UTILISATION D'IMAGES SATELLITAIRES POUR L'ÉTUDE DU RISQUE D'INONDATION LIÉ À L'OCCUPATION DES TERRES AU NORD DU VIÊT-NAM

Duc Viet BUI et Kalifa GOÏTA*

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1.
Téléphone : 819-821-8000, poste 62212 ; télécopieur : 819-821-7944 ;
courriel : Duc.Viet.Bui@USherbrooke.ca ; Kalifa.Goita@USherbrooke.ca.
** Adresse de correspondance*

Soumis le 7 mars 2007 ; révisé le 2 avril 2007 ; accepté le 11 août 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 203-215

Résumé

Cette étude vise à établir une carte du risque d'inondation dans le delta du fleuve Rouge au nord du Viêt-nam. Il s'agit précisément de la zone de Bac Hung Hai, une région agricole qui chevauche trois provinces, celles de Bac Ninh, d'Hung Yen et d'Hai Duong. Une série de données multidates, comprenant des images optiques (TM et ETM+ de Landsat) et radar (RSO d'ERS-1 et d'ERS-2) a été utilisée pour établir les cartes d'occupation des terres de 1988, 1994 et 2001. Afin d'améliorer les résultats des classifications, nous utilisons une approche qui combine à la fois les bandes spectrales, l'information de texture extraite des bandes 4 et 5 des images de TM, ETM+ et RSO. L'ajout de ces informations supplémentaires aux bandes spectrales apporte une amélioration de l'ordre de 1 à 4 % sur le taux de classification, selon les dates considérées. La méthodologie de classification du risque d'inondation proposée associe les connaissances sur les pratiques culturales aux résultats de la classification des images. Elle montre que les niveaux de risque fort à très fort affectent 33 % de l'ensemble du territoire étudié et que les régions sud-est et nord-est présentent le risque le plus élevé.

Mots-clés : Risque d'inondation ; occupation des terres ; images optiques ; images radar ; Viêt-nam.

The use of satellites images to assess flood risks as a function of land use in Northern Vietnam

Abstract

A series of Landsat (TM and ETM+) and radar (ERS-1 and ERS-2 SAR) data were used to establish land cover and flood risk maps as a function of land cover in Bac-Hung-Hai region (Red River Delta in Northern Vietnam). Land cover in a key parameter that has an influence on the occurrence of flooding in this agricultural region. Both spectral and textural features were considered to improve land cover classification. The radar data was also combined with optical spectral and textural channels in the classification approach. This combination improves classification results (1 to 4 %) depending on the dates considered. The flood risk mapping approach proposed integrates knowledge on agricultural practices to image classification results. It shows that approximately 33 % of the territory considered is located in high to very high flood risk areas and that the south-east and north-east portions of the study area present the highest risk.

Keywords : flood risk ; land cover ; optical images ; radar images ; Vietnam.

1. INTRODUCTION

L'occurrence des catastrophes naturelles, en particulier des inondations, devient de plus en plus importante à travers le monde. Au cours de la dernière décennie, plusieurs pays ont été gravement affectés en Asie (par exemple, la Chine et le Viêt-nam en 2002), en Europe (France, Allemagne, Hongrie et République Tchèque en 2000) et ailleurs dans le monde (Venezuela en 1999, Canada, 1996, États-Unis, 2005, etc.). Les inondations sévères et les glissements de terrain associés ont provoqué de nombreuses pertes de vie humaine et des dégâts matériels se chiffrant à plusieurs milliards de dollars (Amraoui *et al*., 2003). Le Viêt-nam est peut-être l'un des endroits au monde les plus touchés par les désastres, en particulier ceux liés à l'eau (inondations, typhons, érosion). Une des raisons de cette situation est que la majorité de la population vit dans des régions à risque d'inondation très élevé. Il s'agit des régions côtières et des deltas des fleuves très propices à la culture du riz (Nguyen and Bui, 2001). L'ajout d'activités humaines mal planifiées contribue à l'aggravation du risque (Truong, 2005).

En 2005, le passage du typhon « numéro sept » dans le delta du fleuve Rouge, au nord du Viêt-nam, a engendré d'énormes conséquences sur le plan socio-économique. Dans les deux plus grands deltas du pays, celui du Mékong et celui du fleuve Rouge, la fréquence des inondations ne cesse d'augmenter (Truong, 2005 ; Thanh *et al*., 2004). La plaine du delta du fleuve Rouge qui nous intéresse est une vaste vallée. Elle est constituée d'alluvions déposées par les fleuves Rouge et Thai Binh. Cette plaine, située au nord du Viêt-nam, dans le confluent des trois grands fleuves Da, Lo et Thao, couvre une superficie d'environ 14 300 km², ce qui en fait une des deux plus grandes plaines du pays (Thanh *et al*., 2004). Le delta du fleuve Rouge est un lieu très peuplé et un important centre économique, culturel et politique du pays. D'après les statistiques de l'Office général de l'hydro-météorologie (2004), 493 basses pressions tropicales ont affecté le territoire du Viêt-nam entre 1899 et 1999. De ce nombre, 30 % des typhons (148) se sont produits dans le delta du fleuve Rouge.

Pour se protéger contre les inondations, les habitants du delta du fleuve Rouge ont construit, à partir du XI^{e} siècle un grand système de digues de 2 000 km de longueur sur les deux rives des fleuves Rouge et Thai Binh. Ce système protège contre les débordements du fleuve Rouge. En revanche, il influence le drainage des zones à l'intérieur des digues durant la saison des typhons. D'après Dang (2001), une pluie supérieure à 80 mm pendant quelques jours provoque de nombreux foyers d'inondation dans le delta. C'est pour cette raison que des études plus exhaustives sur le phénomène de l'inondation sont requises pour les zones intérieures des digues.

La télédétection pourrait contribuer de façon significative à de telles études, comme le montrent Bonn et Dixon (2005). De leur côté, Sanyal et Lu (2003) résument assez bien les méthodes et les modèles basés sur l'utilisation de la télédétection et des SIG pour l'étude des inondations, particulièrement dans les pays asiatiques.

Les analyses concernant les risques d'inondation dans le delta du fleuve Rouge demeurent encore peu nombreuses. Nguyen *et al.* (1994) ont travaillé sur l'aménagement agricole dans cette région en utilisant des images de HRV de SPOT. Luong (1995) s'est intéressé à la caractérisation de l'évolution des cultures sèches et aux problèmes de drainage dans le district de Nam Thanh. Le drainage des basses terres y est traité de façon très sommaire. Des travaux plus substantiels ont été réalisés dans le delta du Mékong, à la fois à partir de données satellitaires optiques, mais surtout radar pour le suivi des inondations (Nguyen and Bui, 2001) ou la classification des régimes de culture rizicole (Liew *et al*., 1998). La prédiction des inondations sur la base de modèles hydrologiques a également fait l'objet de nombreuses investigations (Booij, 2003 ; Villegas, 2004). Cependant, la plupart de ces travaux n'intègrent pas encore les produits de télédétection (Huynh and Nguyen, 2003).

L'analyse des différents travaux montre que l'occupation des terres est un facteur étroitement lié au risque d'inondation, d'où l'intérêt des données de télédétection comme source d'information. Toutefois, l'établissement d'une carte d'occupation des terres, à partir d'images de télédétection ne donne pas encore des résultats satisfaisants dans le delta du fleuve Rouge. Les difficultés sont liées, entre autres, à l'étroitesse des parcelles de culture et à leur hétérogénéité ainsi qu'à la présence continue de nuages qui perturbent la qualité des données provenant des images optiques. Ce problème est particulièrement sérieux dans les études de détection des changements (Arzandeh and Wang, 2003). Pour pallier ces inconvénients, on fait de plus en plus appel aux images acquises en mode actif (Liew *et al*., 1998 ; Nguyen and Bui, 2001).

Dans la présente étude, on combine des images optiques et radar. L'objectif visé est d'arriver à une meilleure cartographie de l'occupation des terres dans le delta du fleuve Rouge, cartographie qui intègre la dynamique des cultures au cours de l'année. De plus, on analyse les relations entre le risque d'inondation et l'occupation des terres, ce qui permet par la suite de produire une cartographie du risque.

2. SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES UTILISÉES

La région d'étude chevauche trois provinces : Bac Ninh, Hung Yen et Hai Duong. Le nom qu'on lui a donné pour des fins pratiques est Bac-Hung-Hai (BHH) et ce nom est formé à partir de la première lettre du premier nom de chacune des provinces. La zone est située au centre du delta, au nord du Viêt-nam (figure 1). Elle est limitée au nord par le fleuve Thai Binh, à l'ouest par le fleuve Rouge, au sud par le canal Bambous (Luoc) et à l'est par le canal Rapide

(Duong). La région du BHH représente environ 2 200 km^2, soit 16 % de la superficie totale du delta du fleuve Rouge. Elle couvre seize districts, dont une partie du district très urbanisé de Gialam appartenant à la capitale Hanoi. En plus d'être une région géographiquement fermée, la région du BHH se retrouve dans des basses terres sur le plan topographique. Elle est donc plus exposée aux situations d'inondation. C'est pourquoi, nous l'avons choisie comme zone caractéristique pour étudier les problèmes dans le delta. Cette région comprend principalement des terres agricoles, des cours d'eau, des agglomérations urbaines et des sols nus.

Les données de télédétection utilisées dans cette étude sont principalement des images multibandes et radar ainsi que des photographies aériennes (tableau 1). Les données auxiliaires considérées sont des statistiques socio-économiques annuelles du Viêt-nam, de 1990 à 2003, fournies par le Centre d'archives des données socio-économiques, des données météorologiques de 11 stations dans la zone de BHH, de 1998 à 2004 (Compagnie Hydraulique de BHH, 2005), les calendriers de cultures de l'an 2000 également fournis par la Compagnie Hydraulique de BHH (2005), les cartes topographiques à l'échelle de 1 : 25 000 datant de 1987 avec une équidistance 2,5 m, les cartes pédologiques à l'échelle de 1 : 50 000 datant de 1995 et des mesures de terrain (voir section 3.1). Les cartes topographiques et pédologiques ont été acquises au Centre VTGEO.

Tableau 1 : Principales données de télédétection utilisées. *Summary of the main remote sensing data used in the study*.

Données	**Date**	**Résolution spatiale (m)**	**Résolution spectrale (μm)**	**Objectif**
ETM+ de Landsat-7	08-05-2001 09-09-2001 16-11-2001	30	Bande 1 = 0,45-0,52 Bande 2 = 0,52-0,60 Bande 3 = 0,63-0,69 Bande 4 = 0,76-0,90 Bande 5 = 1,55-1,75	Construire les cartes d'occupation des terres en trois périodes et établir la carte d'occupation des terres de 2001
TM de Landsat-5	22-12-1988 23-12-1994	30	Bande 1= 0,45-0,52 Bande 2 = 0,52-0,60 Bande 3 = 0,63-0,69 Bande 4 = 0,76-0,90 Bande 5 = 1,55-1,75	Construire les cartes d'occupation des terres de 1994 et 1988
RSO de ERS-1	20-06-1994	12,5	Bande C (5,3 GHz), longueur d'onde : 5,6 cm polarisation VV	Améliorer des résultats de classification
ROS de ERS-2	06-06-2001	12,5	Bande C (5,3 GHz), longueur d'onde : 5,6 cm polarisation VV	Ajouter des informations sur l'image de 2001 et améliorer des résultats de classification
Photo-graphies aériennes	12-1987 11-1995 11-2001	10 7,5 7,5	Noir et blanc	Validation des résultats de la classification

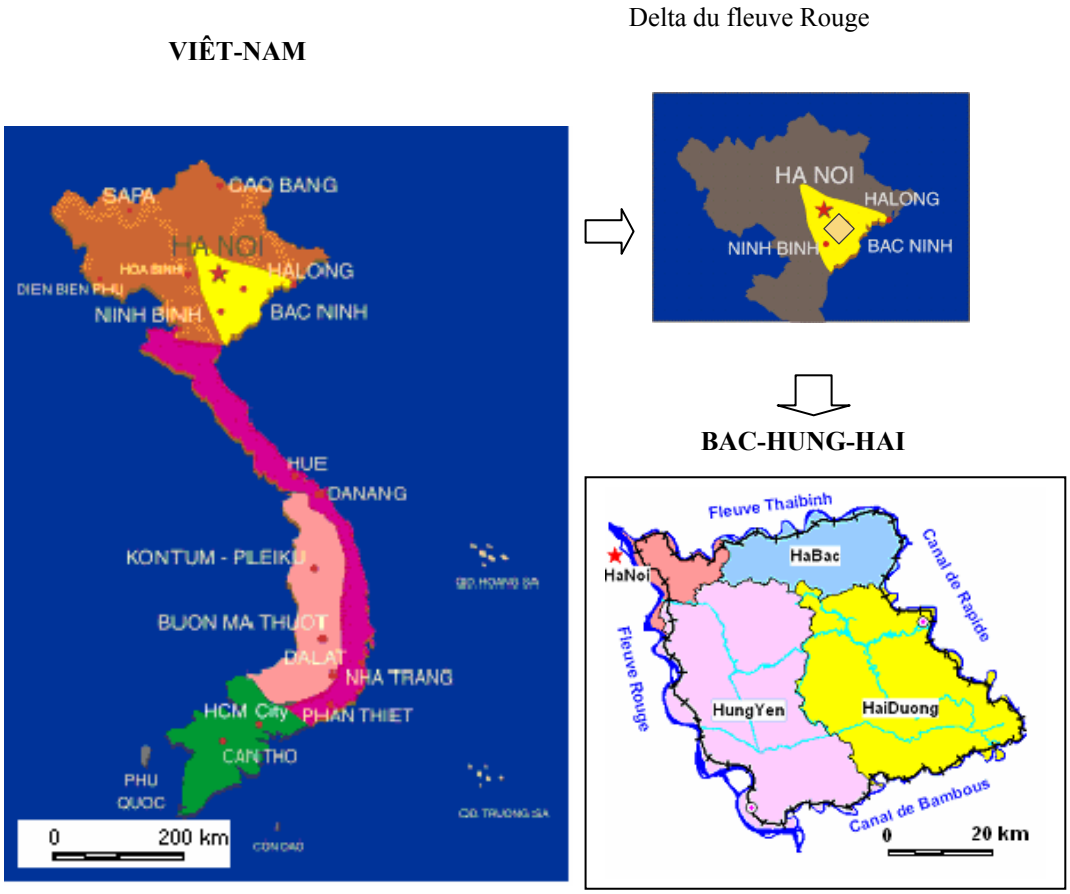


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude. *Location of the study area*

3. MÉTHODOLOGIE

On présente ci-dessous la méthodologie de l'étude. Celle-ci comprend plusieurs étapes allant des traitements préliminaires des données à l'extraction des niveaux de risque d'inondation en fonction de l'occupation des terres.

3.1. Travaux sur le terrain et traitements préliminaires

Pour mener l'étude, nous avons entrepris des travaux sur le terrain en 2005. Plusieurs types de données ont été recueillies. Il s'agit entre autres de données sur l'occupation actuelle des terres et sur la localisation de sites de référencement géométrique. Nous avons également réalisé une enquête auprès des paysans notamment sur l'occurrence des événements d'inondation dans les différentes zones visitées, sur le calendrier agricole et le lien qualitatif avec les inondations. Au total 120 sites ont été visités dans la zone d'étude. Au moins 5 sites ont été visités pour chaque type d'occupation des terres, et cela de façon aléatoire. La position de chacun des sites a été relevée à l'aide d'un GPS, avec une précision planimétrique de moins de 10 m. Plusieurs objectifs sont visés avec ces relevés sur le terrain. Soixante points de contrôle ont été utilisés pour le référencement géométrique des images et des photographies aériennes. Le processus de classification des images a été guidé en se servant d'une trentaine de sites inventoriés. La validation des résultats a été faite avec un nombre équivalent de sites différents.

Puisque la base de données utilisée comprend des images multidates provenant de capteurs différents, il est nécessaire d'appliquer des traitements préliminaires (corrections géométriques, filtrage, masquage des zones nuageuses) avant de pouvoir extraire des informations utiles. Nous avons choisi le filtre de Lee (Rio and Lozano, 2000) pour réduire le chatoiement dans les deux images de RSO de 1994 et de 2001, avec une taille de fenêtre de 3 x 3 pixels. D'après ces auteurs, cette taille de fenêtre permet de réduire le chatoiement sans altérer les valeurs originelles de l'image.

3.2. Approche de classification

Nous avons testé plusieurs types de combinaison d'images au niveau de la classification. Notre approche finale combine l'imagerie optique (bandes spectrales, en plus des bandes de texture) à l'imagerie radar (bandes de texture). Le logiciel Geomatica a été utilisé. Le nombre de classes identifiées dépend des périodes d'acquisition des images considérées.

L'estimation de la texture est basée sur l'utilisation de la méthode des matrices de co-occurrence des niveaux de gris (GLCM). La méthode GLCM est la méthode la plus utilisée en télédétection pour la mesure de la texture (Clausi et Jernigan, 1998 ; Treitz *et al*., 2000 ; Treitz and Howarth, 2000). En effet, elle offre suffisamment de flexibilité pour calculer un nombre multiple de paramètres statistiques qui décrivent différents aspects de la texture (Clausi, 2002). Les bandes infrarouge (bandes 4 et 5) des images TM et ETM+ ont été utilisées pour produire les matrices de co-occurrence et générer par la suite les statistiques. Tel que déjà souligné, plusieurs paramètres de texture sont calculables à partir des matrices GLCM (moyenne, corrélation, entropie, contraste, etc.). Sur le tableau 2, on résume les équations de certains des paramètres considérés. Après différents tests, le paramètre de la moyenne s'est avéré suffisant pour notre zone d'étude dans le cas de l'imagerie optique.

Finalement, la méthode de classification basée sur le maximum de vraisemblance a été appliquée sur les données. Cette méthode est décrite dans la plupart des ouvrages de traitement d'images de télédétection. Elle s'avère comme une référence, en particulier dans la classification des images acquises dans le domaine optique. Nous considérons la précision globale et le coefficient Kappa comme les deux mesures de l'exactitude du processus de classification. Les calculs sont faits dans un premier temps sur les sites d'entraînement pour le choix des meilleures combinaisons (précisions théoriques) et, par la suite, sur les sites de validation (tableau 3). Les images correspondant à chaque date considérée ont été classifiées et évaluées à l'aide des deux indices. Dans le cas de l'image ETM+ de mai 2001, les nuages et leur ombre ont été masqués avant la classification (5,3% de l'image concentré sur une zone compacte). L'image RSO de juin 2001 a été utilisée pour extraire les informations manquantes en s'inspirant des travaux d'Arzandeh et Wang (2002). Ainsi, quatre paramètres de texture ont été considérés parmi ceux extraits de la matrice de co-occurrence provenant de cette image radar (moyenne, contraste, variance et entropie). Les paramètres choisis offrent le plus de séparabilité, tel qu'illustré sur la figure 2. Ces paramètres ont été considérés comme quatre bandes dans une procédure de classification basée également sur le maximum de vraisemblance. La classification résultante a été utilisée pour compléter les parties masquées sur l'image ETM+ de mai 2001.

Pour résumer, à la suite de l'ensemble des classifications effectuées, on se retrouve avec trois images classifiées de la région d'étude en 2001 (mai, septembre et novembre), une image classifiée de décembre 1988 et une autre de décembre 1994. Les images RSO ont été utilisées dans toutes les procédures de classification, sauf en 1988 où elles n'étaient pas encore disponibles (voir tableau 3). Ces différents résultats seront combinés pour dégager le risque d'inondation (section 3.3).

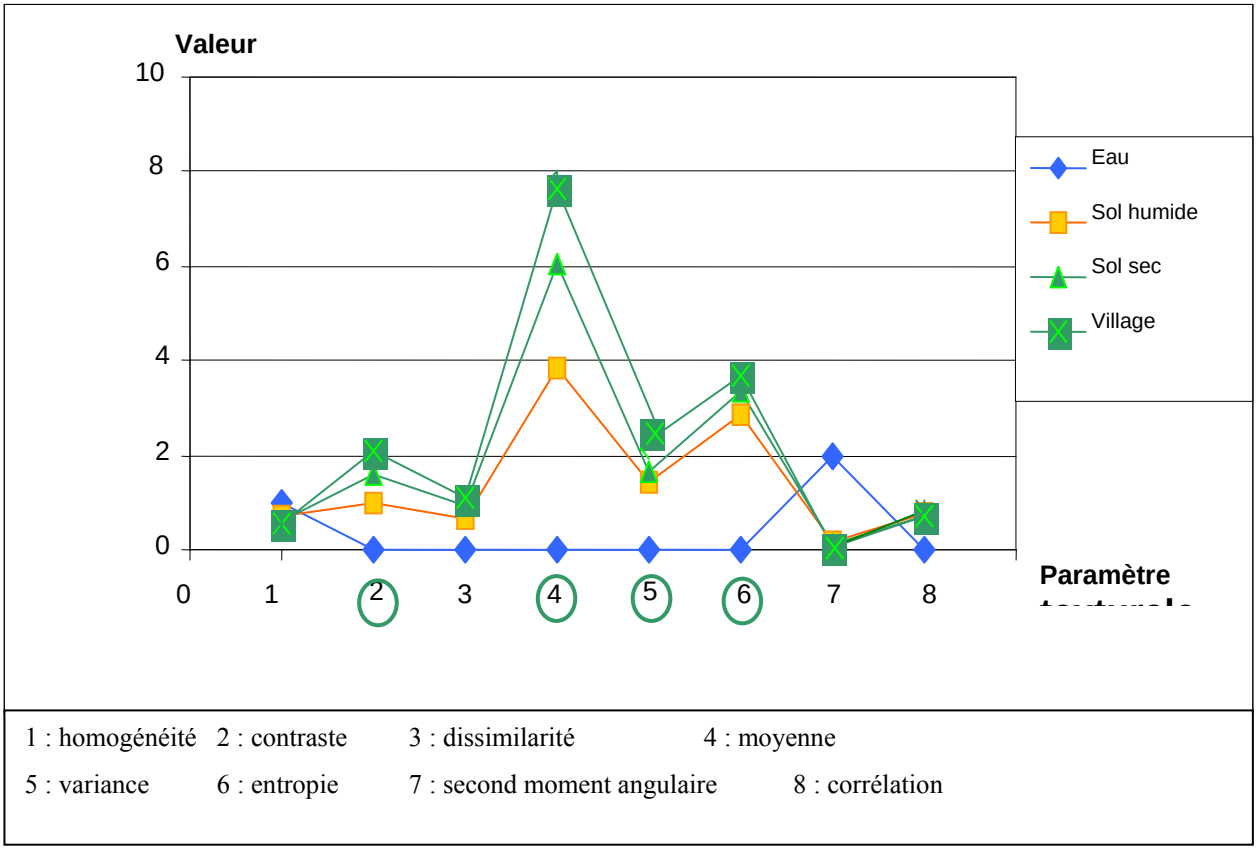
Tableau 2 : Équations de quelques paramètres statistiques de texture considérés dans le processus de classification. *Equations of some texture features considered during the classification process.*

Paramètre de texture	**Formulation**
Moyenne	$F_1 = \mu_I = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} iP_{i,j}$
Corrélation	$F_2 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} \frac{(i-\mu_I)(j-\mu_J)}{\sigma_I \sigma_J}$
Variance	$F_3 = \boldsymbol{\sigma}_I = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j}(i-\mu_I)^2}$
Contraste	$F_4 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j}(i-j)^2$

Paramètre de texture	Formulation
Entropie	$F_5 = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} - P_{i,j} \ln p_{i,j}$

où N est le nombre de niveaux gris ; P est le GLCM symétrique normal de dimension N x N ; et $P_{i,j}$ est l'élément de la ligne i, colonne j de P ;

$$\mu_J = \sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} jP_{i,j} \quad ; \boldsymbol{\sigma}_J = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j}(j-\mu_J)^2} \; .$$



1 : homogénéité 2 : contraste 3 : dissimilarité 4 : moyenne

5 : variance 6 : entropie 7 : second moment angulaire 8 : corrélation

Figure 2 : Variations de différents paramètres de texture testés sur la zone d'étude dans le but de sélectionner ceux qui interviendront dans les processus de classification. *Variations of different texture parameters tested in the study area in order to select those with the maximum separability during the classifications.*

Tableau 3 : Évaluation des résultats de classification. *Evaluation of classification results.*

Combinaison des bandes	**Précision moyenne** (%)	**Précision globale** (%)	**Coefficient Kappa**	**Validation avec sites indépendants** (%)
TM de Landsat 12-1988				
Spectral	81,74	85,01	0,834	77,1
Spectral + mean4	83,06	86,45	0,849	78,2
Spectral + mean5	82,36	85,45	0,838	77,8
Spectral + mean4 + mean5	**83,17**	**86,51**	**0,850**	**78,5**
TM de Landsat 12-1994				
Spectral	83,56	82,20	0,805	73,2
Spectral + mean4	85,90	85,18	0,838	73,5
Spectral + mean5	84,21	83,05	0,815	72,3
Spectral + mean4 + mean5	86,46	86,02	0,847	73,8
Spectral + radar	84,20	83,82	0,836	72,2
Spectral + mean4 + mean5 + RSO de ERS-1	**87,15**	**86,38**	**0,852**	**74,6**
ETM+ de Landsat 05-2001				
Spectral	90,87	86,65	0,839	
Spectral + mean4	91,65	87,88	0,854	
Spectral + mean5	91,28	87,05	0,844	
Spectral + mean5 + mean4	91,90	88,15	0,856	
Spectral + radar	91,95	88,83	0,863	
Spectral + mean5 + mean4 + RSO de ERS-2	**93,12**	**89,56**	**0,882**	
ETM+ de Landsat 09-2001				
Spectral	85,90	85,47	0,837	
Spectral + mean4	87,51	87,11	0,855	
Spectral + mean5	87,72	87,52	0,859	
Spectral + mean5 + mean4	88,66	88,62	0,872	
Spectral + radar	86,44	85,98	0,843	
Spectral + mean5 + mean4 + RSO de ERS-2	**89,05**	**88,99**	**0,876**	
ETM+ de Landsat 11-2001				
Spectral	87,98	89,64	0,884	82,1
Spectral + mean4	89,77	91,05	0,900	83,2
Spectral + mean5	89,46	90,61	0,895	83,8
Spectral + mean5 + mean4	91,21	91,72	0,907	84,2
Spectral + radar	88,57	90,12	0,890	84,1
Spectral + mean5 + mean4 + RSO de ERS-2	**91,34**	**91,74**	**0,908**	**85,2**
RSO de ERS-2 06-2001				
Contraste + moyenne + variance + entropie	58,63	64,45	0,548	

Spectral = utilisation des seules bandes spectrales de TM ou ETM+ de Landsat dans la classification ; $Mean_i$ (i = 4 ou 5) = moyenne de texture extraite de la matrice de co-occurrence établie à partir de la bande i de TM ou ETM+ de Landsat

3.3. Risque d'inondation en fonction de l'occupation des terres

Dans la zone d'étude, l'occupation des terres est essentiellement dominée par l'activité agricole. La classification d'une seule image satellitaire acquise à une date donnée ne permet pas de dresser un portrait de la dynamique de cette occupation. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir des images caractéristiques des principales périodes du calendrier agricole, comme c'est le cas pour l'année 2001 dans cette étude. Par ailleurs, l'occupation des terres dans la région est étroitement liée à la topographie et, en particulier, aux conditions d'irrigation et de drainage. L'analyse de la littérature (VTGEO, 1997 ; Dang, 2001 ; Muller and Zeller, 2002) et surtout les enquêtes menées sur le terrain auprès des paysans, nous enseignent que le mode d'occupation des terres, et donc le choix des parcelles, serait lié au niveau des risques naturels en général et en particulier au risque d'inondation (VTGEO, 1997). C'est ainsi que les agglomérations urbaines se retrouvent souvent sur les terres hautes ou bien sur des terres ayant un drainage suffisant. Les terres dites « hautes » et « moyennes » (parcelles bien drainées avec un relief plus élevé que les environs) sont souvent des terres où trois cultures se succèdent tout au long de l'année. Ces terres présentent un risque d'inondation moindre par rapport aux terres dites « basses » (mauvais drainage et topographie plus basse), où seulement deux cultures se succèdent durant l'année. Compte tenu de cette dynamique, nous définissons le risque d'inondation en fonction des modes d'occupation des terres : faible (zones d'agglomérations urbaines) ; moyen (2 cultures de riz + 1 culture sèche ou 3 cultures sèches) ; fort (2 cultures de riz) et très fort (1 culture de riz).

Les cultures sèches sont le maïs, la pommes de terre, les patates douces, etc. Elles sont habituellement pratiquées entre le 15 octobre et le 15 janvier. Les trois images de 2001 ne sont pas suffisantes pour les retracer adéquatement. Ainsi, pour définir le niveau de risque moyen (2 cultures de riz + 1 culture sèche), nous faisons appel aux images classifiées de 1988 et 1994 en plus de celles de 2001. Les agglomérations rurales ou urbaines sont facilement identifiées à travers le processus de classification, ce qui permet de définir le niveau de risque faible. Dans les autres cas, il s'agit de vérifier la dynamique de succession entre le couvert végétal, les sols nus secs et les sols nus humides. Sur le tableau 4, on résume les règles utilisées pour définir le niveau de risque d'inondation dans la zone d'étude.

Pour évaluer les résultats des classifications, nous employons différentes sources de données comme référence. Ces données proviennent essentiellement des observations compilées sur les champs lors de la campagne de terrain de 2005. De plus, nous utilisons les photographies aériennes de 1987 à 1 : 10 000 ainsi que de 1995 et de 2001 à 1 : 7 500 de même que les cartes topographiques à 1 : 25 000 de 1987.

Tableau 4 : Processus d'établissement de la carte d'occupation des terres et de la carte du risque d'inondation. *Approach used to establish land cover and flood risk maps.*

Occupation des terres						
Mai 2001	Végétation	Végétation	Végétation	Végétation	Village	Urbain
Septembre 2001	Sol nu	Végétation	Végétation	Culture sèche	Village	Urbain
Novembre 2001	Sol nu humide	Sol nu (sec et humide)	Culture sèche	Culture sèche	Village	Urbain
Occupation des terres 2001	**1 riz**	**2 riz**	**2 riz + 1 culture sèche**	**3 cultures sèches**	**Villages**	**Urbain**
Décembre 1988			Culture sèche			
Décembre 1994			Culture sèche			
Risque d'inondation	**Très fort**	**Fort**	**Moyen**	**Moyen**	**Faible**	**Faible**

4. RÉSULTATS

Sur la figure 3, on présente l'occupation des terres en 2001. Les secteurs où l'on cultive le riz seulement une fois par année se retrouvent sur environ 6 % de la superficie totale du territoire. En revanche, on enregistre la culture du riz deux fois par année sur 23 % du territoire. Les zones à deux cultures de riz plus une culture sèche par année occupent également une grande portion du territoire (34 %), alors que la présence de trois cultures sèches est négligeable (environ 3 %). Les agglomérations urbaines (villes, villages) et les surfaces d'eau complètent l'occupation des terres avec environ 32 % du territoire.

Les résultats statistiques des différentes classifications de la couverture des terres sont résumés sur le tableau 3, avec les précisions générales et le coefficient Kappa correspondant. La précision théorique obtenue sur la base des seules bandes spectrales des images des capteurs de Landsat se situe entre 82 et 90 %, tandis que le coefficient Kappa varie entre 0,80 et 0,88, selon les dates considérées. L'ajout de la texture moyenne de la bande 4 ou 5 des capteurs de Landsat améliore légèrement le taux de bonne classification de 1 à 3 %. La corrélation entre la bande spectrale (4 ou 5) et le paramètre moyen de texture (4 ou 5) est élevée sur la zone d'étude (de l'ordre 0,85 en moyenne), ce qui explique la faible contribution de la texture dans le taux de bonne classification. Les résultats apparaissent systématiquement supérieurs lorsque les deux textures moyennes sont considérées en même temps que les bandes spectrales dans la procédure de classification.

La classification de l'image RSO seule donne des résultats faibles (64 % de précision théorique). Cependant, en utilisant l'image RSO combinée aux bandes spectrales des capteurs de Landsat, on obtient systématiquement une précision légèrement supérieure à celle des images des capteurs de Landsat considérées seules.

Notre approche finale a consisté à évaluer l'apport de l'ensemble des données dans le processus de classification (bandes spectrales, textures moyennes des bandes 4 et 5 des capteurs de Landsat, plus image RSO selon la disponibilité). Tel que mentionné sur le tableau 3, cette combinaison apporte une amélioration systématique comparativement à toutes les autres combinaisons déjà mentionnées. L'augmentation la plus élevée au niveau du taux de classification est de l'ordre de 4 % pour l'année 1994. L'examen des classifications de l'image ETM+ de mai 2001 et RSO de juin 2001 montre que les erreurs de commission et d'omission sont inférieures pour toutes les classes dans l'image ETM+. Avec l'image RSO, on éprouve d'importantes difficultés à classifier les zones habitées (villages) et les zones de végétation sur sol sec ou humide. L'erreur de commission maximale observée pour l'image ETM+ est de seulement 4% alors qu'elle atteint 33% pour l'image RSO.

Sur la base de la carte d'occupation des terres de 2001 et de la procédure présentée sur le tableau 4, nous avons élaboré une carte du niveau de risque d'inondation pour la zone d'étude (figure 4). La carte d'occupation des terres de 2001 est établie à partir de l'interprétation des trois périodes considérées durant l'année (mai, septembre et novembre), en se servant du calendrier agricole (tableau 4). Ainsi, par exemple, si la classification de l'image de mai donne la végétation, celle de septembre un sol nu et celle de novembre un sol nu, alors la zone est classifiée comme une culture de riz. L'analyse est faite de manière automatique. L'image résultante finale est considérée comme l'occupation des terres de 2001. Mais, cette carte d'occupation des terres de 2001, à elle seule, ne suffit pas pour prendre la décision sur le niveau de risque, puisqu'elle n'intègre pas toutes les périodes de l'année, en particulier concernant les cultures sèches. On procède donc à une intégration avec les classifications de 1988 et de 1994, ce qui permet d'identifier ou non la présence de cultures sèches, puisqu'elles se trouvent à l'intérieur de la période de plantation de ce type de culture, c'est-à-dire entre le 15 octobre et le 15 janvier.

Les zones à risque très fort et fort occupent respectivement 7 % et 26 % du territoire. La grande majorité du territoire se situe dans les risques moyen (35 %) à faible (32 %). Les extrêmes sud-est et nord-est comptent environ 40 % de toutes les superficies du territoire à risque très fort. Le risque d'inondation diminue plus on s'achemine vers le nord-ouest, comme on peut le constater sur la figure 4. Cette répartition des zones à risque d'inondation concorde assez bien avec la topographie du milieu (figure 5), qui est particulièrement basse au sud-est. Le centre, majoritairement à risque moyen, est situé sur une topographie plane, mais qui contient beaucoup de dépressions sous forme de cuvettes locales.

Sur la figure 6, on illustre le risque d'inondation très fort et fort selon les différents districts du territoire. Dans l'ensemble, c'est le district de TuKy qui est le plus affecté (30 % de sa superficie) suivi de ceux de Gialuong (28 %) et de Ninhgiang (25 %).

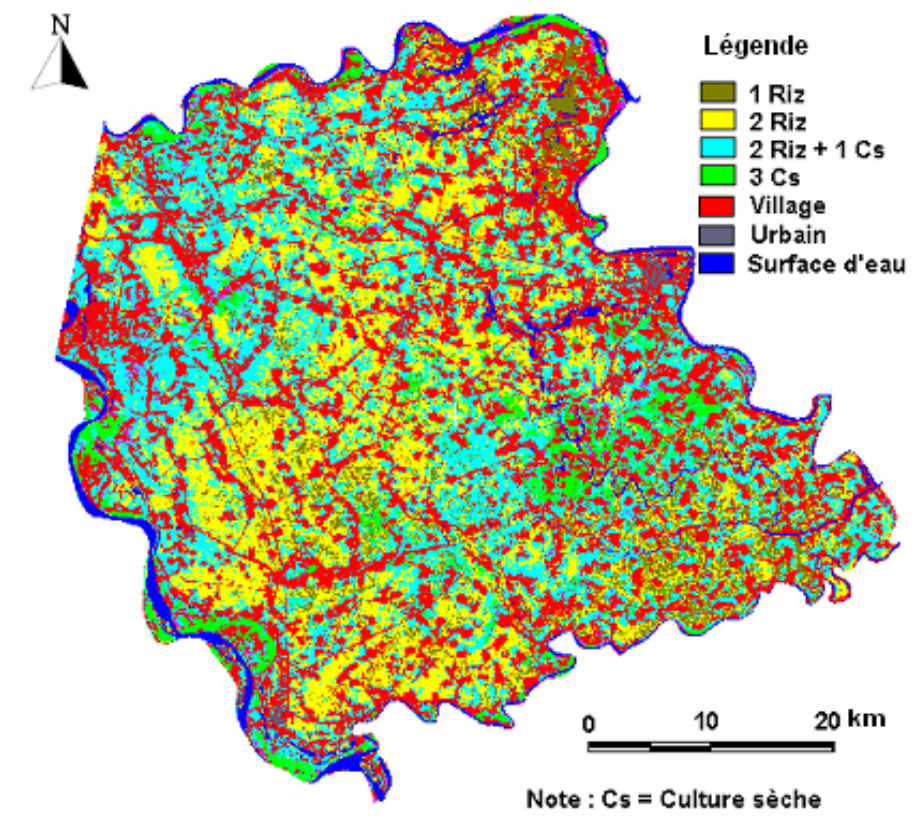


Figure 3 : Occupation des terres en 2001 à partir des images ETM+ classifiées de mai, septembre et novembre 2001. *Land cover in 2001 derived from the classified ETM+ images of May, September and November 2001*.

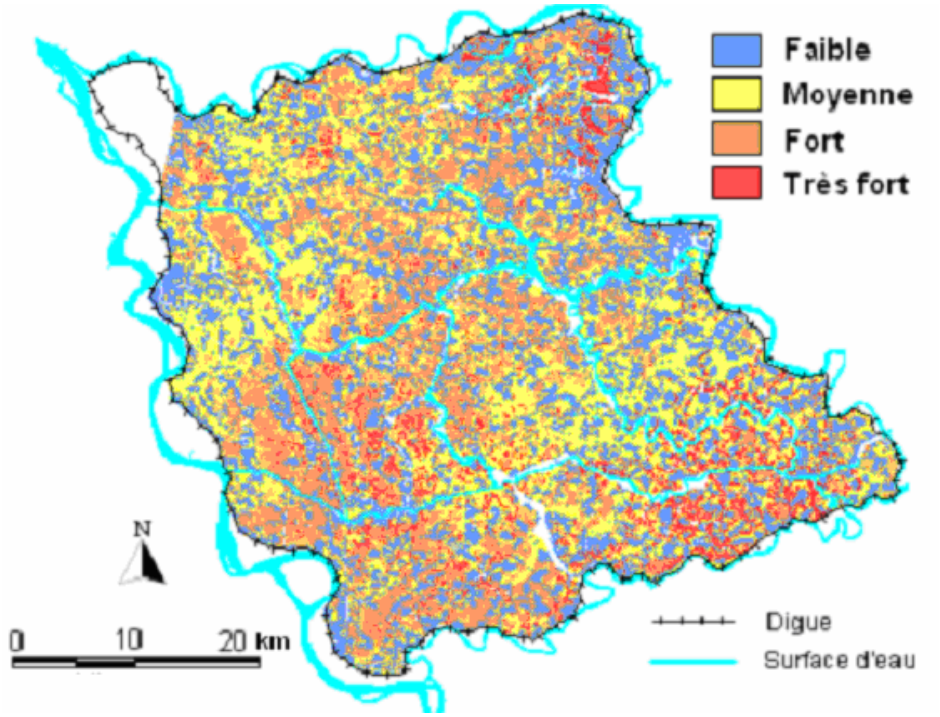


Figure 4 : Risque d'inondation dérivé de l'occupation des terres de 2001, 1994 et 1988. *Flood risk as a function of land cover extracted from the 2001, 1994 and 1988 maps*.

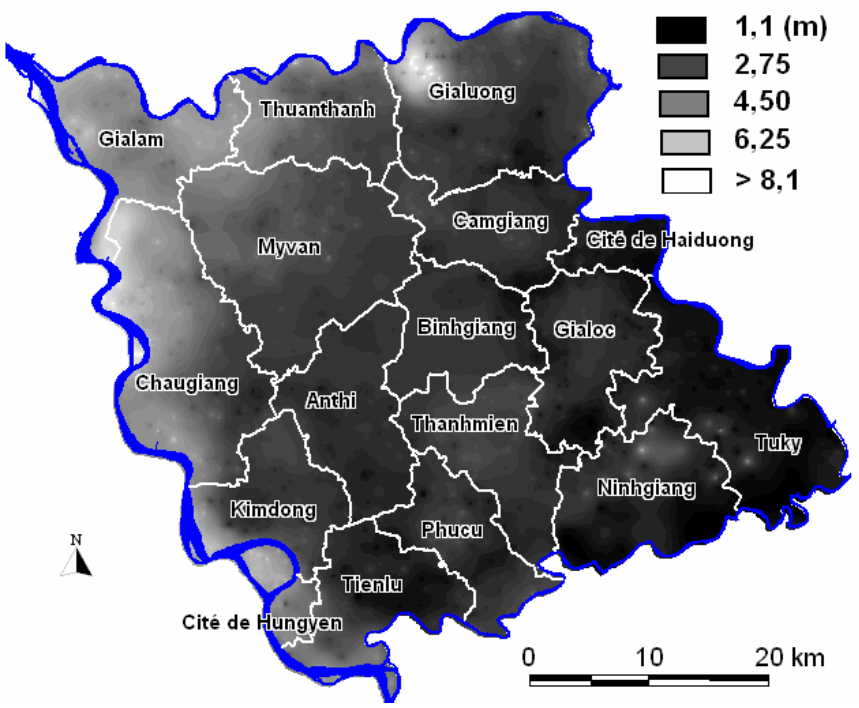


Figure 5 : Topographie du secteur d'étude à partir des cartes topographiques à 1: 25 000 de 1987. *Topography of the study area extracted from the 1 : 25 000 topographic maps of 1987.*

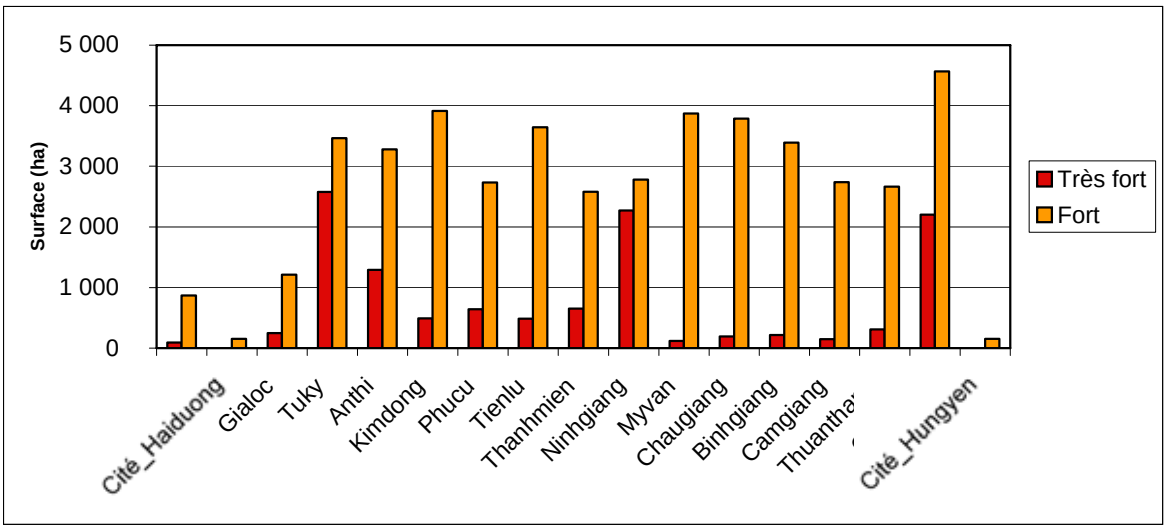


Figure 6 : Répartition du risque d'inondation lié à l'occupation des terres dans les différents districts. *Flood risk as a function of land cover in the different districts*.

5. DISCUSSION

Cette étude utilise des données multidates pour établir l'occupation des terres et le niveau de risque d'inondation dans le delta du fleuve Rouge. La difficulté d'accéder à des images optiques de qualité contraint à l'utilisation de séries temporelles. La présence de nuages explique en grande partie cette difficulté. Dans l'ensemble, nous obtenons de bons résultats de classification avec les images des capteurs de Landsat (> 75 % comparativement aux données de validation), même si on considère seulement les bandes spectrales. Les résultats de l'année 1988 (TM) apparaissent les plus faibles, alors que les meilleurs sont obtenus pour novembre 2001 (ETM+). Au-delà de la méthode de classification, deux facteurs peuvent influencer la cartographie de l'occupation des terres dans la zone d'étude : les conditions d'acquisition des images optiques et l'occupation des terres au moment de l'acquisition. L'image ETM+ de novembre 2001 était de loin la plus claire de toutes les images considérées. Elle a été acquise à une période où le contraste entre les éléments présents sur la surface est très prononcé. Ceci n'est pas le cas vers la fin du mois de décembre, où l'occurrence des nuages est plus élevée et où il y a une confusion entre les champs de riz (période de piquetage) et de cultures sèches. La faible dimension et l'hétérogénéité des parcelles de culture augmentent la confusion au niveau spectral dans les images, d'où l'intérêt de l'ajout de l'information texturale et des images radar.

La considération de la texture a permis d'améliorer légèrement les résultats de classification, conformément aux suggestions de plusieurs auteurs (Clausi, 2002 ; Arzandeh and Wang, 2003). Les paramètres de texture sont nombreux et tous n'apportent pas nécessairement une amélioration en fonction de la catégorie d'image ou de la région d'étude.

Le delta du fleuve Rouge est une région agricole, son occupation des terres est relativement simple. La moyenne de texture, qui est un paramètre de premier ordre, s'est avérée suffisante dans ce cas. Dans l'ensemble, la combinaison avec les données radar (RSO d'ERS-1 ou d'ERS-2) a donné des résultats systématiquement supérieurs à l'utilisation de l'imagerie optique seule. Mais, il s'agit d'une amélioration très légère, voire négligeable quand on regarde le coût des données radar. Seules, ces dernières n'offrent pas la possibilité de classification intéressante pour le moment. Cependant, cette dynamique pourrait changer avec les données de multipolarisation et, particulièrement, avec les données polarimétriques (Scheuchl *et al.*, 2005). Ceci permettrait une meilleure complémentarité avec les images optiques.

La méthodologie proposée pour cartographier le niveau de risque d'inondation est une manière de traduire les connaissances locales de la dynamique de l'occupation des terres en niveau de risque. Le delta du fleuve Rouge se prête bien à cet exercice, compte tenu de son caractère très agricole et de la simplicité relative de son occupation des terres. La précision de la classification influence la délimitation des zones de risque. Par ailleurs, pour mettre en marche la méthodologie proposée, il est nécessaire d'obtenir un portrait de l'occupation des terres tout au long de l'année. Ceci permet de donner un reflet des pratiques agricoles, tout en distinguant les cultures sèches des cultures humides. La carte du risque d'inondation établie (figure 4) révèle que la zone sud-est du territoire à l'étude est la plus propice aux inondations. Le risque diminue plus on se dirige vers le nord-ouest. En effet, la zone au sud-est présente la topographie la plus basse et agit comme une zone d'accumulation des eaux en provenance des régions plus au nord. Ce mauvais drainage explique pourquoi les paysans y pratiquent une seule culture de riz.

6. CONCLUSION

Dans cette étude, on a examiné un aspect de la problématique des inondations dans le delta du fleuve Rouge au nord du Viêt-nam : le lien avec l'occupation des terres. Pour y arriver, il est nécessaire de considérer une série d'images satellitaires multidates, à partir desquelles les pratiques culturales peuvent être déduites après un processus de classification. Dans cette étude, la combinaison des bandes spectrales d'images des capteurs de Landsat et de la moyenne de texture extraite des bandes infrarouge (4 et 5) a amélioré les résultats de la classification de l'occupation des terres. L'ajout d'images radar à cette combinaison apporte une amélioration systématique, mais légère. La carte du risque d'inondation produite en fonction de l'occupation des terres montre que les zones sud-est et nord-est du delta du fleuve Rouge présentent les risques les plus élevés. Ceci apparaît logique lorsqu'on examine la répartition de la topographie sur le territoire.

Dans les prochains travaux, il faudrait examiner l'influence des autres facteurs sur le risque d'inondation, en particulier l'intensité des précipitations, le relief et l'ensemble du système hydraulique du delta du fleuve Rouge, pour ainsi raffiner la cartographie des zones à risque.

DÉDICACE ET REMERCIEMENTS

Nous dédions cet article à la mémoire du professeur Ferdinand Bonn. Ses efforts exceptionnels ont favorisé l'essor de la télédétection au Viêt-nam et la venue d'étudiantes et d'étudiants vietnamiens dans les programmes de maîtrise et de doctorat à l'Université de Sherbrooke. Sans lui, cette étude n'aurait probablement pas vu le jour. Nous remercions le Programme canadien des bourses de la Francophonie et le Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du

Canada pour le support financier. Nous tenons à souligner les contributions du Centre de télédétection et de géomatique (VTGEO) au Viêt-nam, en particulier lors de la collecte des données. Les données des capteurs de Landsat utilisées ont été fournies par le centre Global Land Cover Facility (University of Maryland, USA).

Références

Amraoui, N., Golaz, C. et Mardhel, V. (2003) Évaluation du risque d'inondation dans le bassin de la Somme : apport de l'approche globale et de l'approche distribuée. BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), Service Eau, Paris, 69 p.

Arzandeh, S. and Wang, J. (2002) Texture evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, n° 5, p. 653-666.

Arzandeh, S. and Wang, J. (2003) Monitoring the change of Phragmites distribution using satellite data. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 29, n° 1, p. 24–35.

Bonn, F. and Dixon, R. (2005) Monitoring flood extent and forecasting excess runoff risk with Radarsat-1 data. Natural Hazards, vol. 35, p. 377-393.

Booij, M.J. (2003) Decision support system for flood control and ecosystem upgrading in the Red River basin. P. 115-122, *in* G. Bloschl (réd.) Water Resources Systems, Hydrological Risk, Management and Development. International Association of Hydrological Sciences, Sapporo, Publication n° 281, 1502 p.

Clausi, D.A. (2002) An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, n° 1, p. 45–62.

Clausi, D.A. and Jernigan, M.E. (1998). A fast method to determine co-occurrence texture features. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, n° 1, p. 298-300.

Compagnie Hydraulique de BHH (2005) Rapports de recherche - Données synthétiques d'hydraulique agricole de la zone de BHH de 1985 à 2005. Département encouragement à l'agriculture du casier du BHH, Haiduong, 284 p.

Dang, T. P. (2001) Gestion de l'eau du delta du fleuve rouge, Vietnam. Le cas du casier de Bac Hung Hai. Thèse de doctorat, École nationale du génie rural des eaux et des forêts (ENGREF), Paris, 397 p.

Huynh, N.P. and Nguyen, D.A.K. (2003) Flood forecasting for the upper reach of the Red River basin, North Vietnam. Water SA, vol. 29, n° 3, p. 267-272.

Liew, S.C., Kam, S.-P., Tuong, T.-P., Chen, P., Minh, V.Q. and Lim, H. (1998) Application of multitemporal ERS-2 synthetic aperture radar in delineating rice cropping systems in the Mekong River Delta, Vietnam. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, n° 5, p. 1412-1420.

Luong, A. T. (1995) Caractérisation par télédétection de l'évolution des cultures sèches et des problèmes de drainage dans le district de Nam Thanh. Rapport de stage, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 37 p.

Muller, D. and Zeller, M. (2002) Land use dynamics in the central highlands of Vietnam: a spatial model combining village survey data with satellite imagery interpretation. Agricultural Economics, vol. 27, n° 3, p. 333-354.

Nguyen, T.L. and Bui, D.T. (2001) Flood monitoring of Mekong River Delta, Vietnam

using ERS SAR data. P. 115-122, *in* G. Gerard (réd.) Asian Conference on Remote Sensing. Singapour, 5-9 novembre 2001, National University of Singapore, Singapour, 770 p.

Nguyen, X.D., Pham, V.C., Bruneau, M., Le, T.T., Maire, G., Platel, N et Usselmann, P. (1994) La télédétection satellitaire : un outil pour l'aménagement agricole et les études d'impact environnemental dans le DFR (Viêt-nam). P. 433-456, *in* F. Bonn (réd.) Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Presse de l'Université du Québec, Québec, 532 p.

Office général de l'hydro-météorologie (2004) Rapports de recherche. Département de l'hydro-météorologie, Hanoi, 120 p.

Rio, J.N.R. and Lozano, D.F.G (2000) Spatial Filtering of Radar Data (RADARSAT) for Wetlands (Brackish Marshes) Classification. Remote Sensing of Environment, vol. 73, n° 2, p. 143-151.

Sanyal, J. and Lu, X.X. (2003) Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asian: A review. Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, vol. 33, p. 283-301.

Scheuchl, B., Cumming, I. and Irena, H. (2005) Classification of fully polarimetric single- and dual-frequency SAR data of sea ice using the Whishart statistics. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 31, n° 1, p. 61-72.

Thanh, T.D., Saito, Y., Huy, D.V., Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Tateishi, M. (2004) Regimes of human and climate impacts on coastal changes in Vietnam. Regional Environmental Change, vol. 4, p. 49-62.

Treitz, P.M. and Howarth, P.J. (2000) Integrating spectral, spatial, and terrain variables for forest ecosystem classification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n° 3, p. 305-317.

Treitz, P.M., Howarth, P.J., Filho, O.R. and Soulis, E.D (2000) Agricultural crop classification using SAR tone and texture statistics. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 26, n° 1, p. 18–29.

Truong, T.Q.T. (2005) Water resources management in Viet Nam. P. 185-195, *in* P. Peycam (réd.) Workshop report on the Water in Mainland Southeast Asia, 30 novembre-2 décembre 2005, Center for Khmers Studies, Institute for Asian Studies, Siem Reap (Cambodge), 461 p.

Villegas, P. (2004) Flood modelling in Perfume River Basin, Hu Province, Vietnam. Mémoire de maîtrise, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede (Pays-Bas), 86 p.

VTGEO (Centre de télédétection et de géomatique) (1997) L'évaluation des risques d'inondation par la télédétection dans le district de NamThanh-HaiDuong. Rapport technique, Projet coopératif du VTGEO, du Centre national des sciences et technologie du Vietnam (CNST) et du Centre d'application et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 21 p.