DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR LA DÉTECTION DES CHANGEMENTS D'UN MILIEU MORCELÉ EN UTILISANT DES IMAGES À MOYENNE RÉSOLUTION SPATIALE : APPLICATION À UNE RÉGION LITTORALE AU VIÊT-NAM

Thi Thanh Hien PHAM, Ferdinand BONN et Jean-Marie DUBOIS

Département de géomatique appliquée et CARTEL, Université de Sherbrooke,
2 500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1.
Téléphone : (1) 819-821-8000, poste 62945 ; télécopieur : (1) 819-82-7944 ;
courriel : thi.thanh.hien.pham@USherbrooke.ca ; jean-marie.dubois@USherbrooke.ca

Soumis le 20 décembre 2006 ; révisé le 28 février 2007 ; accepté le 31 août 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 303-323

Résumé

L'apparition de l'aquaculture au Viêt-nam a rapidement changé le paysage de la zone littorale. Les changements intensifs de l'occupation des terres produisent des impacts négatifs sur l'environnement, notamment sur la dégradation des forêts de mangroves, et même sur le rendement de l'aquaculture. À l'aide du traitement numérique d'images satellitaires multidates, un suivi de ces changements a été fait de manière objective et quantitative. Pourtant, le grand morcellement des terres dans la zone d'étude, le district de Tiên Hai, exige une démarche méthodologique de traitement d'image appropriée à l'utilisation d'images à moyenne résolution spatiale, comme celles de TM et de ETM+ de Landsat. Une telle démarche est donc développée à l'aide d'images de trois années différentes, soit 1988, 1994 et 2001. Cette démarche combine la méthode de post-classification et la méthode hybride, qui crée un masque de changements, afin d'isoler les pixels changés. Elle permet aussi aux classificateurs de se concentrer sur ces pixels, ce qui peut réduire l'erreur d'omission de la méthode de post-classification, surtout dans une région aussi morcelée. En outre, les indices Tasseled Cap sont utilisés pour calculer le masque de changements, car ils rehaussent les informations de trois principaux éléments biophysiques de la zone littorale, soit l'eau, le sol et la végétation. Les résultats montrent la croissance de la superficie des bassins aquacoles de 0 en 1988 à 1 500 ha en 1994 et à 2 400 ha en 2001. Après avoir été parfois remplacées par des bassins entre 1988 et 1994, les mangroves s'accroissent cependant d'une superficie de 360 ha entre 1994 et 2001. En dépit des problèmes de confusion, on constate que les images de TM et d'ETM+, utilisées conjointement avec les données cartographiques, fournissent de l'information utile sur les changements aux décideurs. Le recours à des images à plus grande résolution spatiale serait préférable à l'avenir.

Mots-clés : détection de changements, zone littorale, territoire morcelé, TM et ETM+ de Landsat, Viêt-nam.

METHODOLOGICAL APPROACH FOR CHANGE DETECTION IN A PARCELLED LAND-USE ENVIRONMENT BY MEDIUM SPATIAL RESOLUTION IMAGERY: APPLICATION TO A COASTAL ZONE IN VIETNAM

Abstract

Aquaculture activities have rapidly changed the coastal landscape of Vietnam. These intensive land use changes have induced negative environmental impacts, specially in the mangrove forests and on aquaculture productivity. Satellite image change detection methodologies can help to monitor objectively and quantitatively these changes. However, because the coastal territory of Vietnam is extremely parcelled, appropriate image processing methodologies are required, especially for TM or ETM+ images with a 30 m resolution. In this paper, we developed a change detection methodology applied on three Landsat images of 1988, 1994 and 2001 for the district of Tiên Hai. A post-classification

method was combined with a hybrid method where a change/no-change mask was created using Tasseled Cap indexes. The hybrid method was selected to reduce the post-classification method omission errors by applying a change/no-change mask to classify only the pixels that have changed. Additionally, the Tasseled Cap indexes were integrated into the creation of this mask since they introduce three essential elements for the enhancement of the information in the coastal zone: water, soil and vegetation. Our results indicate an important growth in aquaculture between 1988 and 1994, from 0 to 1 500 ha, then to 2 400 ha in 2001. After having sometimes been replaced by aquaculture basins between 1988 and 1994, mangroves have increased by 360 ha between 1994 and 2001. Despite some classification difficulties and imprecision of the results, this study shows that TM or ETM+ images integrated with topographic maps can provide land use change information for decision-makers. However, we recommend the use of higher spatial resolution images for the detection of extensive aquaculture changes as in the case of Tiên Hai in Vietnam.

Keywords: change detection, coastal zone, parcelled territory, Landsat TM/ETM+, Vietnam.

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Après la libéralisation économique et l'ouverture du Viêt-nam aux marchés internationaux en 1986, les modes d'occupation des terres en milieu agricole dans le delta du fleuve Rouge ont subi de nombreuses modifications, particulièrement dans la zone littorale. L'exploitation et la commercialisation des produits aquacoles de cette zone sont des enjeux économiques très importants puisqu'ils ont permis, et permettent toujours, d'améliorer rapidement le niveau de revenu de la population locale (Nguyen et Nguyen, 1999 ; Phi, 1998). Des mangroves et même des rizières sont remplacées par des champs aquacoles à un rythme intensif jamais vu dans le passé (Nguyen et Nguyen, 1999). Ces changements dans l'occupation des terres, qui se traduisent par l'augmentation de la superficie occupée par les bassins aquacoles, ont malheureusement contribué au recul de la forêt de mangroves, une composante protectrice de la zone littorale (Phan, 1998). Ils ont ainsi accéléré la pollution des eaux par le rejet de produits résiduaires provenant des parcelles d'élevage. Les ressources naturelles de cet environnement côtier sont maintenant extrêmement menacées par une exploitation intensive (Dao *et al.*, 2005 ; EJF, 2007 ; Quan *et al.*, 2007 ; Dang, 2005).

Dans ce contexte, une recherche permettrait d'évaluer quantitativement et objectivement ces changements. Compte tenu des avantages des images satellitaires, tels que la répétition des données, leur vue synoptique et leur format numérique apte au traitement par ordinateur, celles-ci deviennent une source d'information pertinente pour le suivi multidate des changements de l'occupation des terres. Dans cet article, la détection des changements à partir d'images TM et ETM+ de Landsat est effectuée dans une zone du district de Tiên Hai, dans l'estuaire du fleuve Rouge, au Viêt-nam.

1.2. Problématique de la détection des changements en milieu morcelé

En général, le choix d'une méthode ou d'une démarche méthodologique appropriée joue un rôle essentiel pour une détection des changements. La qualité des résultats dépend également de nombreux autres facteurs, tels que le géopositionnement, les corrections radiométriques appliquées aux images, la disponibilité de la réalité de terrain, la complexité du terrain et de l'environnement étudiés, l'expérience, les connaissances ou la familiarité de l'analyste avec le terrain ainsi que le temps et le budget des travaux alloués aux travaux. Les auteurs arrivent donc souvent à des conclusions différentes et même controversées sur l'efficacité des méthodes utilisées (Lu *et al.*, 2004).

Au Viêt-nam, comme dans d'autres pays en développement, les images à très haute résolution spatiale ne sont pas toujours disponibles. Les images de moyenne résolution, comme celles des capteurs de SPOT ou de Landsat, sont plus faciles à acquérir, notamment pour des observations multidates, grâce à leur prix abordable et à leur acquisition depuis le début des années 1970. Par contre, le territoire du delta du fleuve Rouge en général, et du district de Tiên Hai en particulier, est extrêmement morcelé, ce qui ne favorise pas l'utilisation de ces images. En effet, les parcelles du delta ont souvent une superficie moyenne de 317 m^2 (Le *et al.*, 2004), tandis qu'un pixel d'une image de TM ou d'ETM+ couvre une surface de 900 m^2. Autrement dit, dans un pixel de TM ou d'ETM+, plusieurs catégories d'occupation des terres peuvent souvent être mêlées. De plus, dans la zone côtière, les conditions biophysiques sont très complexes étant donné qu'une parcelle peut être composée d'une mosaïque d'eau, de sols nus, de rizières, de culture de légumes ou de mangroves. Lors de la détection des changements dans une étude multidate, ces problèmes peuvent engendrer de faux changements.

Malgré de nombreuses études sur la détection de changements, il n'y en a pas une qui mentionne ces problèmes. En effet, dans la zone littorale vietnamienne, la plupart des études réalisées à l'aide de la télédétection portent sur les changements géomorphologiques. Les auteurs ont utilisé des photographies aériennes, des images HRV de SPOT ou MSS de Landsat ou des images radar pour étudier les changements de la ligne de rivage des deltas du Mékong et du fleuve Rouge (Trépanier, 1996 ; Trépanier *et al*., 2002). Pour la détection des changements de l'occupation des terres, des images de SPOT ou de Landsat ont été analysées à l'aide de méthodes simples comme la comparaison de classifications dans la région de Ca Mau (Binh *et al.*, 2005) ou l'interprétation visuelle dans la région de Quang Ninh (Hens *et al.*, 2000). Enfin, dans une autre étude (Béland *et al.*, 2006), on a réalisé la détection de changements sur une

partie du littoral du district de Giao Thuy (au sud de Tiên Hai) à l'aide d'images de TM et d'ETM+. Même si les auteurs de cette dernière étude ont trouvé ces images propices pour la détection des changements dans cette région, ils se sont butés à la difficulté de séparer la classe d'eau marine de celle des bassins aquacoles. Toutefois, cette zone d'étude est différente de la nôtre car elle est moins morcelée et les bassins y sont de grande taille avec des séparations en terre bien visibles sur les images de TM et d'ETM+.

L'objectif de l'étude est donc d'utiliser les données dérivées d'images TM et ETM+ combinées avec les cartes topographiques dans la région de Tiên Hai afin d'établir une méthodologie appropriée de détection des changements d'occupation des terres pour un milieu littoral morcelé.

2. ZONE D'ÉTUDE

Le district de Tiên Hai se situe entre 20^0 15' et 20^0 27' de latitude nord, et 106^0 28' et $106^0$39' de longitude est, à 150 km au sud-est de la capitale, Hanoi (figure 1). Le régime hydrologique varie suivant les deux saisons principales du climat, soit la saison humide de juin à octobre, pendant laquelle circule 75 % de l'eau, et la saison sèche, de novembre à mai. Le territoire est limité par les fleuves Tra Ly et Rouge, respectivement au nord et au sud. Les conditions biophysiques de ce district sont caractéristiques d'un milieu humide influencé tant par la marée que par les variations du niveau d'eau de ces fleuves, ce qui conditionne l'occupation des terres.

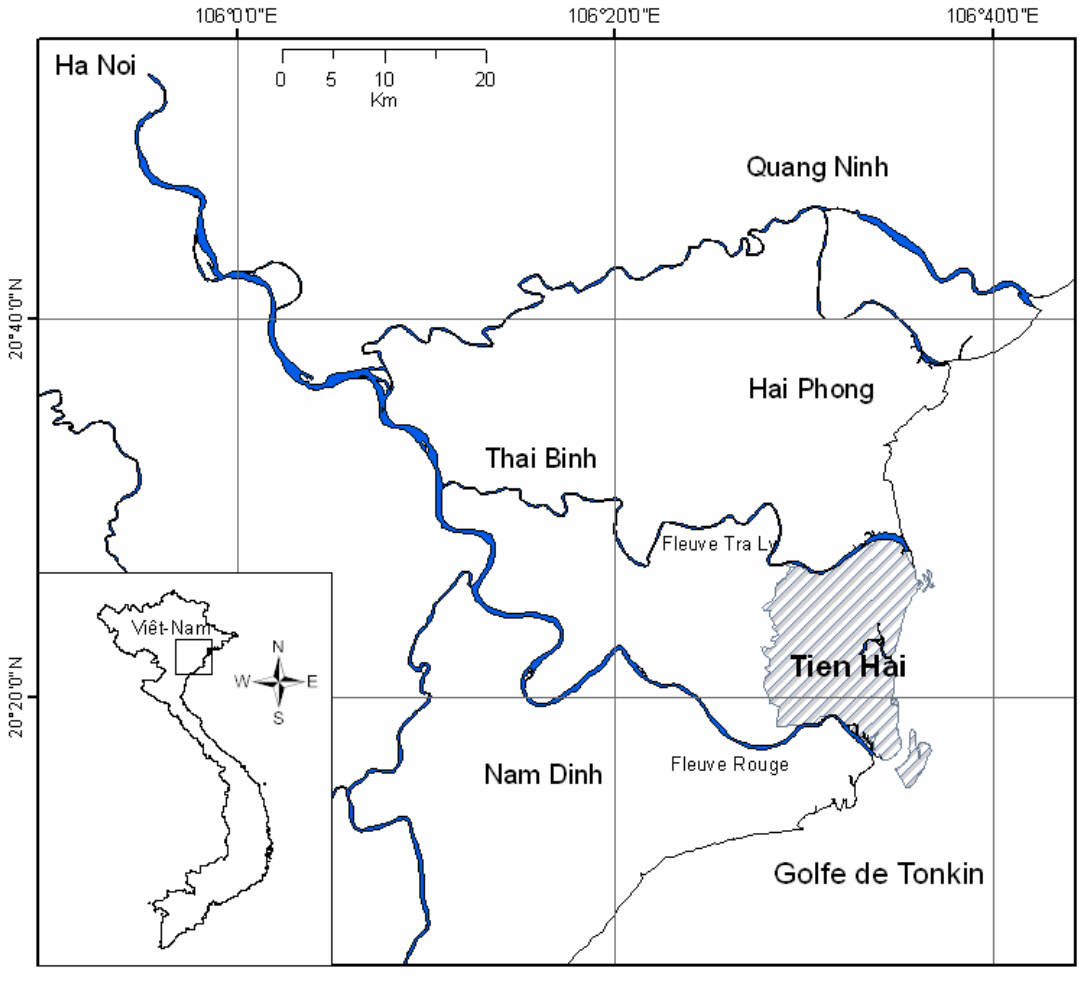


Figure 1 : Localisation de la région d'étude au Viêt-nam. *Location of the study area in Vietnam*

La majorité de la surface est cultivée avec le riz comme production principale (figure 2). Dans les zones d'habitations, des villages sont entourés par les jardins d'arbres fruitiers. Sur certaines terres légèrement plus élevées en altitude, on cultive les filaos pour l'exploitation du bois et la protection des villages de l'intérieur contre des tempêtes. Sur certaines terres basses, salées et récemment défrichées, on cultive le souchet pour rendre le sol moins salé avant de laisser la place aux rizières. Sur les terres côtières salées et les terres situées à l'embouchure du fleuve Rouge, la végétation se développe naturellement pour former des forêts de mangroves, principalement de type S*onneratia*, d'une hauteur variant entre 1 et 3,5 m. Une partie importante de ces terres est actuellement occupée par des bassins aquacoles, destinés à la culture de la crevette et du crabe, tant de manière industrielle que traditionnelle. Dans l'estuaire du fleuve Rouge, au sud du district, une réserve naturelle a été établie depuis 1994 afin de protéger les mangroves et les habitats de milieux humides littoraux.

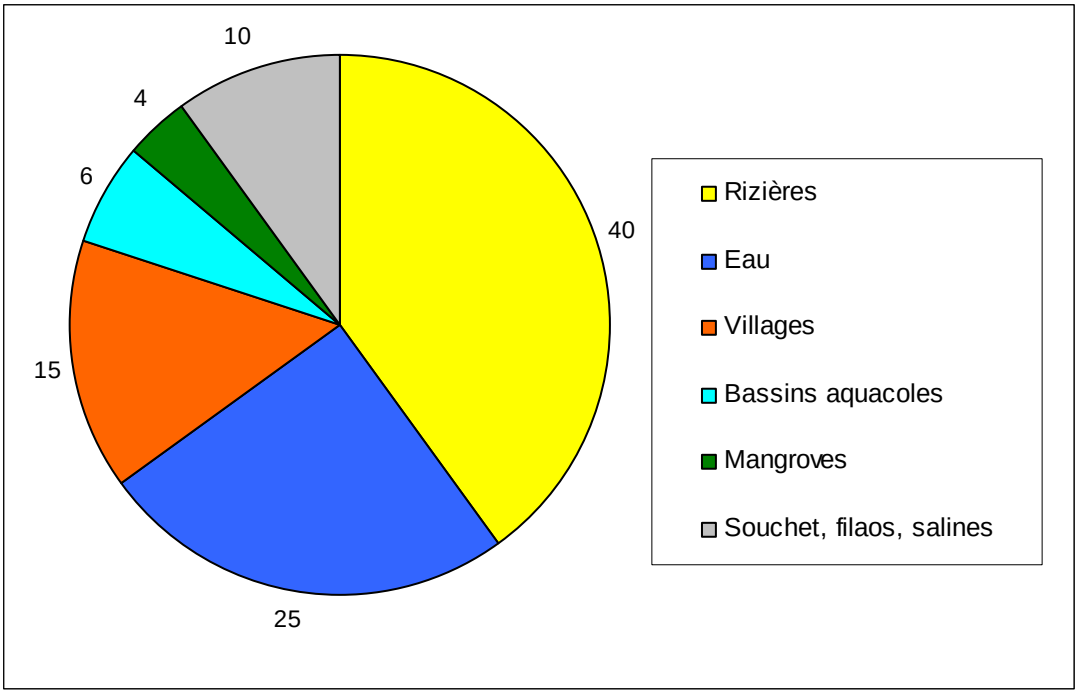


Figure 2 : Proportion des catégories d'occupation des terres du district Tiên Hai en 2001. *Percentage of land use types in the Tiên Hai District in 2001*

3. DONNÉES UTILISÉES ET MÉTHODOLOGIE

3.1. Données utilisées

Trois images Landsat ont été utilisées pour couvrir une période de 13 ans, soit les images TM des 22 décembre 1988 et 23 décembre 1994 ainsi qu'une image ETM+ du 16 novembre 2001. Celles-ci sont été choisies puisque leur date d'acquisition est assez proche dans l'année pour que les conditions biophysiques du terrain soient similaires, par exemple le riz n'était pas présent sur toutes les images et le niveau de la marée était à peu près semblable, soit entre 0,8 et 1,4 m. Ces images sont traitées à l'aide des logiciels ENVI et PCI. Une carte topographique de 1978 à l'échelle du 1 : 50 000 (projection UTM zone 48) a servi pour réaliser les corrections géométriques des images. Une campagne de terrain a aussi été effectuée en juin 2003 afin de colliger les sites de référence pour la classification.

3.2. Méthodologie

Après avoir examiné les avantages et inconvénients des différentes méthodes de détection de changements qui sont actuellement utilisées, une démarche de traitement d'images est choisie en tenant compte des caractéristiques du milieu étudié.

3.2.1. Revue de littérature sur les méthodes existantes

De nombreuses méthodes ont été développées pour la détection des changements de l'occupation des terres. Les méthodes évoluent rapidement et de nouvelles méthodes sont développées pour répondre au besoin réel des changements rapides et complexes de la surface de la Terre. Plusieurs auteurs ont publié des évaluations des méthodes de détection de changements, par exemple Singh (1989), Lunetta et Elvidge (1998), Mas (2000), Jensen (2004) et Lu

et al. (2004). Dans leur plus récente contribution, Lu *et al.* (2004) divisent les méthodes de détection de changements en six catégories : algébrique, de transformation, de classification, avancées, approche SIG, d'analyse visuelle et autres techniques (tableau 1).

Tableau 1 : Classification des méthodes de détection des changements. *Classification of the methods for change detection*

Catégorie	**Techniques**
Algébrique	Différence d'images
	Régression d'images
	Différence d'indices de végétation
	Division d'images
	Soustraction (différence) d'images de base
	Analyse par vecteur de changement
Transformations	Analyse en composantes principales (ACP)
	Transformation Tasseled Cap
	Gramm-Schmidt
	Khi-carré
Classifications	Comparaison de post-classification
	Analyse spectrale temporelle
	Détection du maximum de probabilité
	Détection de changements non dirigée
	Détection de changements hybride
	Réseaux de neurones
Méthodes avancées	Modèle de réflectance de Li-Strahler
	Modèles de mixage spectral
	Méthode de paramètres biophysiques
Approche de SIG	Méthode d'intégration de SIG et de données de télédétection
Analyse visuelle	Interprétation visuelle d'image
Autres techniques	Mesure de dépendance spatiale
	Système d'observation basée sur la connaissance
	Méthode de génération de superficie (*area production method*)
	Combinaison de trois indicateurs : indices de végétation, température de surface et structure spatiale
	Courbe de changements
	Modèles linéaires généralisés
	Approche basée sur le théorème de courbe
	Approche basée sur la structure
	Méthode basée sur la statistique spatiale

Simplifié de Lu *et al*. (2004)

Afin de fournir une vue globale sur les méthodes, nous utilisons la revue bibliographique de Lu *et al*. (2004), à partir de laquelle les points forts et faibles de chaque catégorie de méthodes sont synthétisés de la façon suivante :

A) méthodes algébriques, qui utilisent des algorithmes algébriques (soustraction, division, etc.) et un seuil pour identifier les zones de changements :

- avantages : ces méthodes sont simples (sauf celle de vecteur de changements) ; elles permettent la réduction de certains effets atmosphériques et radiométriques ;

- inconvénients : elles ne donnent aucune information sur la nature des changements (sauf la méthode de vecteur de changements) ; elles exigent un seuillage ;

- conditions : elles exigent l'identification de seuils et le choix de bandes spécifiques pour la détection ;

- conclusion : aucune de ces méthodes n'est retenue ici car elles ne donnent pas d'information sur la nature des changements ;

B) méthodes de transformation, qui appliquent les transformations comme l'analyse en composantes principales, la Tasseled Cap ou le chi-carré :

- avantages : ces méthodes sont plus complexes que les méthodes algébriques mais encore assez simples ; elles réduisent les informations redondantes entre les bandes ; possibilité d'utiliser plusieurs bandes à la fois pour la détection de changements ;

- inconvénient : il est difficile d'identifier les changements détectés ;

- condition : l'analyste doit posséder une bonne connaissance pour le choix des composantes et des seuils ;

- conclusion : parmi ces méthodes, nous avons choisi la Tasseled Cap car cette méthode est assez simple et elle fournit de l'information sur les trois objets essentiels du milieu côtier, soit la végétation, le sol et l'eau ;

C) méthodes de classification, qui sont, par exemple, la comparaison post-classification, l'analyse spectrale et multidate ainsi que la détection des changements non dirigée :

- avantages : ces méthodes réduisent les impacts de l'environnement ; elles fournissent des informations concernant la nature des changements (sauf les méthodes d'analyse spectrale temporelle de détection non dirigée) ; elles produisent une bonne détection ou méthode de détection du maximum de probabilité (*expectation maximization*) ;

- inconvénients : elles exigent beaucoup de temps (sauf la méthode d'analyse spectrale temporelle) ; il est difficile d'identifier les changements ;

- conditions : elles exigent une réalité de terrain, l'identification de seuils, une grande exactitude de la classification et un nombre et une qualité d'échantillons d'entraînement suffisants ;

- conclusion : ces méthodes sont simples et fournissent des informations sur la nature des changements, ce qui est important dans le cas présent ; parmi ces méthodes, la méthode de post-classification consistant en la comparaison de deux classifications est souvent utilisée ; pourtant, cette méthode est critiquée parce qu'elle crée des erreurs d'omission (Béland *et al.*, 2006 ; Petit *et al*., 2001), c'est-à-dire qu'elle a tendance à sous-estimer les changements, situation qui pourrait empirer dans notre zone morcelée ; pour résoudre ce problème, nous proposons donc d'ajouter une autre méthode, la méthode hybride, puisqu'elle permet d'isoler les pixels pour lesquels il n'y a pas eu de changements et de classifier seulement les pixels correspondant à un changement (Jensen, 2004) ;

D) méthodes avancées, qui sont appliquées pour la détection de changement des paramètres biophysiques, en particulier la végétation :

- avantage : ces méthodes fournissent de l'information précise et détaillée sur la nature des changements ;

- inconvénients : elles sont complexes et non disponibles dans les logiciels ; exigent des mesures in situ ;

- conditions : elles exigent le développement de modèles de cime d'arbres et d'estimation des paramètres biophysiques ainsi que l'identification de composantes spectrales homogènes (*endmembers*) et de seuils adéquats ;

- conclusion : aucune de ces méthodes n'est retenue ici à cause de leurs particularités et de leurs inconvénients ;

E) approches de SIG, qui utilisent les données de différentes sources, telles que les cartes topographiques et thématiques :

- avantages : ces approches permettent d'insérer des données auxiliaires pour l'analyse et l'interprétation des résultats ; elles permettent la mise à jour directe dans un SIG ;

- inconvénients : elles diminuent potentiellement l'exactitude des résultats finaux de la détection de changements ; en effet, quand des données viennent de différentes sources, si un des document est cartographiquement moins précis ou s'ils sont à différentes échelles, l'exactitude globale de la détection des changements diminue ;

- condition : elles exigent une bonne précision géométrique des cartes utilisées ;

- conclusion : aucune de ces méthodes n'est retenue ici à cause de leurs inconvénients évidents ;

F) méthodes d'interprétation visuelle :

- avantages : ces méthodes permettent d'incorporer la connaissance de l'analyste ; elles permettent d'analyser deux ou trois images à la fois ;

- inconvénients : elles ne fournissent pas d'informations détaillées sur les changements ; elles dépendent du savoir-faire et du savoir de l'analyste ; elles exigent beaucoup de temps ; elles ne permettent pas une mise à jour facilement ;

- conditions : elles exigent un bon savoir-faire de l'analyste et une familiarisation avec la zone d'étude ;

- conclusion : aucune de ces méthodes n'est retenue ici à cause de leurs inconvénients.

Après avoir analysé les méthodes existantes, il a été décidé de combiner trois méthodes (figure 3) : la comparaison de post-classification, la méthode hybride et la transformation Tasseled Cap. La première a été choisie car elle est simple tout en permettant d'obtenir de l'information sur la nature des changements. La deuxième a été choisie afin de réduire les erreurs d'omission. Elle consiste d'abord à effectuer un seuillage du changement sur l'image obtenue après la transformation. Ensuite, elle crée un masque de changements pour extraire les zones ayant changé et celles qui n'ont pas changé. Ce masque de changements permet de se concentrer sur la classification des zones qui ont été changées (Jensen, 2004), lesquelles n'occupent qu'environ 10 % des terres. De ce fait. l'exactitude de la classification est augmentée (Petit *et al.*, 2001 ; Lu *et al.,* 2004). Dans ce processus, nous insérons la transformation Tasseled Cap qui fournit trois bandes d'indices, soit la brillance, la verdure et l'humidité. Ce processus sera expliqué dans la section suivante.

3.2.2. Démarche méthodologique de détection des changements adaptée

La démarche du traitement d'image est résumée sur la figure 3. La démarche comporte six étapes principales : les corrections géométriques des images, les corrections radiométriques des images, la transformation Tasseled Cap, la méthode hybride de détection des changements, la méthode de post-classification et l'évaluation de l'exactitude.

A) Corrections géométriques des images

Des corrections géométriques ont d'abord été effectuées pour permettre de superposer les trois images utilisées. L'exactitude géométrique est très importante pour la détection des changements. En effet, Dai et Khorram (1998) ont indiqué qu'on devrait obtenir moins de 0,2 pixel de précision géométrique pour détecter 90 % de vrais changements. Par contre, Khorram *et al.* (1999) ont recommandé 0,5 pixel de précision.

Les images de 1988 et de 1994 ont été corrigées géométriquement par la méthode image à carte en utilisant une carte topographique de 1978 à l'échelle de 1 : 50 000. Les corrections de l'image de 2001 ont été effectuées à l'aide de la méthode image à image en se basant sur l'image de 1988. L'erreur moyenne quadratique *(RMS)* obtenue est de l'ordre de 0,37 pixel. Étant donné que le terrain d'étude est dans un milieu rural où ne se trouvent que rarement des infrastructures, les points de contrôle à utiliser pour le géopositionnement sont moins nombreux. En tenant compte de ce constat, nous avons opté pour cette valeur.

B) Corrections radiométriques des images

Les corrections radiométriques sont nécessaires puisqu'elles aident à éliminer les effets liés aux angles d'incidence solaires et les effets atmosphériques, lesquels changent les propriétés spectrales spécifiques des catégories d'occupation des terres sur l'image. Cette façon de faire est exigée dans les deux cas. L'analyste applique des transformations linéaires dans l'algorithme de détection de changements et il utilise l'histogramme de changements pour déterminer le seuil de changement (Caloz et Collet, 2001 ; Jensen, 2004), ce qui correspond à la méthode hybride de détection de changements dans cette recherche.

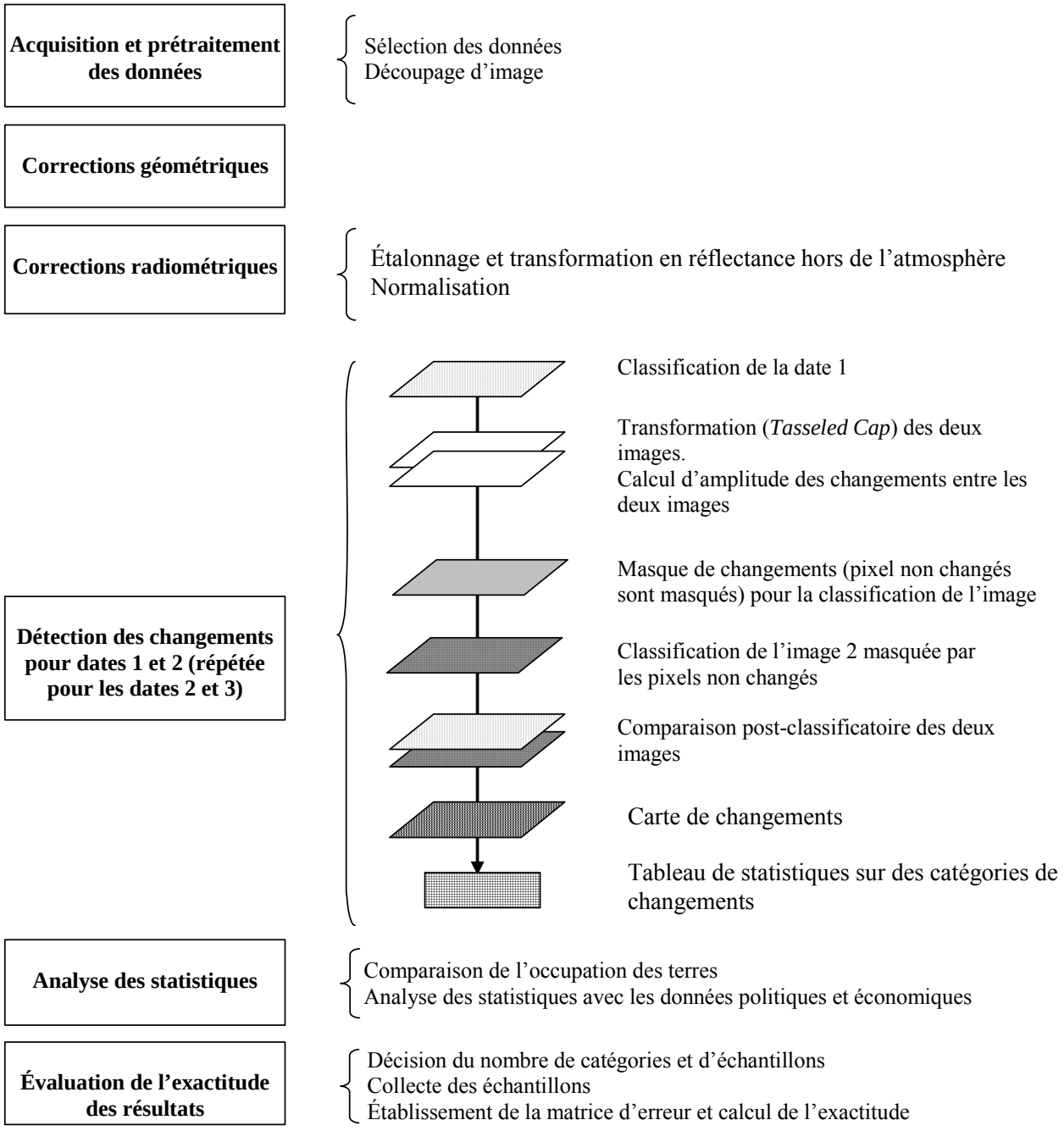


Figure 3 : Schéma de la démarche méthodologique utilisée pour le traitement d'image. *Image processing scheme*

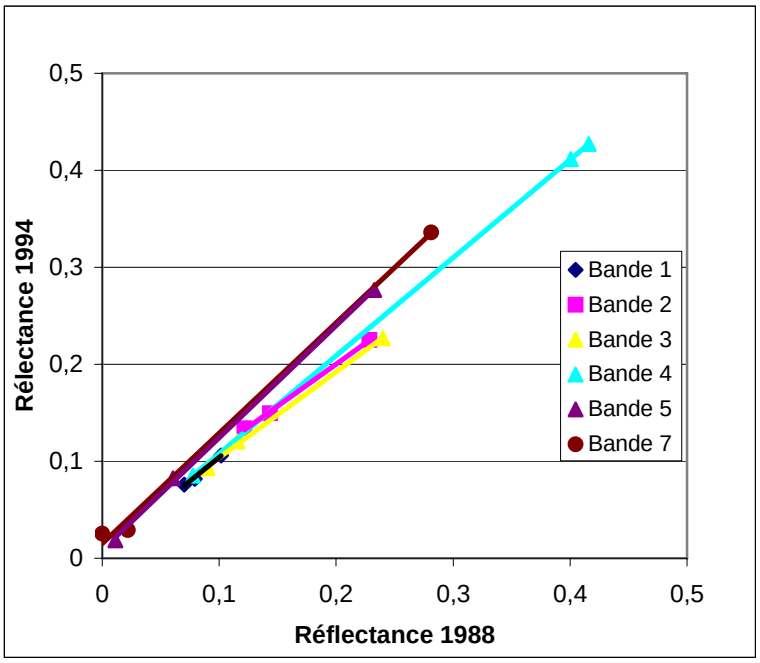
Les corrections radiométriques se présentent en deux étapes : 1) l'étalonnage et la transformation en réflectance au sommet de l'atmosphère, 2) l'atténuation des effets atmosphériques. La première étape sert à corriger les modifications causées par le fait que des valeurs de luminance sont transformées en valeurs de comptes numériques (DN) au capteur. La deuxième étape sert à ajuster radiométriquement les images multidates qui ont été prises dans des conditions atmosphériques et environnementales différentes ainsi que des états phénologiques menant à de faux changements. Il existe quelques approches d'atténuation des effets atmosphériques en utilisant soit des mesures *in situ* et des modèles simulés (la correction absolue), soit une normalisation appelée la correction relative. Cette dernière approche a été utilisée dans cette étude parce qu'elle ne demande pas de paramètres atmosphériques (par exemple la composition des aérosols) ou de mesures spectrales au terrain (Jensen, 2004). Elle est effectuée par rapport à une image choisie comme référence et les autres images sont normalisées par rapport à cette dernière.

Parmi les trois images utilisées, celle de 1994 a été choisie comme référence pour effectuer la normalisation vu qu'elle présente moins de nuages. Les cibles invariantes (*endmembers*) choisies représentent de l'eau (comme points sombres), de la végétation (comme points ayant une réflectance moyenne) et des routes (comme points brillants). Des équations de régression linéaire (figure 4) ont été appliquées pour recalculer les nouvelles bandes normalisées des images de 1988 et 2001. Ces équations ainsi que les valeurs du coefficient de corrélation R^2 sont présentés sur le tableau 2.

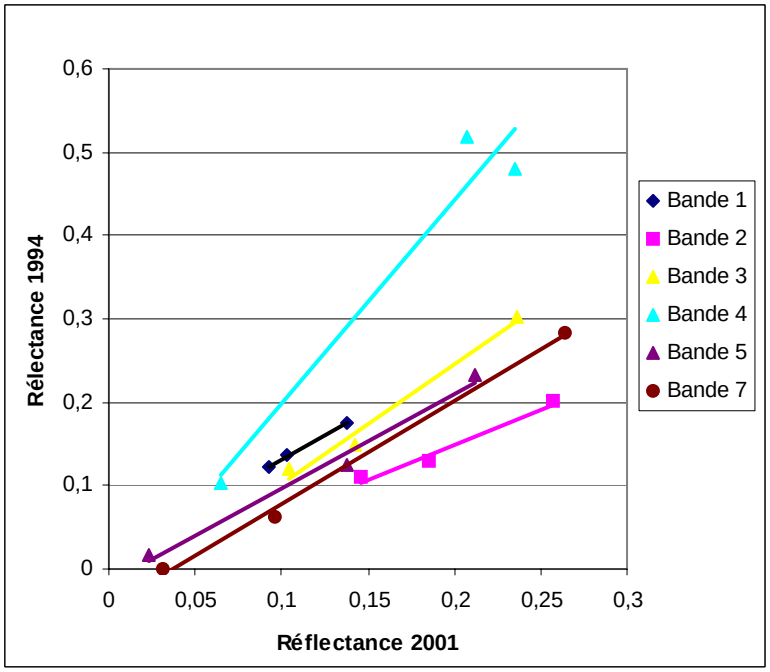
Tableau 2 : Équations de régression et RMS de la correction radiométrique appliquée aux images. *Regression equations and RMS of the radiometric correction applied to the images*

Bande	**Équation de régression (1988-1994)**	**R^2**	**Équation de régression (2001-1994)**	**R^2**
1	y = 0,9733x+0,0066	0,9918	y = 1,1406x+0,0182	0,9971
2	y = 0,862x+0,0278	0,9988	y = 0,8409x-0,0188	0,9759
3	y = 0,8842x+0,0153	0,9985	y = 1,4286x-0,0404	0,9808
4	y = 1,0105x+0,0068	1	y = 2,4483x-0,0464	0,9472
5	y = 1,1554x+0,0087	0,9993	y = 1,126x-0,0158	0,9844
7	y = 1,1386x+0,0151	0,9963	y = 0,8409x-0,0188	0,9759

Nous avons constaté que le R^2 de la bande TM4 est inférieur à celui des autres bandes. En effet, la valeur de végétation de la bande 4 (infrarouge) est généralement élevée par rapport à celle des autres bandes. En plus, sur l'image 2001, la valeur des cibles brillantes est légèrement plus basse que celle des cibles moyennement brillantes (figure 5), ce qui s'explique peut-être par les conditions atmosphériques. Vu que nous n'avons pas trouvé d'autres points de repère dans la zone d'étude, nous avons dû accepter ces valeurs.



(a)



(b)

Figure 4 : Régression des cibles des images de 1988-1994 (a) et 1994-2001 (b). *Invariant target spectral regression for the 1988-1994 images (a) and 1994-2001 images (b)I*

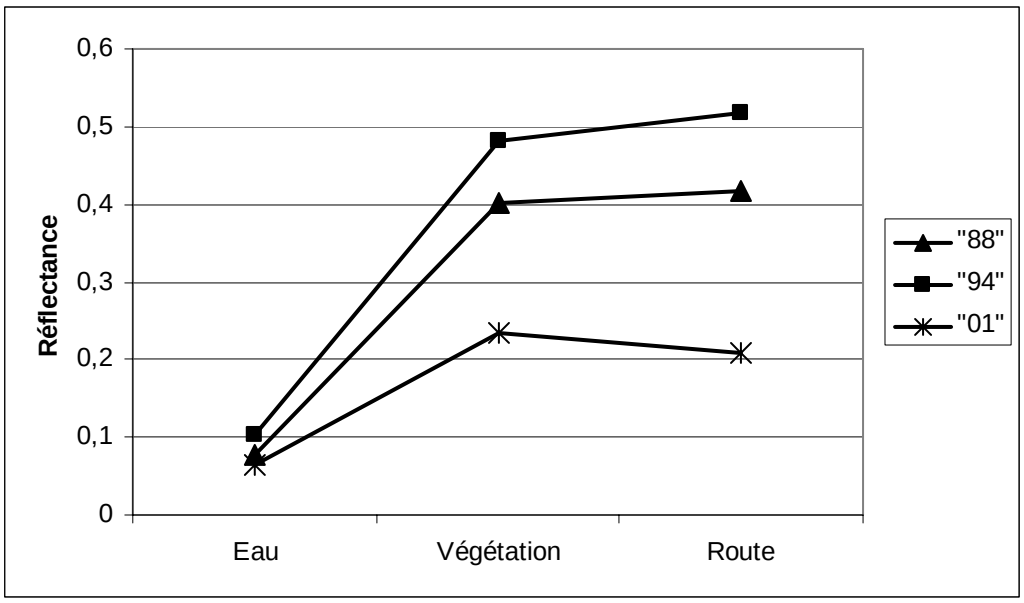


Figure 5 : Valeurs de réflectance de trois cibles dans la bande TM4. *Reflectance values of the three targets in channel TM4*

C) Transformation Tasseled Cap

Pour calculer les indices de brillance, de verdure et d'humidité, Kauth et Thomas ont aussi proposé des coefficients, au départ utilisés pour les images MSS de Landsat (Jensen, 2004). Crist (1985) a ensuite recommandé d'utiliser des coefficients particuliers de réflectance pour les images TM à partir des équations de la transformation Tasseled Cap :

- brillance = $\Sigma\ b_i * TM_i$;

- verdure = $\Sigma\ v_i * TM_i$;

- humidité = $\Sigma\ h_i * TM_i$;

où, b_i, v_i et h_i sont les coefficients de la transformation Tasseled Cap utilisés pour le calcul de brillance, de verdure et d'humidité (tableau 3).

Tableau 3 : Coefficients de la transformation Tasseled Cap appliqués pour la réflectance de l'image de TM. *Tasseled Cap transformation coefficients for the Landsat TM images*

Indice	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brillance	0,2043	0,4158	0,5524	0,5741	0,3124	0,2303
Verdure	-0,1603	-0,2819	-0,4934	0,7940	-0,0002	-0,1446
Humidité	0,0315	0,2021	0,3102	0,1594	-0,6806	-0,6109

Modifié de Crist (1985)

Ces indices sont insérés dans le processus de la méthode hybride de détection des changements. Le calcul de ces indices est appliqué à chacun des pixels de l'image.

D) Méthode hybride et le masque de changements

Cette méthode consiste en la création d'un masque de changements. L'amplitude des changements (soit l'image synthétisée) a été calculée à l'aide des indices Tasseled Cap introduits dans l'équation proposée par Lunetta *et al.* (2002) :

$$Amplitude\,de\,changement(DN) = [(brillance1 - brillance2)^2 + (verdure1 - verdure2)^2 + (humidité1 - humidité2)^2]^{1/2}$$

Le masque contient les valeurs 0 associées aux pixels correspondant à aucun changement et 1 associées aux pixels correspondant à un changement. Le masque est calculé à partir de la valeur moyenne (μ) et de l'écart type (σ) de l'image d'amplitude ainsi qu'un coefficient T selon l'équation suivante :

- maximum de changement = μ + Tσ ;

- minimum de changement = μ - Tσ.

Les pixels sont considérés comme non changés si leur valeur est supérieure au maximum ou inférieur au minimum de changements (figure 6).

D'après la courbe de la figure 6, plus la valeur de T est petite, plus le nombre de pixels changés augmente. En général, la valeur de T devrait être 1 (Lunetta and Elvidge, 1998 ; Jensen, 2004), parce que cette valeur semble être appropriée pour décrire les changements spectraux dans la soustraction des bandes. Cependant, Fung (1990), qui a effectué une étude pour trouver la meilleure valeur de T, a confirmé que 0,8 était la valeur la plus convenable pour avoir les meilleurs résultats. C'est cette dernière valeur qui a donc été utilisée pour calculer le masque de changements.

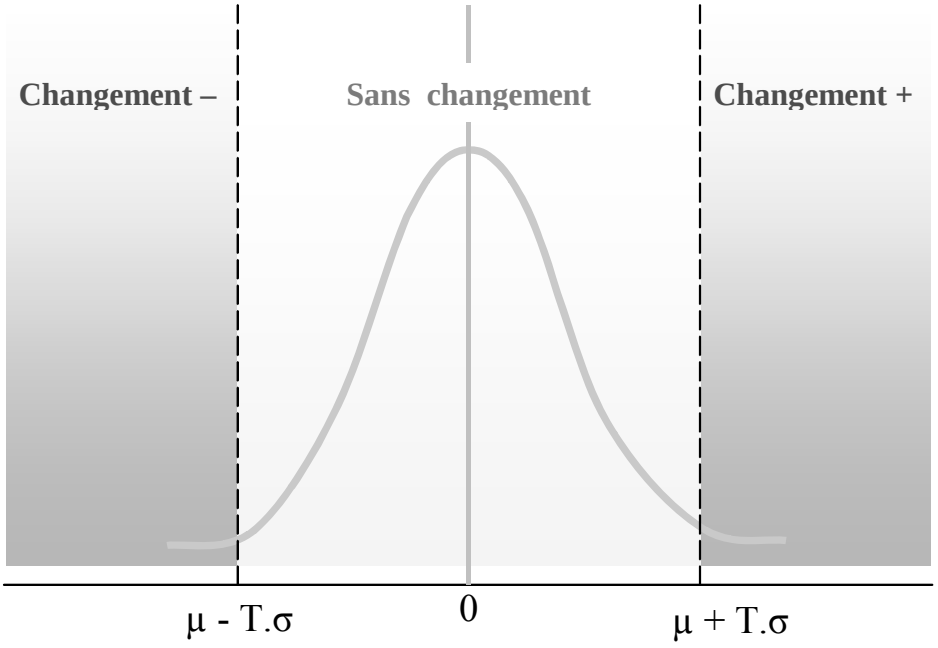


Figure 6 : Courbe d'histogramme de changements et seuil défini par la moyenne (μ) et l'écart type (μ). *Histogram curve of changes and the threshold defined by the mean (μ) and the standard deviation (μ)*

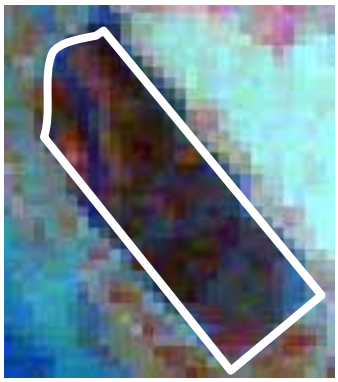
E) Classifications

Une classification a été réalisée pour l'ensemble de l'image de 1988, tandis que, pour les images de 1994 et de 2001, seulement les zones de changements identifiées à l'aide des masques de changements ont été classifiées. Ensuite, ces classifications ont été superposées afin de comparer les changements de l'occupation des terres intervenus entre les trois dates.

Comme le terrain d'étude se situe dans une région littorale très complexe en termes de catégories d'occupation des terres et qu'il est morcelé, les trois éléments principaux (eau, sol et végétation) peuvent se mêler en créant des classes d'occupation des terres différentes en fonction des proportions de chaque élément. Dans ce cas, il est préférable d'effectuer une classification non dirigée et ensuite d'identifier les classes en fonction de la connaissance du terrain de l'analyste. Nous avons décidé de réaliser la classification non dirigée à l'aide de la méthode appelée Isodata (Jensen, 2004).

De plus, des cartes topographiques ont été utilisées pour identifier les catégories de couverture des terres. Par exemple, la ligne de la digue nationale a été utilisée pour distinguer des objets classifiés dans la même catégorie sur la classification, mais qui sont en réalité différents. Par exemple, nous avons ainsi pu séparer les mangroves de certains villages (des villages ne pouvant se trouver entre la digue et le littoral), puisque ces villages pouvaient être confondus avec la végétation à cause des jardins qui entourent les habitations.

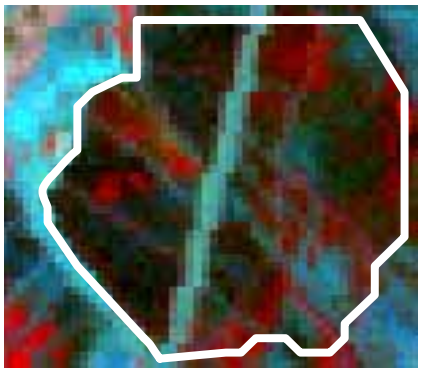
Un autre problème rencontré dans cette étape est que la classification a fourni des catégories de couverture au lieu de catégories d'occupation des terres. En effet, pour les bassins aquacoles composés d'eau et de végétation, la classification a donné une catégorie d'eau et une catégorie de végétation. Pour les champs de souchets, elle a donné une catégorie d'eau et une autre d'arbustes. En plus, la saline a été classifiée comme un sol nu. Étant donné que la classification n'est pas parvenue à produire ces trois classes correctement, il a fallu numériser certains polygones pour chacune de ces trois classes en s'appuyant sur une interprétation visuelle. Nous présentons des exemples sur la figure 7.



Le spectre d'un champ de souchet : mélange spectral de végétation et d'eau



Saline ayant la même couleur (spectres) que le sol nu



Bassins aquacoles : mélange spectral de végétation dispersée, d'eau et de sédiments

Figure 7 : Exemples extraits de la composition fausses couleurs (TM4, 3, 2) de champs de souchet, de salines et de bassins aquacoles. *Examples extracted from the false color composite (TM4, 3, 2) of nut grass fields, saltworks and aquiculture basins*

Neuf catégories d'occupation des terres ont finalement été retenues : eau, sols humides, mangroves, arbustes submergés, villages, champs agricoles, champs de souchets, salines et aquaculture.

F) Évaluation de l'exactitude

Pour évaluer l'exactitude de la détection des changements d'une manière quantitative, il a fallu élaborer un processus rigoureux visant à répondre aux trois questions suivantes (Lunetta and Elvidge, 1998 ; Khorram *et al.*, 1999) :

- comment calculer l'exactitude de la détection des changements ?
- quelle est la taille appropriée de l'échantillon ?
- comment choisir les points d'échantillonnage sur la carte topographique ?

Pour répondre à la première question, nous avons créé une matrice d'erreur de détection des changements, aussi appelée matrice d'évaluation de l'exactitude. Elle est constituée de six composantes (de [1] à [6]), lesquelles représentent les six possibilités de changement/sans changement ou, autrement dit, six catégories d'erreurs. En effet, les composantes sont divisées en deux populations : sans changement (catégories [1], [3] et [5]) et changements (catégories [2], [4] et [6]).

Pour la première population, la composante [1] représente le cas où les polygones correspondant à aucun changement sont classifiés correctement par rapport aux données de référence. La composante [3] représente les polygones qui sont

classifiés comme des zones ayant changé, mais qui ne sont pas dans la bonne catégorie d'occupation des terres. Finalement, les polygones correspondant à un changement dans les données de référence, mais se classifiant comme des zones n'ayant pas changé, correspondent à [5].

À titre d'exemple, on peut présenter le cas d'un polygone classifié comme sol nu pour les deux dates à partir des images. Par contre, sur la carte topographique, ce polygone représentait un sol nu en 1988 et des mangroves en 1994. Cela veut dire, qu'en réalité, ce polygone a bien changé de catégorie d'occupation des terres et qu'il est incorrectement classifié comme non-changé et qu'il appartient à la composante [5] de la matrice d'évaluation d'exactitude.

Pour la population représentant les changements, la composante [2] représente les polygones qui sont classifiés correctement comme des zones de changements. La composante [4] représente les polygones qui sont classifiés comme changés, mais qui ne le sont pas en réalité. Enfin, la composante [6] représente les polygones qui sont associés à des zones de changements dans la classification et dans les données de référence, mais qui ne correspondent pas à la bonne catégorie de changement.

En suivant les recommandations de Khorram *et al.* (1999) sur la taille de l'échantillonnage, nous devons choisir 171 points de référence, soit 171 pixels, pour chacune des populations : changement et non changement. Étant donné que ce nombre est grand par rapport à la dimension de l'image de la zone d'étude (600 x 800 pixels), nous avons décidé que chaque point d'échantillonnage serait composé de quelques pixels pour que le nombre d'échantillons soit réduit. Après plusieurs essais, nous avons constaté que la taille moyenne de chaque échantillon pouvait être de 5 à 6 pixels pour un total de 71 échantillons pour chaque population.

Khorram *et al.* (1999) présentent une stratégie d'échantillonnage efficace par rapport à un simple échantillonnage aléatoire. En effet, dans cette stratégie, il s'agit de tenir compte surtout de la partie de l'image où se trouve le plus de catégories d'occupation des terres pour la collecte des échantillons. Pour la présente étude, les échantillons ont donc été sélectionnés dans la partie voisine du littoral du district de Tiên Hai, mais tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des digues.

Comme il a été impossible de trouver de l'information sur l'occupation des terres en 1988 et en 1994, il a fallu tirer les échantillons des cartes topographiques produites aux environs de ces deux dates, soit celles de 1986 et de 1994. Par ailleurs, pour 2001, malgré les deux visites effectuées sur le terrain, il n'y avait pas assez de points de contrôle par rapport au nombre calculé d'échantillons. Il n'a donc pas été possible d'évaluer l'exactitude de la deuxième paire d'images, soit celle de 1994 et de 2001.

4. RÉSULTATS

4.1. Changements détectés de l'occupation des terres

Trois cartes d'occupation des terres du district de Tiên Hai ont été obtenues pour 1988, 1994 et 2001 (figures 8 à 10), ainsi que les statistiques des changements pour chacune de ces années (tableau 4).

Tableau 4 : Superficie et pourcentage des catégories d'occupation des terres du district de Tiên Hai en 1988, 1994 et 2001. *Area and percentage of the land use classes for Tiên Hai in 1988, 1994 and 2001*

	1988		1994		2001	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Eau	8 770,41	28,2	7 739,9	24,9	7 136,6	22,9
Sols humides	1 611,18	5,2	2 358,4	7,6	3 010,9	9,7
Mangroves	1 258,83	4,0	391,8	1,3	751,5	2,4
Arbustes submergés	1 050,30	3,4	646,0	2,1	434,5	1,4
Villages	4 187,88	13,5	4 231,4	13,6	4 759,2	15,3
Champs agricoles	13 451,40	43,2	14 021,9	45,1	12 559,5	40,4
Souchet	639,18	2,1	90,2	0,3	69,5	0,2
Salines	134,91	0,4	125,4	0,4	43,8	0,1
Aquaculture	0	0	1 499,1	4,8	2 338,6	7,5

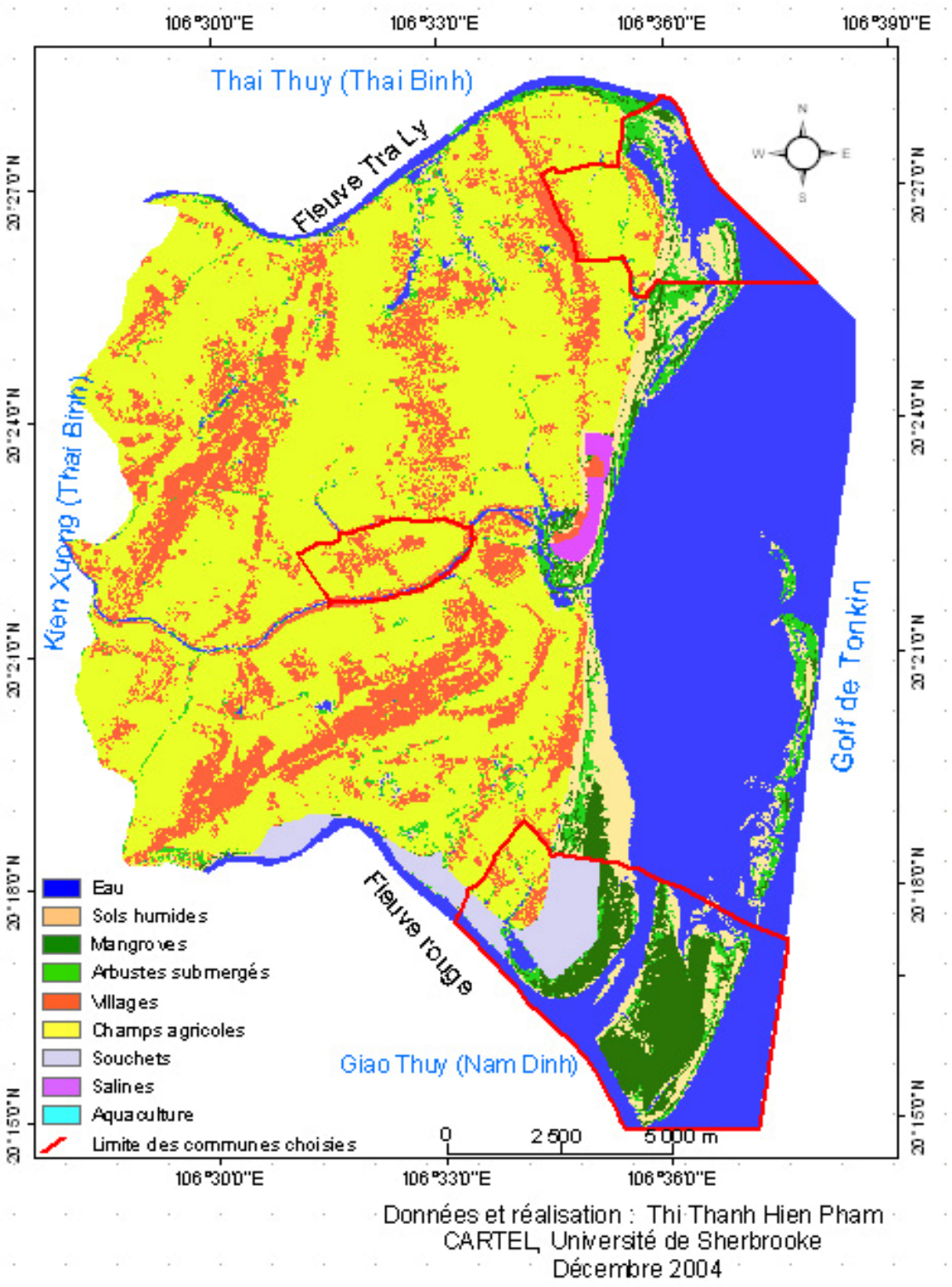


Figure 8 : Carte de l'occupation des terres du district de Tiên Hai en 1988. *Tiên Hai land use map in 1988*

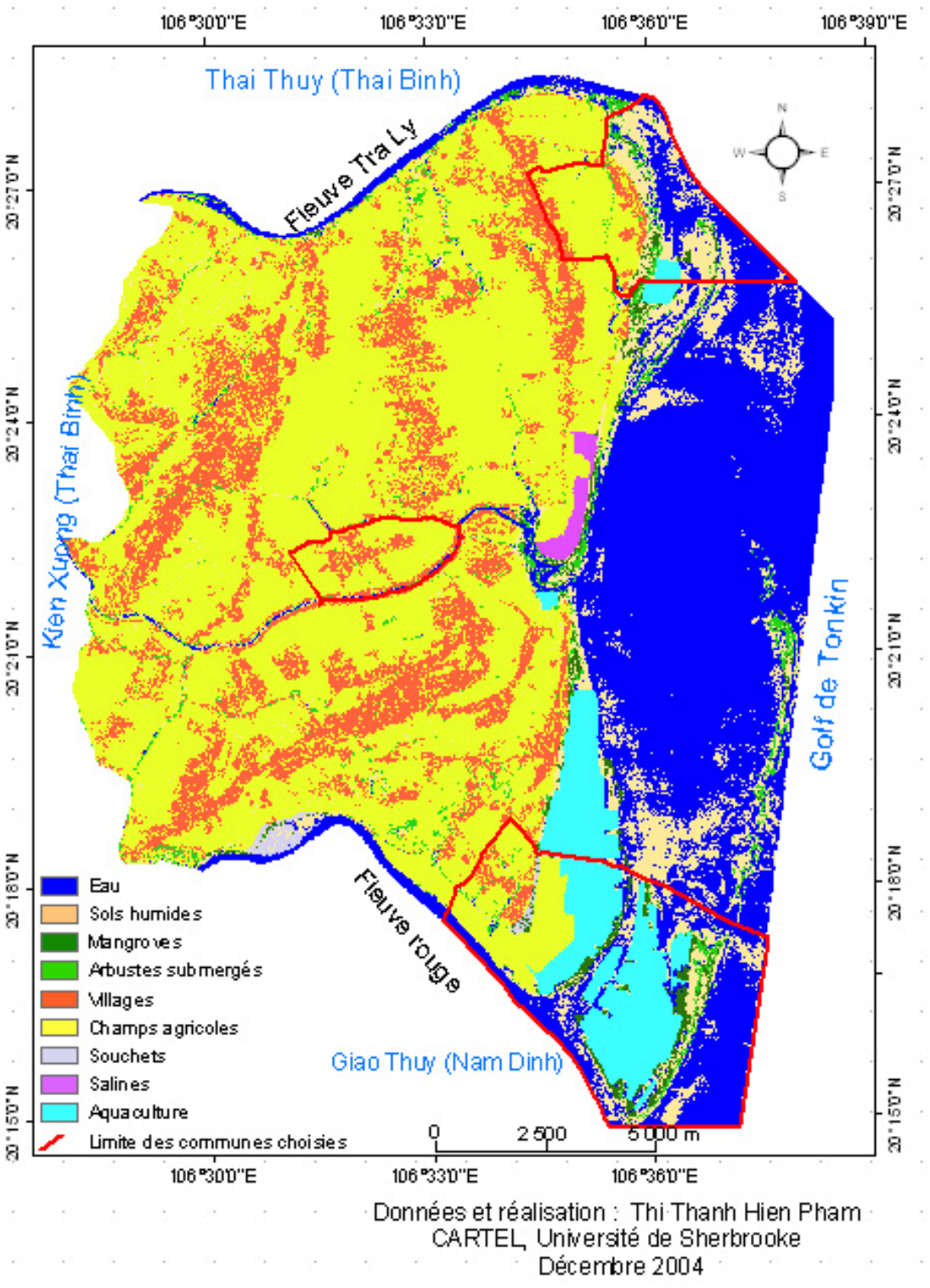


Figure 9 : Carte de l'occupation des terres du district de Tiên Hai en 1994. *Tiên Hai land use map in 1994*

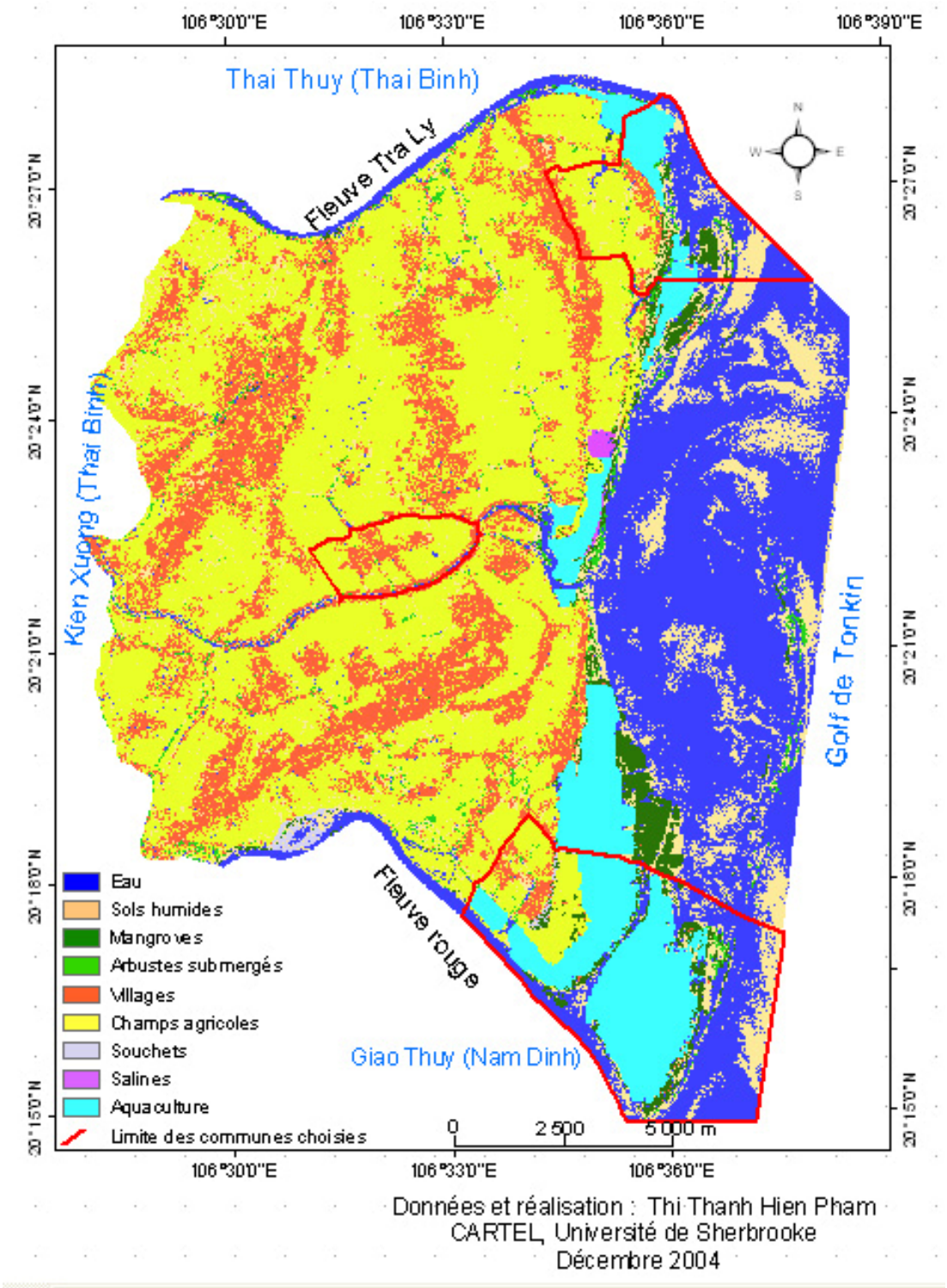


Figure 10 : Carte de l'occupation des terres du district de Tiên Hai en 2001. *Tiên Hai land use map in 2001*

Les catégories importantes d'occupation des terres où les changements sont significatifs sont les champs agricoles, les villages, les mangroves et les bassins aquacoles. Les champs agricoles occupent une grande partie de la zone d'étude (environ 40 %), mais tout en ayant subi des changements, leur superficie demeure assez stable. En effet, l'augmentation de la superficie des champs agricoles est principalement due à l'augmentation des champs de souchet pour la période de 1988-1994. Cependant, il y a eu une perte de superficie de 1994-2001 au profit des villages, des terres humides et de l'aquaculture.

Les mangroves ont subi une diminution très importante entre 1988 et 1994 (870 ha). En fait, le district a perdu à peu près de 70 % de ses mangroves. La plupart des mangroves ont été remplacées par des bassins aquacoles (790 ha). Pour la période de 1994 à 2001, malgré qu'une certaine superficie de mangroves ait encore été légèrement transformée en bassins aquacoles (60 ha), elles ont gagné 360 ha en sols humides et en plans d'eau grâce à un programme de replantation de mangroves du gouvernement local.

La diminution des champs de souchet pour la période de 1988-1994 s'est faite au profit de nouveaux champs agricoles (400 ha) et de bassins aquacoles (90 ha). Pour la période 1994-2001, les champs de souchet ont encore subit une réduction et ont pratiquement disparu du district au profit des bassins aquacoles.

4.2. Évaluation de l'exactitude de la détection des changements

Les catégories des salines, des champs de souchet et de l'aquaculture n'avaient pas besoin d'être évaluées en termes d'exactitude d'identification vu qu'elles étaient numérisées d'après la carte topographique. Nous avons donc uniquement colligé les échantillons des six autres classes d'occupation des terres (a à f sur la matrice de la figure 11) pour en évaluer l'exactitude, soit : les champs agricoles, les mangroves, les sols humides, les arbustes submergés, les villages et l'eau. Ces six classes donnaient 36 cas possibles de changements, ce qui est abondant pour évaluer les échantillons. Alors, nous avons décidé de ne considérer que la catégorie d'erreur relative à chaque échantillon sans égard à la catégorie d'occupation des terres à laquelle appartient cet échantillon. Après avoir choisi les échantillons, nous avons complété la matrice d'évaluation d'exactitude. Chacune des cases de la matrice représente le nombre d'échantillons correspondant à la catégorie d'erreur.

Le nombre de sites d'échantillons pour les six catégories ([1] à [6]) est, respectivement, 30, 12, 6, 12, 6 et 5. Par exemple, 30 (marqué en gris) est le nombre d'échantillons correctement détectés, correspondant à l'erreur de catégorie [1].

À partir de la matrice, l'exactitude de la détection des changements a été calculée et a été établie à 61 %. Elle correspond au rapport du nombre de vrais polygones de changement ou de vrais polygones sans changements sur le total des polygones de changements (sans tenir compte des catégories d'occupation des terres), c'est-à-dire le nombre d'erreurs de catégories [1], [2], [3] et [6] sur le total.

5. DISCUSSION

Le processus de traitement d'image pour détecter les changements d'occupation des terres dans cette recherche permet d'obtenir l'évolution des classes d'occupation des terres de manière quantitative. Les catégories importantes d'occupation des terres sont les champs agricoles, les villages, les mangroves et les bassins aquacoles. Les champs agricoles et les villages, incluant les jardins ou les potagers, changeaient légèrement durant les deux périodes d'observation. L'aquaculture n'existait pas en 1988, mais elle a gagné 1 500 ha entre 1988 et 1994 et encore 840 ha entre 1994 et 2001. En revanche, le district a perdu près 70 % de ses mangroves entre 1988 et 1994, au profit des bassins aquacoles (790 ha), mais en a gagné quelques centaines d'hectares entre 1994 et 2001. Il est donc possible, à l'aide d'images TM ou ETM+ de détecter les changements d'occupation des terres et d'identifier la catégorie si on dispose de cartes topographiques suffisamment détaillées et précises.

Pourtant, nous avons rencontré des difficultés dans ce processus. Ces difficultés sont reliées à la résolution spatiale des images. En se référant aux recherches antérieures, il faut mentionner que Trépanier *et al.* (2002) ont trouvé que les photographies aériennes à l'échelle de 1 : 10 000 sont préférables aux images HRV de SPOT (résolution de 20 m) pour obtenir des résultats quantitatifs. Béland *et al.* (2006) ont confirmé l'efficacité des images TM de Landsat (résolution de 30 m) pour leur zone d'étude sauf pour une image de 1994, où la catégorie d'eau marine et celle des bassins aquacoles se ressemblaient. À cet effet, ces derniers ont été obligés de numériser les polygones de bassins aquacoles sur l'image d'humidité Tasseled Cap. Les résultats de la présente étude montrent que la résolution de 30 m des images de TM est trop grossière pour pouvoir séparer les bassins aquacoles des sols humides, des arbustes submergés ou des mangroves. Cela vient du fait que l'eau des bassins a les mêmes propriétés que l'eau de la mer, surtout si l'eau des bassins vient d'être échangée avec la mer. Béland *et al.* (2006) confirment ce résultat. En plus, dans les bassins aquacoles se trouvent des mangroves de petite taille qui peuvent se confondre avec les arbustes ou les mangroves en forêt.

Au contraire de ce qu'affirme Jensen (2004), nous constatons ici que la classification des zones situées sous le masque de changement n'est pas favorable pour un milieu morcelé car les zones ayant changé sont de faible dimension et elles sont dispersées.

	aa	bb	cc	dd	ee	ff	ab	ac	ad	ae	af	ba	bc	bd	be	bf	ca	cb	cd	ce	cf	da	db	dc	de	df	ea	eb	ec	ed	ef	fa	fb	fc	fd	fe	To-tal
aa	30	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	240
bb	6	30	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	240
cc	6	6	30	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	240
dd	6	6	6	30	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	240
ee	6	6	6	6	30	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	240
ff	6	6	6	6	6	30	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	240
ab	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ac	12	12	12	12	12	12	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ad	12	12	12	12	12	12	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ae	12	12	12	12	12	12	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
af	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ba	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
bc	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
bd	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
be	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
bf	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ca	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
cb	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
cd	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ce	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
cf	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
da	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
db	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
dc	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
de	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
df	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ea	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	229
eb	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	5	229
ec	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	5	229
ed	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	5	229
ef	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	5	229
fa	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	5	229
fb	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	5	229
fc	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	5	229
fd	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	5	229
fe	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	12	229
Total	420	420	420	420	420	420	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	8310

Couleur	Code d'erreur	Définition d'erreur
	[1]	Sans changements classifiés correctement (vrais non changements)
	[2]	Changements classifiés correctement (vrais changements)
	[3]	Sans changements classifiés incorrectement (catégorie erronée d'occupation des terres)
	[4]	Changements classifiés incorrectement (faux changements)
	[5]	Sans changements classifiés incorrectement (faux non changements)
	[6]	Changements classifiés incorrectement (catégorie erronée d'occupation des terres)

(unité : nombre de pixels)

Figure 11 : Matrice d'erreurs de la détection des changements à six classes, de 1988-1994. *Six class error matrix for the change detection, 1988-1994*

Dans les données utilisées, les cartes topographiques jouent un rôle essentiel pour la détection des changements avec des images à moyenne résolution spatiale : elles aident à identifier les catégories d'occupation des terres mentionnées à la section 3.2.2.E. Nous confirmons donc, comme l'avait déjà démontré Trépanier (1996), l'importance de la connaissance du territoire et de l'acquisition de la réalité de terrain.

L'exactitude de 61 % pour la détection des changements représente certainement une faible valeur puisque, normalement, nous devons viser au moins 80 %. Dans le cas de leur étude, Khorram *et al.* (1999) n'avaient obtenu que 59 % d'exactitude, mais ils ne mentionnent comme causes possibles durant le traitement d'image que le géopositionnement des images, l'erreur spatiale et d'attribut des données de référence, la correction atmosphérique, l'erreur de la classification, l'algorithme de la détection de changements et l'erreur de l'analyste. En plus de ces causes techniques, notons que la façon de choisir et de compter le nombre d'exactitudes et erreurs dans les échantillons peut être une autre catégorie d'erreur.

6. CONCLUSION

Malgré quelques limites, le traitement d'images à moyenne résolution spatiale réalisé dans cette étude est adéquate pour étudier les changements d'occupation des terres du milieu littoral très morcelé et dynamique du Viêt-Nam. De plus, il est plus rapide et moins laborieux que de faire ce genre d'étude à l'aide de photographies aériennes.

Pour les études futures, nous proposons d'utiliser des images à plus fine résolution spatiale pour une zone d'aquaculture extensive, comme celle de Tiên Hai. Par exemple, des images ASTER de TERRA (résolution spatiale de 15 m), qui sont faciles à obtenir pour un pays en développement comme le Viêt-Nam, pourraient être utilisées. Aussi, une classification orientée objet peut être utilisée en ajoutant des informations contextuelles pour extraire des polygones de confusion, par exemple les bassins aquacoles. Finalement, afin d'obtenir une classification facilement utilisable et de faciliter la classification, une définition des classes d'occupation des terres de la classification de la région littorale au Viêt-Nam serait très pertinente avec une description de chaque classe.

Remerciements

Cette recherche est particulièrement dédiée au professeur Ferdinand Bonn, qui a inspiré l'auteure principale tant pour l'étude de la télédétection que pour poursuivre une carrière de recherche en développement durable. Son encadrement imprimé profondément dans son cœur continuera à l'accompagner tout au long de sa carrière.

Cette recherche a été financée par le Programme canadien de bourses de la Francophonie et elle a reçu des appuis administratifs du projet GEOMENSA (Géomatique de l'environnement et de la santé) de Ferdinand Bonn, financé par l'ACDI (Agence canadienne de développement international) et géré par l'AUCC (Association des universités et collèges du Canada).

Durant la campagne de terrain, l'auteure principale a eu de l'aide pour l'acquisition des données et a acquis une bonne connaissance de la géographie physique et sociale du district de Tiên Hai grâce aux personnes suivantes : monsieur Phi Van Chin, du Département de sciences et technologie de la province de Thai Binh, et monsieur Tran Du, du Comité populaire de Tiên Hai, ainsi que le personnel de la Croix-Rouge locale.

Les auteurs remercient également Yves Gauthier, de l'INRS-ETE, pour avoir piloté la révision de cet article et pour ses propres suggestions pour l'améliorer.

Références

Béland, M., Goïta K., Bonn, F. and Pham, T.T.H. (2006) Assessment of land-cover changes related to shrimp aquaculture using remote sensing data: a case study in the Giao Thuy District, Vietnam. International Journal of Remote Sensing, vol. 27, n° 8, p. 1491-1510.

Binh, T.N.K.D., Vromant, N., Nguyen, T.H., Hens, L. and Boon, E.K. (2005) Land cover changes between 1968 and 2003 in Cai Nuoc, Ca Mau peninsula, Vietnam. Environment, Development and Sustainability, vol. 7, p. 519-536.

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de Télédétection, vol. 3 : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec et Agence universitaire de la Francophonie, Sainte-Foy, 386 p.

Crist, E.P. (1985) A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. Remote Sensing of Environment, vol. 17, p. 301-306.

Dai, X. and Khorram, S. (1998) The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 36, n° 5, p. 1566-1578.Dang, H.H. (réd.) (2005) State of the Environment in Vietnam 2005 –Biodiversity. Vietnam Environment Protection Agency, Hanoi (Vietnam), 97 p. http://www.nea.gov.vn/english/state /SoE2005/ddsh.htm

Dao, H.G., Yang, Y. and Amararatne, Y. (2005) GIS for land evaluation for shrimp farming in Haiphong, Vietnam. Ocean & Coastal Management, vol. 48, n° 1, p. 51-63.

EJF (Environment Justice Foundation) (2007) Risky Business: Vietnamese Shrimp Agriculture – Impacts and Improvements. Londres (Royaume-Uni), 44 p. http://www.ejfoundation.org/pdf/risky_business.pdf

Hens, L., Nierynck, E., Tran, V.Y., Nguyen, H. Q., Le, T.T.H. and Le, D A. (2000) Land cover changes in the extended Ha Long city area, North-Eastern Vietnam during the period 1988-1998. Environment, Development and Sustainability, vol. 2, p. 235-252.

Jensen, J.R. (2004) Introductory digital image processing – a remote sensing perspective. 3e édition, Prentice Hall, Upper Saddle River (N.J.), 316 p.

Khorram, S., Biging, G.S., Chrisman, N.R., Colby, D.R., Congalton, R.G., Dobson, J.E., Ferguson, R.L., Goodchild, M.F., Jensen, J.R. and Mace, T.H. (1999) Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda (MD), 64 p.

Le, D.T., Dinh, D.T., An, D.Q., Le, S.T. and Bach, T.H. (2004) Practical study of land consolidation in some provinces, the proposal of incentive policies to improve the effect of land use in the Red River Delta. Vietnam Agriculture Science Institute, Summary report, Hanoi, 33 p.

Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. and Moran, E. (2004) Change detection technique. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, n0 12, p. 2365-2407.

Lunetta, R.S. and Elvidge, C.D. (1998) Remote sensing change detection, environmental monitoring methods and applications. Ann Arbor Press, Ann Arbor (Michigan) 318 p.

Lunetta, R.S., Ediriwickrema, J., Johnson, D.M., Lyon, J.G. and McKerrow, A. (2002) Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. Remote Sensing of Environment, n° 82, p. 258-270.

Mas, J.F. (2000) Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. Journal canadien de télédétection, vol. 26, n° 4, p. 349-362.

Nguyen, H.T. et Nguyen, H.T. (1999) Évaluation de l'effet socio-économique de la forestation des mangroves dans la commune de Thuy Hai, district de Thai Thuy, Thai Binh. P. 116-126 *in* (réd.) Compte rendu du symposium national « Les problèmes socio-économiques, environnementaux et solutions de l'aménagement des mangroves plantées à Thai Binh et Nam Dinh ». Thai Binh (Viêt-nam), 22-25 mai 1999, Danish Red Cross (DRC), Mangrove Ecology Research Center (MERC), Hanoi, 87 p.

Phan, N.H (1998) Mangroves et les digues du Vietnam. P. 237-244, *in* Compte rendu du symposium national « L'utilisation durable et efficace des ressources dans l'écologie de mangrove », Nha Trang, 7-11 novembre 1998, Centre of Resources and Environmental Studies (CRES), Nha Trang Institute of Oceanography (NTIO), Action for Mangrove Reforestation (ACTMANG), Hanoi, 130 p.

Phi, V.C. (1998) La situation actuelle d'utilisation des ressources de l'écologie de mangroves de la province de Thai Binh, l'effet économique - écologique et les résolutions, P. 223-228, *in* Compte rendu du symposium national « L'utilisation durable et efficace des ressources dans l'écologie de mangrove ». Nha Trang, 7-11 novembre 1998, Center of Resources and Environmental Studies (CRES), Nha Trang Institute of Oceanography (NTIO), Action for Mangrove Reforestation (ACTMANG), Hanoi, 130 p.

Petit, C., Scudder, T. and Lambin, E. (2001) Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. International Journal Remote Sensing, vol. 22, n° 17, p. 3435-3456.

Quan, T.Q.D., Nguyen, K.T. and Mai, V.H. (2007) Assessment of water quality change in shrimp farming ponds in the mangrove area of the proposed Biosphere Reserve in the Red River Delta - A case study in Giao Lac Commune, Giao Thuy District, Nam Dinh Province. Report of the research project funded by MAB/UNESCO, UNESCO, People Biodiversity and Ecology, 48 p. http://www.unesco.org/mab/bursaries/mysrept/2002/quan_dao/report.pdf

Singh, A. (1989) Digital change detection techniques using remotely-sensed data : Review article. International Journal Remote Sensing, vol. 10, n° 6, p. 989-1003.

Trépanier, I. (1996) Diagnostic d'évolution du littoral d'une partie du delta du fleuve Rouge au Viêt-nam par télédétection multidate. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 103 p.

Trépanier, I., Dubois, J.-M. M. et Bonn, F. (2002) Suivi de l'évolution du trait de côte à partir d'images HRV (XS) de SPOT : application au delta du fleuve Rouge, Viêt-nam. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n° 5, p. 917-937.