dates différentes, la méthode de la division d'image va donner une image de changement qui représente le rapport de la luminance des objets. Dans les zones non changées, ces rapports sont de 1, alors que celles où il y a des changements présentent des valeurs soient supérieures soient inférieures à 1. Cette méthode a les mêmes limites que la différence d'images.
- L'analyse par vecteur de changement est une technique qui se base sur les variations radiométriques dans l'espace de x variables spectrales qui constituent un vecteur de changement. Lunetta et Elvidge (1998) ont défini le vecteur de changement comme la différence de vecteur entre le temps-trajectoire successive, représentée comme un vecteur dans l'espace multidimensionnel de mesure. L'amplitude de ce vecteur indique l'importance du changement et sa direction contient des informations sur le type de changement. Malgré le fait qu'elle donne la nature du changement, cette méthode a aussi ses limites soient : la sensibilité au défaut géométrique, la sensibilité à l'existence des pixels mélangés et la sensibilité à la différence radiométrique entre les images d'entrée (Lunetta et Elvidge, 1998). L'analyse des vecteurs de changement pour déterminer le type de changement est complexe car les vecteurs sont très nombreux (Mas, 2000).

Quant aux méthodes basées sur des opérations globales, elles incluent des méthodes comme la régression d'image, l'analyse en composantes principales et la transformation de Tasseled Cap :

- La régression d'image est une des méthodes pour différencier le changement à partir du non-changement. Cette méthode emploie une image comme variable explicative pour la deuxième image. C'est-à-dire que si on a deux images à deux dates différentes, on suppose que la majeure partie de la première image (date 1) est inchangée et les valeurs radiométriques de cette image sont une fonction linéaire des valeurs des pixels de la deuxième image (date 2). Une régression des moindres carrés est employée pour déterminer la fonction linéaire entre les valeurs de l'image de la date 1 et de l'image de la

date 2. Cette régression linéaire donne une nouvelle image – l'image déduite de la fonction de régression (I_r). L'image de différence (qui contient l'information sur les changements) est déterminée entre l'image I_r et la véritable image (date 1) en utilisant la technique de différence d'images ou celle de division d'images. Par l'utilisation de la technique de régression, les effets défavorables de diverses conditions atmosphériques et/ou angles du soleil sont réduits (Coppin et al, 2004; Colwell, 1983).

- L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique pour identifier la structure entre les variables et une technique pour réduire la dimensionnalité des données. Pour la détection de changement, l'ACP identifie la structure entre les images multi-temporelle multi-spectrales. La première composante principale correspond aux pixels qui ne démontrent pas de changement, tandis que la deuxième composante (ou plusieurs des dernières composantes) identifie les pixels changés. Selon Lunetta et Elvidge (1998), l'ACP est efficace pour la comparaison globale des données multi-temporelles et peu sensible aux problèmes de superposition des images.
- Comme l'ACP, la transformation de Tasseled Cap est une technique linéaire de transformation de données qui permet d'obtenir de nouvelles bandes (indices) correspondant à la luminance du sol, à la verdure et à l'humidité. Ces bandes sont ensuite soustraites pour produire des images de changement. Cette méthode est particulièrement utile pour indiquer les changements de la couverture forestière (Coppin et Bauer, 1996; Mas, 2000; Lea et al, 2004).

2.1.2 Méthodes de classification multi-temporelle

Ces méthodes se basent sur la classification, visuelle ou numérique, d'une image en réunissant les données de plusieurs dates.

En ce qui concerne la classification visuelle, elle consiste à fournir des compositions colorées à partir de la même bande spectrale d'images prises à des dates différentes. Les changements sont reconnus par l'apparition de couleurs différentes. C'est-à-dire que les pixels où les zones ont changé apparaissent en couleur tandis que ceux non changés sont présentés en ton de gris. Il y a deux avantages à cette méthode. Premièrement, la capacité de regarder deux, même trois images (dates) de télédétection en même temps. Deuxièmement, le fait que les compositions multi-

temporelles peuvent être établies à partir de canaux obtenus pas des opérations arithmétiques entre bandes spectrales. Cependant, il y a quelques problèmes rencontrés en utilisant cette méthode : il n'y a pas de patron d'interprétation bien défini et elle ne fournit pas d'information quantitative sur la nature des changements.

Le rassemblement des pixels en classes qui contiennent les objets recherchés est le but des méthodes de classification numérique. Celles-ci se basent sur la similitude radiométrique pour trouver et puis regrouper les objets dont les caractéristiques radiométriques sont les mêmes dans le temps. Il y a plusieurs types de classifications numériques, on décrira ici deux types communs : la classification dirigée et la classification non dirigée. La classification dirigée suppose que l'on connaît la localisation de certaines zones d'entraînement dans l'image et les classes objets correspondants à l'aide de travaux sur le terrain, l'interprétation les photos aériennes, l'analyse les cartes et l'expérience d'analyste. L'entraînement est une étape importante par rapport à ce type de classification. Son but vise à définir les propriétés des signatures spectrales de chacune des classes thématiques au moyen d'échantillons de l'image de classes connues (Bénié, 2004). C'est pourquoi, elle joue un rôle principal dans la recherche des objets identiques et affecte directement le résultat de la classification. Cette étape différencie la classification dirigée de la classification non dirigée. Contrairement à la classification dirigée, dans la classification non dirigée, les objets sont regroupés par proximité de leurs signatures spectrales, et on vérifie par la suite à quoi ils correspondants dans l'image. L'analyste peut ne rien savoir de la nature des subdivisions ou des classes qui en résultent (Bonn et Rochon, 1992). La classification non dirigée, en fait, se fait par utilisation d'un critère de performance ou bien par seuillage d'histogramme (Bénié, 2004).

En général, avec les méthodes de classification multi-temporelle, l'entraînement ou l'identification des classes sont compliqués et elles donnent des résultats médiocres (Mas, 2000).

2.1.3 Méthodes post-classificatoires (comparaison des classifications)

Ces méthodes sont basées sur la classification de deux scènes de différentes dates évaluées sur une base de pixel-par-pixel et rapportées par un tableau de statistique faisant appel à une *matrice de changement*. L'exactitude de la détection de changement dépend de la précision de chacune

des classifications et de la superposition des images. Ces méthodes ont tendance à surestimer la quantité de changements et donnent des résultats médiocres (Mas, 2000). Cependant, à cause de leur simplicité et parce qu'elles rendent compte de la nature des changements, ces méthodes sont couramment employées dans de nombreuses études, surtout pour détecter les changements de l'occupation du sol. Pour obtenir de meilleurs résultats et limiter les erreurs, certains auteurs combinent une méthode de comparaison de classification à une autre méthode. Par exemple, l'analyse de texture, la différence d'image, l'analyse par vecteur de changement ou la logique floue. Ces dernières années, on utilise souvent la classification orientée objets pour classifier des images. Au lieu d'analyser des pixels indépendamment de leur endroit, des pixels contigus semblables sont groupés en objets en regardant certains facteurs comme : l'information voisine, l'échelle, l'endroit et la distance. L'intérêt de cette méthode est qu'elle vient améliorer les techniques de segmentation d'images, qui permettent de diviser une image satellite en régions continues et homogènes faisant appel à des objets.

2.1.4 Autres méthodes

- Grâce à sa flexibilité, la méthode hybride de détection de changement combinant des aspects de changement de seuil et de classification d'images a montré un potentiel élevé pour identifier des secteurs de changement (Prenzel et Treitz, 2004; Lunetta et Elvidge, 1998). En réalité, cette combinaison permet de réduire l'erreur inhérente à l'analyse thématique de changement d'une image typique.
- L'application de la méthode des réseaux neuronaux artificiels (*artificial neural network-ANN*) a gagné une attention considérable comme une alternative aux approches conventionnelles. Cette méthode se base aussi sur des images classifiées. Elle a été employée dans divers études de détection des changements comme : le changement de l'occupation du sol (Abuelgasim et al, 1999), de l'urbain (Liu et Lathrop, 2002) et de la couverture de la forêt (Hese et Schmullius, 2003). Selon ces auteurs, l'exactitude de la classification obtenue par l'approche ANN est meilleure que celles des autres approches (K-moyen ou maximum de vraisemblance). En fait, elle est capable d'intégrer des données multi-sources de capteurs et le contenu complémentaire de l'information dans un procédé de classification (par exemple l'information se base sur l'objet, l'analyse de texture et l'information spectrale).

- Systèmes experts à base de connaissances et intelligence artificielle (*Knowledge-based expert system or artificial intelligence)*: cette méthode permet d'intégrer non seulement l'information spectrale du changement mais les autres caractéristiques des objets. De ce fait, elle permet de surmonter certaines des limitations des classificateurs statistiques.
- Les méthodes basées sur système d'informatique géographique (SIG) inclus l'intégration de SIG et la télédétection et le pur SIG. Cette méthode permet de superposer directement les différentes sources de données en détectant les changements: des données du SIG sur l'image ou seulement des diverses données actuelles et passées du SIG (carte de l'utilisation des terres, carte topographie, etc.). Elle permet aussi de transférer les images traitées dans un système de base de données SIG. La plupart des applications de cette méthode se concentrent sur le changement de la zone urbaine vu qu'elle donne de meilleurs résultats que les méthodes traditionnelles par rapport à la complexité du paysage urbain (Lu et al, 2004).

2.2 Avantages et inconvénients des méthodes de détection du changement

Malgré qu'elles soient catégorisées ou nommées par des noms différents, les méthodes de détection de changement se basent sur l'hypothèse que les changements d'occupation du sol se traduisent en des variations de la radiance et que ces variations sont importantes en comparaison de celles causées par d'autres facteurs concernant l'environnement (conditions atmosphériques, inclinaison solaire, humidité du sol ou état phénologique de la végétation) (Mas, 2000). Ainsi, la sélection des périodes des images devient une étape importante. Il faut choisir des scènes prises lors de périodes où la variabilité spectrale entre les différentes cultures et les autres couverts est grande (Savary et al, 2005). Afin d'éviter des variations de radiance dues à la différence du calendrier agricole, on doit nécessairement prendre des images prises à la même date (où même saison) pour une étude de détection des changements d'occupation du sol.

Colwell (1983) et Jensen (1996) ont aussi montré que les méthodes de détection numérique de changement subissent l'influence des caractéristiques des capteurs (temporelles, spatiales, spectrales et radiométriques). D'autre part, les études de Collin et Woodcock (1996), Ridd et Liu (1998) et Civco (2002), constatent que dans le même environnement, différentes approches peuvent donner des cartes de changement différentes. Ils ont prouvé que la méthode mise en

œuvre peut affecter profondément les évaluations qualitatives et quantitatives du changement. Le choix de la méthode appropriée prend donc une importance considérable. Il faut bien connaître les avantages et les inconvénients de chacune, lesquels sont présentés au tableau 2-4. Ces facteurs permettent de choisir la méthode la plus appropriée pour un traitement d'images spécifique afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

Tableau 2-4 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de télédétection du changement.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Différence	Simplicité de mise en œuvre	Sensibilité à la qualité des corrections géométrique et radiométrique. Analyse délicate de l'image accentuée. Pas d'information sur la nature du changement.
Ratio	Réduction les impacts de l'angle du soleil, de l'ombre et de la topographie	Distribution non-normale du résultat souvent critiquée.
Vecteur de changement	Capacité de traiter tout nombre de bandes spectrales désirées. Information sur la nature du changement.	Sensibilité à la qualité des corrections géométrique et radiométrique. Complexité des données. Difficulté à identifier les changements trajectoires de l'occupation du sol.
Régression	Moindre sensibilité à la correction radiométrique. Réduction des impacts du capteur et des différences environnementales entre deux images acquises à deux périodes différentes de l'année.	Sensibilité à la qualité de la superposition des images. Pas d'information sur la nature du changement.
ACP	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images.	Interprétation difficile des composantes. Pas d'information sur la nature du changement.

ACP sélective	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images.	Pas d'information sur la nature du changement.
Classification multi-temporelle visuelle	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images. Avantages de l'interprétation visuelle.	Information sur la nature du changement difficile à extraire.
Classification multi-temporelle numérique	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images. Possibilité d'identifier la nature du changement.	Complexité de la phase d'apprentissage (classification dirigée) ou de l'identification *a posteriori* des classes spectrales (classification non dirigée).
Comparaison post classificatoire	Correction radiométrique non nécessaire. Identification de la nature du changement. Possibilité d'intégrer des données de nature différente.	Grande sensibilité à la qualité des classifications utilisées. Grande quantité d'heures et d'expertise à créer des classifications.
Autres méthodes		
Hybride	Exclusion des pixels non-changés de la classification afin de réduire les erreurs de classification.	Choix des seuils à classifier. Complexité à identifier le changement trajectoire.
Réseaux neuronaux artificiels (*artificial neural network* - ANN)	Capacité d'estimer les propriétés des données se basant sur des échantillons d'entraînement.	Longue période d'entraînement. Sensibilité à la quantité des données d'entraînement utilisées. Les fonctions d'ANN ne sont pas toujours disponibles dans les logiciels de traitement d'images commerciaux.

SIG (Système d'informatique géographique)	Support au processus d'interprétation et d'analyse. Capacité de mettre à jour directement l'information de l'utilisation des terres dans le SIG. Intégration de photos aériennes de l'utilisation des terres récentes et anciennes et d'autres données cartographiques.	Sensibilité à la qualité des différentes sources de données utilisées. Sensibilité à l'exactitude de la géométrique des données SIG et du système de classification utilisé.

(Tiré et modifié de Mas, 2000 et Lu et al, 2004)

2.3 Approches retenues

La méthode retenue est la comparaison de classifications en utilisant l'approche orientée objets à partir de pseudo-bandes spectrales. Elles consistent en des bandes issues de l'analyse en composantes principales (ACP) et de l'indice de végétation (NDVI).

Afin de supporter le processus de segmentation pour obtenir un meilleur résultat de classification, une analyse en composantes principales et un calcul de l'indice de végétation seront appliqués à chacune des images. Selon Caloz et Collet (2001), les trois premières composantes d'une transformation en composantes principales appliquée sur une image du capteur TM de Landsat contiennent 96 % à 99 % des informations présentes dans les six bandes originales. Passé le cap de la troisième composante principale, le bruit de l'ensemble des bandes spectrales (lignage, parasites) se concentre de manière croissante dans les composantes suivantes. Dans les trois premières composantes, les zones d'un même thème sont donc plus homogènes. Celles-ci et une bande de l'indice de végétation seront utilisées dans la phase de segmentation de l'image à l'aide du logiciel e-Cognition. L'analyse des images classées va permettre de déterminer la nature du changement de l'occupation du sol.

Pourquoi la comparaison des classifications en utilisant la classification orientée objets? En effet, la méthode de la comparaison des classifications est souvent utilisée en télédétection du changement grâce à ses avantages (voir le tableau 2-4) et sa simplicité. Cependant, sa précision dépend de la qualité de chacune des images classifiées. Elle pourrait donner un mauvais résultat à cause de la confusion à la procédure de la classification, particulièrement par rapport aux données images satellitaires généralement disponible de 25m. En raison de cela, l'approche

orientée objets est choisie. Grâce aux améliorations des techniques de segmentation d'images, cette méthode divise une image en régions ou entités homogènes. Elle tient compte non seulement des caractéristiques spectrales des pixels mais également des notions de formes, textures et voisinages. Celle-ci permet de diminuer les confusions, de mieux distinguer les objets dans les zones caractérisées par une intercalation de type côte à côte des différents types d'état de surface, comme c'est le cas dans la zone d'étude et d'obtenir un meilleur résultat.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Données utilisées

Le but scientifique de cette recherche est d'analyser et de comprendre les changements de l'occupation du sol sur un sous-bassin versant du bassin versant de la rivière Câu. Autrement dit, on retrace l'évolution de l'occupation du sol pour une période de dix ans. En raison de cela, il est d'abord nécessaire de présenter des données et des outils qui permettent l'atteinte de cet objectif.

3.1.1 Images satellitaires

Dans une étude de détection des changements, la sélection des images satellitaires est une étape cruciale pour éviter des erreurs physiques.

Le premier critère temporel à considérer est le mois d'acquisition des images. Cela est particulièrement important par rapport à un territoire où l'agriculture est l'activité principale. Jensen (1996) a suggéré d'utiliser des images acquises dans le même période de l'année pour la détection des changements et ce, afin de réduire les problèmes dus aux différences angles d'ensoleillement, aux changements phénologiques de la végétation et aux différences dans l'humidité des sols.

Deuxièmement, la scène que l'on choisit doit être de bonne qualité radiométrique, la couverture nuageuse doit être minimale et bien sûr elle doit couvrir en totalité la superficie du bassin versant. Enfin, le but et le contexte de la recherche contribuent aussi au choix des images.

Pour le cas du bassin versant de la rivière Câu, parmi les images disponibles (étant peu nombreuses) des trois capteurs TM, ETM+ et ASTER, celles de TM et ETM+ de Landsat ont été sélectionnées car ces deux capteurs couvrent deux décennies et leur résolution spatiale est identique en mode multi-spectrale. Nous avons choisi les images des années 1993, 1999 et 2003 (tableau 3-1) qui respectent assez bien les critères mentionnés plus haut.

Tableau 3-1 : Images Landsat utilisées dans le cadre de cette recherche.

Satellite et Capteur	Date d'acquisition	Résolution spatiale(m)	Bandes utilisées
Landsat-5 TM	27 décembre 1993	28,5	Bleu (0.45μm - 0.52μm) Vert (0.52μm - 0.60μm) Rouge (0.63μm - 0.69μm) Infrarouge (0.76μm - 0.90μm) Infrarouge moyen (1.55μm-1.75μm)
Landsat-7 ETM+	20 décembre 1999	30	
Landsat-7 ETM+	13 janvier 2003	30	Infrarouge moyen (2.08μm-2.35μm)

3.1.2 Autres données

Parmi les autres données disponibles qui peuvent être mises à profit, nous retrouvons des cartes topographiques, des cartes d'occupation du sol et des relevés de terrain.

Lors du processus de la classification, les vecteurs numériques de la topographie et de l'occupation du sol ont été utilisés. Ce sont des données à l'échelle du 1 : 50 000 (2004) couvrant l'ensemble du bassin versant et du 1 : 5 000 (2004) de district Soc Son, et du 1 : 100 000 (1997) de tout le pays.

Par ailleurs, des régions du bassin ont été visitées à Soc Son en août 2006, à Bac Ninh et Yen Phong en juillet 2006. Des points d'observation ont été photographiés afin d'avoir plus d'informations (notamment sur les classes du milieu urbain et des zones industrielles) sur l'occupation du sol du territoire (annexe 1). Ces informations collectées sur le terrain et les cartes d'occupation du sol de la province d'Hanoi (1993, 1995, 2003) et de la région montagneuse Tam Dao (2003) du VTGEO servent à choisir les échantillons pour les classifications ainsi que pour leur validation d'exactitude.

3.2 Analyse des images

L'analyse des images comprend six étapes qui sont représentées à la figure 3.1, soient : l'acquisition et le prétraitement des données (choix des sites étudiés et préparation des données pour les étapes suivants), la correction géométrique, l'analyse en composantes principales (ACP) et le calcul de l'indice de végétation (NDVI), la classification orientée objets et sa validation, la détection des changements et l'analyse des résultats. Chacune de ces étapes est décrite dans cette section, sauf la dernière, analyse et interprétation des résultats, qui sera présentée au chapitre 4.

3.2.1 Choix des sites étudiés et prétraitements des données

Afin de mettre en œuvre l'approche choisie qui permet de mieux séparer les objets par rapport à la classification des images satellitaires de moyenne résolution, le choix des sites étude s'est porté sur un sous-bassin versant sur lequel existe un morcelé des modes d'occupation des sols et des pratiques agricoles depuis une dizaine d'années période pour laquelle une série d'images est disponible.

Pour ce fait, une interprétation visuelle des changements de tout le bassin versant a été effectuée sur des compositions colorées à partir de la même bande spectrale d'images prises à deux dates différentes. Cette approche est aussi une des méthodes de détection du changement (Mas, 2000; Jensen, 1996) et elle a été décrite à la section 2.1.2 du chapitre 2.

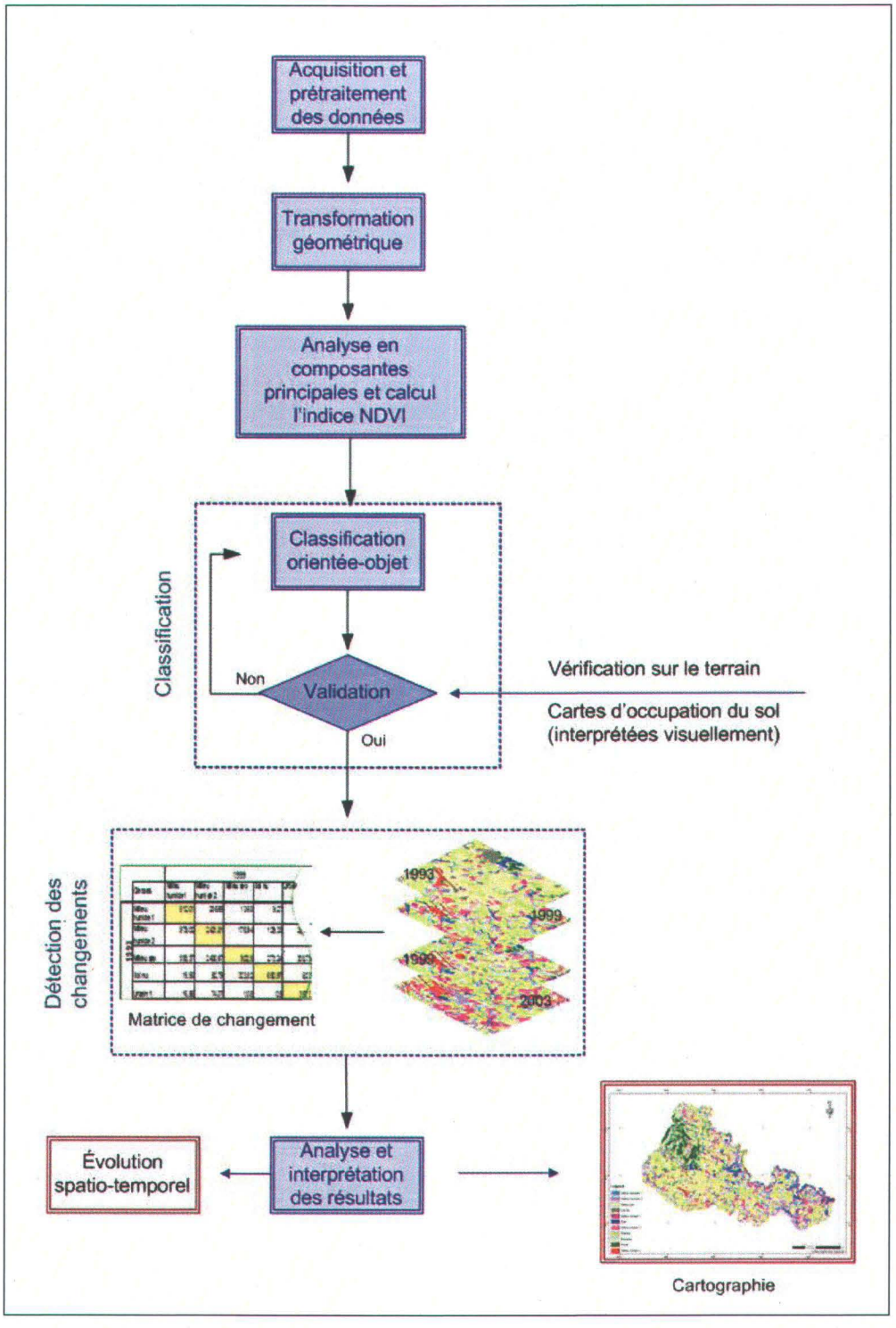


Figure 3.1 - Organigramme de la démarche méthodologique

Parmi les bandes spectrales des trois images Landsat (tableau 3-1), la bande rouge (0.63µm - 0.69µm) a été utilisée vu qu'elle discrimine bien entre les espèces de plantes à feuilles ou sans

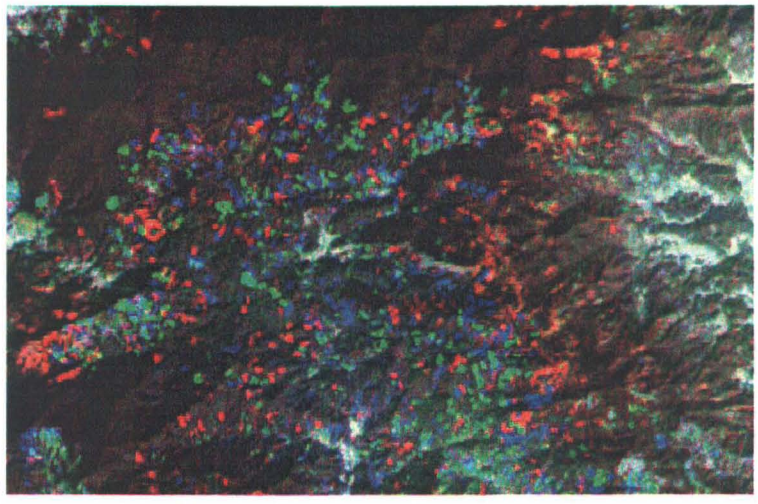
feuille, des traits culturels et urbains. De cette façon, un portrait général du changement de l'occupation du sol du bassin versant de l'amont vers l'aval est obtenu :

- *En amont et au centre du bassin versant (incluant la province de Bac Kan et de Thai Nguyen):* il n'y a pas eu beaucoup de changement. Dans la région montagneuse, le changement principal est que les zones boisées (ouvertes ou peu denses) sont devenues des terres agricoles (brûlis), des sols nus ou des buissons (figure 3.2a). Dans la vallée, les plantations (de bambou, d'acacia, d'eucalyptus) ainsi que les terres agricoles sont devenues des terres en friche (sols nus) ou bien des zones urbaines.

- *En aval du bassin versant (incluant la province de Vinh Phuc, de Bac Giang, de Bac Ninh et Hanoi) :* des changements ont eu lieu un peu partout (figure 3.2b). Notamment, en milieu urbain, les zones de faible densité (les villages, incluant des jardins) sont devenues des zones de forte densité. Par ailleurs, les surfaces d'eau augmentent de 1993 à 2003, notamment en 1999. Durant cette période, suite à la construction de digues, il y a l'apparition des nouveaux petits lacs pour l'irrigation. Le changement en aval est plus complexe que celui en amont du bassin versant.

À partir de cette estimation, nous avons choisi le sous bassin versant situé en aval du bassin versant de la rivière Câu, incluant le territoire entier de deux districts (Soc Son de Hanoi et Yên Phong de Bac Ninh) et celui partiel de la ville de Bac Ninh (figure 1.4). Ces derniers sont décrits au chapitre 1.

a)



b)

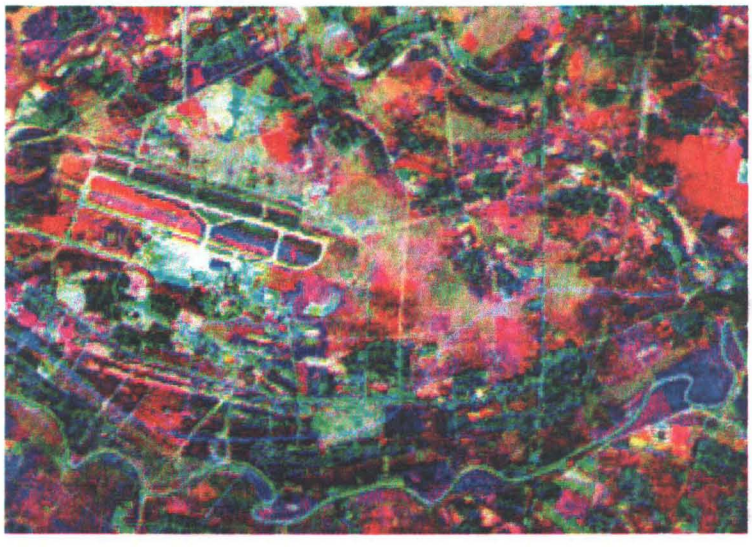


Figure 3.2 - Composition colorée à partir de la bande rouge (3) : a) en amont et b) en aval du bassin versant. Canal rouge : TM (1993), canal vert : ETM+ (1999), canal bleu : ETM+ (2003)

3.2.2 Transformation géométrique

Les facteurs comme l'effet de perspective de l'optique du capteur, le mouvement du système de balayage, le mouvement et la stabilité de la plate-forme (l'attitude, la vitesse et le comportement), le relief à la surface, et la courbure de la Terre et sa rotation causent des distorsions géométriques (Caloz et Collet, 2001) aux images acquises par satellite. La transformation géométrique permet de corriger les distorsions et de rendre la fidélité des images et d'obtenir une projection cartographique. Pour notre étude de détection des changements, la correction géométrique est une étape très importante. En effet, la précision de la rectification géométrique va influencer la précision du changement, notamment dans l'analyse de la

comparaison des classifications parce que cette analyse est exécutée sur une base de pixel-par-pixel.

Entre les deux principales méthodes de transformation géométrique, la méthode de transformation globale par polynôme du premier degré avec un ré-échantillonnage du plus proche voisin a été choisie. La transformation polynomiale se base sur les principes des transformations de système de référence spatiale à l'aide des équations linéaires. Pour ce faire, le système S' de l'image initiale (non géoréférencé) exprimé en unité de pixels (mesuré en lignes et colonnes), est transformé à un autre système S géoréférencé (mesuré en degré de longitude et latitude, ou en mètre) dont les axes de coordonnées correspondent à ceux de la cartographie locale (Caloz et Collet, 2001). Dans ce cas-ci, le système de coordonnées géographiques de référence utilisée est la projection Universelle Transverse Mercator (UTM), zone 48 Nord, le *datum* de référence est le WGS 84. La précision de cette transformation est déterminée par la moyenne quadratique (RMS) des erreurs.

Quant au processus de correction géométrique pour une étude de détection des changements, Jensen (1996) a recommandé d'utiliser une approche hybride : corriger une image initiale à partir des informations cartographiques, ensuite l'utiliser pour corriger les autres images. En examinant les images, on constate que l'image de 2003 a déjà été corrigée selon le système de projection UTM. En raison de cela, 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.

Bien que plusieurs auteurs aient proposé qu'une précision géométrique de moins de 0,2 pixel soit nécessaire pour obtenir 90 % de vrais changements (Verbyla et Boles, 2000). Lunetta et Elvidge (1998) ont aussi indiqué que le RMS entre deux dates ne devrait pas excéder 0,5 pixel. La moyenne quadratique des erreurs que l'on a obtenue est de 0,41/0,35 pixel à cause du manque de points d'appui en amont du bassin de la rivière Câu où se trouve rarement des points appropriés pour la géo-référence mais aussi moins de changement de l'occupation du territoire.

3.2.3 L'analyse en composantes principales (ACP) et le calcul de l'indice de végétation (NDVI)

Pour atteindre le premier objectif de cette recherche, la classification des images est effectué par l'approche orientée objets qui est présentée plus bas à la section 3.2.4. Cette approche se base d'abord sur une segmentation de l'image en zones ou entités homogènes, et ensuite une classification tient compte non seulement des caractéristiques spectrales mais encore des notions de forme, de texture et de voisinage. La segmentation se base selon des objets définis par des critères, des éléments voisins, et fonctionne efficacement pour une image haute résolution ou une photo aérienne (Caloz et Collet, 2001; Blaschke et al, 2001). En raison de cela, pour une image de résolution moyenne, il est nécessaire de rehausser la qualité des images afin de faciliter l'étape de segmentation.

L'ACP et l'indice NDVI sont mis en œuvre dans le cas présent à cause de leurs avantages respectifs. 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; CCT) et permet de mieux séparer la végétation (forêts, cultures) des sols nus et des surfaces urbanisées.

L'analyse en composantes principales est une approche statistique, aussi appelée l'analyse factorielle (Caloz et Collet, 2001). Cette analyse est aussi connue sous le nom de l'*Hotelling*, la transformation de Karhunen-Loeve ou d'*Eigenchannel*. La nature mathématique de l'ACP est une transformation linéaire pour rechercher un nouveau système d'axes qui maximise les variables à partir des axes originaux. Les axes sont choisis de telle sorte que les variables sont ordonnées dans le sens décroissant, le premier axe porte toujours le plus d'information (figure 3.3). Celle-ci qui permet de réduire un système complexe de corrélation en un moins nombre de dimensions. En effet, cette transformation est basée sur les vecteurs propres (*eigenvectors*) orthogonaux de la matrice de covariance produite d'un groupe de pixels ou l'ensemble des canaux spectraux de l'image initiale. Le rendement de cette transformation est un

nouvel ensemble de canaux d'image lesquels sont appelés *eigenchannels*. Ce sont des bandes non corrélées.

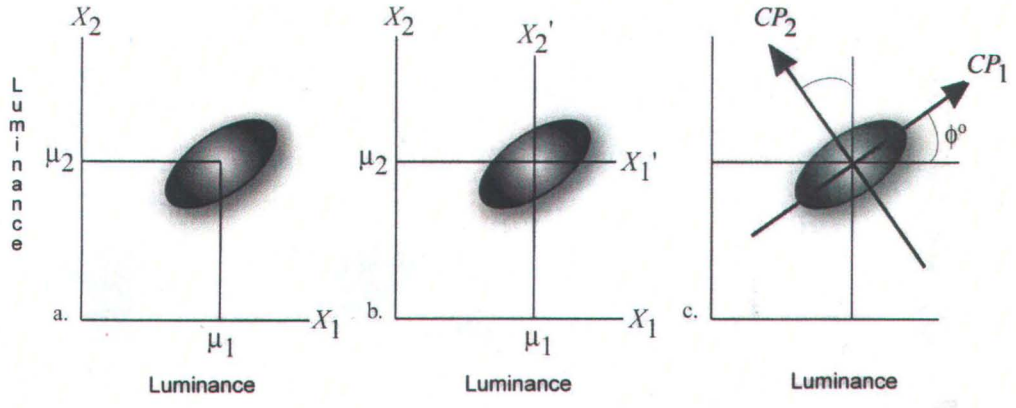


Figure 3.3 - Représentation graphique du processus de transformation ACP (Adapté de Jensen, 2005)

a) Le système d'axes original avec l'ellipsoïde de nuage de points de la luminance collecté de deux bandes spectrales X_1 et X_2, μ_1 et μ_2 sont les valeurs moyennes de la distribution de luminance; **b)** Le nouveau système d'axes créé par la translation ceux d'original à un système de X'; **c)** Le système d'axe de X' tourne autour de son origine (μ_1 et μ_2) de sorte que X_1' soit projetée par le demi-grand axe du nuage de points et la variance de X_1' soit maximum. Ce nouvel axe appelé la première composante principale (CP_1). La CP_2 est perpendiculaire avec la CP_1.

Le calcul des composantes principales est décrit comme un problème de la matrice de valeur propre :

$$\left|M_{vc} - \lambda I\right| v = 0 \qquad \text{(Équation 3.1)}$$

$\mathbf{M_{vc}}$ est la matrice de variance-covariance, $\boldsymbol{\lambda}$ est la valeur propre, $\boldsymbol{I}$ est la matrice unité, $\mathbf{v}$ est le vecteur propre correspond à la valeur propre $\boldsymbol{\lambda}$, $\mathbf{0}$ est le vecteur zéro.

Dans le cas présent, à l'aide de la fonction PCA du logiciel PCI Geomatica, une analyse en composantes principales a été appliquée à chacune des images en vu d'obtenir la synthèse des différentes bandes informatives. Le résultat a montré que les trois premières composantes principales expliquaient l'essentiel de la variance des bandes informatives pour chaque image. Ces composantes ont été utilisées pour segmenter l'image (figure 3.4). Le tableau 3-2 présente les pourcentages de l'information contenue attribuables à chacune des composantes principales.

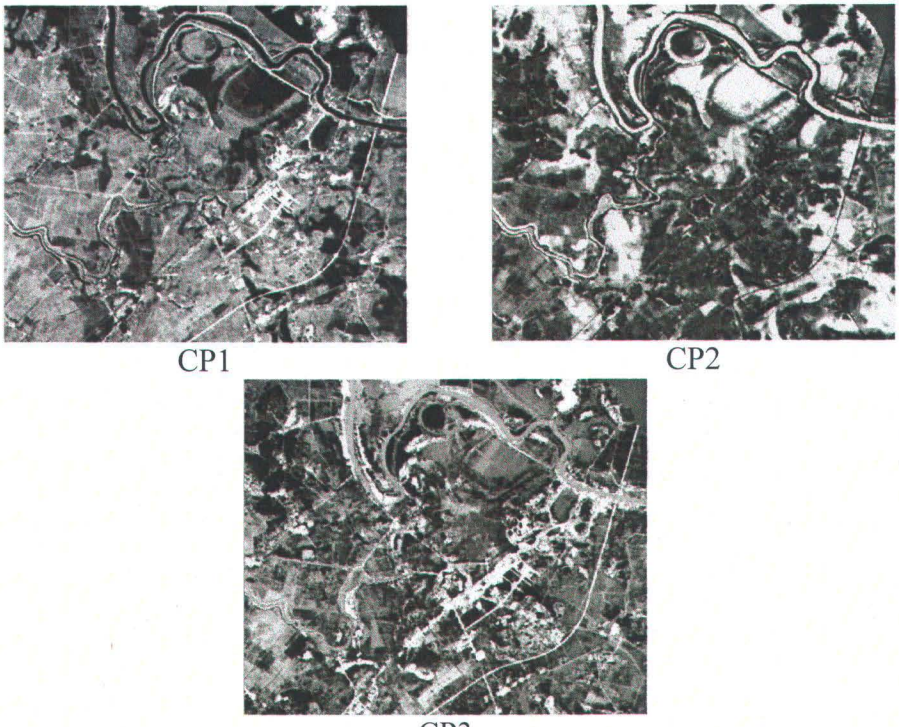


Figure 3.4 – Représentation des trois premières composantes principales calculées sur les six bandes spectrales d'un secteur de l'image ETM+ de Landsat 1999.

Tableau 3-2 : Pourcentage de l'information contenu dans chaque composante principale pour les trois images Landsat.

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

L'indice de végétation est un traitement permettant la mise en évidence et l'analyse de la végétation chlorophyllienne. Ces indices utilisent les propriétés spectrales de la végétation, en particulier les écarts de réflexion entre la bande rouge (faible réflexion) et la bande proche infrarouge (forte réflexion). L'indice de végétation normalisé NDVI (*Nomarlized Diffirence*

Vegetation Index) demeure le plus communément appliqué parmi les indices de végétation (Lau, 1997; Kawamura, 1997; VTGEO, 2005).

Comme la plupart des autres indices végétatifs, le NDVI est considéré comme un rapport entre la réflectivité mesurée dans la partie rouge (R) et proche-infrarouge (PIR) du spectre électromagnétique (équation 3.2a). Ces deux bandes spectrales sont choisies parce qu'elles contiennent plus de 90 % de l'information spectrale sur un couvert végétal (Bonn, 1996). En effet, les pigments chlorophylliens absorbent fortement dans le rouge visible pour la photosynthèse, et les feuilles réfléchissent par contre fortement dans le proche infrarouge. En outre, dans les bandes rouge et proche-infrarouge, le contraste entre la végétation et le sol est maximum. Ces deux bandes présentent aussi une plus faible dépendance par rapport aux conditions atmosphériques (Caloz et Collet, 2001). Le calcul de cet indice est présenté par l'équation 3.2a :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \qquad \text{(Équation 3.2a)}$$

Dans le cadre de cette recherche, l'indice a été calculé pour chaque image TM et ETM+ où les bandes rouge et proche-infrarouge équivalent aux bandes 3 et 4 respectivement. Par ailleurs, pour qu'on puisse afficher l'indice NDVI comme une image de 8 bits, il est nécessaire d'effectuer une mise à l'échelle. Pour chacune des images, une couche d'information supplémentaire a donc été créée selon l'équation 3.2b suivante :

$$NDVI = \left(\frac{Bande4 - Bande3}{Bande4 + Bande3} \right) \times 128 + 127.5 \qquad \text{(Équation 3.2b)}$$

La figure 3.5 illustre les pseudo-bandes de NDVI des images TM et ETM+. Celles-ci ont ensuite été utilisées dans la segmentation des images.

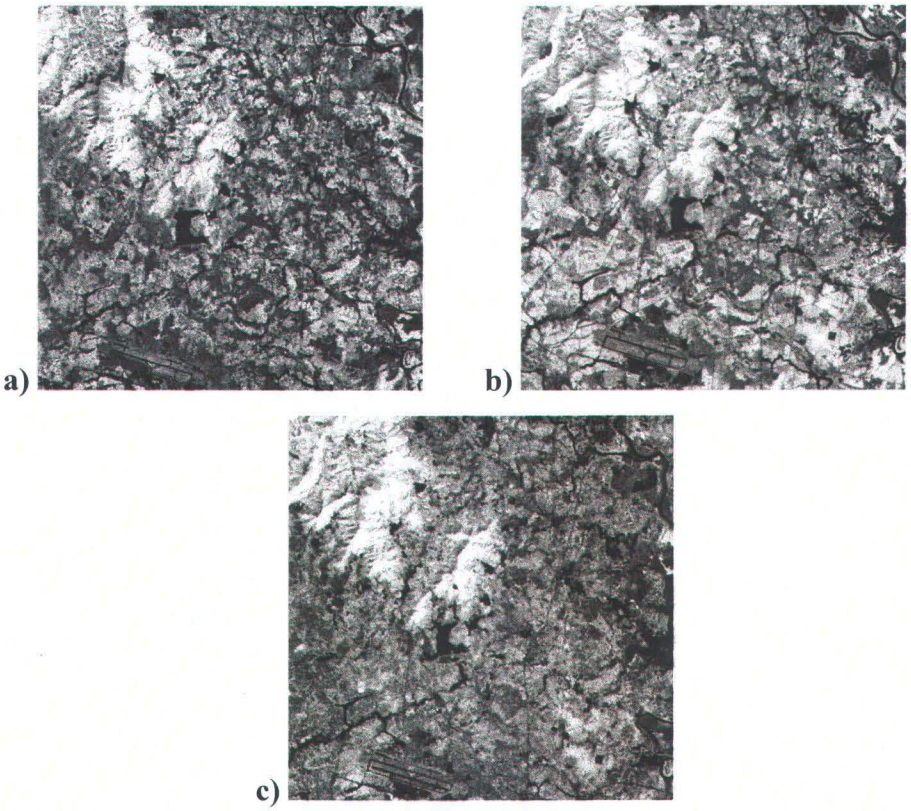


Figure 3.5 - Pseudo-bandes de NDVI d'un secteur de l'imange de a) 1993, b) 1999, c) 2003.

3.2.4 Classification par l'approche orientée-objet

A) Approche orientée objets

En classification, les approches traditionnelles par pixel semblent être inadaptées à la cartographie des types d'occupation morcelés à partir d'une image de résolution moyenne comme celui de la zone d'étude. Dans plusieurs cas, quelques classes ne peuvent pas être séparées. Par exemple, pour une image Landsat de résolution de 30m, nous trouvons que le milieu urbain confond souvent le milieu agricole ou bien la confusion entre le milieu urbain et des sols nus. La raison peut être la résolution spatiale ou radiométrique de l'image, ou simplement le capteur ne fournit pas des signaux différents pour les types d'information d'intérêt différents. De plus, le principe des approches traditionnelles de regrouper les pixels suivant le critère de leur ressemblance spectrale est aussi une des limites de ces approches.

Vu que le pixel isolé ne tient pas assez d'information pour détecter des phénomènes différents, une autre approche de classification que celle par pixel offrira des nouvelles possibilités, c'est le

cas de l'approche orientée objets. 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). L'avantage de cette approche est de tenir compte des caractéristiques spectrales et spatiales du pixel et de son voisinage dans le processus de la classification. Cette approche 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 (moyenne des niveaux de gris de l'objet), spatiaux (forme, texture), structuraux (relation spatial entre les objets) et d'autres variables géographiques (altitude, pente, exposition, ou densité de population). En raison de cela, cette méthode de classification est aussi connue sous le nom de classification contextuelle. Ces deux phases ont été réalisées à l'aide du logiciel eCognition (Definiens Imaging, 2004). Le processus de ce traitement est présenté par la figure 3.6.

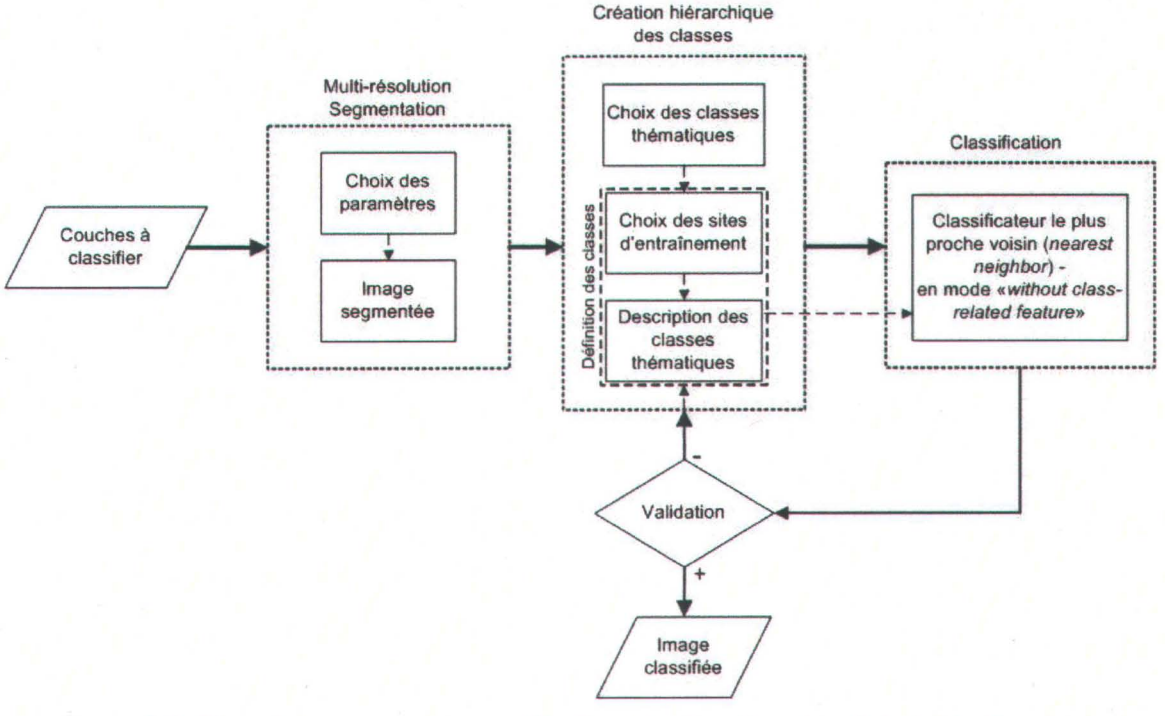


Figure 3.6 - Organigramme pour la classification orientée objets dans le logiciel eCognition.

B) Segmentation multi-résolution

Tel que décrit, l'étape préliminaire dans l'approche de la classification orientée objets est la segmentation de l'image afin de diviser l'image en des objets homogènes. Les pixels sont groupés en objets significatifs. Il existe différents algorithmes de segmentation : *Chesseboard*, *Multiresolution* ou *Quad-tree* (Definiens, 2005). Dans le cadre de ce projet, on a utilisé la segmentation multirésolution, c'est le seul algorithme alors implémenté dans le logiciel eCognition version 4.0 (Definiens Imaging, 2004). Cela se base sur la fonction générale de segmentation (Baatz et Schäpe, 2000; Jensen, 2005; Definiens Imaging, 2004) :

$$S_f = w_{couleur} .h_{couleur} + (1 - w_{couleur}).h_{forme} \qquad \text{(Équation 3.3)}$$

Où : $w_{couleur}$ est le poids donné pour l'information spectrale (couleur), définit par l'analyste ($0 \leq w_{couleur} \leq 1$); $h_{couleur}$ est l'hétérogénéité spectrale d'un objet d'image, calculé par la somme de produit des écarts-types des valeurs spectrales et le poids de chaque couche de l'image; h_{forme} est l'hétérogénéité de forme, définit par la compacité (*compactness*) et le degré de lissage (*smoothness*).

Lors de la mise en œuvre dans l'eCognition, 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'homogénéités (figure 3.7). Cette phase est effectuée sur les pseudo-bandes spectrales (composantes principales et NDVI).

- Le poids (1) des couches employées détermine l'importante relative des bandes utilisées dans la segmentation. Dans le cadre de cette recherche, les trois premières composantes principales sont utilisées et leur poids est déterminé par le pourcentage de la variance (Savary et al, 2006) de chaque composante principale (tableau 3-2). Par ailleurs, un poids de 1 est donné pour les valeurs de l'indice de végétation qui sont aussi utilisés pour segmenter.
- L'échelle (2) est une valeur abstraite qui détermine l'hétérogénéité maximum permise pour les objets résultants d'image. Pour des données hétérogènes, il est recommandé de donner

un paramètre de l'échelle plus petit que celui pour des données plus homogènes. Après avoir testé quelques valeurs, la valeur de 20 est attribuée au facteur d'échelle. Elle représente une balance entre les données hétérogènes de l'image comme les secteurs urbanisés et les données plus homogènes comme les secteurs boisés, les parcelles agricoles ou encore les secteurs inondés.

- Les critères d'homogénéités sont défini par l'ensemble des paramètres consistent la couleur (3), la forme (4), la compacité (5) et le lissage (6). Le paramètre couleur est un facteur qui balance l'homogénéité de la couleur et de la forme d'un segment. La valeur de ce paramètre va de 0 à 1. Si on désire mettre le plus grand accent sur les caractéristiques spectrales, la valeur de la couleur est plus forte. Par contre, pour mettre en évidence les caractéristiques spatiales, cette valeur est faible, c'est-à-dire que celle de la forme est plus élevée. Le facteur de forme (*shape*) prévient la segmentation fractale d'objet en présence de données fortement texturées (Savary et al, 2006). Néanmoins, un certain niveau d'homogénéité, selon la forme, améliore parfois la qualité de l'extraction des objets (Definiens Imaging, 2004).

Dans le contexte de la zone d'étude, l'occupation du sol est morcelée, les objets n'ont pas de forme particulière. Le facteur de couleur lié est de favoriser directement l'information spectrale des pseudo-bandes qui souligne la séparabilité des différentes classes. La valeur de ce facteur est de 0,9. Le critère de forme est donc moins important, sa valeur est de 0,1.

En plus de l'information spectrale, eCognition permet d'optimiser l'homogénéité d'objet en ce qui concerne la forme de l'objet. Le critère de forme se compose de deux paramètres : la compacité et le lissage (Definiens, 2004). Le critère de lissage est utilisé pour optimiser les objets de l'image en fonction de leur frontière. Il prévient la formation d'objets de trop faible densité. Quant à la compacité, elle est employée pour optimiser des objets d'image en ce qui concerne leur compacité. Pour le site étudié, il est préférable de choisir pour l'attribution d'un poids le plus grand au paramètre de compacité (0,9) que de lissage (0,1).

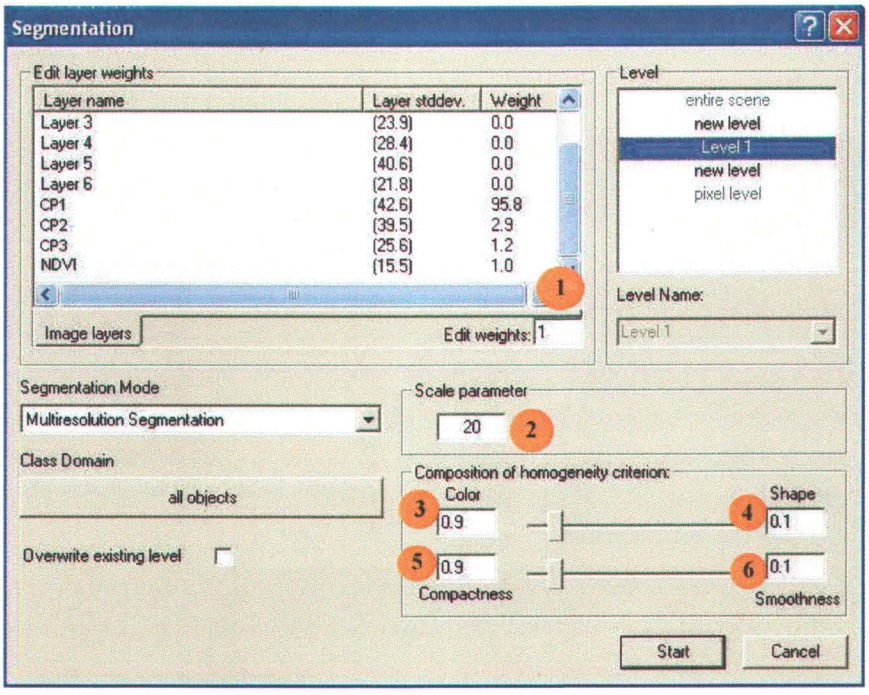


Figure 3.7 - Les paramètres de segmentation pour l'image de 1999.

Bien que le logiciel permette de segmenter d'image selon plusieurs niveaux des objets image, pour l'instant, avec tous les paramètres choisis, la segmentation a été effectuée au niveau 1. Il faut noter que l'utilisation des pseudo-bandes dans le processus de segmentation améliore le résultat de celui-ci. La figure 3.8 présente le résultat de la segmentation pour un secteur de l'image de 1999.

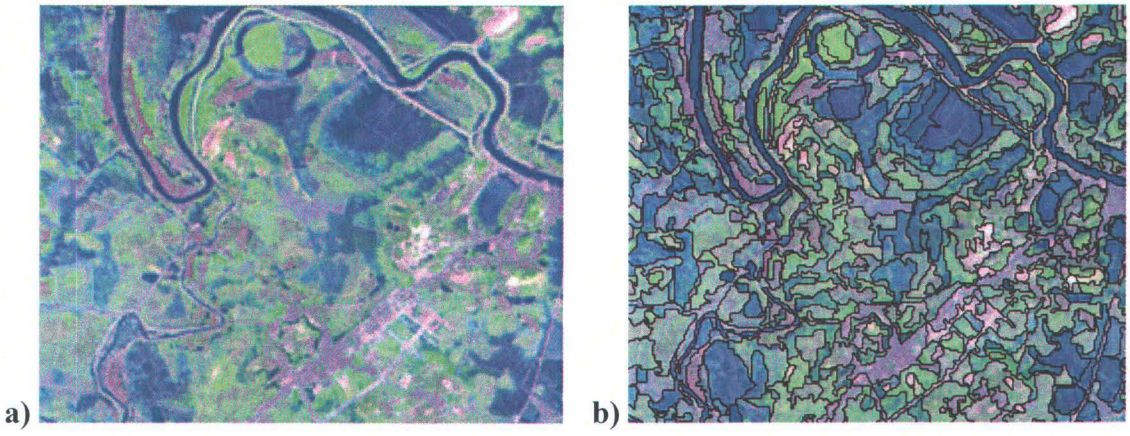


Figure 3.8 - Exemple de segmentation pour l'image 1999

a) Secteur de l'image - Composition colorée RVB à partir de la bande moyen infrarouge (R), infrarouge (V) et rouge (B) de l'image Landsat; b) Segmentation de l'image.

C) Classification orientée-objet:

La classification orientée objets d'une image segmentée est très différente d'une classification pixel-par-pixel. Cette méthode permet de classifier des objets en regardant leurs attributs spectraux et spatiaux. Il s'agit de déterminer la classe thématique d'un objet si ses caractéristiques satisfont à la description ou aux conditions typiques de la classe.

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*). La logique floue est une approche mathématique permettant de quantifier une instruction incertaine. L'idée de cet algorithme est de remplacer la binaire instruction logique « oui » et « non » par une rangée continue de 0 à 1 où la valeur 0 signifie que « exactement non » et la valeur 1 signifie « exactement oui ». Toutes les valeurs entre 0 et 1 représentent un état plus ou moins certain entre « oui » et « non ». L'association d'un objet à une classe dépend donc de la valeur attribué (entre 0 et 1) à cet objet qui faisant appel à «*membership value*».

Il est d'abord important dans le logiciel eCognition de construire une hiérarchie des classes thématiques et ensuite d'effectuer la classification.

L'hiérarchie des classes est la base de connaissance pour la classification des objets d'image. Elle contient l'ensemble de toutes les classes avec leur description spécifique. Afin de choisir des classes appropriées, on a consulté le système de classification d'utilisation/d'occupation du sol d'Anderson et al (1976). Les images fournissent une information différente selon leur résolution. Une image de résolution moyenne comme TM, ETM+ de Landsat (30m) ou HRV de SPOT XS (20m) ne favorise pas des informations détaillées. Pour ce type de l'image, il est préférable d'établir une légende au niveau général.

En consultant également les résultats des études précédentes (ASTV et MST, 2003; VTGEO, 2004), une hiérarchie simple de 11 classes thématiques a été établie (tableau 3-3). Les photos illustrées et la description détaillée de ces classes sont présentées à l'annexe 2. Chaque classe est ensuite décrite selon ses caractéristiques spectrales et spatiales.

Tableau 3-3 : Classes thématiques appliquées pour la classification

No	Classes thématiques	Description
1	Milieu humide 1	Milieu agricole très humide
2	Milieu humide 2	Milieu agricole humide
3	Milieu sec	Milieu agricole sec, sans récolte
4	Sol nu	Les sables, les chemins en terre, etc.
5	Milieu urbain 1	Urbain forte densité : la ville ou centre ville des districts
6	Eau	Rivières, lacs et zones inondées
7	Milieu urbain 2	Urbain faible densité (les villages, incluent des jardins)
8	Rizières	Rizières
9	Buisson, herbage	Les buissons, les herbages et les arbustes
10	Forêt	Les plantations d'acacia, d'eucalyptus et de pin
11	Milieu urbain 3	Constructions, routes, zones industrielles

Quant à la classification, le logiciel eCognition 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. Le plus proche voisin et des fonctions d'appartenance sont deux algorithmes qu'on peut utiliser pour décrire des objets d'une classe thématique. Dans le premier, les classes sont définies à travers les échantillons d'objets. Ces derniers sont déterminés par l'analyseur. Tandis que le second est de transformer une valeur arbitraire d'objet à un certain dégrée entre [0 … 1], il indique l'appartenance d'une classe. Ce logiciel donne aussi deux modes concernant la relation des objets dans l'hiérarchie créée : le mode de classification «*without class-related feature*» et celui «*with class-related feature*». C'est-à-dire, une simple hiérarchie où n'existe pas de connexion entre les objets des classes va être appropriée pour l'utilisation du premier mode. Par contre, le second sera utilisé lorsqu'un objet dans le réseau des objets d'image est lié à des objets voisins, des sous-objets (niveau inférieur) ou des super-objets (niveau supérieur).

Nous avons utilisé la technique de classification dirigée (supervisée) selon le classificateur du plus proche voisin (*nearest neighbor classifier*) et une combinaison de ce dernier et des fonctions

d'appartenance (*membership functions*), avec le mode de classification «*without class-related feature*». La technique de classification dirigée (décrite à la section 2.1.2 du chapitre 2) consiste à diviser l'espace spectral en différentes classes à l'aide des objets échantillons (sites d'entraînement) et de la description des propriétés de chaque classe. Le principe de cette méthode est simple. Il faut d'abord choisir des objets échantillons à partir de l'image segmentée. L'algorithme ensuite cherche l'objet échantillon le plus proche dans l'espace des objets pour créer une classe, c'est-à-dire la distance euclidienne calculée entre chacun des objets constituant une classe thématique. L'objet à classifier est calculé et ensuite assigné à la classe pour laquelle un des objets échantillons est le plus proche.

Les classes thématiques sont décrites par l'algorithme le plus proche voisin, sauf la classe Milieu urbain 3 a été définie par une combinaison du plus proche voisin et de fonctions d'appartenance afin de minimiser la confusion de cette classe et la classe sols nus (figure 3.9). Les sites d'entraînement ont été choisis pour 11 classes thématiques, la description détaillée de ces sites est présentée à l'annexe 2.

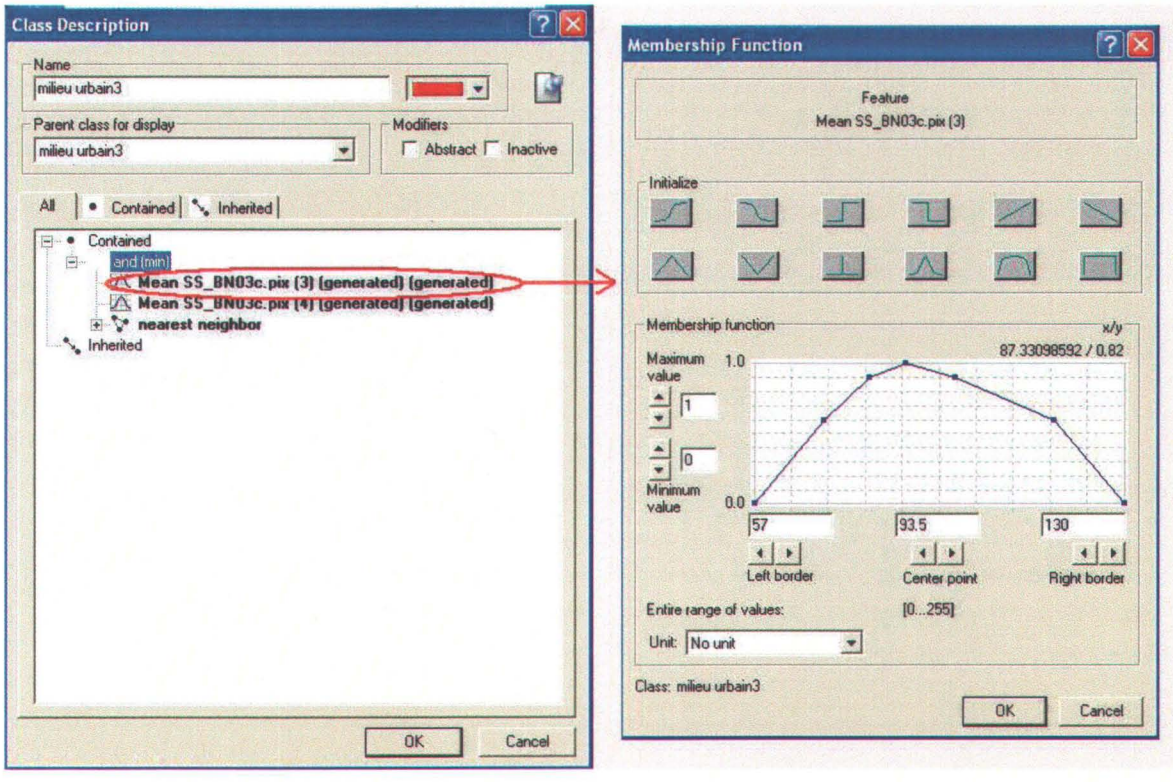


Figure 3.9 - Description de la classe Milieu urbain 3 pour l'image 2003.

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. Il est important de noter que la qualité de la classification (bonne, mauvaise) dépend aussi des bandes (couches) utilisées, ce qui est nommée «*features*» dans eCognition. Il s'agit de choisir les bandes sur lesquelles on pourra avoir de l'information additionnelle pour la classification. Néanmoins, il n'est pas facile de choisir les plus significatives. Pour y arriver, nous avons utilisé un outil inclut dans eCognition, celui faisant appel à «*Feature Space Optimization*» (FSO). 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 couche qui ont comme conséquence la meilleure distance de séparation de classe. Nous avons entré six bandes spectrales et quatre pseudo-bandes dans l'espace des couches utilisées, parmi ces dix bandes le FSO a ensuite choisi une combinaison optimale pour chacune d'image. Après la classification, la précision de chaque image classifiée est ensuite estimée en vue d'assurer que les résultats obtenus soient optimaux. Les résultats des classifications seront présentés au chapitre 4.

3.2.5 Validation (évaluation de la précision)

La validation est une étape nécessaire pour perfectionner la classification des images et établir l'exactitude des résultats des classifications. Cette étape permet d'identifier les sources d'erreur à corriger et d'améliorer la qualité de l'information sur la carte. De plus, la majorité des informations extraites des données de télédétection est ensuite employée dans un processus décisionnel (un SIG, un modèle hydrologique comme HYDROTEL, un modèle de gestion intégrée des bassins comme GIBSI) où la précision de l'information est requise. Essentiellement, l'évaluation de la précision est un processus quantitatif ou qualitatif (Congalton et Green, 1999) et se fait à l'aide de la matrice d'erreurs ou matrice de confusion. Au niveau de l'évaluation quantitative de l'exactitude, ce processus implique la comparaison de deux sources d'information, celle de l'image classifiée vis-à-vis l'information de référence pour le même site. L'information de référence c'est soit l'information collectée sur le terrain, soit celle extraite d'autres types de données comme des photos aériennes, ou des cartes de la même période que l'image classifiée.

La démarche d'évaluation de la précision consiste à un nombre d'échantillons de référence qui est identique aux catégories de la classification. Après avoir réalisé la collection des échantillons de référence, on devra établir une matrice d'erreurs. En effet, cette matrice est un tableau de chiffres qui identifient le nombre d'échantillons (qui peuvent être des pixels, des groupes de pixels ou des polygones) assigné à une catégorie de la classification, relativement au nombre actuel de cette catégorie, mais vérifié par des données de référence. Plus simplement, les colonnes de la matrice représentent les données de référence collectées sur les sites de vérification alors que les lignes représentant la classification générée par des données de télédétection. Les valeurs indiquées sur la diagonale de la matrice représentent la concordance entre la classification et la vérification.

Comme son nom l'indique, la matrice d'erreurs est un outil pratique pour calculer les erreurs de la classification. Il existe deux types d'erreurs en classification: les erreurs de commission et les erreurs d'omission. Ces deux types d'erreurs permettent d'établir les mesures de précision d'une classification : la précision d'utilisateur (les erreurs de commission) et la précision du producteur (les erreurs d'omission). La précision d'utilisateur est la probabilité pour qu'un pixel classifié dans une classe thématique donnée par le processus de classification représente réellement un élément de cette classe sur le terrain. La précision du producteur est la probabilité pour qu'un site de vérification d'une classe soit identifié correctement à cette classe sur l'image classifiée. À côté de la valeur de deux types d'erreurs, la matrice d'erreurs permet également de calculer la précision globale et l'indice Kappa (K). Le calcul de ces valeurs est décrit par les équations suivant :

$$\text{Précision de producteur} = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100 \quad \text{(Équation 3.3)}$$

$$\text{Précision d'utilisateur} = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \times 100 \quad \text{(Équation 3.4)}$$

$$\text{Précision globale} = \frac{D}{N} \times 100 \quad \text{(Équation 3.5)}$$

$$K = \left(\frac{N\sum_{i=1}^{l} x_{ii} - \sum_{i=1}^{l} (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{l} (x_{i+} \times x_{+i})} \right) \qquad \text{(Équation 3.6)}$$

Où : x_{ii} est le nombre de pixels classés correctement,

x_{+i} est la somme marginale de la colonne i,

x_{i+} est la fréquence marginale de la ligne i,

D est la somme des pixels bien classés (éléments de la diagonale dans la matrice d'erreur),

N est le somme de pixels dans la matrice d'erreur,

l est le nombre de la ligne dans la matrice.

Les matrices d'erreurs sont établies à l'aide d'un outil statistique inclut dans le logiciel eCognition. Pour le processus de validation, à cause du manque de vérité-terrain et de données auxiliaires correspondant à chaque image traitée, à l'exception des références du milieu urbain de l'été 2006, la sélection des échantillons de référence s'est appuyée sur l'interprétation visuelle. Ces derniers ont été interprétés de chaque image segmentée par des analystes (experts) d'images optiques du centre VTGEO. Pour les milieux urbains, les échantillons ont été déterminés par deux sources de référence : l'enquête sur le terrain effectuée en juillet et en août 2006 et les données de l'interprétation visuelle. La précision des classifications obtenues sera présentée au chapitre 4.

3.2.6 Détection des changements par la méthode de la comparaison de classifications

Tel que décrit au chapitre 2, la comparaison de classifications est une approche de détection des changements très utilisée vu qu'elle est simple et fournit l'information détaillée du changement. Autrement dit, elle permet de répondre à la question « D'où viennent les changements? ». De plus, elle facilite la préparation des cartes de changement (Yuan et al, 2005). C'est la raison pour laquelle on voulait mettre en œuvre cette méthode.

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. 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 (tableau 3-4 et tableau 3-5). L'analyse des matrices nous donne l'évolution spatio-temporelle de changement qui est abordé au chapitre 4 - Analyse et interprétation des résultats.

Tableau 3-4 : Matrice de changement de l'occupation du sol de 1993 à 1999

		Occupation du sol de 1999 (ha)											
	Classes	Milieu humide 1	Milieu humide 2	Milieu sec	Sol nu	Urbain 1	Eau	Urbain 2	Rizière	Buisson, herbage	Forêt	Urbain 3	Total
Occupation du sol de 1993 (ha)	Milieu humide 1	512,01	286,65	13,68	9,27	22,32	645,75	37,44	231,48	24,84	0,09	13,95	**1797,48**
	Milieu humide 2	979,02	2421,81	176,94	129,33	296,55	1355,94	243,09	1957,77	262,53	30,87	82,8	**7936,65**
	Milieu sec	593,37	2408,67	922,5	273,24	308,79	678,69	362,43	3762,99	788,58	16,38	150,57	**10266,21**
	Sol nu	15,93	92,79	323,82	650,97	6,03	52,83	44,37	407,88	684,54	207,09	18	**2504,25**
	Urbain 1	16,56	74,07	1,08	0,9	357,3	33,03	45,09	59,4	10,89	0	7,74	**606,06**
	Eau	336,87	214,38	13,59	6,57	55,62	1544,94	37,98	204,12	29,7	7,11	46,17	**2497,05**
	Urbain 2	110,7	198,36	32,22	22,77	478,98	178,65	1237,14	801,81	136,8	18,27	14,31	**3230,01**
	Rizière	401,04	1459,53	365,67	347,85	499,23	611,55	1847,52	11794,59	1652,13	267,75	157,95	**19404,81**
	Buisson, herbage	12,33	38,07	31,14	97,2	0	35,55	137,97	271,35	646,74	560,34	0	**1830,69**
	Forêt	15,75	28,26	0,81	26,82	4,68	22,68	11,16	115,92	190,62	1807,2	0	**2223,9**
	Urbain 3	0	0,45	3,6	0	0	0	0	3,78	31,05	0	49,5	**88,38**
	Total	**2993,58**	**7223,04**	**1885,05**	**1564,92**	**2029,5**	**5159,61**	**4004,19**	**19611,09**	**4458,42**	**2915,1**	**540,99**	**52385,49**

Par ailleurs, l'intersection des deux images classifiées permet également de créer une nouvelle image sur laquelle la valeur de pixel va de 1 à N^2 (N est le nombre de classe thématique, 11 dans ce cas-ci). Chacune des valeurs de l'image, en effet, représente un type de changement d'une classe à l'autre. En se basant sur ce caractère, une autre matrice de transition a été crée afin de cartographier des changements. À la différence des matrices de changement mentionnées plus hauts, au lieu de la superficie, la valeur apparaissant dans chaque case de cette matrice est la valeur représentant un type de changement (figure 3.11). Pour cartographier les changements, il est nécessaire de sélectionner les valeurs des types de changement à afficher, ensuite une couleur est assignée pour chacune des valeurs (Jensen, 1996).

Tableau 3-5 : Matrice de changement de l'occupation du sol de 1999 à 2003

Occupation du sol de 1999 (ha)	Classes	Occupation du sol de 2003 (ha)											
		Milieu humide 1	Milieu humide 2	Milieu sec	Sol nu	Urbain 1	Eau	Urbain 2	Rizière	Buisson, herbage	Forêt	Urbain 3	Total
	Milieu humide 1	1348,65	142,38	13,23	7,65	64,8	505,71	102,33	749,34	18,09	10,35	31,05	**2993,58**
	Milieu humide 2	1280,07	1695,96	78,12	13,32	195,12	367,2	311,85	3096,09	60,66	15,3	109,35	**7223,04**
	Milieu sec	90,81	565,92	274,86	69,39	34,56	54,09	131,04	453,33	168,93	1,8	40,32	**1885,05**
	Sol nu	38,16	191,34	318,51	455,13	30,96	9,27	99,81	109,35	241,2	53,01	18,18	**1564,92**
	Urbain 1	54,81	64,8	21,33	1,62	1339,2	23,58	225,09	238,5	11,16	2,61	46,8	**2029,5**
	Eau	1233,63	422,37	60,03	20,34	119,97	2066,4	211,05	887,67	52,38	22,05	63,72	**5159,61**
	Urbain 2	135,72	151,02	65,34	12,06	387,9	21,96	2370,15	691,65	125,46	30,96	11,97	**4004,19**
	Rizière	805,59	2485,53	671,58	44,46	407,07	211,77	2404,98	11561,3	655,2	120,6	243	**19611,1**
	Buisson, herbage	76,86	545,67	236,43	170,64	83,25	31,32	721,08	949,05	1236,6	318,15	89,37	**4458,42**
	Forêt	8,46	17,37	19,26	15,57	1,17	3,51	54,99	175,59	243,09	2376	0,09	**2915,1**
	Urbain 3	18,18	28,53	0,45	0,09	29,88	15,75	12,78	47,52	22,23	0	365,58	**540,99**
	Total	**5090,94**	**6310,89**	**1759,14**	**810,27**	**2693,88**	**3310,56**	**6645,15**	**18959,4**	**2835**	**2950,83**	**1019,43**	**52385,5**

À la figure 3.10, les valeurs de la principale diagonale de la matrice représentent des informations non-changées. Seulement un nombre de (N^2-N), soit 110 classes de changement de l'occupation du sol peuvent être choisies pour produire la carte de détection des changements. Par exemple, afin de mettre en évidence le changement du milieu urbain de 1999 à 2003, tous les pixels changeant de n'importe classe de l'année 1993 aux classes Milieu Urbain 1, 2 et 3 de l'année 1999 étaient colorés respectivement en violet, en orange et en rouge, alors que les jaunes sont les pixels non-changés. De cette manière, on peut créer des cartes de changement spécifique selon le but de l'analyste.

Dans le cadre de ce projet, afin de faciliter l'analyser des résultats, les 11 classes thématiques ont été ensuite regroupé en cinq grands groupes «Milieu Agricole», «Milieu Urbain», «Milieu Forestier et Arbustif», les deux autres étant Eau et Sol nu. Les cartes de changement de 1993 à 1999 et à 2003 ont donc été établies en se basant sur ces cinq groupes et sont présentées au chapitre suivant.

DE 1993	No	À 1999 Milieu Humide 1	Milieu Humide 2	Milieu Sec	Sols Nus	Milieu Urbain 1	Eau	Milieu Urbain 2	Rizières	Buisson, herbage	Forêt	Milieu Urbain 3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Milieu Humide 1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Milieu Humide 2	2	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Milieu Sec	3	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Sols Nus	4	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Milieu Urbain 1	5	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
Eau	6	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
Milieu Urbain 2	7	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
Rizières	8	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
Buisson, herbage	9	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
Forêt	10	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
Milieu Urbain 3	11	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121

Figure 3.10 - Exemple de la matrice de changement codée et colorée pour produire des cartes de changement.

4 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Le présent chapitre vise la présentation les résultats obtenus par la classification orientée objets et les statistiques sur lesquels nous avons évalué les changements de l'occupation du sol pour un période de dix ans. Une analyse globale de l'état de la qualité de l'eau dans le bassin versant de la rivière Câu est également présentée dans cette section afin de montrer le lien entre quelques paramètres de la qualité de l'eau et les changements de l'occupation du sol.

La classification orientée objets a été appliquée sur trois images, les résultats de ces travaux (figure 4.1, 4.2 et 4.3) ont ensuite été comparés, classe par classe, afin d'évaluer les changements. Ces derniers sont évalués selon leur évolution temporelle et leur évolution spatiale.

La précision (du producteur et d'utilisateur) moyenne de chaque classification et sa précision globale sont présentées au tableau 4-1. Ce tableau montre que la précision globale moyenne des trois classifications est de 76 %. Celle de la classification de l'année 1993 est moins précise (69 %). C'est le résultat de la forte confusion entre la classe milieu urbain 2 (7), et les classes rizières (8) et buisson (9). Pour l'année 1999, les classes thématiques sont mieux séparées. Il reste quelques confusions entre les classes milieu humide 2 (2) et urbain 2 (7). Cela donne une bonne précision (80 %). Le résultat de la classification de l'année 2003 est moins bon que celui de 1999, sa précision globale est de 78 %. C'est le résultat de la confusion entre la classe sol nu (4), milieu sec (3) et milieu urbain 3 (11). Malgré les confusions, ces classifications nous ont permis d'évaluer l'évolution des changements de l'occupation de la zone d'étude.

Tableau 4-1 : Le pourcentage de la précision de classification

	Classification			
Valeur	**1993**	**1999**	**2003**	**Moyenne**
Producteur	86 %	82 %	74 %	81 %
Utilisateur	76 %	83 %	77 %	79 %
Précision globale	69 %	80 %	78 %	76 %
KIA	0,64	0,77	0,74	0,72

4.1 Évolution temporelle

L'évolution temporelle est représentée sous forme graphique. 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 (tableau 4-2). Le Milieu Agricole inclut les classes Milieu humide 1, Milieu humide 2, Milieu sec et Rizières. Le Milieu Forestier et arbustif comprend les classes Forêt et Buisson, herbage. Les classes Milieu urbain 1, Milieu urbain 2 et Milieu urbain 3 sont regroupées sous le groupe Milieu Urbain. La description de chaque classe thématique a été décrite à l'annexe 2.

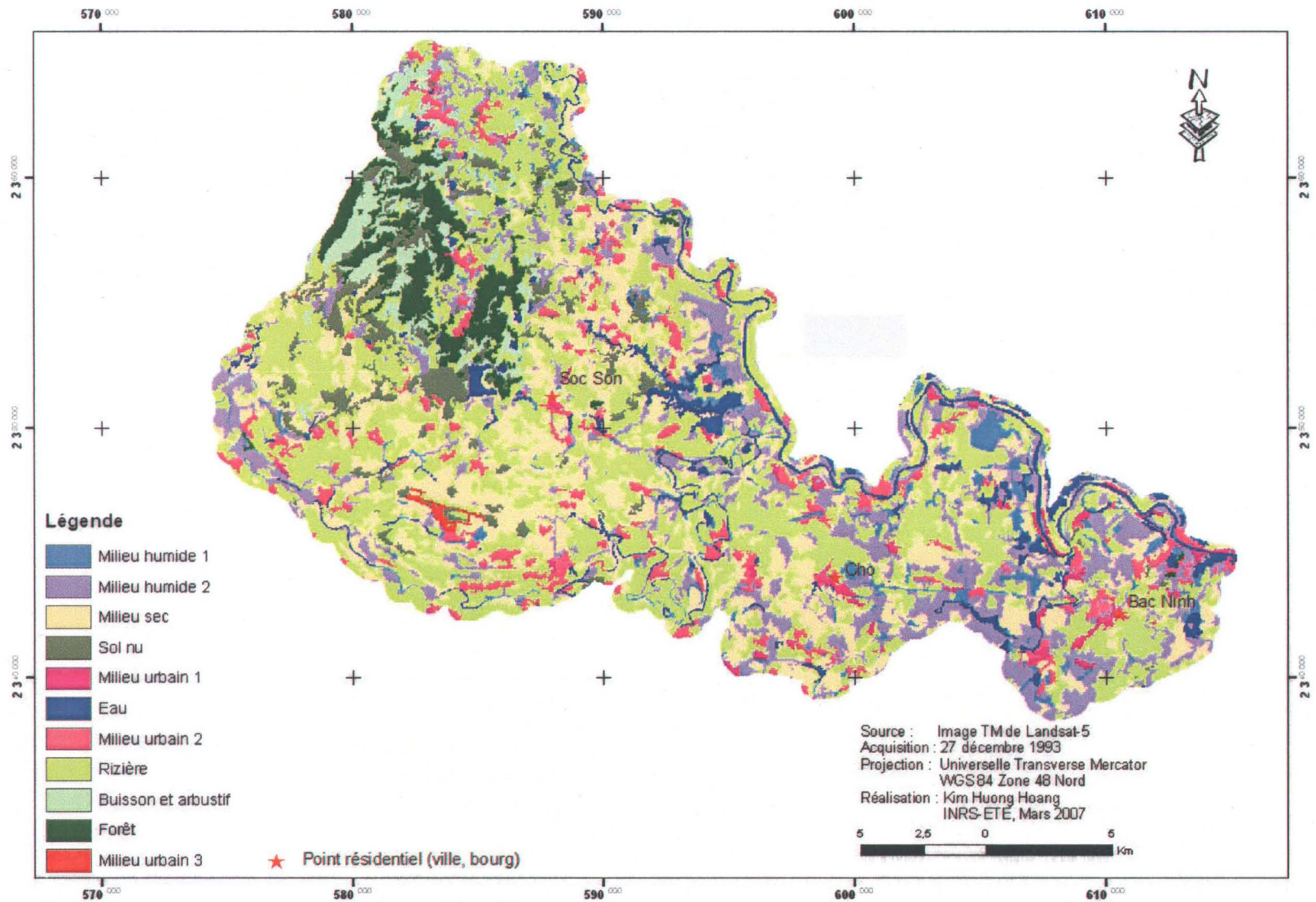


Figure 4.1 - Classification de l'occupation du sol pour l'année 1993.

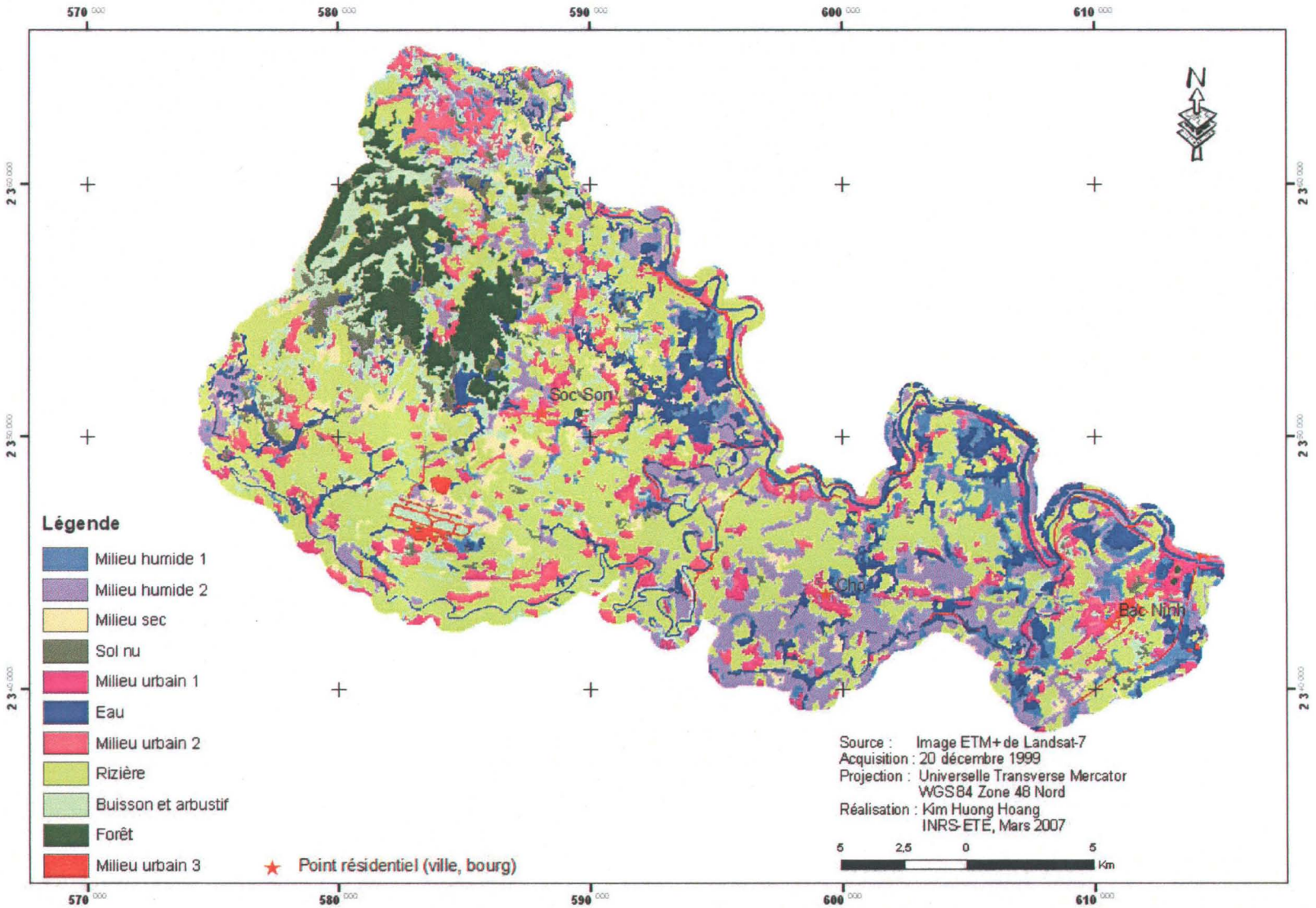


Figure 4.2 - Classification de l'occupation du sol pour l'année 1999.

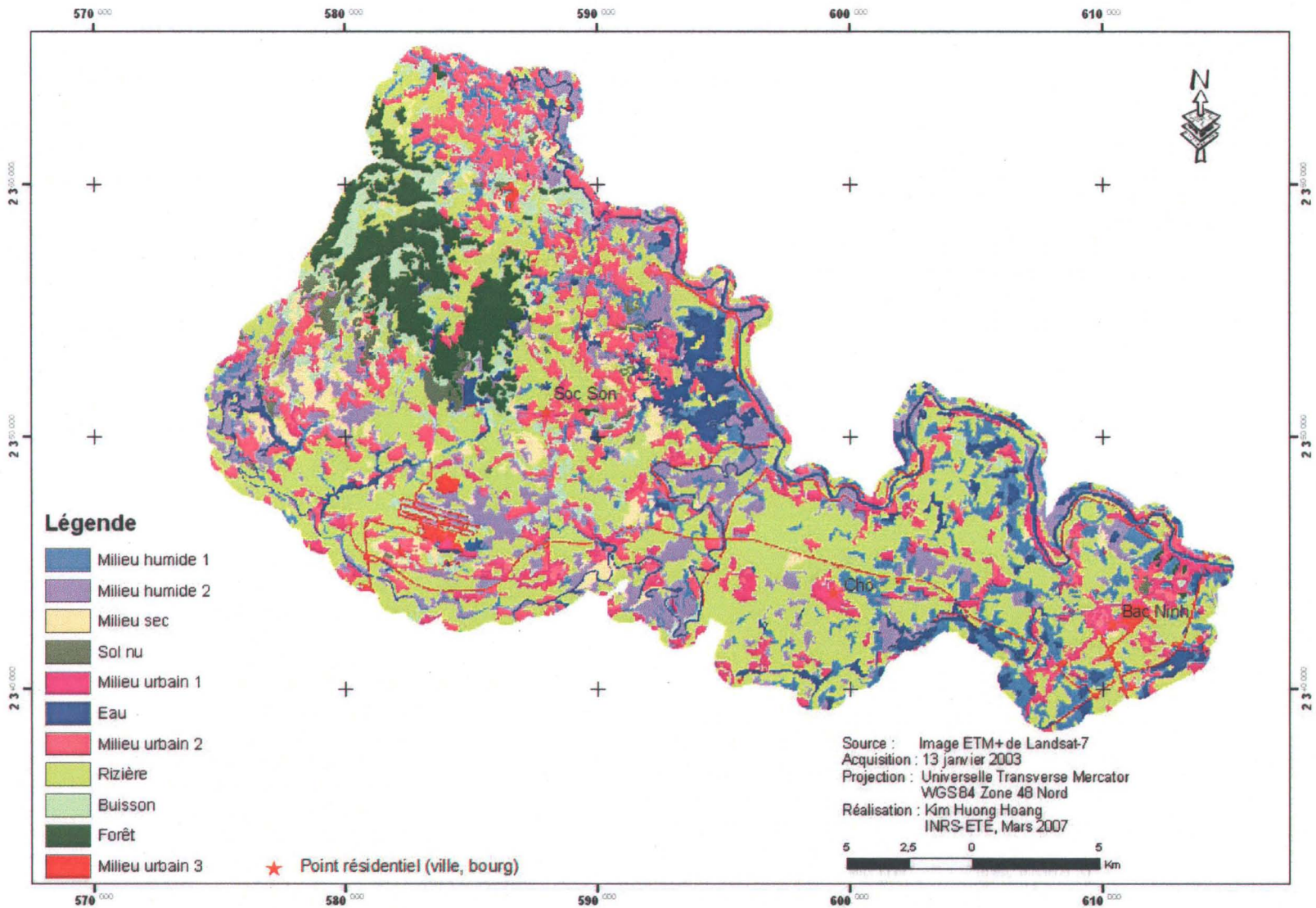


Figure 4.3 - Classification de l'occupation du sol pour l'année 2003.

Le tableau 4-2 présente le pourcentage et la superficie de chacune des classes pour les trois années choisies. L'analyse de ce tableau et des graphiques subséquents montre tout d'abord qu'au plan de la répartition des classes d'occupation du sol des sites étudiés, celle des milieux agricoles occupe plus de 60 % de la superficie totale lors des trois années d'observation mais une baisse significative de 15 % est observée entre 1993 et 1999. Le milieu urbain occupe à peu près 20 % du territoire pour l'année 2003 tandis que dix ans plus tôt (1993), il occupait seulement que 7,49 % (1/3 de 2003). Ces chiffres donnent le portrait d'une région en urbanisation. Le milieu forestier se trouve principalement sur la région des montagnes du district Soc Son, les terres en friche (buisson, herbage) ont une tendance à augmenter, notamment pour la période de 1993 à 1999. La forêt occupe de 4 à 6 % de la surface totale. La superficie de l'eau augmente, elle est deux fois plus importante en 1999 qu'en 1993 (figure 4.8). Ce changement dépend non seulement des conditions naturelles des précipitations mais également des activités d'irrigation. Dans cette zone, les sols nus occupent une faible superficie. Malgré cela, elle montre une baisse significative entre 1993 à 2003 (de 4,6 à 1,6 % environ).

Tableau 4-2 : Pourcentage et superficie de l'occupation du sol pour chacune des classes thématiques en 1993, 1999 et 2003.

Groupes	Classes thématiques	1993		1999		2003	
		ha	%	ha	%	ha	%
Milieu Agricole	Milieu humide 1	1797,48	3,43	2993,58	5,71	5090,94	9,72
	Milieu humide 2	7936,65	15,15	7223,04	13,79	6310,89	12,05
	Milieu sec	10266,21	19,60	1885,05	3,60	1759,14	3,36
	Rizière	19404,81	37,04	19611,09	37,44	18959,4	36,19
	sous-total	***39405,15***	***75,22***	***31712,76***	***60,54***	***32120,37***	***61,32***
Milieu Forestie et arbustif	Buisson, herbage	1830,69	3,49	4458,42	8,51	2835	5,41
	Forêt	2223,9	4,25	2915,1	5,56	2950,83	5,63
	sous-total	***4054,59***	***7,74***	***7373,52***	***14,08***	***5785,83***	***11,04***
Milieu Urbain	Urbain 1	606,06	1,16	2029,5	3,87	2693,88	5,14
	Urbain 2	3230,01	6,17	4004,19	7,64	6645,15	12,69
	Urbain 3	88,38	0,17	540,99	1,03	1019,43	1,95
	sous-total	***3924,45***	***7,49***	***6574,68***	***12,55***	***10358,46***	***19,77***
Autres	Sol nu	2504,25	4,78	1564,92	2,99	810,27	1,55
	Eau	2497,05	4,77	5159,61	9,85	3310,56	6,32
Total		**52385,49**	**100,00**	**52385,49**	**100,00**	**52385,49**	**100,00**

Comme pour les analyses précédentes, ces chiffres sont à considérer à titre indicatif car il est difficile d'évaluer leur précision. Dans certains cas, les chiffres ne reflètent pas exactement le changement à cause des erreurs de classification, notamment par rapport aux images des années plus anciennes (1993, 1999) où on n'a pas eu les données nécessaires pour valider. Néanmoins, les erreurs qu'on peut constater et mesurer sont celles qui occupent un taux moins important sur la superficie totale de la classe (exemple : en 1999, la classe rizières comptent 4 % de la superficie de la classe urbain 2 (801 ha) de l'année 1993 alors que la tendance générale est une diminution des surfaces agricoles et non une diminution du milieu urbain).

La figure 4.4 et le tableau 4-2 présentent la baisse du milieu agricole pour la période 1993-1999 et sa stabilité dans la période 1999-2003. Le changement intensif de ce groupe s'est passé pendant la période de 1993 à 1999, la superficie s'est réduite de 7692 ha (soit 15 % de la superficie totale, 20 % de celle du groupe). C'est le résultat de la diminution des milieux sec (classe 3) et humide 2 (classe 2).

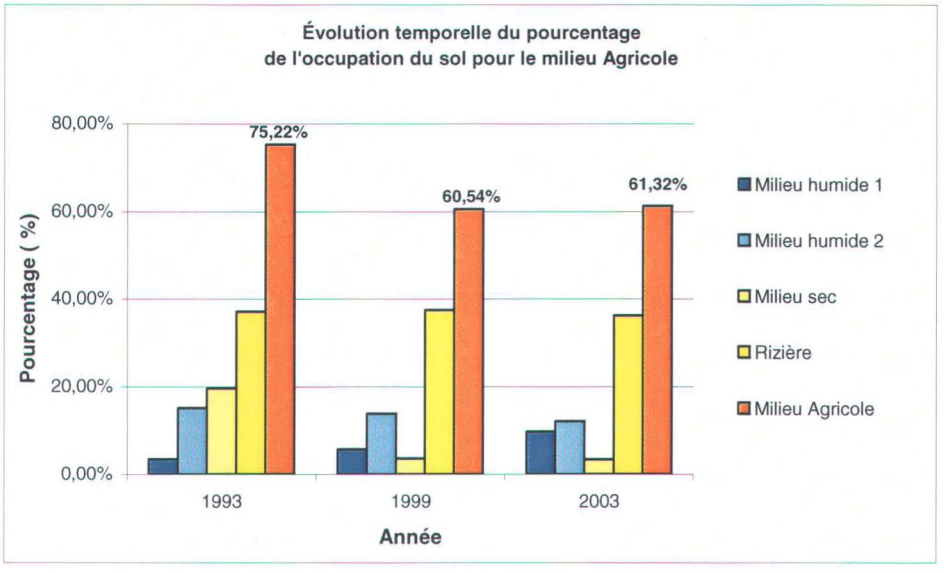


Figure 4.4 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour le milieu agricole.

Par contre, la période de 1999 à 2003 est marquée par une très légère augmentation de 0,8 % (408 ha) du milieu agricole, résultat de l'augmentation du milieu humide 1. C'est la superficie du milieu humide 1 (1) qui a augmenté dans cette période. C'est la baisse des superficies du milieu

humide 2 (2), de l'eau (6) et des rizières (8) entre 1999 et 2003 ont contribué à cette augmentation du milieu humide 1. En fait, ces trois classes contribuent à plus de 60% de la surface du milieu humide 1. Pour la classe rizières, malgré une récurrence stable, sa superficie est encore restreinte par les activités urbanisées. Une portion de 13 % (2504 ha) de cette classe en 1993 et 16 % (3055 ha) de celle de 1999 est devenue des zones classées milieu urbain. Toutefois, le milieu sec a subi une diminution très importante en 1999. Cela s'explique par l'augmentation de la classe eau, la majorité des terres sèches a été remplacé par des champs humides ou inondées. Le tableau 4-2 montre des superficies inverses de 1993 à 2003 entre le milieu sec d'une part, et le milieu humide 1 et la classe eau d'autre part. La superficie de la classe milieu sec diminue de 20 à 4 % de la superficie du groupe milieu agricole tandis que la classe milieu humide 1 augmente de 4 à 10 % et la classe eau de 5 à 10 %.

On peut expliquer la diminution de superficie des terres agricoles au profit des zones urbaines par l'accroissement de la population et du développement de l'infrastructure. Néanmoins, on constate que la plupart des changements des terres agricoles est l'interaction parmi les quatre sous-classes de ce groupe. Par ailleurs, le calendrier agricole peut être une des raisons du changement de ce type de l'occupation du sol.

Sur l'ensemble du secteur d'étude, le milieu forêt et arbustif n'occupe qu'une petite partie de la superficie totale. La classe forêt occupe la majorité de cette superficie. La superficie des arbustes et herbages ont tendance à varier. Les principales composantes de la forêt sont les plantations de pin, d'eucalyptus et d'acacia qui se distribuent à l'Ouest-Nord du district Soc Son sur la montagne Tam Dao et sur les petites collines ou bien dans le jardin de maisons avec légumes. La figure 4.5 montre une augmentation du milieu forestier et arbustif caractérisée par la fluctuation (de 7 à 14 % de la superficie totale) liées à la variabilité de la classe buisson, herbage. Cette dernière augmente fortement en 1999, occupe 60 % (4458 ha) de la superficie du groupe. En 2003, elle diminue à peu près la moitié (1623 ha) par rapport à l'année 1999. Tout cela peut s'expliquer par le développement d'arbustes dans la région montagneuse et de buissons et d'herbages dans la plaine sur les terres agricoles en friche. D'autre part, la baisse de la classe buisson en 2003 peut être due à sa réaffectation comme superficie agricole ou bien que celle-ci était inondée en 1999. La faible augmentation de la sous-classe forêt (1% environ) 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. La distribution des terres de forêt au nord du Vietnam a été énoncé dans la résolution et a été mise en place à partir de 1992 et se poursuivait encore en 2001 (Boissau et al, 2003). Cette résolution proposait que des terres de forêt soient distribuées aux habitants, elle était présentée à la fois comme un moyen de lutte contre la déforestation et comme une aide à la sédentarisation de la population (Boissau et al, 2003). Mais, il faut noter que l'augmentation des surfaces de plantations forestières dans le bassin versant de la rivière Câu est liée à l'aide du programme PAM- Programme Alimentaire Mondiale (ASTV et MST, 2003). Malgré une récurrence élevée, la surface du milieu forestier est restreinte par les activités agricoles et les besoins en infrastructure (comprenant des zones industrielles, des routes et des bâtiments résidentiels ou bien des zones touristiques), notamment pour la période de 1999 à 2003. Pour la période de 1993 à 1999, 15 % la superficie totale de la classe forêt est devenue des terres agricoles et des zones urbaines. Ce taux est de 16 % pour la période de 1999 à 2003, augmente de 1 % par rapport à la période précédente (1993-1999). Cette augmentation est due à l'augmentation des zones urbaines.

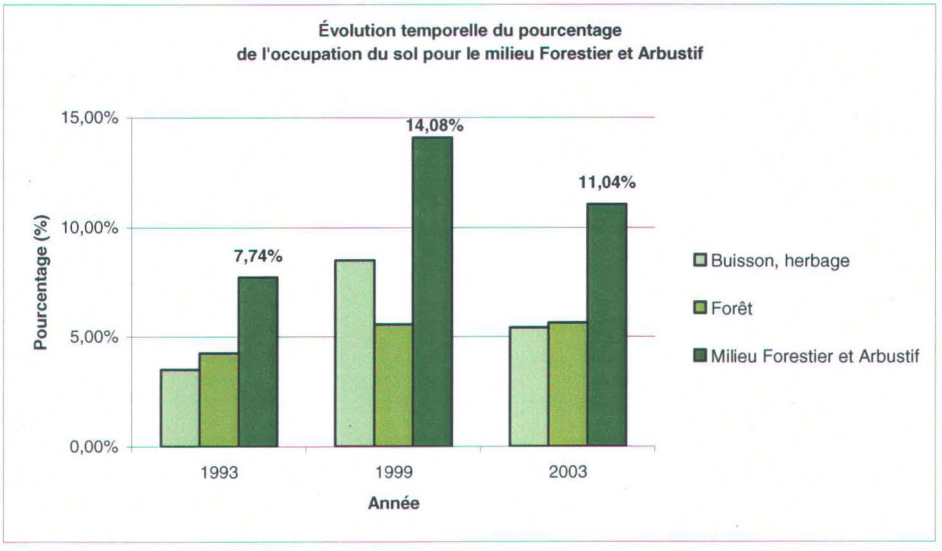


Figure 4.5 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour le milieu forestier et arbustif

Quant aux milieux urbains (figure 4.6), il est facile de constater une forte augmentation de leur superficie associée à l'urbanisation de la zone d'étude. C'est la conséquence forcée du développement et de l'accroissement démographique.

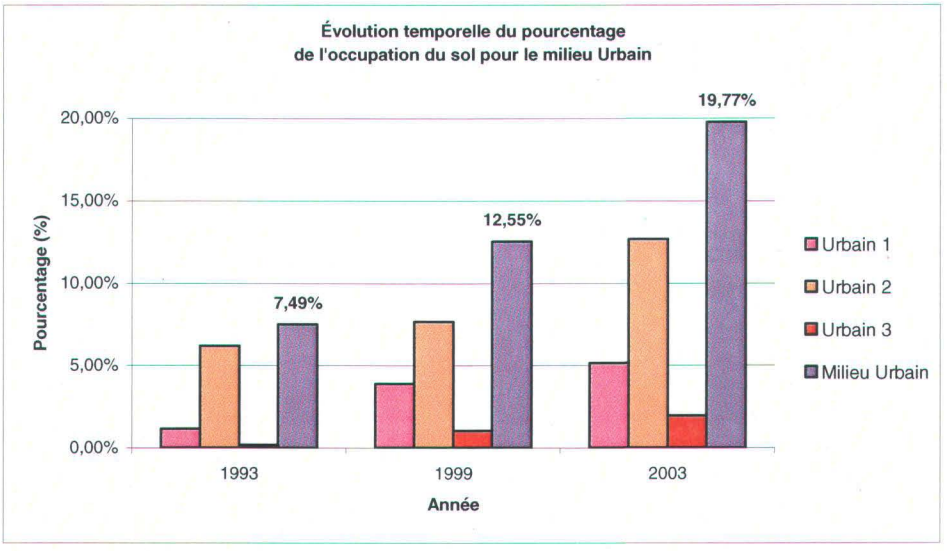


Figure 4.6 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour le milieu urbain

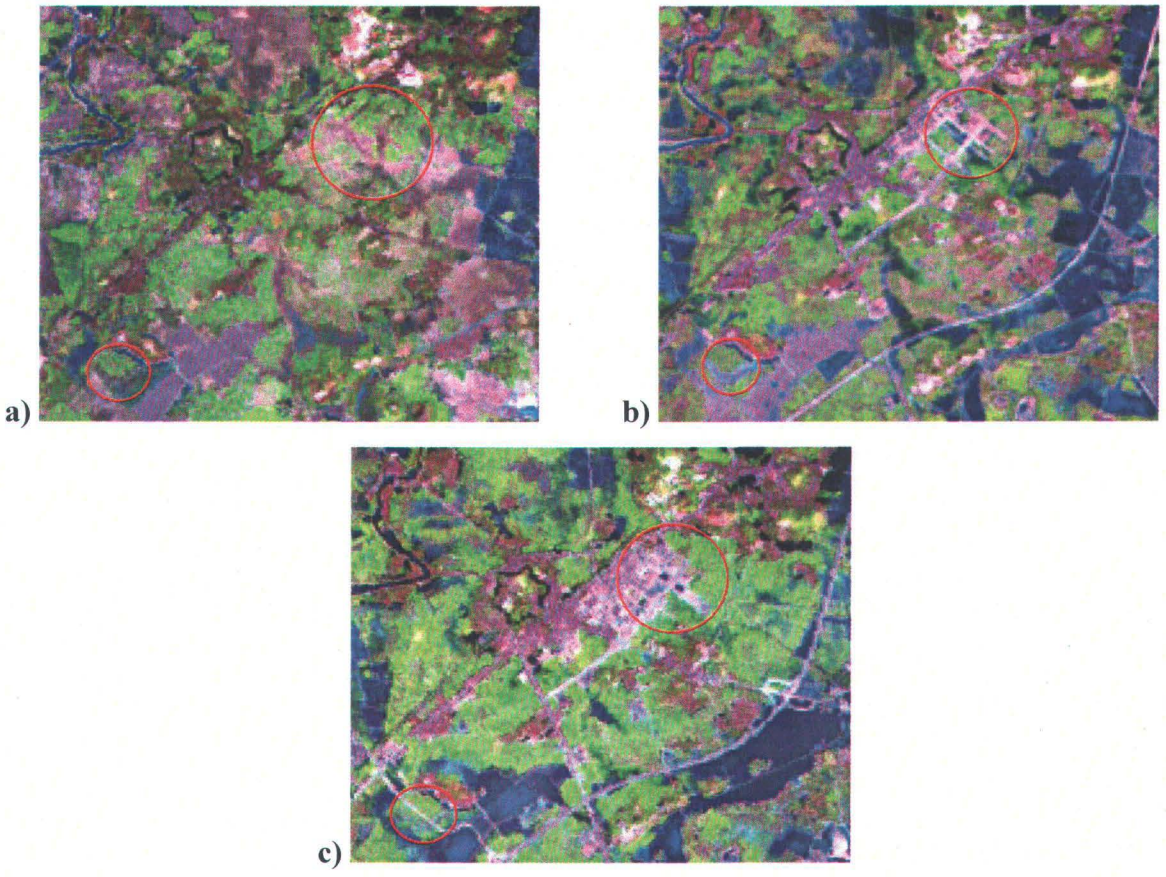


Figure 4.7 - Illustration de l'expansion du milieu urbain (niveau densité et niveau spatial) avec la contribution de la classe rizière (des cercles rouges). Composition colorée à partir de bande moyen infrarouge(R), infrarouge (V) et rouge (B) : a) 1993, b) 1999 et c) 2003.

Tout d'abord, le milieu urbain présente une superficie augmentée avec la contribution principale de la classe rizière. Ceci peut aussi être détecté visuellement sur les images dans quelques secteurs de la ville Bac Ninh (figure 4.7). Ensuite, les statistiques montrent que 24 % de la surface de la classe urbain 2 (plus faible densité) en 1993 et 14 % de celle-ci en 1999 a été transformée en classe urbain 1 (forte densité) en 2003. Malgré ceci, la superficie de la classe urbain 2 est passée de 3230 ha (en 1993) à 6645 ha environ (en 2003).

Pour la classe urbain 3, elle a connu l'augmentation la plus importante (de 88,38 ha à 1019 ha environ). Cette augmentation paraît excessive (six fois de plus par rapport à l'année 1999 et deux fois pour l'année 2003) et ces données doivent bien sur être considérées avec prudence. Cependant, elles semblent plus réalistes si l'on analyse l'origine de cette évolution. Ceci peut être liée à la stratégie de l'expansion de la province de Hanoi jusqu'à 2020 (VTGEO, 2005). Cependant, l'augmentation de ce milieu peut également être liée à l'incertitude de la classification (tableau 4-1) à cause des similitudes des signatures spectrales entre les milieux urbains (1, 2 et 3), sols nus et le milieu humide 2.

La figure 4.8 montre les fluctuations dans les surfaces de l'eau. En 1999, il y a deux fois plus d'eau qu'en 1993. Cette augmentation pouvant s'expliquer par les grandes précipitations de cette année-là, lesquelles sont la cause des crues à la fin de l'année. Effectivement, en 1999, plusieurs secteurs agricoles ont été inondés, ceci est représenté par une contribution de 36 % du milieu humide 1 (646 ha), 17 % milieu humide 2 (1356 ha), 7 % du milieu sec (679 ha) et 3 % des rizières (612 ha) à la classe eau. La période suivante (de 1999 à 2003), la surface de cette classe diminue et, une partie de celle-ci a été transformée en classes du groupe milieu agricole. 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.

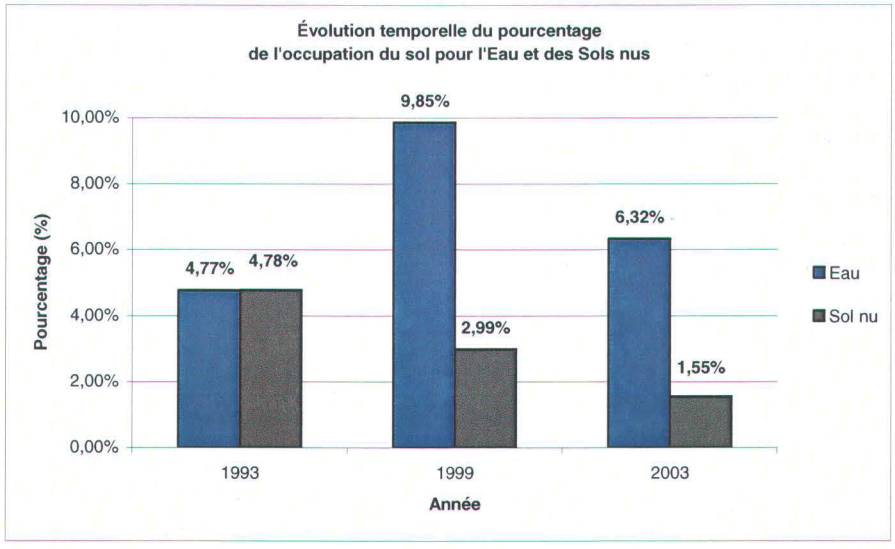


Figure 4.8 - Évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour l'eau et le sol nu.

Pour les sols nus (classe 4), ils occupent une petite superficie de la région et, se concentrent principalement au secteur de la montagne Tam Dao du district Soc Son. Le changement de cette classe est beaucoup moins important que les autres classes. Malgré ceci, de 1993 à 2003 (tableau 4.2), elle présente une faible récurrence et une baisse de 5 % (2504 ha) à 2 % (810 ha). Cette classe a été transformée en classes rizières (classe 8), buisson (classe 9) et forêt (classe 10). Cependant, elle est difficilement identifiable (erreur de classification) vu le nombre restreint de sites d'entraînement et il demeure pertinent de noter que la classe sol nu présente une signature spectrale semblable à celle de la classe urbain 3 (classe 11) ou encore à celle de d'étendue de sol labouré (milieu sec (classe 3)).

4.2 Évolution spatiale

Cette analyse est réalisée à l'aide de la matrice de changement entres les images consécutives. Ces matrices (chapitre 3) présentent l'évolution de la distribution des classes thématiques entre les différentes dates d'acquisition d'image. Elles nous permettent de comprendre la redistribution spatiale des classes comme des exemples présentés ci-dessous. On pourrait analyser l'évolution spatiale selon deux approches : soit la redistribution d'une classe aux autres, soit l'inverse. Le premier graphique (figure 4.9) présente la redistribution de la classe rizières pour l'année 1999 (les colonnes jaunes) de celle de l'année 1993 (la colonne orange) lorsque le second (figure 4.10)

montre la contribution des différentes occupations du sol dans l'expansion de classe urbain 1 entre 1993 et 2003.

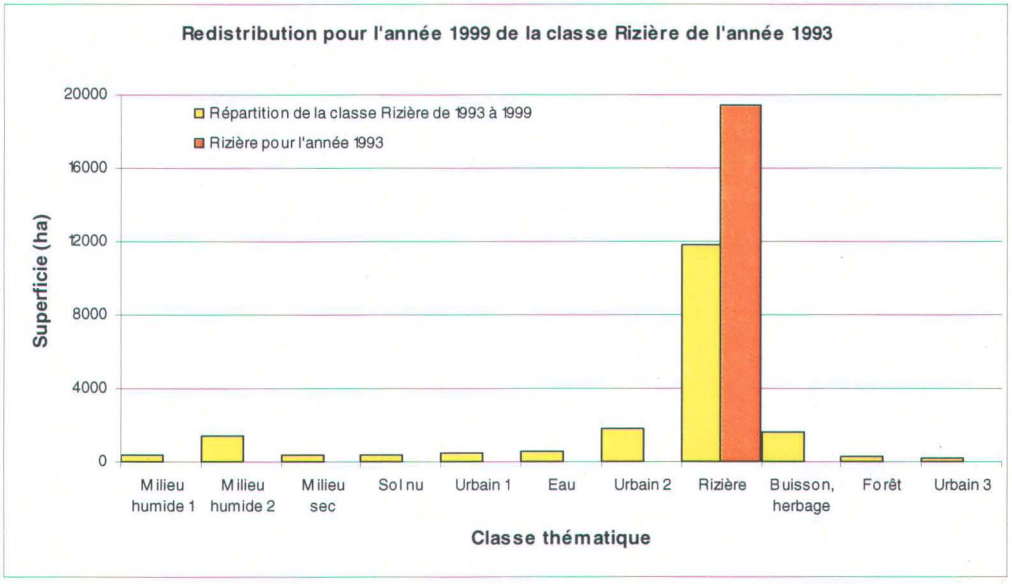


Figure 4.9 - Redistribution de classe rizières (de 1993 à 1999)

Simplement, la figure 4.9 nous 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.

L'analyse de l'évolution temporelle a souligné l'augmentation du milieu urbain où celui de forte densité (milieu urbain 1) présente un changement important (trois fois plus entre 1993 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 par une densification des zones déjà existantes (figure 4.10). Le reste de l'expansion du milieu urbain dense s'est fait au détriment des zones en construction du milieu urbain 3 (0,1 %), des zones du milieu forestier et arbustif (0,3 %), des sols nus (1,4 %), mais également des eaux ou bien des terres inondées (3 %).

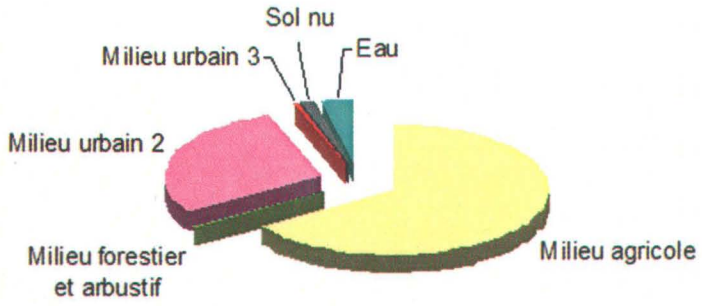


Figure 4.10 - Contribution des différentes classes d'occupation du sol à l'expansion des surfaces urbaines de forte densité entre 1993 et 2003.

Afin d'afficher les changements sur une surface de deux dimensions (cartes), nous avons utilisé la matrice de changement. Le principe de ce processus a été décrit au chapitre 3. De cette manière, les informations sur les divers types de changement peuvent être cartographiées. Les figures 4.11 et 4.12 sont deux cartes qui présentent les changements de l'occupation du sol de deux périodes, respectivement 1993-1999 et 1999-2003. Elles montrent 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. Pour la période de 1993-1999, la figure 4.11 présente le changement de la densité du milieu urbain (violet pâle). Cette carte présente aussi le remplacement du milieu agricole par le milieu urbain (violet très foncé). Le milieu forestier et arbustif augmente sur les montagnes du district Soc Son. Il ressort une expansion des surfaces de l'eau (bleu ciel). Pour la période de 1999-2003 (figure 4.12), on constate l'expansion du milieu urbain (les violets) du district Soc Son (niveau spatial et densité). Il ressort dans cette période une augmentation du milieu urbain 3 (classe 11), c'est le développement d'infrastructure (des routes, des zones services, etc.). Le milieu forestier et arbustif ne change pas beaucoup (vert foncé).

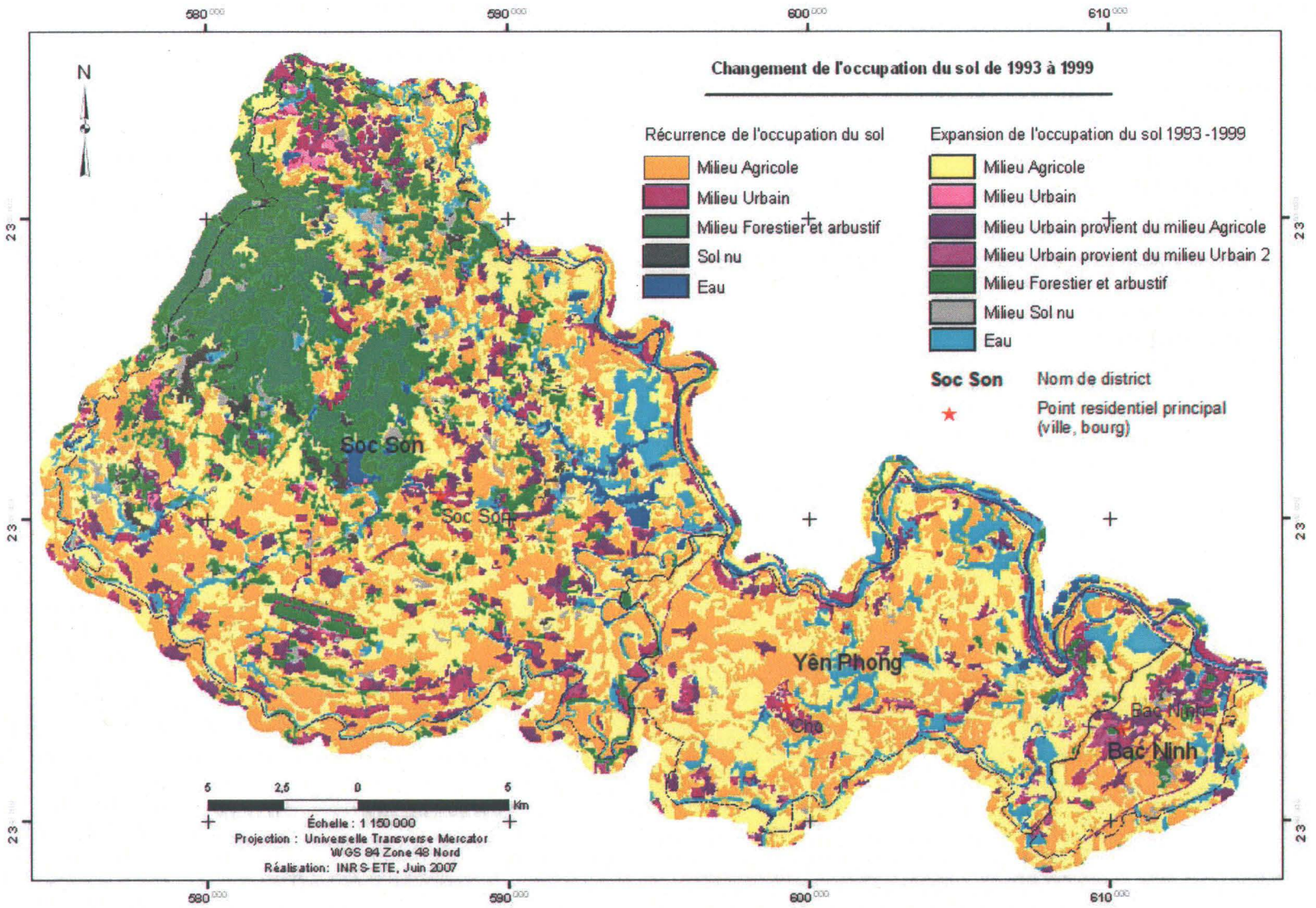


Figure 4.11 - Changement de l'occupation du sol entre 1993 et 1999.

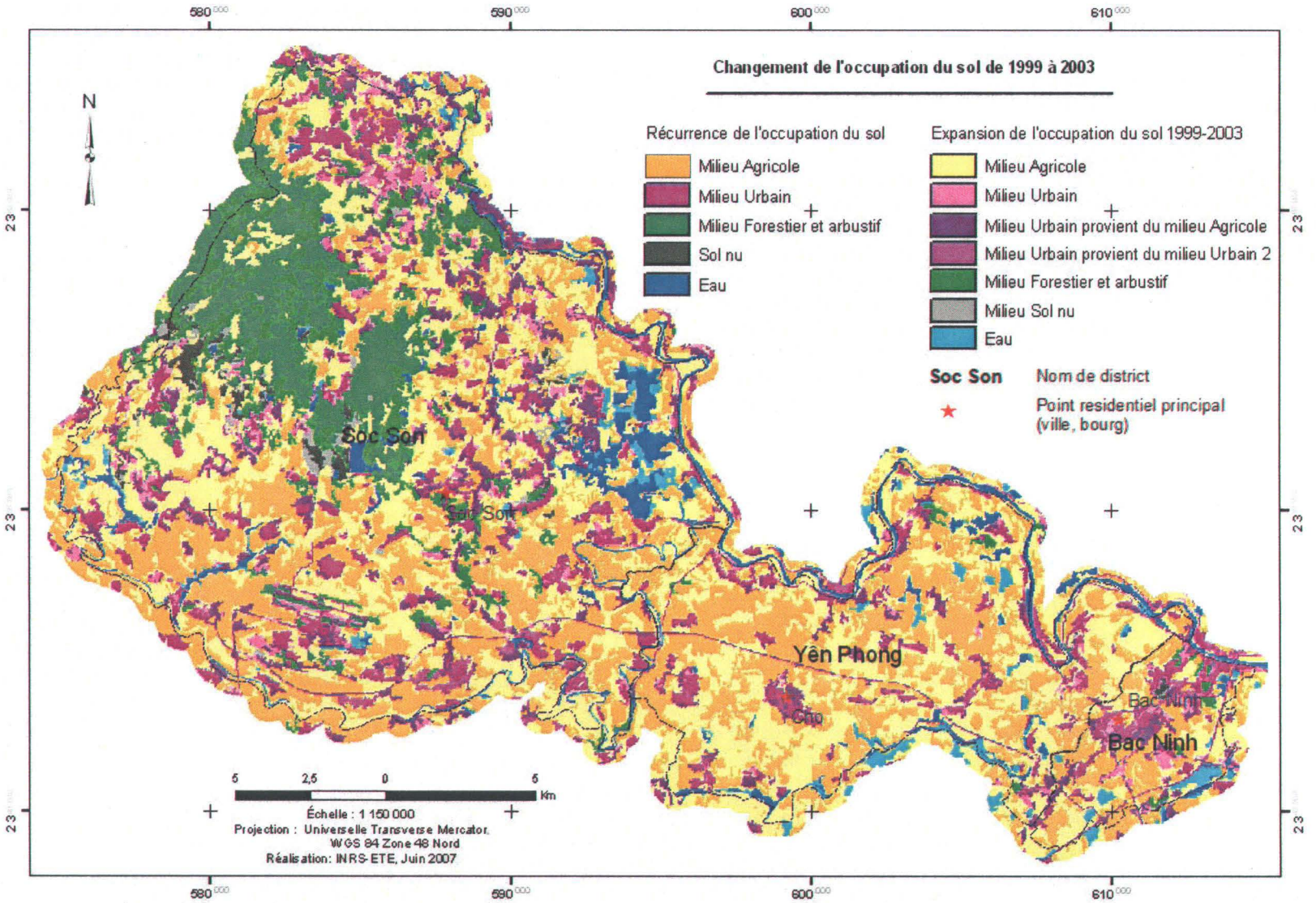


Figure 4.12 - Changement de l'occupation du sol entre 1999 et 2003.

4.3 Les facteurs influençant les changements de l'occupation du sol

La comparaison des résultats avec les documents références nous permet de déterminer les facteurs influençant le changement de l'occupation du sol: les facteurs physiques et les facteurs anthropiques. Ces derniers ont un impact plus grave et plus durable que les facteurs physiques sur les changements.

Pour les facteurs physiques, ils incluent le positionnement géographique et les caractéristiques des conditions naturelles. Tel que décrit au chapitre 1, la zone d'étude est soumise à un climat tropical humide de mousson très rigoureux. D'autre part, elle se situe aussi à l'aval d'un gros bassin versant où converge des tributaires de la rivière Câu. Par ailleurs, le décalage du calendrier agricole entre des types de plantes cultivés, ainsi que le décalage du temps d'acquisition des trois images choisies sont des facteurs importants. L'image de 2003 a été acquise le 13 janvier, un mois plus tard que deux dates précédentes (1993 et 1999), où il n'y a pas de pratique agricole (IWARP, 2003). Tous cela influence le dynamique de l'occupation du sol, une évidence est l'augmentation de l'eau en 1999 qui amène le changement d'autres types de l'occupation du sol : la baisse des champs du riz, du milieu sec, ou bien l'extension de la surface de l'eau, etc. Par ailleurs, on trouve la distance temporelle entre les trois images influence aussi l'évolution de changement. C'est pour cela que le changement de la première période semble plus important que la deuxième.

Quand on parle des facteurs anthropiques, en fait, tous les activités d'humaines mènent des impacts précis (soit plus ou moins) sur les systèmes écologiques naturels. Cependant, pour la zone d'étude, nous avons constaté certains facteurs crucials qui sont résumés ci-dessous. Tout d'abord, on constate que la libéralisation économique est un levier pour le développement multiforme des activités agricoles et également non agricole. Les nouvelles politiques du gouvernement pour cette époque joue un rôle important, ce sont la résolution 10 NQ/TW de 1988 sur la rénovation de la gestion de l'agriculture (Boissau et al, 2003), la loi foncière de 1993 ou l'arrêté 02-CP du 15 janvier 1995 pour la dévolution de droit de l'utilisation du sol, (Boissau et al, 2003; Castella et al, 2002; Lamballe, 1998). Ces politiques permettent aux agriculteurs d'avoir la propriété foncière, la liberté en investissement. Grâce à ces réformes, on met l'accent

sur l'agriculture familiale plus que sur les fermes d'état collectives. La production alimentaire a donc fait un grand bond en avant (Dao, 1998).

Ensuite, les plans gouvernementaux de développement économique, l'urbanisation et l'industrialisation ont influencé la tendance d'utilisation du sol et amené la perte des terres agricoles. La vitesse de l'urbanisation de cette région augmente en moyenne de 1,34 % par an (ASTV et MST, 2003).

L'accroissement démographique est aussi un facteur important. Les statistiques démographiques montrent qu'au delta du fleuve Rouge (y compris le bassin versant de la rivière Câu) la population rurale a augmenté de 2,5% chaque année de 1985 à 1995, (Jesus et Dao, 1998). Cela s'explique pour l'augmentation du milieu urbain de 1993 à 1999. Concernant le milieu forestier et arbustif sont les coupes de forêt pour le besoin en bois. Bien qu'il occupe une superficie moins importante dans la zone d'étude, le rapport de l'ASTV et de MST (2003) montre les surfaces du milieu forestier ont une tendance diminuée.

4.4 Les impacts de changement de l'occupation du sol sur la qualité des eaux de surface

Une variété de facteurs humains et naturels peuvent influencer la qualité et l'utilisation des cours d'eau, lacs, et les fleuves, connus sous le nom d'eau de surface. Un des facteurs les plus importants pouvant affecter la qualité de l'eau de surface d'un bassin versant est l'utilisation des terres. Un certain nombre d'études (MRE, 2005) ont prouvé que la densité de la population et du logement ainsi que les pratiques agricoles peuvent affecter la qualité de l'eau dont les concentrations en nitrate, en nitrite ainsi que celles en pesticides dans les cours d'eau.

Pour éclaircir ce point, une analyse des données statistiques de la qualité de l'eau en combinant des données de télédétection a été réalisée. 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.

Néanmoins, les documents concernant l'environnement de l'eau du bassin versant de la rivière Câu sont rares et dispersés. L'absence d'une base de données détaillées et consécutives des

stations d'observation ne nous permet pas de réaliser une analyse quantitative. Avec six paramètres mesurés en saison sèche (pH, DO, COD, BOD_5, SS et NO^{2-}) sur trois ans (1995, 1999 et 2003) d'une station unique, ce que nous avons pu faire est l'évaluation qualitative de la corrélation entre les deux grandeurs (la qualité de l'eau et le changement de l'occupation du sol). Il faut noter qu'avec seulement un point d'observation, cette analyse n'assure pas la précision, 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. Cependant, elle sera considérée comme un test afin de donner des idées pour les prochaines études.

Des études conjointes entre l'ASTV et MST (2001, 2002) montrent l'accroissement de la contamination de l'eau de surface du bassin versant de la rivière Câu par diverses activités (agriculture, industrie, exploitation des matériaux, les quartiers résidentiels, etc.), surtout au centre et à l'aval du bassin versant. En comparant les résultats avec les critères (norme A et B) de qualité de l'eau (annexe 3), on remarque que l'eau de surface est localement polluée, plus précisément dans certains endroits sur la rivière Câu, Ca Lô et au cours moyen de la rivière Công, tant au niveau de la turbidité que de la matière en suspension (SS) lesquelles sont supérieurs à la limite de la norme A. Les polluants principaux sont l'oxygène dissous (DO), la demande chimique en oxygène (COD), la demande biologique en oxygène (BOD_5), le nitrite (NO^{2-}) et l'huile. Pour tous les mois d'observation, ils dépassent la norme A. Par contre, les métaux lourds, les composés, les pesticides et les coliformes totaux ne sont presque pas présents. Leur concentration est inférieure à la limite de la norme A.

Pareillement, les données mesurées 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 (tableau 4-3, figure 4.13 et figure 4.14). Le SS est un paramètre important dans l'évaluation de la qualité de l'eau, il concerne des eaux usées municipales. Sa fluctuation dépend des caractéristiques du sol, du tapis végétatif, les caractéristiques des cours d'eau et du poids des sédiments (ASTV et MST, 2003). La concentration de ces paramètres augmente dans la région où existe des zones industrielles et des milieux urbains dense. Quant au NO^{2-}, il est un des paramètres du composé du nitrogène. Son

apparition dans l'eau est le résultat des activités agricoles, de l'élevage et des eaux usées municipales.

Tableau 4-3 : 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	$mg.l^{-1}$

(Tiré de la Norme nationale TCVN 5942:1995)

Les figures 4.13 et 4.14 illustrent les variations temporelles des paramètres. La concentration de SS est très élevée, elle dépasse la limite de la norme A de 2 à 4 fois. Malgré une grande baisse en 2003, la concentration de NO^{2-} est encore supérieure le 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 surface de l'eau (terres inondées).

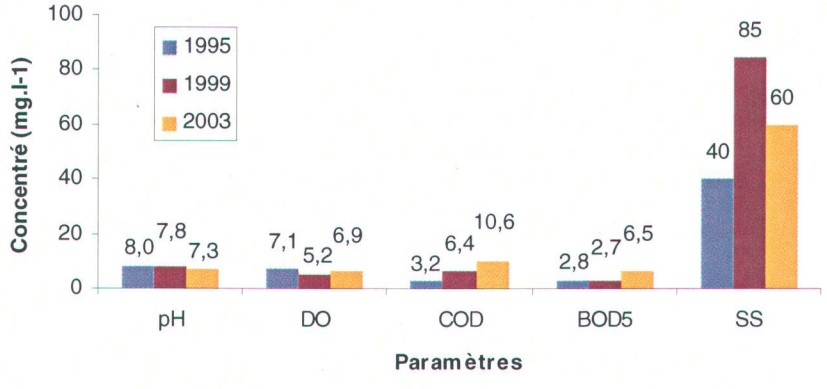


Figure 4.13 - Évolution des paramètres de la qualité de l'eau pour la saison sèche de 1995, 1999 et 2003

De plus, 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. Le nitrite existe en engrais organique, par des pratiques agricoles, il s'accumule et s'absorbe dans le sol. Quand il y a de la pluie, une partie du nitrite s'écoule vers le cours d'eau. Cela s'explique pour quoi sa concentration montre dans l'eau en 1999 et diminue en 2003. La baisse de ce paramètre peut être s'expliquer par la diminution du milieu agricole de 1999 à 2003. Pour le COD et le BOD_5, leur concentration ne dépassent presque pas la limite de la norme A, sauf celle de 2003. Mais, ces paramètres augmentent selon le temps (figure 4.13). Ces sont des paramètres concernent des eaux usées municipales. Ceci nous permet aussi de penser à l'impact du milieu urbain.

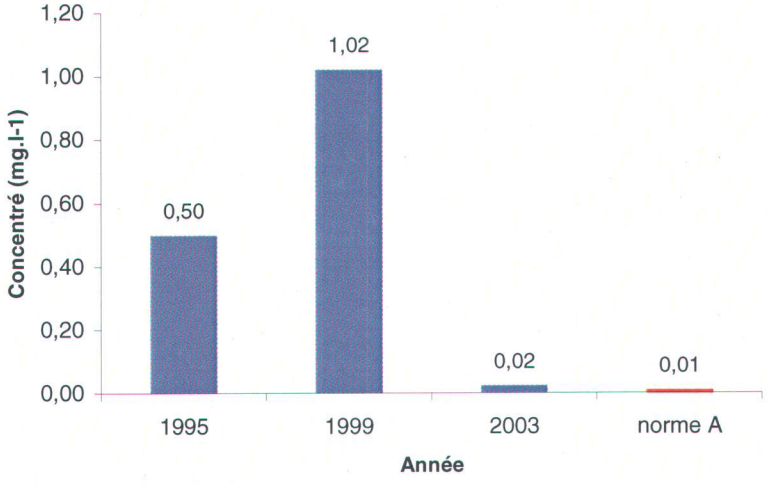


Figure 4.14 - Évolution du paramètre NO^{2-} pour la saison sèche de 1995, 1999 et 2003 (Station Pont Dap Cau)

Il faut répéter que l'évaluation se base sur les données d'une station d'observation et elle ne montre pas la tendance sur l'ensemble du bassin versant. Malgré ceci, elle montre quand même que le changement de l'occupation du sol peut affecter la qualité de l'eau. Le résultat semble plus réaliste si l'on analyse son origine. La localisation de la station Pont Dap Cau est presque au centre ville de la ville de Bac Ninh où existe un nombre important d'artisans de villages et des usines. Le milieu urbain y est de plus en plus développé. Les surfaces des terres agricoles y sont restreintes.

En conclusion, si nous avions une base de données plus détaillée de la qualité de l'eau, on pourrait avoir un résultat plus précis. Néanmoins, tout cela témoigne du potentiel d'utiliser les

informations extraites des données de la télédétection en combinant des données statistiques pour suivre la dynamique de la qualité de l'eau. Malgré cela, il faut noter ici qu'on a encore besoin des travaux sur le terrain pour les mesures afin d'analyser exactement la nature de la contamination.

4.5 Discussion

Une des méthodes existante pour détecter les changements de l'occupation du sol a été appliquée au contexte d'un bassin versant au nord du Viêt-nam. Certaines évidences sont ressorties de cette recherche, la méthode de la comparaison des classifications a montré quelques utilités et faiblesses. Pour la méthode de classifier des images, les études antérieures (VTGEO, 2005; Béland et al, 2005) ont obtenu des résultats moins précis que la présente recherche. L'approche orienté objets à partir de pseudo-bandes spectrales a donné de bons résultats, mais les confusions demeurent présentes. Nous avons aussi constaté que les changements de l'occupation du sol affectant la qualité de l'eau de surface.

Au niveau de la détection des changements, l'application de la méthode de comparaison des classifications a témoigné l'utilité d'une approche simple pour détecter des changements de l'occupation du sol. Cette méthode est basée sur la classification de deux scènes de différentes dates. L'évaluation des changements est simplement réalisée sur une base de pixel-par-pixel à l'aide d'une matrice de changement. De plus, cette méthode rend compte de la nature des changements. Elle a fourni 121 combinaisons des occupations changées «De - À» à partir de 11 classes thématiques. Cette information est très utile dans un contexte de gestion intégrée d'un bassin versant. Un autre avantage de la méthode est sa facilité à créer des cartes des changements. Cependant, la précision de ces cartes dépend de l'exactitude de chacune des classifications d'images. Puisque les occupations du sol de la zone d'étude sont complexes pour une classification automatique, cela devient une limite de l'application de la méthode choisie à la zone d'étude. Par ailleurs, avec un nombre élevé de classes thématiques, l'analyse de la matrice de changement peut être complexe. Comme nous n'avons pas eu assez de références sur le terrain pour les trois années d'observation, la validation de l'exactitude des changements n'a pas pu être effectuée. Cependant, les résultats donnant l'évolution des changements semblent réalistes lorsqu'on analyse l'origine de ceux-ci. Malgré ces limites, la méthode de la comparaison des classifications s'est montrée efficace en détectant des changements.

L'approche orientée objets a prouvé son intérêt pour la classification d'une région où les types d'occupation du sol sont morcelés. Les précisions globales obtenues sont de 69 % (1993), 80 % (1999) et 78 % (2003). En comparant ces résultats avec des études antérieures effectuées au Viêt-nam (VTGEO, 2005; Béland et al, 2005), on constate que l'approche orientée objets donne un meilleur résultat que l'approche traditionnelle. Par rapport aux études qui utilisent la même approche (Kuk et Araujo, 2006; Mapru et al, 2006; Mansor et al, 2002), les précisions obtenues sont des valeurs moyennes. Grâce à l'amélioration de la segmentation en utilisant des pseudo-bandes spectrales, on peut bien séparer des objets, notamment la séparation des arbres, des jardins dans le milieu urbain 2, ainsi que les routes, les constructions. Il est intéressant de constater que cette méthode nous permet d'éliminer presque tous les confusions entre l'ombre et les surfaces d'eau dans les secteurs de montagnes en amont du bassin versant de la rivière Câu. 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) exposent quelques limites. Avec cette résolution spatiale, certaines classes n'ont pas bien être discriminées, la confusion est inévitable. Dans cette recherche, grâce à l'analyse orientée objets qui permet de contrôler le processus de classification, nous avons eu des résultats convenables. Ces résultats nous ont ensuite permis d'analyser la relation entre le changement de l'occupation du sol et la qualité de l'eau. L'augmentation de la concentration des paramètres SS et NO^{2-} dans l'eau de surface concerne le changement des zones urbaines et agricoles. Cela montre que le changement de l'utilisation du sol affecterait la qualité de l'eau.

Malgré les limites de la méthode utilisée, les portées scientifiques, mais aussi pratiques de cette recherche sont considérables. D'abord, elle a montré l'applicabilité de la méthode de comparaison des classifications en utilisant l'approche orientée objets dans un milieu hétérogène. Même si l'analyse de l'impact des changements de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau de surface n'est que qualitative, ce projet a montré l'applicabilité et l'utilité de la télédétection dans le domaine de la gestion des ressources naturelles au Viêt-nam. Quant au côté pratique, cette recherche a montré la tendance de changement de l'occupation du sol soit l'expansion de la densité et de l'étendu du milieu urbain, la baisse du milieu agricole, la fluctuation du milieu forestier et arbustif ainsi que celle de l'eau et des sols nus. De plus, elle a montré leurs impacts

sur la qualité de l'eau de surface. Elle donnera aux gestionnaires du bassin versant une idée du comportement de l'utilisation du sol et des pressions sur la qualité de l'eau. Elle permettra d'établir, d'archiver et de mettre à jours une base de données numérique diachronique. Tout cela pourra aider les responsables du bassin versant à établir des actions concrètes en matière de gestion, de protection et de conservation de l'environnement en général et celle de l'eau en particulier.

5 CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL EN AMONT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CÂU.

La mise en contexte présentée au chapitre 1 montre le besoin de conserver, de gérer l'environnement et la qualité de l'eau du bassin versant de la rivière Câu. Un modèle mathématique visant la gestion intégrée sera appliqué sur ce bassin versant dans le cadre du projet «Gestion intégrée du bassin versant de la rivière Câu», c'est le modèle GIBSI (Gestion Intégrée des Bassin versants à l'aide d'un Système Informatisé). Ce modèle permet d'estimer les impacts de l'industrialisation, de la déforestation, de la densification du milieu urbain ou bien des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau (Rousseau et al, 2000). L'idée de cet outil est de supporter des décideurs par la modélisation des divers processus influençant la qualité de l'eau sur le bassin (pluviométrie, ruissellement, érosion des sols, transport des contaminants, écoulements en rivière et écoulements souterrains, etc.), il est donc un assemblage de modèles différentes (hydrologie, érosion des sols, etc.). En vue de construire un scénario et réaliser une simulation dans un modèle comme celui de GIBSI, il est nécessaire de rassembler plusieurs types de données. La base de données comprend des données spatiales et celles d'attribut, concernant les informations des usages de l'eau, de l'hydrologie, de l'utilisation du territoire, de la qualité de l'eau et les données socioéconomiques (Rousseau et al, 2000). Parmi ces informations, celles de l'utilisation du territoire sont normalement obtenues à partir des données de télédétection pour servir à la simulation hydrologique (HYDROTEL) ou la simulation spatiale du modèle de l'érosion des sols et du transport des contaminants (Rousseau et al, 2000; Fortin et al, 2001).

Afin d'utiliser le modèle GIBSI sur les sous bassins en amont de la rivière Câu (figure 5.1), la carte de l'occupation du sol de ces bassins a été produite pour l'année 2003. L'approche de classification orientée objets développée pour atteindre l'objectif 1 a été utilisée. Cette zone inclut presque tout le territoire de deux provinces : Thai Nguyen et Bac Kan.

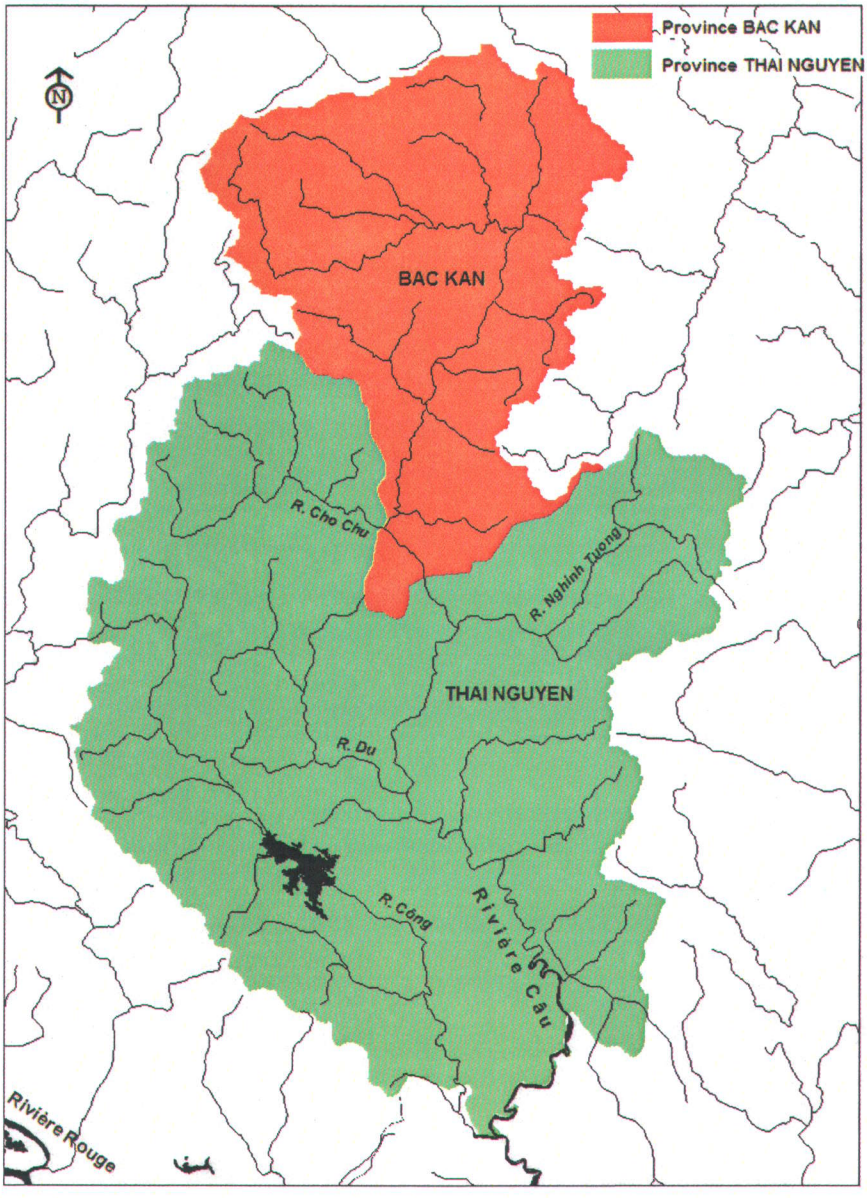


Figure 5.1 - Localisation et limite des sous-bassins en amont du bassin versant de la rivière Câu.

Une légende moins détaillée a été créée (tableau 5-1) en se basant sur les besoins du modèle (Pr. Sophie Duchesne, communication personnelle) et la capacité de l'image Landsat de classifier automatiquement un bassin versant à l'utilisation du sol complexe et morcelée. Elle comprend sept classes thématiques : Milieu Agricole, Milieu Urbain, Milieu Forestier, Arbustif, Eau, Sol nu et Mixe. Les six premières classes ont été définies à partir des 11 classes thématiques appliquées pour le sous-bassin en aval. Néanmoins, à cause de la complexité et du morcellement de l'utilisation du sol dans la plaine de ce sous-bassin versant (notamment celle de la province de

Thai Nguyen), il est nécessaire d'ajouter une classe mixte, une classe comprenant un mélange de parcelles agricoles, d'habitations et de plantations. En effet, l'interprétation visuelle de l'image Landsat-7 et une visite sur le terrain à Thai Nguyen du VTGEO (2001) a montré que l'utilisation du sol de cette province est très morcelée. La distribution spatiale de l'occupation du sol est complexe à cause des caractéristiques du relief : la plaine, les collines et les montagnes alternent. Aussi, les populations habitent partout sur le territoire (figure 5.2). Cette hétérogénéité amène des difficultés dans la séparation des objets même par rapport à la méthode de l'interprétation visuelle à l'échelle 25:000. Les photo-interprètes du VTGEO ont donc regroupé ces objets dans quelques classes mixtes selon leur capacité de les distinguer sur l'écran (par exemple: mélange de brûlis et de forêt, des plantations et des terres agricoles, des terres agricoles et des buissons, etc.).

a)

b)

Figure 5.2 - Illustration du mélange de l'occupation du sol : a) terres agricoles, buissons, plantations et habitations; b) habitations et plantations sur les collines.

Tableau 5-1 : Classes thématiques appliquées pour les sous-bassins en amont du bassin versant

Classes thématiques pour le sous bassin aval	Classes thématiques pour le sous-bassin amont	Description
Milieu humide 1	Milieu agricole (1)	Milieu agricole très humide
Milieu humide 2		Milieu agricole humide
Milieu sec		Milieu agricole sec, sans récolte
Rizières		Rizières
Milieu urbain 1	Milieu urbain (2)	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 (3)	Les feuillus, les plantations d'acacia, d'eucalyptus et de pin
Buisson, herbage	Arbustif (4)	Les buissons, les herbages et les arbustes
Eau	Eau (5)	Rivières, lacs et zones inondées
Sol nu	Sol nu (6)	Les sables, les chemins en terre, terres agricole en friche, etc.
	Mélange d'agricole, d'habitations et de plantations (7)	Entremêlement du milieu agricole, milieu urbain faible et des plantations

En fait, à l'échelle de l'ensemble du bassin versant, on constate que l'application de la méthode développée dans le parti aval n'est pas facile. Le terrain est plus complexe que celui en aval du bassin versant. Les habitations sont dispersées et entremêlées de jardins, de plantations et de buissons. Les signatures spectrales des zones ombragées dans les secteurs de montagne et celles des surfaces d'eau profonde sont semblables. La classification se basant sur seulement un niveau comme celle appliquée sur la zone en aval n'est pas appropriée dans le cas des sous-bassins amont. Afin de diminuer les confusions en conservant les sept classes nécessaires, nous avons appliqué une classification avec trois niveaux différents de segmentation. Tel que d'écrit au chapitre 3, la segmentation multi- résolution du logiciel eCognition permet de créer des objets à différentes échelles sur une même image selon le but de l'analyste. De cette manière, on peut identifier et séparer divers objets.

En général, le processus de classification est similaire à celui présenté au chapitre 3. Nous avons aussi utilisé quatre pseudo-bandes spectrales (trois premières bandes composantes principales et une NDVI) pour la segmentation. Cette dernière a été appliquée à trois niveaux (figure 5.3). Le premier niveau (niveau inférieur) permet d'identifier des objets de plus petite superficie (zones humides, groupement d'habitations, ombres, des plantations sur les petites collines). Le niveau trois (niveau supérieur) permet d'identifier des objets de plus grande superficie (les forêts, les terres agricoles entremêlées d'habitations et de plantations). Les autres objets ont donc été identifiés au niveau deux-niveau moyen. On y retrouve les zones urbaines forte densité, les lacs, les rivières et les régions dites mixtes (classe 7) lesquelles sont les régions où l'on retrouve des parcelles agricoles, des habitations et des plantations, etc. Le niveau deux de la segmentation a été utilisé pour la fusion de tous objets des trois niveaux déjà classifiés afin d'obtenir une classification finale comprenant sept classes thématiques.

Pour l'étape de la classification, nous avons appliqué la méthode développée pour le sous-bassin en aval. La seule différence est la création de l'hiérarchie des classes. Cette dernière a été créée selon les liens entre des classes. Par exemple, la classe milieu forestier a été fusionnée à partir des sous-classes: ombres, feuillues et plantations. Aux niveaux 2 et 3, les secteurs d'ombres dues aux pentes escarpées des montagnes se confondent avec les surfaces d'eau profonde aussi très sombre dans les bandes de visible et de l'infrarouge. Afin de diminuer ces confusions, d'abord la sous-classe ombre a été classifiée au niveau 1. Ensuite, pour qu'on puisse fusionner l'ombre dans la classe milieu forestier, cette sous-classe a été définie au niveau 2 par la relation des objets inférieurs à travers l'algorithme des fonctions d'appartenance. Par contre, la définition de la sous-classe feuillue se base sur la relation des objets supérieurs. À cause de l'apparition des liens entre des objets de niveaux différents, le mode de classification utilisé dans ce cas est le «*with class-related feature*». Le résultat de la classification (figure 5.4) est donc un réseau d'objets classifiés par des caractéristiques, des liens entre les voisins et des liens entre des objets de différents niveaux (supérieur ou inférieur) de l'hiérarchie.

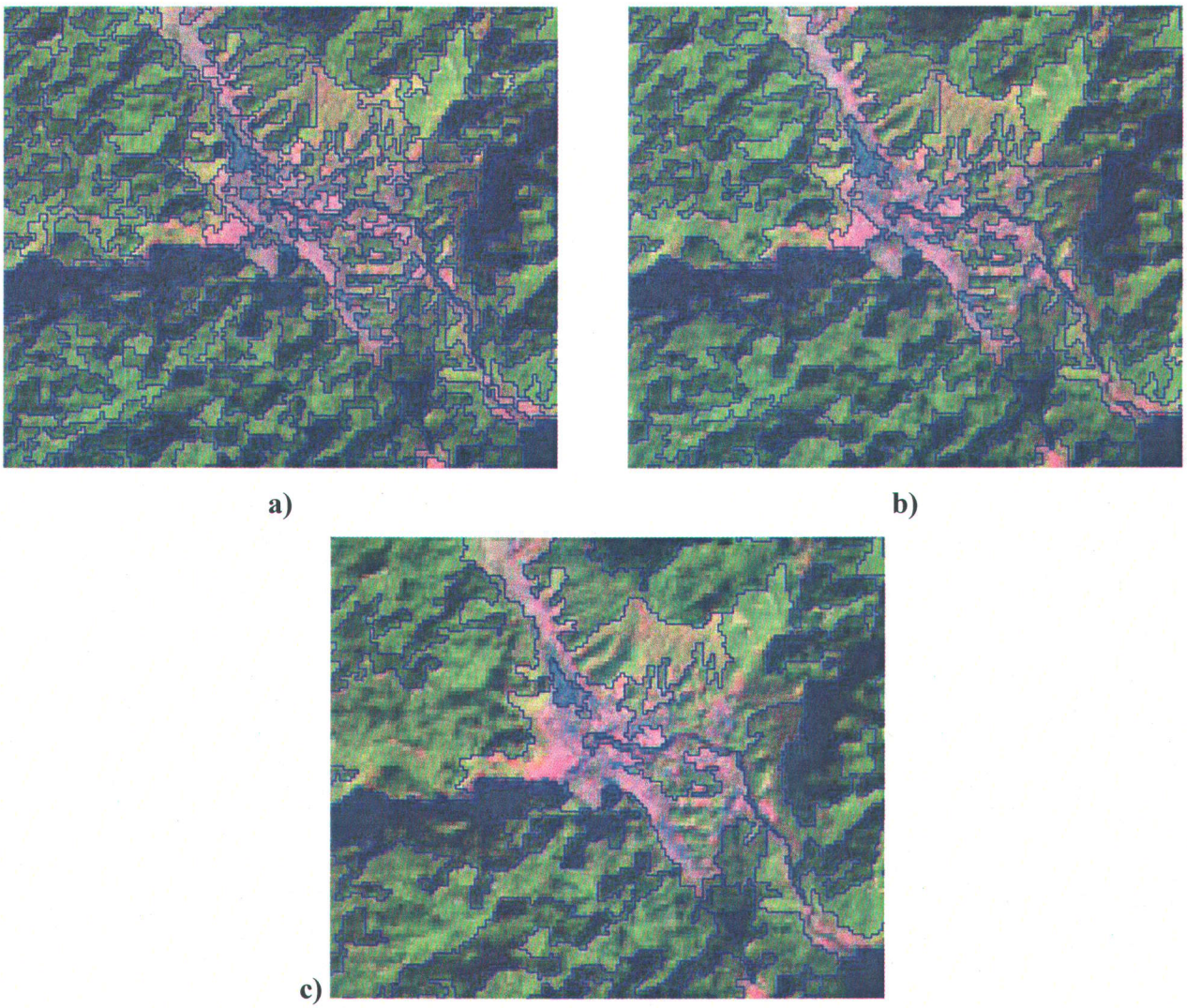


Figure 5.3 - Trois niveaux différents de la segmentation.
Composition colorée RVB des bande moyen infrarouge(R), infrarouge (V) et rouge (B),
a) niveau 1 (inférieur), b) niveau 2 (moyen), c) niveau 3 (supérieur)

Le résultat obtenu n'est pas vraiment parfait mais convenable pour l'instant. Il reste des confusions, donc des erreurs de classification. Le manque de données de références sur le terrain (13 janvier 2003) ne nous permet pas de réaliser la validation. La résolution spatiale de l'image utilisée (30 m) est une limite, mais l'hiérarchie des classes a aussi besoin d'être reprise. L'application de cette méthode au contexte du bassin versant de la rivière Câu pourrait donner de meilleurs résultats (meilleures séparabilités) si nous avions une stratégie plus appropriée et plus logique d'établissant de l'hiérarchie des classes. Les images de haute résolution spatiale seraient

aussi nécessaires, notamment pour distinguer les zones habitées des terres agricoles sur les collines.

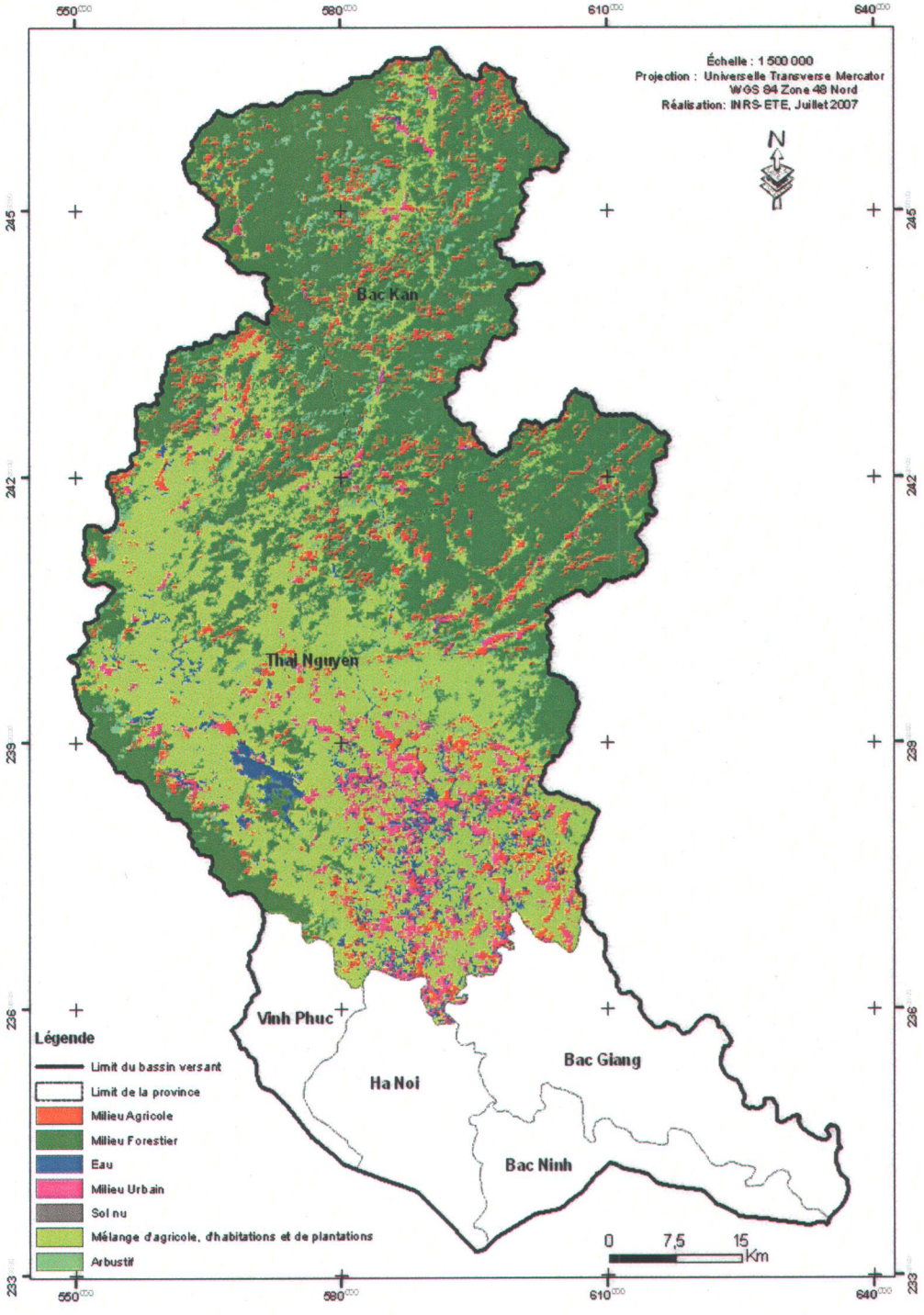


Figure 5.4 - L'occupation du sol des sous-bassins en amont du bassin versant de la rivière Câu.

6 CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette recherche était la détection des changements de l'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Câu entre les années 1993 et 2003 en utilisant la télédétection. Les trois objectifs secondaires étaient l'établissement d'une méthode pour détecter le changement de l'occupation du sol à partir des données satellitaires multi-sources et multi temporelles disponible, l'identification des causes des changements de l'occupation du sol et l'estimation les impacts de ces derniers sur la qualité de l'eau de surface. Ces objectifs ont été atteints. L'hypothèse scientifique de cette recherche était que la qualité de l'eau de surface est reliée aux types d'occupation du sol du bassin versant et l'hypothèse de nature technique était que la classification orientée-objets permet de mieux classifier l'occupation du sol que l'approche traditionnelle par pixel. Ces deux hypothèses ont été validées. Trois images Landsat ont été classifiées. Les classifications ont permis d'obtenir des informations quantitatives sur l'occupation du sol en 1993, 1999 et 2003 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 ressort également une diminution significative des espaces agricoles. Parmi les facteurs influençant le changement de l'occupation du sol, les facteurs anthropiques sont plus importants que les facteurs physiques.

L'approche orientée-objets s'est montrée très efficace. Une amélioration significative des résultats a été obtenue par rapport à l'utilisation des méthodes de classification traditionnelle. Mais la résolution spatiale grossière des images Landsat est encore une limite. Les confusions dues à des similitudes des signatures spectrales entre quelques classes thématiques demeurent présentes. Le manque de précision des résultats nous conduit cependant à envisager l'utilisation d'images de plus haute résolution spatiale (pour mieux discriminer la zone urbanisée) et des traitements mieux adaptés pour les études postérieures.

Parallèlement, l'application de la méthode développée dans le parti amont du bassin versant (Landsat ETM 13/01/2003) montre les mêmes limites dues à la complexité de l'utilisation du sol de cette région. Une segmentation de trois niveaux différents permet de diminuer les confusions,

notamment celles entre les zones ombragées et les surfaces d'eau profonde. Cependant, la confusion entre les habitations, les jardins et les plantations demeure.

Cependant, cette recherche a montré quelques limites. Le milieu complexe et 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. Néanmoins, les résultats obtenus offrent des perspectives très encourageantes sur la possibilité d'intégrer des informations extraites des données de télédétection dans un système automatisé de gestion intégrée afin de développer des outils pour mieux évaluer les impacts des changements de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau d'un bassin versant. Les premiers résultats concernant l'analyse de la relation entre les changements de l'occupation du sol et la qualité de l'eau confirment l'intérêt et la possibilité de l'estimation de la dynamique de la qualité de l'eau de surface à l'aide des données de télédétection. Ainsi, afin d'exploiter le potentiel d'un outil de gestion intégrée comme le modèle GIBSI pour suivre les impacts des changements de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau pour l'ensemble du bassin versant de la rivière Câu depuis l'année 1993, les cartes de l'utilisation du sol des années antérieures sont nécessaires. Il est recommandé de faire une classification orientée-objets des images Landsat TM de 1993 et 1999 selon l'approche de segmentation à trois niveaux appliquée sur l'image Landsat ETM de 2003. L'intégration de ces cartes dans le modèle GIBSI permettrait de tenir compte de l'évolution de l'occupation du sol entre 1993 et 2003 dans les simulations des paramètres de la qualité de l'eau et de comparer les résultats avec les données réelles de qualité de l'eau même si elles sont restreintes.

Pour les prochaines études, il est aussi noté que des campagnes de terrain sont vraiment nécessaires. Les informations obtenues sur le terrain nous permettraient 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. À ce moment, on pourrait même utiliser l'image Landsat ETM d'années plus récentes (2006, 2007 voire 2008). Les images de haute résolution aideraient aussi pour obtenir des informations détaillées (les bâtiments, les zones industrielles, les habitations isolées, etc.). Une approche de

cartographie de l'occupation du sol qui intégrerait des classifications issues d'images de résolutions différentes (Landsat ETM, 30m et Quickbird, 4m) serait aussi envisagée.

ANNEXE 1 RAPPORT SUR LE TERRAIN

Afin de pouvoir choisir des échantillons pour la classification et l'évaluation de son exactitude, on a effectué deux visites sur le terrain. La première était en juillet 2007 et la seconde était en août 2007. Un nombre de 20 points d'observation ont été visités (résumé au tableau A1.1) sur le sous bassin versant (figure A1.1). Chacun des points a été décrit selon 4 orientations et des photos ont été prises à chaque orientation (figure A1.2).

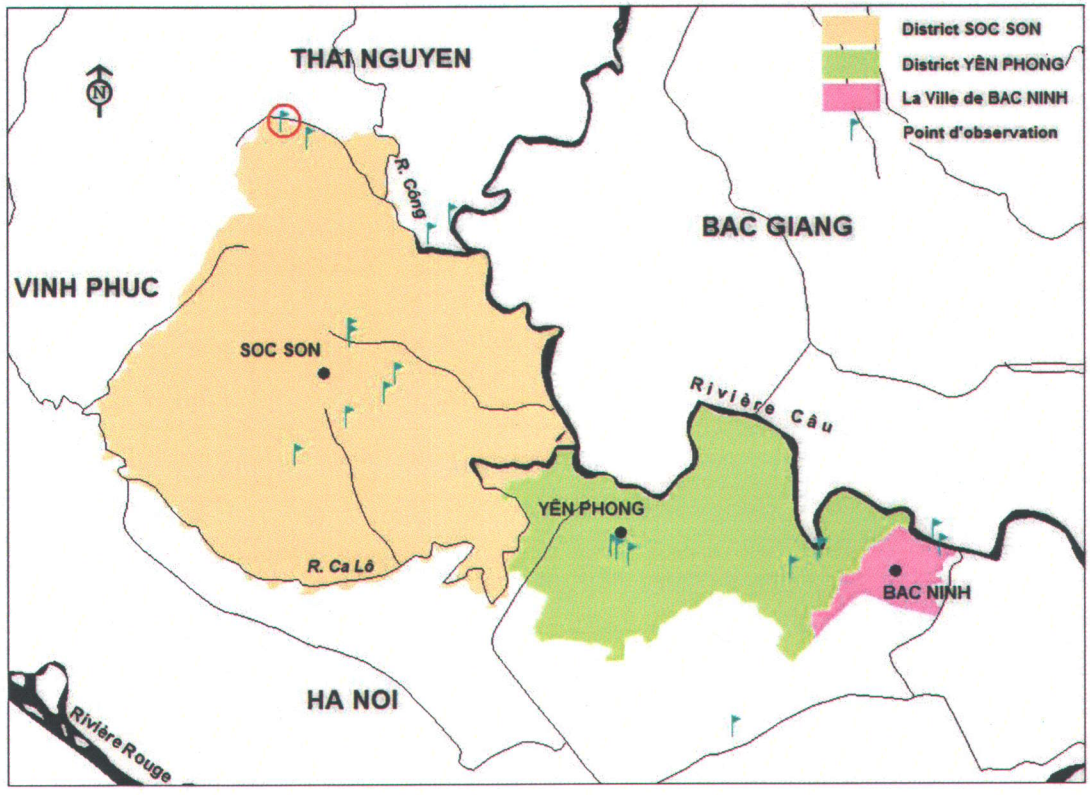


Figure A1.1 - Les secteurs visités et les 20 points d'observation sur le terrain

Tableau A1-1 : Résumé des informations des 20 points d'observation.

No	Coordonnées X	Coordonnées Y	Information générale au point d'observation	Lieu
District Yen Phong et la ville de Bac Ninh, Bac Ninh				
1	604342	2335920	Nouveau quartier et zone industrielle Nord Tu Son.	District Tu Son - Bac Ninh
2	613949	2344302	Milieu urbain de forte densité.	Ville de Bac Ninh
3				
4	608405	2344223	Milieu urbain de faible densité, rizières.	Commune Van An
5	608299	2344121	Milieu urbain dense. Plusieurs maisons ont été reconstruites en 2002.	Commune Van An
6	607644	2343282	Rizière, milieu urbain de faible densité + des plantations d'eucalyptus.	Commune Dong Phong,
7	599558	2343879	Milieu urbain de forte densité, plusieurs nouvelles maisons ont été construites sur le milieu agricole.	Bourg Cho
8	599002	2344154	Milieu urbain de forte densité, des herbages.	Bourg Cho
9	598728	2344319	La transition du milieu agricole à un milieu en construction.	Bourg Cho
10	613654	2344997	La rivière Câu. Milieu urbain de forte densité, des usines.	Ville de Bac Ninh
District Soc Son, Hanoi				
11	584082	2348512	Est : Rizières; North : Rizières et la zone industrielle Noi Bai.	Commune Mai Dinh
12	586472	2350282	Les maisons alternent avec un mélange de plantations d'acacia, d'eucalyptus et des buissons, arbustes.	Commune Mai Dinh
13	588248	2351427	Milieu urbain de forte densité.	Bourg Soc Son
14	588734	2352286	Milieu urbain de faible densité + rizières	Commune Phu Linh
15	586639	2354053	Plantations d'acacia	Commune Phu Linh
16	586569	2354406	Utilisation complexe, milieu urbain de faible densité + le mélange des plantations de pin, d'acacia et d'eucalyptus.	Zone touristique de Temple Soc, commune Phu Linh
17	590301	2358794	Milieu urbain de forte densité, les activités d'exploitation des matériaux (sables).	Pont Da Phuc, la rivière Công, Commune Trung Gia
18	591242	2359643	Rizières.	La rivière Câu, Commune Thuan Thanh, Pho Yen, Thai Nguyen
19	583506	2363971	Plantations d'acacia, milieu urbain de très faible densité. Théiers plantés sur les petites collines et dans le jardin des maisons.	Commune Bac Son
20	584679	2363192	Sur les collines, des théiers s'insèrent entre les plantations d'eucalyptus. La population est clairsemée.	Commune Bac Son

Date : *6 août 2006* **Météo** : *Pluie, passages nuageux*
Numéro de point : 19
Coordonnées : X: *48583506* Y: *2363971* Z: *8m*
Commune : *Bac Son – district Soc Son – province Hanoi*
Observateur : *Kim Huong Hoang*
Note : *Sur l'ensemble du secteur, les plantations alternent avec les buissons et les arbustes. Le milieu urbain est de faible densité, les maisons sont éparses sur les petites collines et elles sont entourées par des végétaux comme des plantations d'acacias et divers types de plantes cultivés.*

	Information d'occupation du sol	Carte interprétée	Image	Photo
Observation point				
Est	*Plantation d'acacias, d'eucalyptus + urbain 2 + théiers*	*Végétation*	*Le mélange des couleurs vert, rose pâle et ton clair. Texture : grain fin*	40
Ouest	*Urbain 2 + divers types de végétaux (des théiers)*	*Végétation*	*Le mélange des couleurs vert, rose pâle et ton clair. Texture : grain fin*	41
Sud	*Urbain 2, divers végétaux (des théiers)*	*Végétation*	*Le mélange des couleurs vert, rose pâle et ton clair. Texture : grain fin*	42
Nord	*Plantation d'acacias*	*Végétation*	*Le mélange des couleurs vert, rose pâle et ton clair.Texture : grain fin*	39

Figure A1.2 - Exemple d'une fiche résumant les informations recueillies au point d'observation No.19 (marqué par un cercle rouge sur la figure A1.1)

ANNEXE 2 DESCRIPTION DES CLASSES THÉMATIQUES

La présente annexe vise la description des 11 classes thématiques et la présentation des sites d'entraînement correspondant à chaque classe. Les figures ci-dessous présentent des exemples de sites d'entraînement pour chacune des classes d'occupation du sol pour l'image de 1999. Les illustrations de la classe milieu urbain 3 (figure A2.11) sont pour l'image de 2003.

L'attribution manuelle des sites d'entraînement pour chacune des classes est effectuée par l'outil «*Select Samples*» dans le logiciel eCognition, les objets sont affichés par la composition fausses couleurs RVB rehaussant la réflectance et l'humidité des sols (Rouge = bande moyen infrarouge(5), Vert = bande infrarouge (4), Bleu = bande rouge (3)).

Toutes les classes ont été bien distinguées sur l'image de 1999, néanmoins la classe milieu urbain 3 paraît plus clairement sur l'image 2003. Cela s'explique pourquoi nous avons utilisé ces deux images pour la description des classes.

Des photos ont été prises pour illustrer les classes. Néanmoins, certaines d'entre elles ne correspondent pas vraiment à l'apparence de la classe à cause du décalage de temps entre les images utilisées (1995, 1999, 2003) et les visites sur le terrain (2006).

1. Milieu humide 1

Milieu humide 1 et 2 sont effectivement des champs avant (champs labourés) ou pendant la période de semence du riz. Dans cette période, tous les champs sont remplis de l'eau. Visuellement, ils s'affichent sous des teintes bleu-gris s'approchant à l'occasion du bleu pâle ou bien de ciel. Normalement, les milieux humides 1 peuvent être identifiés sans trop de difficulté, néanmoins dans le cas présent ils sont confondus avec les cours d'eau et les lacs.

Photo de champs humides (Bac Ninh, juillet 2006)

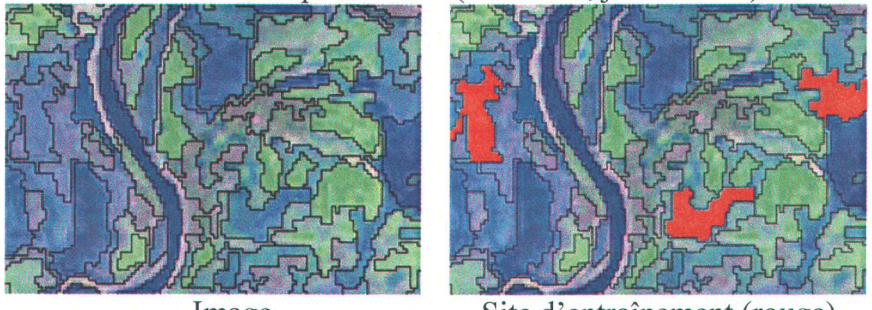


Image Site d'entraînement (rouge)

Figure A2.1 - Photo du milieu humide 1 et ses sites d'entraînement

2. Milieu humide 2

Cette classe comprend des champs sans récolte, mais ils sont plus secs que la classe Milieu humide 1 et plus humides que la classe Milieu sec. Ils paraissent violets sur les images. C'est la raison qu'ils se confondent souvent avec la classe Milieu urbain 1.

Photo de champs humides (Bac Ninh, juillet 2006)

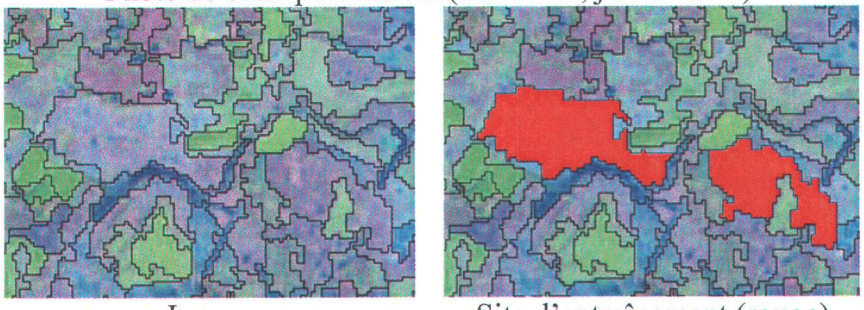


Image Site d'entraînement (rouge)

Figure A2.2 - Photo du milieu humide 2 et ses sites d'entraînement

3. Milieu sec

Le milieu sec inclut les champs du riz dans la période sans récolte (en jachère) ou peut être les champs des cultures vivrières en terre sèche. Au niveau de l'occupation du sol, cette classe peut être considérée des sols nus. Néanmoins, en vue d'avoir un portrait représentatif de la forte transition du milieu agricole, les milieux secs ont été gardés comme une classe indépendante. Ce choix a entraîné des erreurs dans la classification. Sur la composition colorée, elle apparaît sous des teintes rose/violet pâle. Il n'y a pas de photos pour illustrer cette classe.

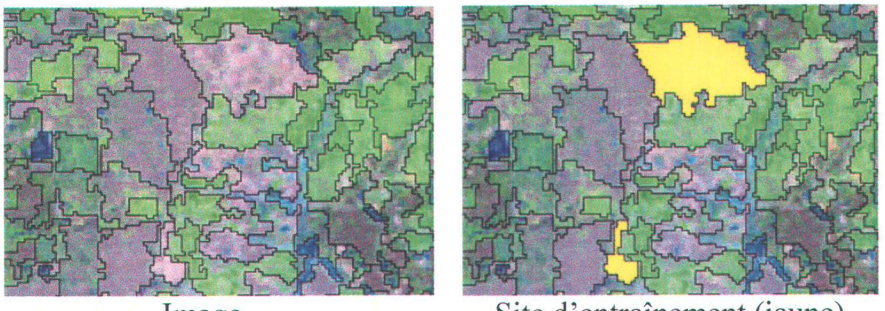


Image Site d'entraînement (jaune)

Figure A2.3 - Illustration des sites d'entraînement du milieu sec

4. Sol nu

La classe Sol nu est caractérisée par l'absence d'activité chlorophyllienne et s'affiche dans des teintes assez foncées de brun, mauve ou de rose clair. Celles-ci soulignent l'absence de végétation et met en évidence la présence de sol dénudé. Cette classe inclut notamment les chemins en terre, les zones d'exploitation des matériaux de construction (les sablières, gravières), les friches sur la montagne, etc. Vu que la signature spectrale des sols nus s'approche de celle des zones urbanisées ou des zones sèches, on a rencontré des difficultés à distinguer ces classes les unes des autres.

Photo de la rivière Công (Soc Son, août 2006)

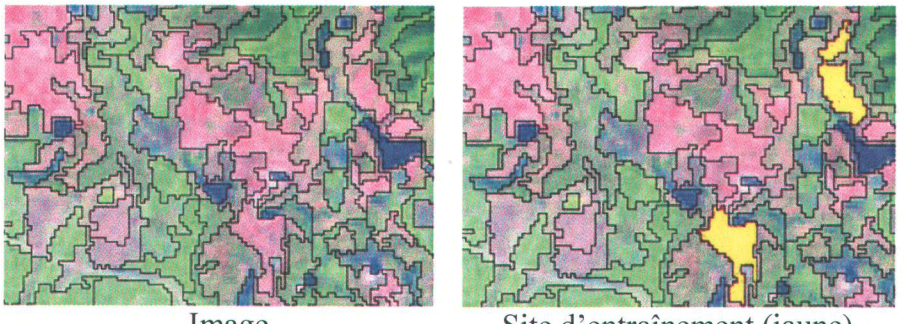


Image Site d'entraînement (jaune)

Figure A2.4 - Photo de la classe sol nu et ses sites d'entraînement

5. Milieu urbain 1

Cette classe représente les zones urbanisées de forte densité, elle inclut notamment les villes, les bourgs ou les villages en banlieue des grandes villes. Elles s'affichent sous la teinte violette foncée. Bien que sa signature spectrale s'approche de celle des zones milieux humides 2, leurs textures et leurs formes permettent de les distinguer par l'approche orientée-objets.

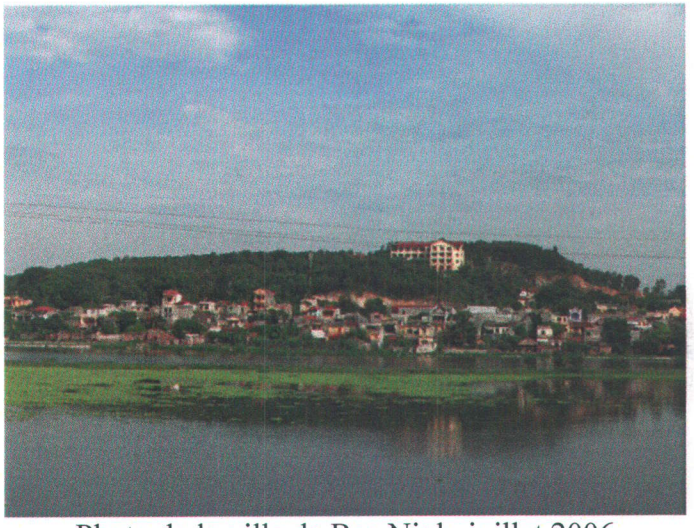


Photo de la ville de Bac Ninh, juillet 2006

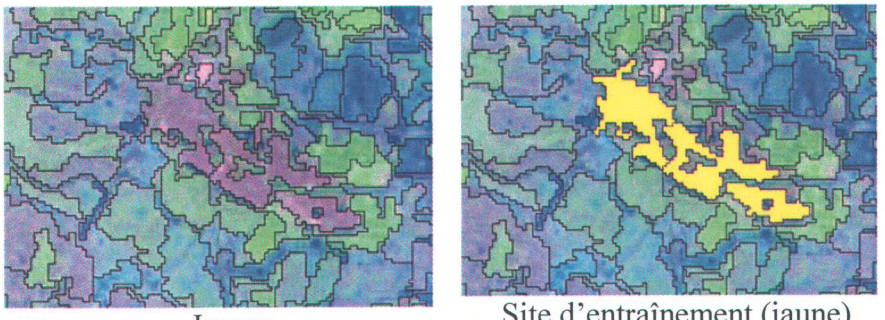


Image | Site d'entraînement (jaune)

Figure A2.5 - Photo du milieu urbain 1 et ses sites d'entraînement

6. Eau

L'eau inclut les mares, les lacs et les rivières. Dans ce cas d'étude, elle inclut aussi les champs inondés. Cette classe s'affiche en bleu, de pâle à foncé. Dans certains secteurs, elle apparaît en vert foncé lorsque les mares sont couvertes de lentilles et de jacinthes d'eau. Il est à noter que c'est en 1999 que l'on a retrouvé le plus de champs inondés.

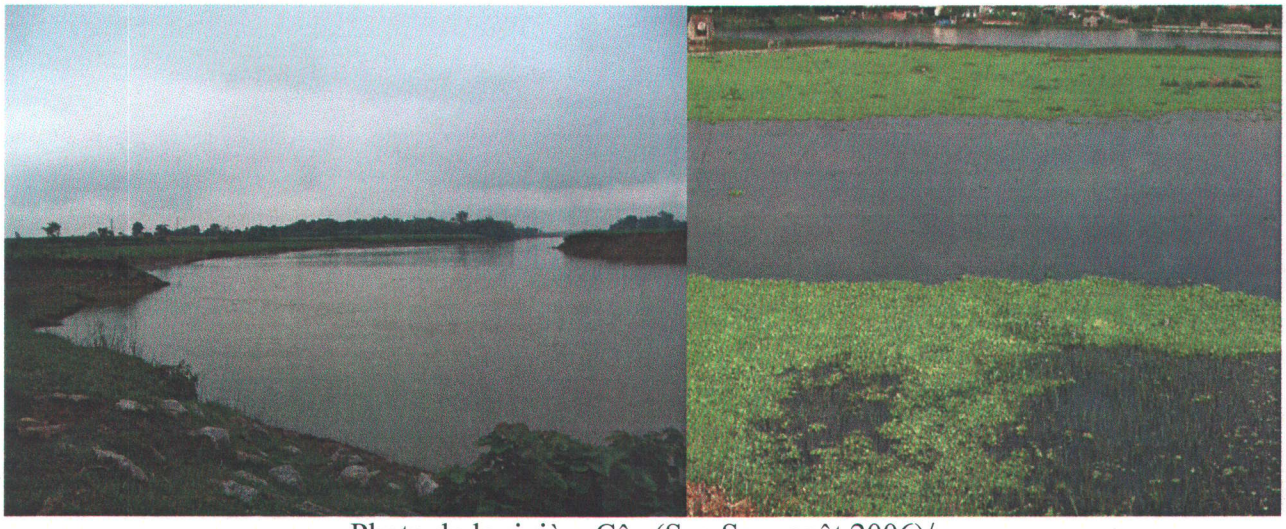


Photo de la rivière Câu (Soc Son, août 2006)/
les lentilles d'eau couvrent la surface du lac ou de la mare (Bac Ninh, juillet 2006)

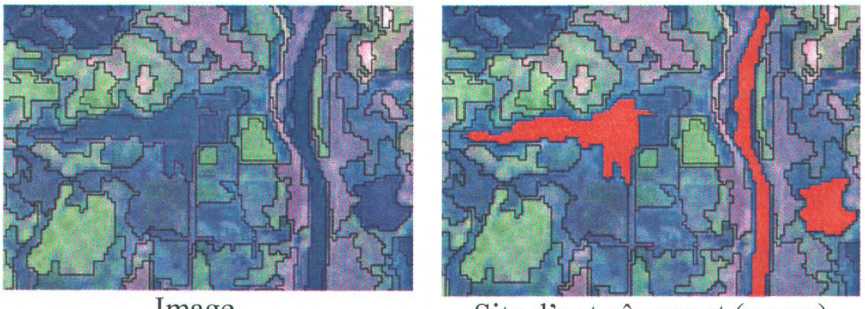


Image Site d'entraînement (rouge)

Figure A2.6 - Photo de la classe eau et ses sites d'entraînement

7. Milieu urbain 2

Les zones urbaines 2 sont les villages qui incluent des jardins. Elles sont hétérogènes et contiennent souvent d'autres types d'utilisation : arbres, milieu humide, plantations, etc. Usuellement, la séparation de ces objets dans une seule classe est impossible au moyen d'une image Landsat. Néanmoins, la création d'entités homogènes de zones urbaines minimise la prise en compte d'autres types d'occupation du sol.

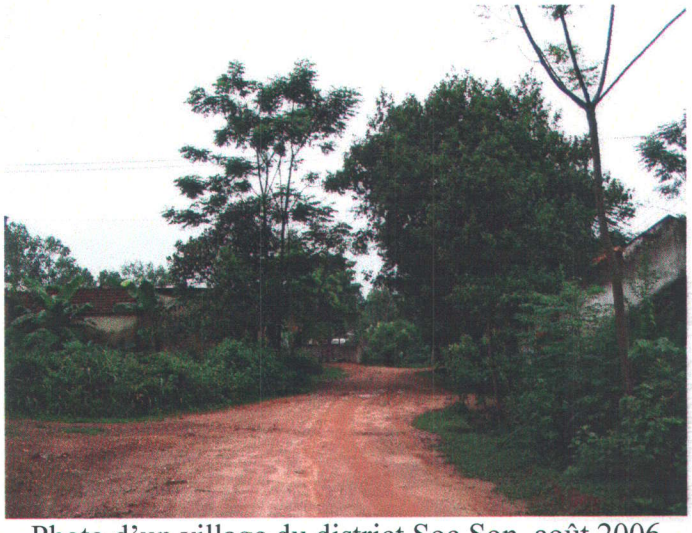


Photo d'un village du district Soc Son, août 2006

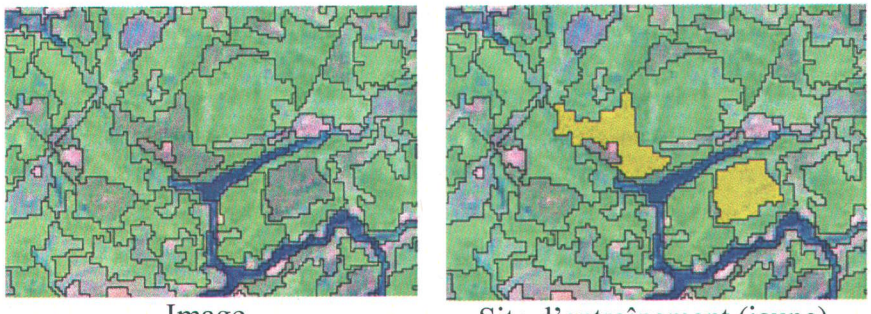


Image Site d'entraînement (jaune)

Figure A2.7 - Photo du milieu urbain 2 et ses sites d'entraînement

8. Rizières

En général, les champs du riz sont faciles à distinguer par leur structure fine, leur compacité et leur forme qui représente celles de parcelles cultivées. Néanmoins, ces parcelles sont parfois ensemencées d'autres cultures. Pour les zones de notre étude et la résolution grossière de l'image Landsat, on accepte les confusions entre les rizières et des champs cultivés. Le vert pâle clair est la teinte qu'elles affichent sur l'image. Il est à noter que les rizières sont la culture que l'on retrouve majoritairement dans la zone d'étude.

Photo des rizières (Soc Son, août 2006)

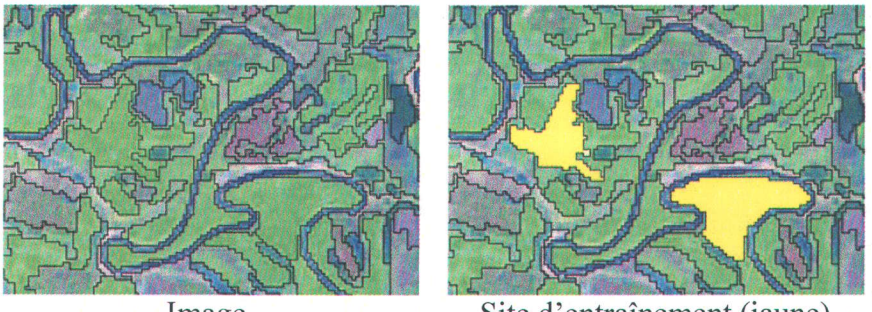


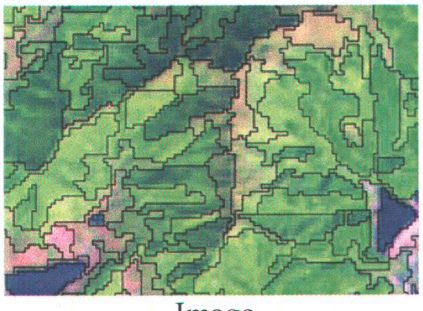
Image Site d'entraînement (jaune)

Figure A2.8 - Photo de la classe rizières et ses sites d'entraînement

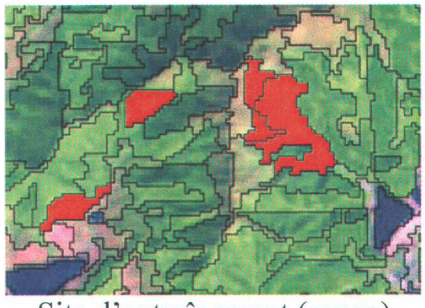
9. Buisson, herbage et arbustif

Cette classe est composée de divers types de végétation qui sont situés en montagne et dans la plaine. Elle inclut des friches herbacées, partiellement arbustives et les zones de coupes. Les sites d'entraînement affichent une couleur dominée par le jaune-vert clair signalant une plus faible activité chlorophyllienne se différenciant ainsi de la signature spectrale de la forêt. Cependant, les herbages se confondent avec les jeunes rizières.

Photo des herbages et des arbustes (Bac Ninh, juillet 2006)



Image



Site d'entraînement (rouge)

Figure A2.9 - Photo de la classe buisson, herbages et ses sites d'entraînement

10. Forêt

La classe Forêt se différencie essentiellement des autres classes par sa distribution dans l'espace et par son activité chlorophyllienne qui lui confère une signature spectrale propre. Pour la zone d'étude, cette classe inclut les feuillus, les plantations de pins, d'acacias et d'eucalyptus. Néanmoins, les plantations sont en majorité. Elles sont situées sur les petites collines et les pentes modérées des montagnes. Elles apparaissent sur l'image dans les tons de vert très foncé à vert.

Photo de la plantation de pin et d'acacia (Soc Son, août 2006)

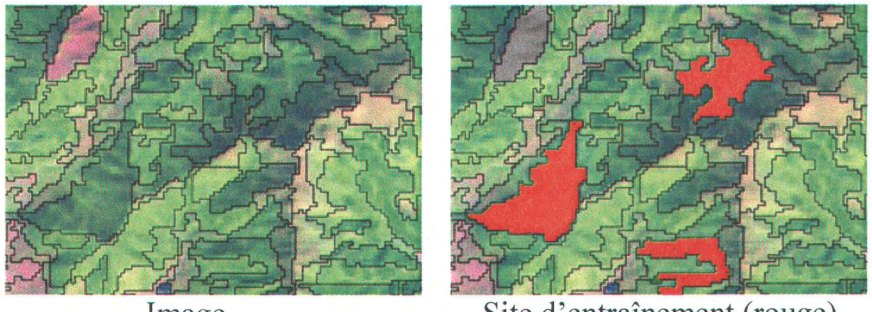


Image Site d'entraînement (rouge)

Figure A2.10 - Photo de la classe forêt et ses sites d'entraînement

11. Milieu urbain 3

La sélection des sites d'entraînement de cette classe est concentrée sur les éléments caractérisant le milieu urbain soit les routes, les bâtiments, les zones industrielles, les constructions et les surfaces asphaltées, etc. La signature de cette classe est similaire aux sols nus.

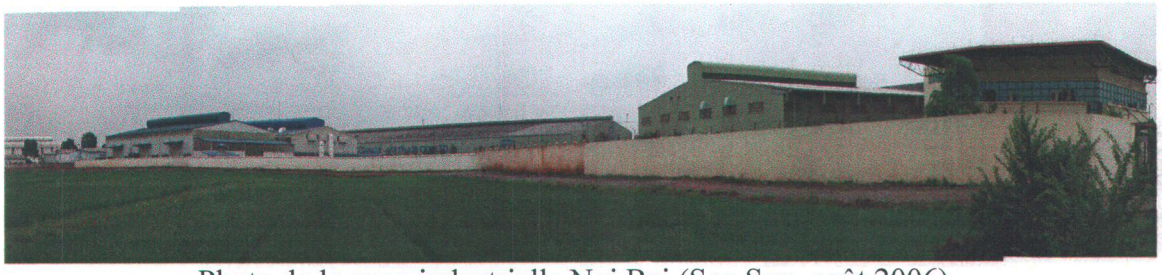
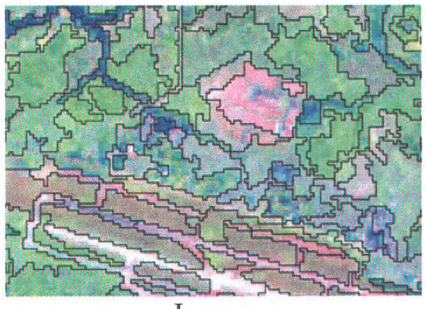
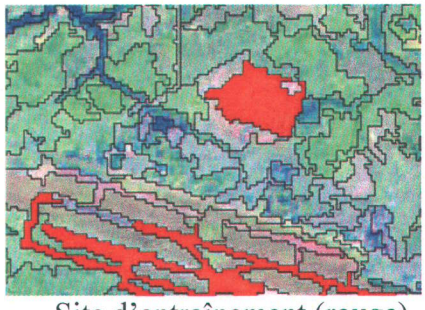


Photo de la zone industrielle Noi Bai (Soc Son, août 2006)



Image



Site d'entraînement (rouge)

Figure A2.11 - Photo du milieu urbain 3 et ses sites d'entraînement

ANNEXE 3 NORME DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE SURFACE (TCVN 5942 :1995)[2]

Tableau A3-1 : Norme de la qualité de l'eau de surface

No	Nom	Symbole	Unité	A	B
1	Ammoniaque (tính theo N)	NH3 (N)	mg/l	0.05	1
2	Arsenic	As	mg/l	0.05	0.1
3	Baryum	Ba	mg/l	1	4
4	Cadmium	Cd	mg/l	0.01	0.02
5	Matière en suspension	SS	mg/l	20	80
6	Détergents	-	mg/l	0.5	0.5
7	Plomb	Pb	mg/l	0.05	0.1
8	Coliformes	-	MPN/100ml	5000	10000
9	Chrome (III)	Cr (III)	mg/l	0.1	1
10	Chrome (VI)	Cr (VI)	mg/l	0.05	0.05
11	Huiles, graisses	-	mg/l	0	0.3
12	DDT	DDT	mg/l	0.01	0.01
13	Cuivre	Cu	mg/l	0.1	1
14	Fluor	F-	mg/l	1	1.5
15	pesticides totaux (sauf DDT)	-	mg/l	0.15	0.15
16	Zinc	Zn	mg/l	1	2
17	Manganèse	Mn	mg/l	0.1	0.8
18	Demande chimique en oxygène	COD	mg/l	<10	<35
19	Demande biologique en oxygène	BOD5	mg/l	<4	<25
20	Nickel	Ni	mg/l	0.1	1
21	Nitrate (N)	NO3- (N)	mg/l	10	15
22	Nitrite (N)	NO2- (N)	mg/l	0.01	0.05
23	Oxygène dissous	DO	mg/l	>=6	>=2
24	pH	pH	-	6-8.5	5.5-9
25	Phénols (totaux)	-	mg/l	0.001	0.02
26	Fer	Fe	mg/l	1	2
27	Étain	Sn	mg/l	1	2
28	Mercure	Hg	mg/l	0.001	0.002
29	Activité radioactive total α	-	Bq/l	0.1	0.1
30	Activité radioactive total β	-	Bq/l	1	1
31	Cyanure	CN-	mg/l	0.01	0.05

A: Pour l'eau de surface qui peut servir comme l'eau municipale après le traitement

B: Pour l'eau de surface qui peut servir pour l'agriculture et l'aquaculture.

[2] Tiré de Norme nationale de l'environnement du Vietnam. Vol.1. Qualité de l'eau.

LISTE DES RÉFÉRENCES

ABUELGASIM, A. A., W. D. ROSS, S. GOPAL et C. E. WOODCOCK, 1999. «Change Detection Using Adaptive Fuzzy Neural Networks: Environmental Damage Assessment after the Gulf War». Remote Sensing of Environment, vol. 70, no. 2, pp. 208-223.

ACADÉMIE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES DU VIÊT-NAM et MINISTÈRE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DU VIÊT-NAM, 2003. Environnement du bassin versant de la rivière Câu. Hanoi, 422 p.

AGENCE DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT DU VIETNAM, 2007. http://www.nea.gov.vn/Sukien_Noibat/Luuvuc_Song/songCau.htm
http://www.nea.gov.vn/Sukien_Noibat/Luuvuc_Song/songCau/SOE_SCau.pdf

ANDERSON, J.R., E.E. HARDY, J.T. ROACH et R.E. WITMER, 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.

BAATZ, M., et A. SCHÄPE, 2000. «Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scle image segmentation». In: STROBL, J. et al. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag: 12–23.

BÉNIÉ, B.G., 2004. Note de cours TEL 700, Traitement numériques d'images de télédétection. Département de géomatique appliquée. Faculté des lettres et sciences humaines. Université de Sherbrooke, pp. 99-117.

BÉLAND, M., K. GOÏTA, F. BONN, et V.C. PHAM, 2005. Monitoring shrimp aquaculture expansion and evaluating land suitability for site selection using remote sensing and GIS : a case study in northern Vietnam. Rapport Résultats de Recherche du Projet GEOMENSA, Hanoi, Vietnam, pp 44-56.

BLASCHKE, T., 2005. Towards a framework for change detection based on image objects. Remote sensing and GIS for Environment Studies. Göttinger Geographische Abhandlungen, vol. 113.

BLASCHKE, T., M. CONRADI et S. LANG, 2001. «Multi-scale image analysis for ecological monitoring of heterogeneous, small structured landscapes». Proceedings of SPIE, pp. 35-44.

BOISSAU, S., J-C. CASTELLA et H.T. NGUYEN, 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, vol. 12, no. 5, pp. 297-305.

BONN, F., 1996. Précis de Télédétection, Volume 2 - Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 633 p.

BONN, F., et G. ROCHON, 1991. Précis de Télédétection, Volume 1 - Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 485 p.

CALOZ, R., et C. COLLET, 2001. Précis de Télédétection, Volume 3 - Traitement numériques d'image de télédétection. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 386 p.

CASTELLA, J-C., et D.Q. DANG, 2002. Doi Moi in the Mountains. Land use changes and farmers' livelihood strategies in Bac Kan province, Vietnam. The Agricultural Publishing House, Hanoi, Vietnam. 283 p.

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

CENTRE DE TÉLÉDÉTECTION ET GÉOMATIQUE, 2005. L'application de Télédétection et SIG en planification du développement d'économie-sociale. Le cas de la ville Hanoi. Académie des sciences et des technologies du Vietnam, Hanoi, 79 p.

CENTRE DE TÉLÉDÉTECTION ET GÉOMATIQUE, 2004. Recherche la relation entre l'utilisation des terres et les éléments géomorphologie. Le cas du district Soc Son - la banlieue de Hanoi. Académie des sciences et des technologies du Vietnam - Institut de Géologie, Hanoi, 31 p.

CENTRE DE TÉLÉDÉTECTION ET GÉOMATIQUE, 2004. Landcover mapping of Tam Dao National Park from satellite images. Institut de Géologie, Hanoi, 87 p.

CIVCO, D.L., J.D. HURD, E.H. WILSON, M. SONG et Z. ZHANG, 2002. «A comparison of land use and land cover change detection methods». Proceeding 2002 ASPRS Annual Conference (Washington D.C., 22-26 avril 2002). Washington D.C.

COLLINS, J.B., et C.E. WOODCOCK, 1996. «An Assessment of Several Linear Change Detection Techniques for Mapping Forest Mortality Using Multitemporal Landsat TM Data». Remote Sensing of Environment, vol. 56, no. 1, pp. 66-77.

COLWELL, R.N., 1983. Manual of Remote Sensing. Second Edition, Volume 2 - Interpretation and Applications. American Society of Photogrammetry. Fall Church,VA, pp. 1233-2440.

CONGALTON, G.R., et K. GREEN, 1999. Assessing the Accuracy of Remote Sensed Data: Principles and Practices. Lewis Publishers, 137 p.

COPPIN, P., et M. BAUER, 1996. «Change detection in forest Ecosystems with Remote Sensing Digital Imagery». Remote Sensing Reviews, vol. 13, pp. 207-234.

DAO, T.T., 1998. Les transformations rurales récentes au Vietnam. Système agraire dans le bassin du Fleuve Rouge. Éditions de l'Agriculture. Hanoi-Vietnam. 160 p.

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

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

DESCLEE, B., P. BOGAERT et P. DEFOURNY, 2006. «Forest change detection by statistical object-based method». Remote Sensing of Environment, vol. 102, no. 1-2, pp. 1-11.

FORTIN, J-P., R. TURCOTTE, S. MASSICOTTE, R. MOUSSA, J. FITZBACK et J-P, VILLENEUVE, 2001. « Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I : Description of model». Journal of Hydrologic Engineering, vol. 6, no. 2, pp. 91-99.

HALL, O., et G.J.A. HAY, 2003. «Multiscale Object-Specific Approach to Digital Change Detection». International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 4, no. 4, pp. 311-327.

HESE, S., et C. SCHMULLIUS, 2003. «Forest cover change detection in Siberia». ISPRS & EARSel Joint Workshop: High Resolution Mapping from Space 2003. University Hanover, Workshop Proceedings.

INSTITUT DE LA PLANIFICATION DE RESSOURCES EN EAU, 2003. Rapport hydraulique agricole. Ministère de l'Agriculture et du développement rural du Vietnam (MADR). Hanoi, 111 p.

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

JENSEN, J. R., 1996. Introductory digital image processing - A remote sensing perspective, second edition. Prentice Hall, Upper Saddle River (N.J.), 316 p.

JESUS, F., et T.A. DAO, 1997. L'agriculture du delta du fleuve Rouge face aux réformes économiques. Système agraire dans le bassin du Fleuve Rouge. Éditions de l'Agriculture. Hanoi-Vietnam. 160 p.

KAWAMURA, M., S. JAYAMAMANA et Y. TSUJIKO, 1997. «Comparison of Urbanization and Environmental Condition in Asian Cities using Satellite Remote Sensing Data». http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ps1/ps2008.shtml [Downloaded: 11 Jan, 2007].

KUX, H.J. H., et E.H.G. ARAUJO, 2006. «Multi-temporal object-oriented classifications and analysis of Quickbird scenes at a metropolitan area in Brazil (Belo Horizonte, Minas Gerais State». Conference Proceedings OBIA2006, ISPRS, vol 36, 4/C42, ISSN 1682-1777. Austria. www.commission4.isprs.org

LAMBALLE, P., 1998. Évolution de l'agriculture des collines dans le bassin du fleuve Rouge: enseignement pour la vulgarisation et l'appui au développement. Système agraire dans le bassin du Fleuve Rouge. Éditions de l'Agriculture. Hanoi-Vietnam. 160 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).

LEA, R., C. BLODGETT, D. DIAMOND et M. SCHANTA, 2004. «Using the tasseled cap transformation to identify change in the Missouri Ozark forests». Remote sensing for field users [electronic resource] : proceedings of the Tenth Forest Service Remote Sensing Applications Conference (Salt Lake City, Utah, April 5-9, 2004). Bethesda, Md.: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 1-9.

LIU, X., et R.G.Jr. LATHROP, 2002. «Urban change detection based on an artificial neural network». International Journal of Remote Sensing, vol. 23, no. 12, pp. 2513-2518.

LU, D., P. MAUSEL, E. BRONDIZIO et E. MORAN, 2004. «Change detection techniques». International Journal of Remote Sensing, vol. 25, no 12, pp. 2365-2407.

LUNETTA, R.S., et C.D. Elvidge, 1998. Remote Sensing Change Detection Environmental Monitoring Methods and Applications. Ann Arbor Press, 318 p.

MANSOR, S., W.T. HONG et A.R.M. SHARIFF, 2002. «Object oriented classification for land cover mapping». GISdevelopment.net/Application/Environment. www.gisdevelopment.net

MARPU, P.R., I. NIEMEYER, et R. GLOAGUEN, 2006. «A procedure for automatic object-based classification». Conference Proceedings OBIA2006, ISPRS, vol. 36, 4/C42, ISSN 1682-1777. Austria. www.commission4.isprs.org

MAS, J.F., 2000. «Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement». Journal Canadien de Télédétection, vol. 26, no. 4, pp. 349-362.

MINISTÈRE DE RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT DU VIÊT-NAM, 2005. Rapport annuel de l'état de l'environnement du pays, Partie générale. Hanoi, 94 p.

MINISTÈRE DE RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT DU VIÊT-NAM, BANQUE MONDIALE et DANISH INTERNATIONAL DEVELOPMENT ASSISTANCE (DANIDA), 2003. Rapport annuel : Vietnam Environment Monitor 2003, Water. Hanoi, 74 p.

NELSON, R.F., 1983. «Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS». Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, no. 9, pp. 1303-1314.

NORME NATIONALE DE L'ENVIRONNEMENT DU VIETNAM, 1995. Volume1- Qualité de l'eau.

NGUYEN, V.P., V.S. LE, T.X. TRAN, T. TRAN, B.N. TRAN, T.H. DOAN et T.T.H. NGUYEN, 2001. Catalogue of rivers for Southeast Asia and the Pacific. Part Vietnam, vol. 4, pp. 312-326.

PRENZEL, B., et P. TREITZ, 2004. «Remote sensing change detection for a watershed in north Sulawesi, Indonesia». *Progress in Planning*, vol. 61, pp. 349-363.

RIDD, M.K., et J. LIU, 1998. «A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment». Remote Sensing of Environment, vol. 63, pp. 95-100.

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

SAVARY, S., J.F. DOLBEC et A.N. ROUSSEAU, 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 pour le projet FACC A9446- Programme Impacts et Adaptation. Québec : INRS-ETE, 89 p.

VERBYLA, D.L., et S.H. BOLES, 2000. «Bias in Landcover Change Estimates due to Misregistration». International Journal of Remote Sensing, vol. 21 no. 18, pp. 3553-3560.

WALTER, V., 2004. «Object-based classification of remote sensing data for change detection». ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 58, no. 3-4, pp. 225-238.

WILLHAUCK, G., T. SCHNEIDER, R. DE KOK et U. AMMER 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: ISPRS, vol. 33, Amsterdam, 2000.

YUAN, F., K.E. SAWAYA, B.C. LOEFFELHOLZ et M.E. BAUER, 2005. «Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing». Remote Sensing of Environment, vol. 98, no. 2-3, pp. 317-328.