

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CÂU (VIETNAM) AU MOYEN D'IMAGES OPTIQUES ET SAR EN SUPPORT À LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Par
Kim Huong HOANG

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

| | |
|---------------------------|---|
| Examineur externe | Thuy Le Toan CESBIO, Toulouse, France |
| Examineur externe | Sylvie Daniel Université Laval, Québec, QC |
| Examineur interne | Karem Chokmani INRS-ETE, Québec, QC |
| Directrice de recherche | Monique Bernier INRS-ETE, Québec, QC |
| Codirectrice de recherche | Sophie Duchesne INRS-ETE, Québec, QC |
| Codirectrice de recherche | Y Minh Tran VAST, Hanoi, Vietnam |

À mes parents

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est déroulée au sein du laboratoire de Télédétection et de géomatique du centre INRS-ETE dans le cadre du projet de coopération entre l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) et l'Académie des Sciences et des Technologies du Viêt-nam (ASTV), financé par l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI), et je voudrais remercier en premier lieu les responsables de ces deux Instituts pour m'avoir permis de réaliser ce travail.

Je souhaite aussi faire preuve de gratitude envers les professeures Monique Bernier, Sophie Duchesne, Minh-Y Tran et toutes les personnes qui ont permis l'aboutissement de cette thèse, à travers les années, les mois de réalisation et de rédaction.

Ma gratitude va également aux membres du jury qui ont accepté de participer à mon jury de thèse et de prendre le temps de lire ces pages malgré un emploi du temps certainement très chargé.

L'Agence Spatiale Canadienne a contribué à l'aboutissement de cette recherche par l'octroi des données RADARSAT-2.

Je tiens à remercier particulièrement ma directrice de thèse, la professeure Monique Bernier qui, en m'accordant sa confiance, m'a permis de me lancer dans cette aventure. Je la remercie pour son soutien financier mais surtout pour ses précieux conseils aussi bien scientifiques que pratiques, ses directions dans l'accomplissement de ce travail. Je la remercie aussi pour ses encouragements et sa patience pendant toute la durée de cette thèse.

Je tiens à remercier sincèrement ma co-directrice de thèse, la professeure Sophie Duchesne, pour son soutien scientifique mais également pour m'avoir fait profiter de ses connaissances des modèles hydrologiques. Ses avis, ses conseils m'ont permis d'avancer efficacement. Je la remercie aussi pour ses encouragements et sa confiance tout au long de mes travaux de thèse.

Je remercie ma deuxième co-directrice de thèse, Dr. Minh-Y Tran pour son support en données et ses encouragements.

Je suis également très reconnaissante envers le professeur Jean-Pierre Fortin de l'INRS-ETE d'avoir suivi mes travaux. Je le remercie pour les nombreuses discussions scientifiques que nous avons eues durant ce travail.

Je remercie Stéphane Mermoz de CESBIO pour l'aide apportée sur le filtre multicanaux.

Mes remerciements s'adressent au professeur Pham Van Cu de l'Université Nationale de Hanoi et à l'équipe de l'Université de l'Agriculture et des Forêts de la province de Thai Nguyen d'avoir accepté de réaliser la campagne de terrain en 2012.

Je tiens également ici à remercier chaleureusement l'ensemble des professeurs, étudiants et professionnels du centre ETE et du laboratoire de Télédétection et de Géomatique pour leur accueil, leur aide et leur sympathie. Je remercie en particulier le professeur Jean-Pierre Villeneuve, le professeur Karem Chokmani, Yves Gauthier, Jimmy Poulin, Suzanne Dussault et Johanne Desrosiers.

Mes remerciements vont également à tous les collègues qui ont contribué à ce travail par les échanges que nous avons eus : Stéphane Mermoz, Yannick Duguay, Anas El Alem, Maria Dissanska, Nomessi Kokutse, Yann Dribault, Charles Gignac, Marion Tanguy et Sébastien Tremblay.

Je n'oublie pas de remercier tous mes amis de Québec et d'ailleurs qui, chacun à leur manière, et à des degrés divers, m'ont apporté du soutien durant ce doctorat. Je pense tout particulièrement à Trang, Dorra, Anas, Fabien, Véronique, Marylou, Hien, Lan Huong, Rimeh, Isabelle, Michel, Parvin, Rebecca, Andres, Maria-Rita, Hoa, Huy, Phuong, ...

J'exprime ici ma gratitude à Jean-Pierre et Marie-Henriette qui, par leur présence charmante et sympathique, m'ont permis de trouver une petite famille à Québec.

Finalement, je veux remercier toute ma famille et plus particulièrement mes parents, ma sœur, mon beau-frère et ma nièce pour leurs encouragements constants tout au long de mes études.

RÉSUMÉ

Le bassin versant de la rivière C au (nord du Vietnam) a connu un développement économique important accompagné d'urbanisation et d'industrialisation après l'adoption d'une politique de réforme économique en 1986. Une étude sur les changements de l'occupation survenus dans la partie aval du bassin versant entre 1993 et 2003 (Hoang, 2007) a fait ressortir une expansion importante du milieu urbain associée   une densification des zones urbaines existantes et   une diminution significative des espaces agricoles. Il en résulte un impact sur l'hydrologie et la qualité de l'eau.

Le besoin d'améliorer la gestion intégrée du bassin versant de la rivière C au demande de développer des méthodes pour surveiller l'occupation du sol. La méthode de télédétection optique pour classifier et cartographier l'occupation du sol (Hoang et al., 2008) est bien établie et peut être considérée comme efficace. Néanmoins, cette méthode affiche certaines lacunes lorsqu'appliquée   l'échelle détaillée des régions où l'occupation du sol est complexe et où la couverture nuageuse est fréquente, comme c'est le cas dans le bassin versant étudié. La détection des rizières, lesquelles occupent une proportion importante de la superficie du bassin versant, est donc limitée en utilisant des données optiques.

Dans la première partie de cette thèse, afin de suivre l'évolution récente de l'occupation du sol, des images HRVIR 2 de SPOT-4 ont été acquises fin novembre 2007 et début janvier 2008. L'approche de classification hiérarchique avec le mode de classification « avec caractéristique liée aux classes » a été développée et appliquée afin d'extraire les classes d'occupation du sol pertinentes   la modélisation hydrologique, sans distinguer les rizières des autres types de culture. Cette approche a montré son efficacité, la précision globale de la classification étant de 91 %. Une diminution significative de la confusion entre les milieux urbain, les terres agricoles et les plantations a été remarqu e par rapport   la classification de l'image LANDSAT-7 de 2003, dont la précision globale était de 78 %.

Par la suite, afin de distinguer les rizières des autres types de culture, deux séries de données RADARSAT-2 en bande-C (double polarisation et polarimétriques) ont été utilisées, ces images ayant été acquises de mai 2009   mai 2010 et couvrant deux périodes de croissance du riz, soit la période de la principale récolte (saison traditionnelle du riz) et celle du printemps.

En se basant sur l'analyse de la rétrodiffusion temporelle des rizières, une méthode de seuillage adaptée a été appliquée sur les images du rapport de données double polarisation en mode

Standard (S5) acquises en début de saison et à la mi-saison. Cette méthode a permis de détecter 74 % des rizières de la saison traditionnelle du riz et 63 % des rizières de la saison de riz du printemps, en comparant avec des données statistiques de la province de Thai Nguyen. La précision globale de la classification obtenue est de 71 % pour la saison traditionnelle de riz et de 67 % pour la saison de riz du printemps.

Afin d'estimer le potentiel des données polarimétriques RADARSAT-2 en mode fin (FQ21) pour cartographier les rizières d'une zone hétérogène, la matrice de cohérence a été choisie, parmi d'autres matrices et paramètres polarimétriques, pour identifier les rizières. La classification a été réalisée à l'aide de l'algorithme *Support Vector Machine* (SVM). Cet algorithme a été également appliqué sur la seule polarisation HH en vue de comparer l'efficacité d'identification des rizières entre la matrice de cohérence et une seule polarisation. Les résultats ont montré le potentiel des données polarimétriques ainsi que celui de la méthode de la classification par le SVM pour détecter et distinguer les rizières dans les milieux d'utilisation du sol morcelée. La classification dérivée de la polarisation HH obtient une précision globale moindre que celle dérivée des données polarimétriques, soit 72 % contre 82 % (pour la saison traditionnelle du riz 2009) et 71 % contre 74 % (pour la saison de riz du printemps).

Malgré certaines limites observées (le manque de données de référence ainsi que de données sur le terrain, le retard par rapport aux usages des pratiques agricoles dû aux conditions climatiques ou économiques et la mauvaise qualité de la croissance des plantes), la méthode par seuillage a permis d'identifier les rizières du bassin versant. Ces dernières informations ont ensuite été intégrées à la carte thématique dérivée d'images SPOT-4 pour obtenir la carte finale. Cette carte sert directement à la modélisation hydrologique.

Enfin, les calculs des besoins en eau pour la culture du riz ont montré que les rizières prennent une grande proportion du débit total dans les deux sous-bassins versants utilisés en exemple. Ces calculs montrent l'importance de détecter les rizières si l'on souhaite réaliser des simulations hydrologiques réalistes sur le bassin versant de la rivière Càu et tendent à confirmer une des hypothèses de la thèse, qui est que l'identification des rizières sur la carte d'occupation du sol améliore les évaluations et prédictions liées au cycle hydrologique.

Les résultats obtenus offrent l'avantage d'ouvrir des pistes d'application des images SAR et de la classification SVM pour classifier les types d'occupation du sol, en général, et plus particulièrement pour détecter les rizières au nord du Vietnam. Ils contribuent également à supporter les décideurs du bassin versant pour établir des actions concrètes en matière de

gestion durable, de protection et de conservation de l'environnement, en général, et de celle de l'eau, en particulier.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-------------|
| REMERCIEMENTS | iii |
| RÉSUMÉ | v |
| TABLE DES MATIÈRES | ix |
| LISTE DES TABLEAUX | xiii |
| LISTE DES FIGURES | xv |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS | xix |
| CHAPITRE 1 : INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Contexte général | 1 |
| 1.2 Problématiques..... | 3 |
| 1.3 Objectifs et hypothèses de recherche | 8 |
| 1.4 Plan de la thèse | 9 |
| CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE | 11 |
| 2.1 La culture du riz au Nord Vietnam..... | 11 |
| 2.1.1 Cycle de croissance du riz..... | 11 |
| 2.1.2 Aperçu des types de riziculture..... | 15 |
| 2.1.3 Calendrier agricole et variétés de riz dans le bassin de la rivière C au | 17 |
| 2.2 Cartographie des rizières et de l'occupation du sol par télédétection | 20 |
| 2.2.1 Interaction du signal optique et microonde avec la végétation | 20 |
| 2.2.2 Concept d'images polarimétriques et potentiel de la polarimétrie pour la cartographie de la végétation..... | 25 |
| 2.2.3 Télédétection optique et radar des rizières :  tat de l'art..... | 28 |
| 2.2.4 Méthodes et techniques de traitement des images SAR en vue de la cartographie des champs de riz..... | 34 |
| 2.2.5 Orientée-objets : une approche efficace pour la classification des zones complexes | 41 |
| 2.3 Sommaire | 45 |
| CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE | 47 |
| 3.1 Le bassin versant de la rivière C au | 47 |
| 3.1.1 Localisation géographique et caractéristiques naturelles | 47 |
| 3.1.2 Régime hydrologique..... | 50 |
| 3.1.3 Ressources naturelles et caractéristiques environnementales..... | 51 |
| 3.1.4 Zones d'étude..... | 51 |

| | |
|--|------------|
| 3.2 Données utilisées | 55 |
| 3.2.1 Données SPOT4 du capteur HRVIR..... | 55 |
| 3.2.2 Données SAR de RADARSAT-2 | 56 |
| 3.2.3 Données auxiliaires | 59 |
| 3.3 Traitement et analyse des images SPOT-4..... | 67 |
| 3.3.1 Prétraitement des images | 67 |
| 3.3.2 Classification orientée-objets de l'occupation du sol..... | 70 |
| 3.3.3 Validation de la classification | 81 |
| 3.4 Traitement et analyse des images RADARSAT-2, double polarisation | 84 |
| 3.4.1 Prétraitement des images SGF..... | 84 |
| 3.4.2 Cartographie des rizières par le mode double polarisation | 89 |
| 3.4.3 Validation de la classification par seuillage | 91 |
| 3.5 Traitement des images RADARSAT-2 polarimétriques | 92 |
| 3.5.1 Filtrage du chatoiement | 94 |
| 3.5.2 Classification des rizières à partir de données polarimétriques..... | 97 |
| 3.5.3 Comparaison des classifications polarimétriques et double polarisation | 100 |
| 3.5.4 Correction géométrique des images polarimétriques classifiées..... | 101 |
| 3.6 Intégration des rizières dans la classification de l'occupation du sol (SPOT-4)..... | 101 |
| 3.7 Estimation de l'impact des rizières sur le régime hydrologique | 102 |
| CHAPITRE 4 : RÉSULTATS..... | 107 |
| 4.1 Classification orientée-objets des images SPOT-4 | 107 |
| 4.1.1 Classification de l'occupation du sol | 107 |
| 4.1.2 Validation des classifications de l'occupation du sol | 109 |
| 4.2 Identification et cartographie des rizières par le mode double polarisation..... | 112 |
| 4.2.1 Analyse de la variation temporelle de la rétrodiffusion (σ^0) des rizières et d'autres types de végétation..... | 112 |
| 4.2.3. Identification des rizières par seuillage d'images du rapport | 125 |
| 4.2.4 Validation de la classification des rizières par seuillage | 129 |
| 4.3 Classification des rizières par données polarimétriques..... | 132 |
| 4.3.1 Résultats de la classification par le SVM | 132 |
| 4.3.2 Validation de la classification | 135 |
| 4.4 Cartographie de l'occupation du sol et de la croissance du riz du bassin versant | 138 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.1 Carte de l'occupation du sol servant à la simulation hydrologique | 138 |
| 4.4.2 État de croissance des rizières | 139 |
| 4.5 Impact des rizières sur le régime hydrologique | 142 |
| 4.6 Sommaire | 143 |
| CHAPITRE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 147 |
| 5.1 Résumé des travaux..... | 147 |
| 5.2 Conclusion et perspectives | 150 |
| RÉFÉRENCES..... | 155 |
| ANNEXE I FICHES DE TERRAIN..... | 171 |
| ANNEXE II DESCRIPTION DES CLASSES DE L'OCCUPATION DU SOL | 205 |
| ANNEXE III COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION | 213 |
| ANNEXE IV CARTES DE L'OCCUPATION DU SOL ET DES RIZIÈRES | 215 |



LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|----------------|---|-----|
| Tableau 2.1 : | Calendriers agricoles du bassin versant de la rivière C au | 17 |
| Tableau 2.2 : |  tat des 10 champs expérimentaux dans la province de Thai Nguyen (bassin de la rivière C au) au début et   la fin de la saison de culture du riz, au printemps 2012 | 18 |
| Tableau 3.1 : | Caractéristiques des images SPOT-4, capteur HRVIR..... | 55 |
| Tableau 3.2 : | Principaux paramètres d'acquisition des images RADARSAT-2 utilisées | 58 |
| Tableau 3.3 : | Liste des cartes de référence | 60 |
| Tableau 3.4 : | Exemple d'une fiche résumant les informations recueillies pour un champ expérimental | 65 |
| Tableau 3.5 : | Précision de la correction géométrique des images SPOT-4..... | 68 |
| Tableau 3.6 : | Les six classes thématiques de la carte de l'occupation du sol | 69 |
| Tableau 3.7 : | Paramètres de segmentation | 75 |
| Tableau 3.8 : | Classes thématiques de chaque niveau de la classification et la relation super-objets des sous-classes | 80 |
| Tableau 3.9 : | Précision de la correction géométrique des images S5 de RADARSAT-2..... | 86 |
| Tableau 4.1 : | Comparaison de la superficie totale (statistique et classification) du milieu agricole en 2007 | 109 |
| Tableau 4.2 : | Matrice d'erreur de la classification du Niveau P, dérivée des images SPOT-4..... | 110 |
| Tableau 4.3 : | Précision de la classification des niveaux G et P, dérivée des images SPOT-4..... | 111 |
| Tableau 4.4 : | Rapport des intensités de rétrodiffusion (σ^0) en polarisation HH de deux saisons de riz | 126 |
| Tableau 4.5 : | Précision de la classification des rizières par rapport aux échantillons de la carte de référence pour la province de Thai Nguyen. | 129 |
| Tableau 4.6 : | Comparaison de la superficie totale (hectares) du riz (classification, carte de référence et statistiques) pour la province de Thai Nguyen. | 131 |
| Tableau 4.7 : | Matrice de confusion de la classification SVM..... | 136 |
| Tableau 4.8 : | Précision de la classification SVM calculée   partir de la matrice de confusion..... | 136 |
| Tableau 4.9 : | Précision de la classification des rizières dérivée des données polarimétriques FQ21 et en polarisation HH de RADARSAT-2..... | 138 |
| Tableau 4.10 : | Importance des besoins en eau pour la culture du riz sur le bassin versant de la rivière C au | 143 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure 2.1 : | Diagramme illustrant les stades de croissance du riz..... | 12 |
| Figure 2.2 : | Les stades de la phase végétative..... | 13 |
| Figure 2.3 : | Les stades de la phase de reproduction | 14 |
| Figure 2.4 : | Les stades de la phase de maturation | 15 |
| Figure 2.5 : | Les bandes principales de longueur d'onde utilisées par les RSO..... | 23 |
| Figure 2.6 : | Les principaux types de diffusion sur un couvert de végétation | 24 |
| Figure 2.7 : | Production et consommation mondiale de riz | 29 |
| Figure 2.8 : | Plan H/ α | 39 |
| Figure 2.9 : | Confusion des signatures spectrales dans quatre bandes optiques pour des objets différents | 42 |
| | | |
| Figure 3.1 : | Représentation physiographique du bassin versant de la rivière C u illustrant ses cinq affluents et les zones montagneuses. L'encadrée montre sa localisation au nord du Vietnam | 49 |
| Figure 3.2 : | Moyennes annuelles des caract eristiques climatiques des provinces du bassin versant | 50 |
| Figure 3.3 : | Pr ecipitations moyennes mensuelles de six provinces du bassin versant..... | 50 |
| Figure 3.4 : | Localisation des sous-bassins retenus pour la classification de l'occupation du sol et la mod elisation hydrologique | 53 |
| Figure 3.5 : | Illustration des deux sites de test..... | 54 |
| Figure 3.6 : | Localisation (encadrées orange) et dates des sc enes acquises | 56 |
| Figure 3.7 : | Localisation des images acquises (encadrées rouges), modes S5 et FQ21 | 57 |
| Figure 3.8 : | Localisation des 25 points observées sur le terrain en 2007, 2009 et 2010 | 62 |
| Figure 3.9 : | Exemple d'une fiche r esumant les informations recueillies au point d'observation No 5..... | 63 |
| Figure 3.10 : | Localisation de dix champs exp erimentaux pour la mission de 2012 | 64 |
| Figure 3.11 : | Photos illustrant certaines des informations repr esent ees au tableau 3-4 pour le site 1..... | 66 |
| Figure 3.12 : | Organigramme de la classification orient ee-objets..... | 71 |
| Figure 3.13 : | Param etres du niveau 2 (P) de la segmentation de l'image SPOT..... | 73 |
| Figure 3.14 : | Segmentation des images SPOT-4 selon deux niveaux : a) Niveau 1, b) Niveau 2 | 75 |
| Figure 3.15 : | Exemple d'h ierarchie des classes th ematiques de niveau G et P (a) et description d'une classe (b) | 77 |
| Figure 3.16 : | Sch ema de la classification hi erarchique | 78 |
| Figure 3.17 : | D emarche de d etection des rizi eres en utilisant des images RADARSAT-2 en double polarisation (HH et HV) | 90 |
| Figure 3.18 : | Exemples de sites d' echantillons de riz et d'autres types d'occupation du sol affichées sur l'image en composition de couleur RVB de trois dates | 91 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Figure 3.19 : | Processus de la classification des rizières au moyen d'images polarimétriques et de l'algorithme SVM..... | 93 |
| Figure 3.20 : | Exemple de l'image T_{11} , acquise le 21 août 2009, avant (a) et après (b) le filtrage IDAN avec $N_{\max} = 50$ | 96 |
| Figure 3.21 : | Les vecteurs supports et l'hyperplan séparateur optimal | 98 |
| Figure 3.22 : | Transformation non linéaire (Φ) des données pour permettre une séparation linéaire des échantillons dans un nouvel espace. | 99 |
| Figure 3.23 : | Localisation des deux bassins versants étudiés : a) celui de l'amont du bassin versant de la rivière Càu, b) celui de la rivière Cồng..... | 105 |
| Figure 3.24 : | Enchaînement des différents traitements de données | 106 |
| Figure 4.1 : | Carte de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Càu (sans rizières), dérivée des images SPOT-4..... | 108 |
| Figure 4.2 : | Illustration de l'occupation du sol: a) dérivée d'une image LANDSAT-7 ETM+, 2003, b) dérivée d'une image SPOT-4, 2007et 2008. | 112 |
| Figure 4.3 : | Exemple des échantillons de riz sur une image composite RVB de trois dates différentes. Les rizières s'affichent sur l'image en vert et en jaune-vert foncé. | 113 |
| Figure 4.4 : | Rétrodiffusion moyenne du riz (saison traditionnelle) et d'autres types de végétation en polarisation: a) HH; b) HV..... | 114 |
| Figure 4.5 : | Moyenne et écart-type de la rétrodiffusion du riz (saison traditionnelle 2009) et d'autres types de végétation en polarisation : a) HH; b) HV..... | 116 |
| Figure 4.6 : | Variation temporelle de σ^0 moyenne du riz en HH et HV, de mai 2009 à mai 2010..... | 117 |
| Figure 4.7 : | Dispersion de σ^0 (HH vs HV) du riz, durant la saison de riz traditionnelle de l'année 2009..... | 118 |
| Figure 4.8 : | Variation temporelle de σ^0 (HH vs HV) du riz, durant la saison de riz du printemps de l'année 2010..... | 118 |
| Figure 4.9 : | États d'un champ de riz à la phase végétative | 119 |
| Figure 4.10 : | Les panicules de riz, mai 2012 | 120 |
| Figure 4.11 : | Le riz à la phase de maturation, saison de riz de printemps, juin 2012. | 121 |
| Figure 4.12 : | Rétrodiffusion σ^0 moyenne du riz de dix champs expérimentaux, saison de riz traditionnelle en polarisation HH (de juillet à octobre 2009)..... | 122 |
| Figure 4.13 : | Moyenne et écart-type de σ^0 du riz de dix champs expérimentaux, saison traditionnelle de riz 2009 en polarisation HH..... | 123 |
| Figure 4.14 : | Les agents pathogènes pour le riz..... | 124 |
| Figure 4.15 : | Image de rapport de rétrodiffusion R2 entre les images acquises le 02 juillet et 19 août 2009..... | 127 |
| Figure 4.16 : | Distribution du riz (en vert) de la récolte de printemps de 2010, dérivée du rapport de trois images RADARSAT-2 en polarisation HH, acquises le 10 janvier, le 16 avril et le 10 mai..... | 128 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figure 4.17 : | Carte de la distribution du riz (en vert) de la récolte traditionnelle de 2009, dérivée du rapport de trois images RADARSAT-2 en polarisation HH, acquises le 02 juillet, le 26 juillet et le 19 août..... | 129 |
| Figure 4.18 : | Illustration de la qualité de la carte de référence (ligne jaune), affichée sur l'image de haute résolution téléchargée de Google Earth..... | 131 |
| Figure 4.19 : | Distribution du riz (en vert) de la récolte traditionnelle de 2009 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 polarimétrique, acquise le 21 août, par la classification SVM. | 133 |
| Figure 4.20 : | Distribution du riz (en vert) de la récolte de printemps de 2010 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 polarimétrique, acquise le 18 avril, par la classification SVM. | 133 |
| Figure 4.21 : | Distribution du riz (en vert foncé) de la récolte traditionnelle de 2009 (carré noir) dérivée de l'image RADARSAT-2 en polarisation HH, par la classification SVM. | 134 |
| Figure 4.22 : | Distribution du riz (en vert foncé) de la récolte de printemps de 2010 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 en polarisation HH, par la classification SVM. | 134 |
| Figure 4.23 : | Carte de l'occupation du sol en aval du sous-bassin versant de Thai Nguyen extraite des images SPOT de 2007. Les rizières (en jaune) de l'année 2009 y sont intégrées. | 139 |
| Figure 4.24 : | État des rizières de la saison traditionnelle du riz, dérivée de l'image en polarisation HH, acquise le 26 juillet 2009..... | 140 |
| Figure 4.25 : | État des rizières de la saison traditionnelle du riz, dérivée de l'image en polarisation HH acquise le 19 août 2009..... | 141 |



LISTE DES ABRÉVIATIONS

Organisations

| | |
|---------|---|
| ACDI | Agence Canadienne de Développement International |
| APEV | Agence de Protection de l'Environnement du Viêt-nam |
| ASC | Agence Spatiale Canadienne |
| ASTV | Académie des Sciences et des Technologies du Viêt-nam |
| CCT | Centre Canadien de Télédétection |
| CIRAD | Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement |
| CNES | Centre national d'études spatiales |
| CRDI | Centre de recherches pour le développement international |
| ETE | Centre Eau, Terre et Environnement |
| FAO | <i>Food and Agriculture Organization</i> |
| FAOSTAT | <i>Food and Agriculture Organization Statistics</i> |
| INRS | Institut National de la Recherche Scientifique |
| IRD | Institut de Recherche pour le Développement |
| IRRI | <i>International Rice Research Institute</i> |
| ISG | <i>International Support Group</i> |
| IWARP | Institut de la planification de ressources en eau (Viêt-nam) |
| MOSTE | <i>Ministry of Science, Technology and Environment (Viêt-nam)</i> |
| MRE | Ministère de Ressources et Environnement du Viêt-nam |
| MST | Ministère des Sciences et Technologies du Viêt-nam |
| OADR | Office de l'Agriculture et du Développement Rural |
| OSB | Office de Statistique de la province de Bac Kan |
| OGS | Office Général de la Statistique |
| SOAR-E | Science and Operational Applications Research - Education |
| USGS | <i>U.S Geological Survey</i> |
| VASI | <i>Vietnam Agricultural Science Institute</i> |
| VTGEO | Centre de Télédétection et Géomatique |

Spécialité

| | |
|----------|---|
| 2RRBS | <i>Second Red River Basin Sector Project</i> |
| APS | <i>Alternating Polarisation Single-look</i> |
| CI | Indice de changement |
| DN | <i>Digital Number</i> |
| ETM | <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> |
| EVI | <i>Enhanced Vegetation Index</i> |
| FBS/D | <i>Fine-beam single/dual</i> |
| FQ | <i>Fine Quad-pol</i> |
| GIBSI | Gestion Intégrée des Bassin versants à l'aide d'un Système Informatisé |
| GIBVC | Gestion intégrée du bassin versant de la rivière Càu |
| HRVIR | Haute Résolution Visible et InfraRouge |
| HYDROTEL | Hydrologie-Télédétection |
| IDAN | <i>Intensity Driven Adaptive Neighborhood</i> |
| LAI | <i>Leaf Area Index</i> |
| LSWI | <i>Land Surface Water Index</i> |
| MNA | Modèle Numérique d'Altitude |

| | |
|---------|---|
| NDVI | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> |
| PIR | Proche-infrarouge |
| RSO/SAR | Radar à Synthèse d'Ouverture / <i>Sythetic Aperture Radar</i> |
| S | Standard |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SVM | <i>Support Vector Machine</i> |
| TM | <i>Thematic Mapper</i> |
| UHRH | Unités Hydrologiques Relativement Homogènes |
| VGT | Végétation |
| VIR | <i>Visible and Infrared</i> |

CHAPITRE1 : INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Durant les deux dernières décennies, le Vietnam a connu de grandes évolutions sur le plan économique. Cette période a été marquée par l'adoption d'une politique de renouveau de l'économie, « la politique de réforme »; tant le système d'agriculture que les autres composantes économiques ont connu de nombreuses transitions, et deviennent de plus en plus multiformes et complexes. Le pays est en pleine phase d'industrialisation et d'urbanisation, incluant les provinces du bassin de la rivière Càu. Effectivement, ces provinces voient la structure de leur économie se transformer d'un type « Agriculture - Industrie - Service » à celui de « Industrie - Service - Agriculture ». Cette transition a apporté plusieurs avantages pour le développement économique du pays et a permis d'améliorer le niveau de revenu de la population locale. Cependant, les effets secondaires de ce développement économique sont plus que jamais des problèmes environnementaux. Les questions de la dégradation de l'environnement et de la qualité de l'eau dans la région deviennent un défi pour les gestionnaires locaux. Les dirigeants du Comité de bassin de la rivière Càu ont mis l'accent sur ces défis dans le cadre de la conférence du projet en 2009 à Hanoi. Le développement d'outils qui permettront d'aider les bureaux de planification et d'administration est donc nécessaire.

Au cours des années 2000, plusieurs documents (Ministère des Ressources et de l'Environnement du Vietnam (MRE), Banque Mondiale (BM) et *Danish International Development Assistance* (DANIDA), 2003; MRE, 2005) montrent l'accroissement de la contamination de l'eau de surface, de l'eau souterraine et de l'eau côtière sur ce bassin versant. La contamination de l'eau de surface et de l'eau souterraine devient de plus en plus sérieuse. L'eau est de faible qualité du centre vers l'aval du bassin. Tandis qu'en amont, la quantité d'eau, notamment dans les petits cours d'eau, s'épuise peu à peu (Hoang, 2007). En 2001, dans le cadre du projet 2RRBS (*Second Red River Basin Sector Project*), le bassin versant de la rivière Càu était choisi comme un pilote qui présentait « un vrai défi de gestion intégrée des ressources » (Molle et Chu, 2009). Selon le rapport le plus récent du Ministère des Ressources et de l'Environnement du Vietnam (MRE, 2006), la qualité de l'eau du bassin versant est à surveiller.

Face à la dégradation de la qualité de l'environnement du bassin versant, le projet global de la rivière Càu a été approuvé en 2006 par la Décision No.174/2006/QD-TTg du Premier Ministre. L'objectif global de ce projet était de protéger par un développement durable l'environnement écologique et le paysage du bassin versant de la rivière Càu (Décision No.174/2006/QD-TTg, 2006). Par la suite, en 2007, le Comité du bassin versant de la rivière Càu a été constitué, selon la Décision No.171/2007/QD-TTg du Premier Ministre. Le rôle du Comité est de diriger la réalisation du projet global, de coordonner les divers objectifs à atteindre en matière d'amélioration de la qualité de l'environnement du bassin versant, de sorte que la rivière Càu serait de nouveau propre en 2020 (Décision No.174/2006/QD-TTg, 2006). Dans le cadre de sa stratégie nationale de protection de l'environnement, le Vietnam considère la protection du bassin versant de la rivière Càu comme l'une de ses trois plus grandes priorités (MOSTE, 2000).

Dans ce contexte, le bassin versant de la rivière Càu a été choisi comme bassin d'étude dans le cadre du projet « Gestion intégrée du bassin versant de la rivière Càu (GIBVC) » une coopération scientifique entre l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) et l'Académie des Sciences et des Technologies du Vietnam (ASTV) (entente de collaboration signée en 1998 et renouvelée en 2006). Le projet, financé par l'ACDI, s'inscrit dans un programme de recherche qui vise à implanter au Vietnam une approche de gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin versant en adaptant l'outil informatique GIBSI (Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé), développé par une équipe de recherche du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS (INRS-ETE) (Rousseau et al., 2000). Ce projet comprend deux objectifs principaux. Le premier est l'implantation d'une approche de gestion intégrée de l'eau en vue d'élaborer divers scénarios d'aménagement ou d'intervention et d'être en mesure de définir les priorités d'action pour l'amélioration de la qualité de l'eau des rivières vietnamiennes. Le second consiste à la formation des professionnels de l'ASTV et des étudiants vietnamiens (INRS, 2010). Les travaux de recherche ont été réalisés par des étudiants et ils portaient sur des problématiques particulières du Vietnam, en général, et du bassin versant de la rivière Càu, en particulier. Il y a eu six thèses de doctorat et un mémoire de maîtrise réalisés dans le cadre de ce projet. La maîtrise avait pour objectif de compléter les données existantes concernant l'occupation du sol du bassin versant par le recours à l'analyse d'images satellites optique (Hoang, 2007; Hoang et al., 2008). La première thèse portait sur la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Càu (Nguyen, 2012). Le deuxième thèse visait à adapter les modèles de qualité de l'eau et les modèles de production d'azote et de phosphore au bassin versant de la rivière Càu, puis ensuite d'évaluer l'apport de la pollution diffuse (par rapport à la pollution ponctuelle). La troisième porte sur la modélisation et l'analyse de l'impact

des rizières et de l'irrigation sur l'hydrologie du bassin versant de la rivière Còng, un sous-bassin du bassin versant de la rivière Càu. Le quatrième aborde la modélisation de l'érosion et du transport sédimentaire (Pham, 2013a). La cinquième thèse contribue à l'évaluation systématique des impacts du développement socio-économique futur sur la qualité des eaux de surface (Pham, 2013b). Elle permet ainsi aux décideurs de choisir les meilleures interventions pour la gestion du bassin versant (INRS, 2010).

Cette thèse, qui est la sixième du projet, fait partie du volet portant sur la cartographie de l'occupation du sol et des rizières du bassin versant de la rivière Càu, en utilisant des images optiques et des images radar (Hoang et al., 2011).

1.2 Problématiques

Tel que mentionné, le projet GIBVC a pour objectif d'adapter l'outil informatique GIBSI au bassin versant de la rivière Càu, en vue d'évaluer l'impact des usages à l'échelle du bassin versant afin de planifier, d'une manière optimale, les décisions d'aménagement pour protéger les ressources du bassin versant.

GIBSI permet d'estimer les impacts de l'industrialisation, de la déforestation, de la densification du milieu urbain ou bien des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau (Rousseau et al., 2000). L'idée de cet outil est de supporter les décideurs par la modélisation mathématique des divers processus influençant la qualité de l'eau sur le bassin (pluviométrie, ruissellement, érosion des sols, transport des contaminants, écoulements en rivière et écoulements souterrains, etc.). Il est donc un assemblage de sous-modèles différents (hydrologie, qualité de l'eau, érosion des sols, production et transport des sédiments, etc.). En vue de construire un scénario et de réaliser une simulation avec un modèle comme ceux de GIBSI, il est nécessaire de rassembler plusieurs types de données concernant les informations requises pour chaque sous-modèle. Par exemple, pour utiliser le modèle hydrologique, il est nécessaire de disposer d'historiques de mesures du débit en rivière en différents moments et en différents endroits du bassin versant et d'un historique concomitant de mesures des précipitations. Afin de quantifier l'impact de pratiques de gestion sur la qualité de l'eau en rivière, le bassin versant est d'abord divisé en un certain nombre d'unités spatiales, appelées unités spatiales de modélisation. Le modèle numérique d'altitude (MNA) est nécessaire pour réaliser cette opération. Pour chaque unité spatiale de modélisation, les données sur la topographie du terrain (élévation) et des informations sur les pratiques agricoles (type de culture, cheptel, etc.) et sur le sol (type de sol,

occupation du sol, etc.) doivent être rassemblées. Dans le cas des scénarios de développement, les données socio-économiques comme celles de la densité et des habitudes de vie de la population, les activités industrielles, les pratiques agricoles, etc., sont aussi importantes (INRS, 2010).

De cette manière, la base de données pour GIBSI comprend donc des données spatiales et attributs, concernant les informations des usages de l'eau, de l'hydrologie, de l'utilisation du territoire, de la qualité de l'eau et des données socio-économiques (Rousseau et al., 2000). Parmi ces informations, celles de l'utilisation du territoire jouent un rôle important et sont normalement obtenues à partir des données de télédétection pour servir à la simulation hydrologique ou à la simulation spatiale du modèle de l'érosion des sols et du transport des contaminants (Fortin et al., 2001a, b).

Dans le cas concret du bassin versant de la rivière Cáu, afin de faire fonctionner le modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin et al., 1995) sur le bassin versant, au cours de la première phase du projet GIBVC, la carte de l'occupation du sol de l'ensemble du bassin versant a été élaborée en utilisant une image LANDSAT 7 ETM+ acquise le 13 janvier 2003. Cette carte a été réalisée par Hoang (2007) dans le cadre de l'évaluation des changements de l'occupation du sol entre 1993 et 2003, et de leurs impacts sur les eaux de surface de trois sous-bassins en aval du bassin versant de la rivière Cáu. La précision globale obtenue de la classification de l'image de 2003 était de 78 %. L'approche orientée-objets utilisée s'est montrée efficace, mais les limites et les lacunes de la méthode ont aussi été relevées.

Tout d'abord, la classification orientée-objets s'est montré un choix convenable pour extraire les informations de l'occupation du sol de l'ensemble du bassin versant de la rivière Cáu. Compte tenu de l'hétérogénéité des objets, une segmentation en trois niveaux (trois échelles) a été appliquée afin d'être capable de distinguer les petits objets. Toutefois, le morcellement de l'utilisation du sol du bassin versant ne permet pas de bien distinguer les terres agricoles des milieux urbains, à cause notamment de la ressemblance spectrale entre ces types d'objets. Pour cette raison, une classe « mixte », dans laquelle on retrouve des parcelles agricoles, des habitations et des plantations, a été définie lors de la classification de l'occupation du sol au moyen de l'image ETM+ de 2003. Cette classe « mixte » représente l'utilisation du sol typique dans la plupart des plaines du Vietnam, particulièrement au Nord. Elle illustre bien la difficulté de l'application des données de télédétection optique à résolution spatiale moyenne (30 m) sur le bassin versant (VTGEO, 2000; Hoang et al. 2008).

La difficulté de classer les zones agricoles a été aussi mentionnée par McNairn et Brisco (2004). Dans ces zones, les conditions du sol et des cultures changent spatialement selon la saison. La superficie des cultures agricoles varie aussi, d'un champ à l'autre. Par conséquent, la cartographie et la surveillance des sols et des cultures caractéristiques présentent un défi. Donc, l'existence de la classe « mixte » dans la classification ETM+ est une des lacunes de la carte créée en 2007 à partir de l'image LANDSAT.

Ensuite, on remarque qu'il y a beaucoup de rizières dans ce bassin versant, mais plusieurs d'entre elles n'ont pas pu être extraites par la méthode appliquée en 2007. En réalité, des études antérieures (McCloy et al., 1987; Okamoto et Fukuhara., 1996; Shao et al., 2001; Xiao et al., 2005; Motohka et al., 2009; Shiu et al., 2010, 2012) ont montré l'efficacité de la télédétection optique (LANDSAT-MSS, LANDSAT-TM, LANDSAT ETM+, SPOT-4, MODIS, NOAA AVHRR, FORMOSAT-2) pour détecter les rizières, mais elles ont aussi mentionné la difficulté de l'application de ce type de données, particulièrement sur les régions tropicales où la couverture nuageuse est fréquente et les zones agricoles, hétérogènes (Shao et al., 2001; Shiu et al., 2010). Cela s'applique bien à la situation du bassin versant étudié. La plupart des zones agricoles du bassin versant sont occupées par des cultures vivrières avec prédominance de la riziculture. Selon le Bureau des statistiques générales du Vietnam (2009), pour deux provinces (Thai Nguyen et Bac Kan, les plus grandes de ce bassin versant, occupant 75,5 % de la superficie totale), plus de 66 % des terres agricoles sont occupées par des champs de riz. Les parcelles des rizières du delta du fleuve Rouge, en général, et du bassin versant de la rivière Càu, en particulier, sont morcelées et dispersées. Les cultures de légumes alternent avec des cultures vivrières diversifiées (maïs, manioc, patate, bananiers, canne à sucre, etc.), près des rizières. De plus, la distinction des rizières des autres types de végétation par des données optiques représente un défi étant donné la confusion des signatures spectrales des cultures dans l'optique, durant la saison sèche (sans nuage) en particulier (McCloy et al., 1987; Okamoto et Fukuhara., 1996; Shiu et al., 2010). Pourtant, l'information sur les superficies cultivées en riz et leur localisation est importante lors de la modélisation hydrologique. En effet, les rizières ont un impact significatif sur le bilan hydrologique du bassin versant (Bouman et al., 2007, Wu et al., 1997). Elles agissent comme des milliers de petits réservoirs, qui sont alternativement mis en eau et asséchés en fonction du cycle des cultures. Il est donc important de savoir où sont situées les rizières pour assurer la qualité des simulations hydrologiques. Dans ce cas, l'utilisation des données radar, un capteur haute résolution opérant dans les microondes, indépendant de l'ensoleillement (jour et nuit) et de la couverture nuageuse (fenêtre atmosphérique des hyperfréquences), est mieux adaptée pour détecter les rizières que les

données optiques. En effet, les capteurs radar (Synthetic Aperture Radar-SAR / Radar à Synthèse d'Ouverture - RSO) sont des capteurs dits actifs, générant l'énergie à des longueurs d'ondes (micro-ondes) traversant la couverture nuageuse. Cette capacité de recueillir des images sous n'importe quelle condition climatique est importante pour la cartographie des rizières, lesquelles sont souvent plantées dans des régions tropicales nuageuses. De plus, par rapport à d'autres types de végétation, les rizières ont une forte rétrodiffusion (quantité d'énergie retournée vers l'antenne du radar) lorsqu'elles sont inondées.

Dès le début des années 1990, plusieurs recherches (Staples et al., 1994; Staples et Hurley, 1996; LeToan et al., 1997; Rabaute et al., 1998; Ross et al., 1998; Ribbes et LeToan, 1999; Shao et al., 2001, Li et al., 2003; Bouvet et al., 2009; Oh et al., 2009; Lopez-Sanchez et al., 2011) ont montré l'efficacité des données radar en double-polarisation et polarimétriques pour l'identification et la surveillance des rizières. Les données utilisées dans ces travaux proviennent des satellites ERS-1,2, RADARSAT-1, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, TerraSAR-X et RADARSAT-2. Il y a aussi des applications des données radar pour le suivi des rizières dans le delta du fleuve Mékong au Sud du Vietnam (Lam Dao, 2005, 2007; Bouvet et al., 2009), où les rizières sont homogènes et couvrent de grandes superficies. Toutefois, l'utilisation de RADARSAT-2 pour détecter les parcelles de riz relativement petites au Nord du Vietnam n'a pas été relevée dans la littérature bien que la répétitivité de 24 jours du cycle orbital de RADARSAT-2 est adéquate pour suivre chaque stade de croissance du riz qui dure 30 jours en moyenne. L'imagerie RADARSAT-2 en modes standard (10 000 km²) et double polarisation a donc été retenue dans cette thèse pour la cartographie des rizières de l'ensemble du bassin versant. Quatorze images couvrent l'ensemble du bassin. La polarimétrie radar sera aussi exploitée, mais à l'échelle d'un sous-bassin étant donnée la couverture limitée des images polarimétriques en mode fin (650 km²).

Afin de surmonter les limites mentionnées ci-dessus et d'obtenir une carte de l'ensemble des occupations du sol de bonne qualité (plus précise et plus détaillée) du bassin versant, l'utilisation d'images optiques de très haute résolution spatiale a aussi été envisagée. Le bassin est trop grand (6 030 km²) pour une couverture inférieure à 3 m de résolution à un coût raisonnable avec GeoEye-1 (lancé le 6 septembre 2008) ou Quickbird (lancé le 10 octobre 2001), puisque plus d'une vingtaine d'images seraient nécessaires. De plus, l'acquisition d'une seule couverture nécessiterait plusieurs jours (orbites différentes) sans avoir la garantie d'une couverture sans trop de nuages. L'utilisation d'une couverture SPOT-4 (20 m de résolution

spatiale) a alors été retenue. Cinq images SPOT-4 (deux orbites voisines) sont nécessaires pour couvrir le bassin versant.

Afin de bien produire la carte finale de l'occupation du sol, les classifications séparées des données radar (carte des rizières) et optiques (carte d'occupation du sol dérivée de données SPOT-4) ont été intégrées. Cette approche a été préférée à la fusion des données multi-sources. En effet, en vue d'améliorer la performance d'interprétation, la fusion des données multi-sources, c'est-à-dire la combinaison de deux ou de plusieurs images de capteurs différents pour former une nouvelle image en utilisant un algorithme de fusion (Pohl et Van Genderen, 1997), a été envisagée. Toutefois, la fusion d'images ne donne pas toujours une classification plus précise puisqu'elle est limitée par quelques facteurs, dont la simultanéité de l'acquisition des données multi-sources, la grande différence de la résolution spatiale des données, l'insécurité de la validation de l'algorithme de fusion, la disponibilité des données sur le terrain et la complexité du paysage (Pohl et Van Genderen, 1997; Zhang, 2010). En analysant le contexte de la zone d'étude et du projet, l'intégration des résultats des classifications a été préférée à la fusion des données optiques et radar.

L'idée de cartographier l'occupation du sol incluant les rizières reposant uniquement sur des images RADARSAT-2 a été envisagée. Toutefois, l'utilisation des données en polarisation double (mode Standard, résolution spatiale 25 m) risquerait le même problème que l'utilisation des données optiques, donc la confusion entre le riz et les autres types de végétation. Il serait pertinent d'utiliser des données radar polarimétrique de haute résolution (en mode Fin ou mode Ultra-Fin), mais il serait nécessaire d'acquérir plusieurs images pour un grand bassin versant (6 030 km²). C'est donc la combinaison d'images optique et radar que nous allons privilégier pour la cartographie de l'occupation du sol (incluant les rizières) du bassin versant étudié. Cette combinaison permet de profiter à la fois des avantages des données optiques (haute résolution spatiale et spectrale) et ceux des données radar (capteur tout temps, distinction des rizières en période de mousson).

En résumé, la nécessité de documenter l'état de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cáu, afin d'établir un premier lien quantitatif entre les activités humaines, leurs répercussions sur l'environnement et la dimension géographique (spatiale) dans le bassin versant, nous a amené à ce projet de recherche doctoral. Ce sujet de recherche vise à répondre aux questions suivantes : 1) Quel moyen permet d'obtenir une classification d'occupation du sol représentative de la complexité et du morcellement du bassin étudié? 2) Quelles sont les méthodes aptes à distinguer les rizières des autres types de cultures à l'échelle régionale, dans

le contexte d'une utilisation du sol fragmentée et dans une région tropicale comme celle de la zone d'étude ?

1.3 Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif principal est donc de développer une méthode pour obtenir une carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Càu, et plus particulièrement l'étendue des surfaces consacrées à la culture du riz, qui soit adaptée à la modélisation hydrologique et à la modélisation de la qualité de l'eau, à l'aide de l'intégration des résultats des classifications de l'imagerie radar et optique. Pour ce faire, les objectifs spécifiques et leur hypothèses sont de :

1. Déterminer les classes d'occupation du sol importantes pour la modélisation hydrologique et la modélisation de la qualité de l'eau du bassin versant de la rivière Càu.

1^{ère} Hypothèse : Les classes d'occupation du sol ont des effets hydrologiques différents sur les débits le long d'une année (Amstrong et Martz, 2008; Homdee et al., 2011; Getachew et Melesse, 2012); une bonne détermination des classes d'occupation améliore le réalisme des simulations.

2. Adapter et valider la classification orientée-objets à la cartographie de l'occupation du sol du Nord Vietnam (paysage morcelé) à partir d'images SPOT 4-HRVIR.

2^e Hypothèse : La classification orientée-objets est la meilleure approche pour obtenir une carte de l'occupation du sol de la rivière Càu assez précise pour son utilisation dans un modèle hydrologique distribué à partir de nos images. En effet, elle a déjà fait ses preuves pour des images de moyenne résolution comme celles de SPOT 4-HRVIR lorsqu'appliquée sur des régions où le paysage est fragmenté et hétérogène, comme des zones agricoles et périurbaines (Walter, 2004; Whiteside et Ahmad, 2005, Weih et Riggan, 2010).

3. Identifier les rizières à partir de données en double polarisation et polarimétriques de RADARSAT-2 et valider les approches retenues.

3^e Hypothèse : Les limites des données optiques (LANDSAT 7 ETM+ (30 m) et SPOT-4 (20 m)) et les succès de l'application des données radar dans la détection et le suivi des rizières nous amènent à poser l'hypothèse que les images radar double polarisation ou polarimétriques en mode fin de RADARSAT-2 permettent de bien distinguer et de cartographier les rizières du bassin versant de la rivière Càu grâce à leur sensibilité aux stades de croissance du riz.

4. Intégrer les résultats des classifications RADARSAT-2 avec celles des images SPOT-4 afin d'établir la carte de l'occupation du sol incluant les champs de riz qui servira aux simulations d'un modèle hydrologique.

4^e Hypothèse : L'utilisation conjointe des résultats de la classification de l'imagerie radar et optique améliore la classification de l'occupation du sol.

5. Estimer l'impact des rizières sur le régime hydrologique.

5^e Hypothèse : L'identification des rizières sur la carte d'occupation du sol améliore les évaluations et prédictions liées au cycle hydrologique.

1.4 Plan de la thèse

Le premier chapitre est l'introduction. Il définit le contexte du projet de recherche (1.1), les problématiques (1.2), les objectifs et les hypothèses de recherche (1.3).

Le chapitre 2 résume la revue de littérature. Ce chapitre est organisé en deux grandes sections. La première (2.1) introduit le lecteur à la culture du riz et à son importance au Vietnam. Elle décrit le cycle de croissance du riz et les types de riziculture, puis présente le calendrier agricole et les variétés de riz dans le bassin versant de la rivière Cáu. La deuxième section (2.2) décrit les concepts utiles à la compréhension de notre démarche méthodologique concernant la cartographie des rizières et de l'occupation du sol par télédétection au Nord Vietnam. Vu l'abondance de la littérature, elle a été divisée en cinq sous-sections a) Interaction du signal optique et micro-onde avec la végétation; b) Concept d'images polarimétriques et leur potentiel pour la cartographie de la végétation; c) La télédétection optique et radar des rizières : état de l'art; d) Méthodes et techniques de traitement des images SAR en vue de la cartographie des champs de riz; et e) Efficacité et pertinence de la méthode de classification orientée-objets.

Le chapitre 3 renferme une description de la zone d'étude et des sites retenus (3.1), les données utilisées pour l'étude (3.2), la description de la méthodologie appliquée, portant sur le traitement et l'analyse des images SPOT-4 (3.3), le traitement et la cartographie des rizières à partir d'images RADARSAT-2 en double polarisation (3.4) et polarimétriques (3.5), l'intégration des rizières dans la classification dérivée d'images SPOT-4 et l'élaboration des cartes d'état de croissance du riz (3.6); la dernière section (3.7) portant sur l'estimation de l'impact des rizières sur le régime hydrologique.

Le chapitre 4 présente les résultats et les discussions concernant la classification orientée-objets (4.1), d'une part, et l'identification des rizières à partir d'images RADARSAT-2 en double polarisation (4.2) et polarimétriques (4.3), d'autre part, puis l'intégration des résultats des sections 4.1 et 4.2 pour obtenir la carte de l'occupation du sol finale du bassin versant (4.4). L'analyse préliminaire de l'impact des rizières sur le cycle hydrologique est présentée à la section 4.5.

Finalement, les conclusions et les perspectives se retrouvent au chapitre 5.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre est organisé en trois sections. La première (2.1) introduit le lecteur à la culture du riz et à son importance au Vietnam. Elle traite du cycle de croissance du riz (2.1.1) et des types de riziculture (2.1.2) ainsi que du calendrier agricole dans le bassin versant de la rivière C au (2.1.3) et des vari et es de riz qui y sont cultivées (2.1.4). La seconde section d ecrit les concepts utiles   la compr ehension de notre d emarche m ethodologique pour la cartographie par t el ed etection des rizi eres et de l'occupation du sol d'un bassin versant du Nord Vietnam. Vu la diversit e des concepts et l'abondance de la litt erature, cette seconde section (2.2) comprend cinq sous-sections : la premi ere traite de l'interaction du signal optique et microonde avec la v eg etation, la seconde pr esente le concept d'images polarim etriques et leur potentiel pour la cartographie de la v eg etation, la troisi eme traite plus sp ecifiquement de la t el ed etection optique et radar appliqu ee aux rizi eres, la quatri eme r esume les m ethodes et techniques de traitement des images SAR en vue de la cartographie des champs de riz et la derni ere explique comment la m ethodologie de classification orient ee-objets est efficace pour la classification de zones complexes. Le chapitre conclue en donnant les principales justifications pour les objectifs de cette recherche et nos principaux choix m ethodologiques (2.3).

2.1 La culture du riz au Nord Vietnam

2.1.1 Cycle de croissance du riz

La croissance du riz passe par diff erents stades.   chacun de ces stades, le plant affiche un aspect diff erent, lequel fait varier la r eponse du signal radar. Il est donc n ecessaire de bien comprendre le cycle de croissance du riz afin d'être en mesure d'identifier les rizi eres par t el ed etection. Cette section r esume les phases principales du d eveloppement du riz.

Le riz est cultivée dans les r egions tropicales, subtropicales et temp er ees chaudes. La p eriodede d eveloppement du riz diff ere selon le type de plant. La dur ee de vie du riz tropical varie de 110 - 120 jours   150 jours (Nguyen, 2008; LeToan et al., 1997; Maclean et al., 2002; IRRI, 2009),   compter de la germination jusqu'  la maturit e. En g en eral, il y a trois phases principales : phase v eg etative, phase de reproduction et phase de maturation (Figure 2.1).

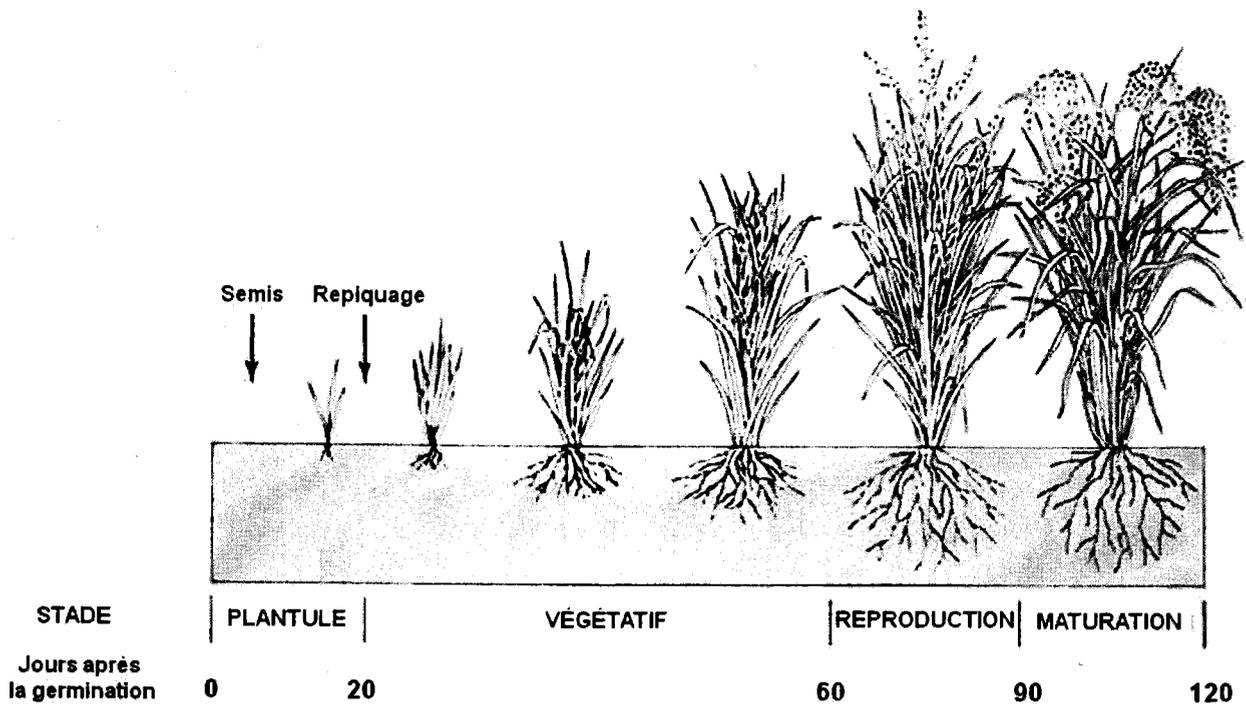


Figure 2.1: Diagramme illustrant les stades de croissance du riz (adapté d'IRRI, 2009 et FAO, 2009)

a. Phase végétative

La phase végétative (*plantule/seedling*, *tallage/tillering*, *élongation de tige/stem elongation*) commence de la germination jusqu'à l'initiation de la panicule, et dure au moins 60 jours (Figure 2.2). Cette phase est caractérisée par le développement de feuilles, l'augmentation de la hauteur du plant et du nombre de talles. Durant cette période, si les conditions sont favorables (nutrition, lumière et conditions climatiques), le riz peut taller quand il a sa cinquième ou sixième feuille (Nguyen, 2008). Le tallage et l'élongation de la tige sont les périodes pendant lesquelles le riz développe des tiges secondaires et tertiaires, chacune ayant la capacité de produire une panicule. Le tallage commence environ 15 jours après le semis et continue jusqu'à la floraison. C'est une étape significative et la plus importante dans toute la vie du riz, qui va déterminer le nombre d'épis et donc la productivité du plant. Ce stade s'étend de l'apparition de la première talle jusqu'à ce que le nombre maximal de talles soit atteint. Après le repiquage, la première talle disparaît, le plant ayant besoin de temps pour se rétablir. Puis, les talles se développent de plus en plus rapidement et chaque plant devient une touffe (*cluster*). Les plants sont prêts pour entrer dans la phase suivante, qui est l'élongation de la tige. Dans ce stade, les talles continuent d'augmenter en nombre et en hauteur. Pour les variétés de riz de courte durée (110-120 jours),

les phases du maximum de tallage, d'élongation de la tige et d'initiation de la panicule arrivent presque simultanément. Par contre, pour les variétés de riz de longue durée (150 jours), le maximum de tallage ne se produit pas en même temps que les deux autres stades.

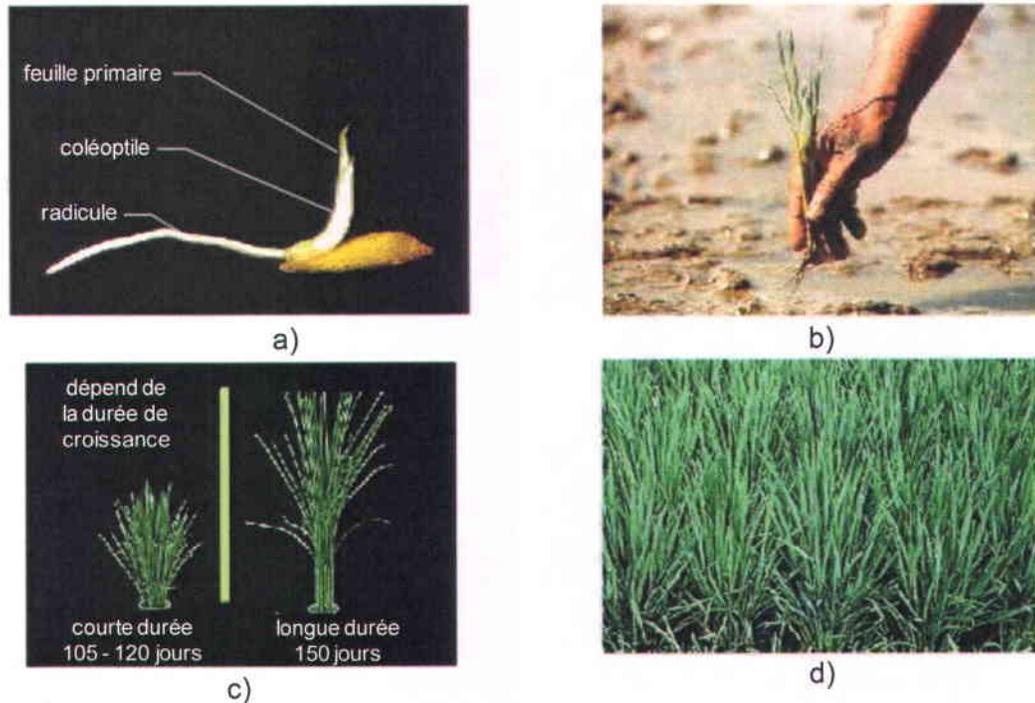


Figure 2.2: Les stades de la phase végétative : a) Germination, b) Plantule (prête pour le repiquage), c) Tallage, d) Élongation de tige (adapté d'IRRI, 2009)

b. Phase de reproduction

La Figure 2.3 illustre les stades de la phase de reproduction (initiation de la panicule à « lance »/booting, épiaison/heading, floraison/flowering). Cette phase commence à l'initiation de la panicule et s'étend jusqu'à la floraison; elle dure de 27 à 35 jours (30 jours en moyenne pour toutes les variétés de riz).

Pendant cette phase, le nombre de talles diminue. Le plant prend de la hauteur, dû à l'élongation de cinq entre-nœuds ainsi qu'à la formation et au développement de panicules. La panicule devient visible comme un cône blanchâtre, d'environ 1,0 à 1,5 mm de long. Elle apparaît d'abord dans la tige principale et ensuite dans les talles d'où elle émerge. Les panicules augmentent en taille et en extension vers le haut à l'intérieur de la gaine de feuille étendard (*leaf sheath*). En raison de cela, cette dernière gonfle. Ce gonflement de la feuille étendard est nommé « booting ». À ce stade, les plants ont des changements évidents de forme

et de couleur de feuille, puis la sénescence des feuilles se produit. Quand la pointe de la panicule sort de la gaine de feuille étandard, c'est le stade d'épiaison. Après ce stade, la croissance s'arrête (biomasse, hauteur) et les feuilles changent d'orientation (LeToan et al., 1997). La floraison a lieu un jour après l'épiaison.

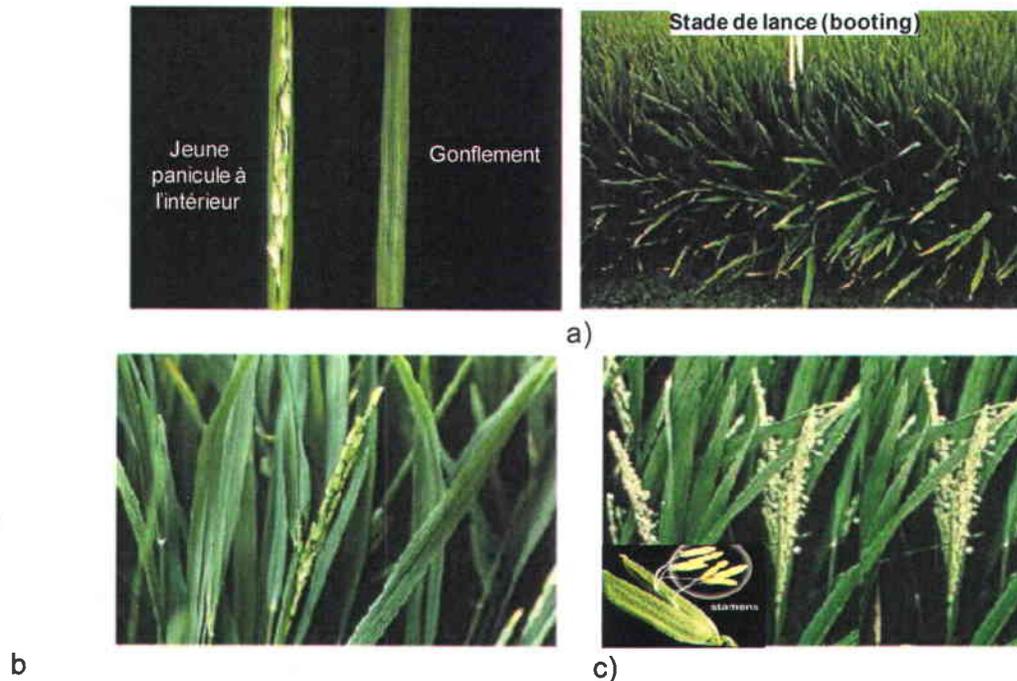


Figure 2.3: Les stades de la phase de reproduction: a) Initiation de la panicule à « lance »/booting, b) Épiaison/heading, c) Floraison (adapté d'IRRI, 2009)

c. Phase de maturation

La maturation est la dernière phase dans le développement du riz (Figure 2.4). Le riz passe alors de la floraison à la maturité du grain (lait, pâte/*dough*, maturité). Le plant de cette phase est caractérisé par une diminution de la teneur en eau des feuilles et de la tige ainsi que du nombre de feuilles (LeToan et al., 1997).

Cette période prend en moyenne 30 jours pour la plupart des variétés de riz dans les tropiques. Le grain de riz commence à se remplir d'une matière laiteuse. La panicule est verte et commence à fléchir. Puis les grains de la panicule commencent à changer du vert au jaune. La sénescence des talles et des feuilles est perceptible. Lorsque les grains se développent pleinement, ils deviennent durs et totalement jaunes.

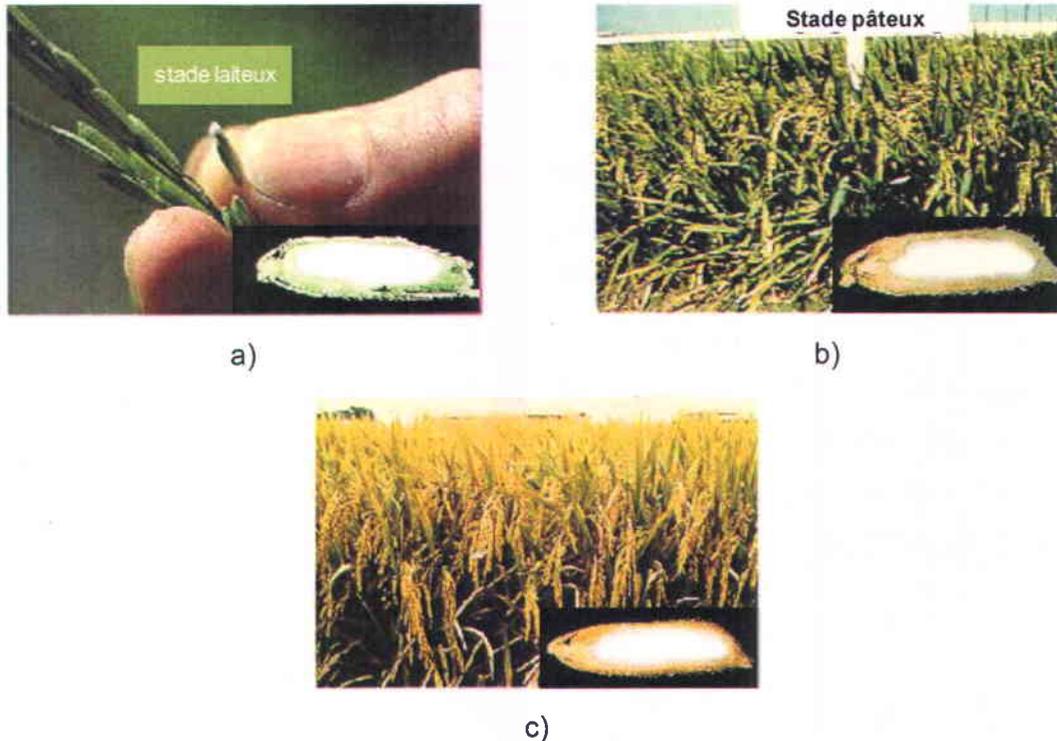


Figure 2.4: Les stades de la phase de maturation: a) Laiteux, b) Pâteux c) Maturité (adapté d'IRRI, 2009)

Après la récolte, les champs sont laissés en jachère ou deviennent recouverts de mauvaises herbes dans des conditions humides. Dans quelques régions, entre deux récoltes, les agriculteurs profitent de ces champs pour planter des cultures à cycle court comme des haricots, des pommes de terre, du manioc, du maïs, etc.

2.1.2 Aperçu des types de riziculture

La culture du riz est le plus grand usage unique de terres pour la production alimentaire. Dans le monde, environ 79 millions d'hectares de riz sont cultivés dans des conditions irriguées. La quasi-totalité (90 %) du riz est produite en Asie (Maclean et al., 2002). L'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) définit, dans Maclean et al. (2002), quatre types de riziculture en Asie. Cette définition se base sur les pratiques hydrologiques qui sont associées à chaque type de riziculture. Elle comprend donc : la riziculture irriguée (*irrigated rice*), la riziculture pluviale de plaine (*rainfed lowland rice*), la riziculture d'altitude (*upland rice*) et la riziculture d'inondation (*flood-prone rice*).

- La riziculture irriguée contribue aux trois-quarts de la production globale du riz. Ce type de riziculture est surtout concentrée dans les zones humides, subhumides (critère de la présence

d'eau, d'humidité du sol (Barnaud et Fustec, 2007)) et dans les régions tropicales-humides et subtropicales (critère de température, caractérisée par des étés chauds et humides ainsi que des hivers frais). La riziculture irriguée est pratiquée dans les rizières entourées de diguettes. Le niveau d'eau dans les rizières (qui varie de 2 cm à 25 cm) est contrôlé par des systèmes d'irrigation et de drainage. La variabilité de la précipitation est la base de la subdivision des écosystèmes irrigués en deux saisons : la saison irriguée humide et la saison irriguée sèche.

- Le riz pluvial de plaine, parfois appelé riz inondé, est cultivé dans des champs endigués inondés (la profondeur d'eau allant de 0-25 cm (eau peu profonde) à 25-50 cm (profondeur moyenne) et parfois supérieure à 100 cm) pour au moins une partie (pas plus de 10 jours consécutifs) de la saison de culture. Le niveau d'eau dans les champs n'est pas contrôlé par le système d'irrigation. Le riz n'est pas immergé mais est alimenté par la pluie, ou par le ruissellement d'eaux provenant d'un réservoir ainsi que par les transferts d'une parcelle à l'autre par gravité.

- La riziculture d'altitude est pratiquée dans les basses vallées sur des terres en pente ondulées et raides avec un débit d'eau élevé et un mouvement d'eau latéral. Ce type de culture ne représente qu'une très faible proportion (environ 4 %) de la production mondiale, pour une proportion de 9 % des surfaces rizicoles. Elle est pratiquée en Asie, en Afrique et en Amérique latine. En Asie du Sud-Est, la plupart du riz pluvial d'altitude est cultivé sur des terres ondulées et montagneuses avec des pentes variant de 0 % à plus de 40 %. En Afrique de l'Ouest, le riz pluvial d'altitude pousse sur des collines dans des zones humides et sur des terrains plats dans des zones arides et des forêts humides. Au Brésil, ce type de riz pousse sur des terres légèrement ondulées (de 0 % à 8 % de pente). Dans la riziculture d'altitude, les champs ne sont pas inondés; au cours de la saison de croissance, l'eau de surface ne s'accumule pas. Dans ce type de culture, la terre est préparée et ensemencée à sec dans les champs, sans diguette.

- Quant à la riziculture d'inondation, elle est pratiquée dans les basses terres adjacentes aux cours d'eau, dans les deltas des régions humides et subhumides et dans les zones côtières sujettes aux inondations causées par les fluctuations des marées. L'eau dans les champs provient de la crue des rivières ou des lacs, ou résulte de l'effet des marées près des embouchures des deltas (comme dans le delta du Mékong au Vietnam et au Cambodge, ainsi que dans les cas du Ganges et du Brahmapoutre en Inde et au Bangladesh). Les systèmes de culture varient selon le temps, la profondeur et la durée des inondations. La profondeur de l'eau est supérieure à 100 cm en général et peut parfois dépasser 5 m. À l'échelle mondiale, ce type de culture représente environ 9 % de la surface rizicole totale.

La majorité de la surface rizicole du monde est donc soit en riziculture irriguée (environ 55 %), soit en riziculture pluviale de plaine (environ 33 %). Dans les régions tropicales du Sud et du Sud-Est asiatique, environ 40 % de la surface rizicole est irriguée.

Au Vietnam, le riz est cultivé dans trois régions : au Nord (delta du fleuve Rouge), au Centre et au Sud (delta du Mékong). Il peut être cultivé en plaine comme en montagne, en fonction des températures, de la géographie, des saisons de culture et du nombre de récolte. Au Nord du Vietnam, où le bassin versant étudié est situé, il y a deux récoltes par année et la riziculture irriguée est le type principal.

2.1.3 Calendrier agricole et variétés de riz dans le bassin de la rivière C u

En se basant sur les documents du bureau de l'Agriculture et du Développement Rural des provinces dans le bassin versant, ainsi que sur les informations collectées sur le terrain pour les besoins de cette recherche doctorale (dans la province de Thai Nguyen), on remarque que le calendrier agricole varie selon chaque région et selon chaque saison de culture. Pour l'ensemble du bassin versant, selon les documents de référence (IWARP, 2003), il y a deux calendriers élaborés en se basant sur la topographie, soit un calendrier pour la région montagneuse et un calendrier pour la plaine. Ces calendriers sont présentés au Tableau 2.1.

Le Tableau 2.2 présente un aperçu des différences d'apparence des champs expérimentaux visités pour cette thèse entre le début et la fin de la saison de culture du riz du printemps 2012, qui sont localisés sur la carte de la Figure 3.10.

Tableau 2.1 : Calendriers agricoles du bassin versant de la rivière C u

| Sur la montagne | | | |
|--|---------------------|---------|-----------------|
| Récolte | Repiquer – Récolter | | |
| | De |   | Nombre de jours |
| Printemps (Vu Xuan) | 15 fév. | 13 juin | 120 |
| Traditionnelle (Vu Mua) | 10 juil. | 27 oct. | 110 |
| Dans la zone intermédiaire et la plaine | | | |
| Printemps (Vu Xuan) | 05 fév. | 03 juin | 120 |
| Traditionnelle (Vu Mua) | 01 juil. | 19 oct. | 110 |

Tableau 2.2: État des 10 champs expérimentaux dans la province de Thai Nguyen (bassin de la rivière C au) au début et   la fin de la saison de culture du riz, au printemps 2012

| N  du site | Nom du champ | Début de saison (05 fév.) | Fin de saison (02 juin) |
|------------|-----------------|---|---|
| site 1 | Cho Chu 1 (CC1) |  |  |
| site 2 | Cho Chu 2 (CC2) |  |  |
| site 3 | Cu Van 1 (CV1) |  |  |
| site 4 | Cu Van 2 (CV2) |  |  |
| site 5 | Luc Ba 1 (LB1) |  |  |

| | | | |
|---------|---------------------|---|---|
| site 6 | Luc Ba 2 (LB2) |  |  |
| site 7 | Dao Xa 1 (DX1) |  |  |
| site 8 | Dao Xa 2 (DX2) |  |  |
| site 9 | Minh Duc 1 (MD1) |  |  |
| site 10 | Minh Duc 2 (MD2) |  |  |

En réalité, les données collectées sur le bassin de la rivière Càu, présentées à l'Annexe I, ont montré que les dates du repiquage et de la récolte du riz varient en fonction de différents

facteurs tels que la météorologie, la qualité et le type de riz, la qualité du sol et du système d'irrigation, les agriculteurs, etc.

Il y a différentes variétés de riz dans l'ensemble du bassin versant. Toutefois, selon les informations collectées sur le terrain, il y a dans les champs expérimentaux deux variétés principales, soit celle de Khang Dan 18 et celle du riz hybride. Ce sont des variétés à court terme (95 - 130 jours) qui ont une bonne résistance au froid et un potentiel de rendement élevé.

2.2 Cartographie des rizières et de l'occupation du sol par télédétection

2.2.1 Interaction du signal optique et microonde avec la végétation

Depuis le lancement de LANDSAT-1 en 1972, les techniques de télédétection ont été largement utilisées dans les systèmes agricoles pour l'identification des cultures, l'estimation de la superficie et du rendement ainsi que pour la prévision et l'évaluation des dommages aux cultures, en utilisant l'information portée par le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par ces surfaces dans une certaine région de longueurs d'onde ou de fréquences (Bonn, 1996; Val Niel et McVicar, 2001; Bouvet, 2009). La longueur d'onde (λ) équivaut à la longueur d'un cycle d'une onde, tandis que la fréquence (f) représente le nombre d'oscillations par unité de temps. Ces deux éléments sont liés par la relation : $c = \lambda * f$, où c est la vitesse de la lumière ($3 * 10^8$ m/s).

Présentement, la variété des instruments de télédétection est grande, tout comme leur gamme d'applications. Dans le domaine agricole, différents types de données de télédétection peuvent être utilisées en fonction des applications qui sont envisagées, soit les photos aériennes, pour la télédétection aéroportée, et les données (images) des satellites d'observation de la Terre, pour la télédétection spatiale. En ce qui concerne notre cas d'étude, nous nous intéressons à la télédétection spatiale et à leurs données. Pour la télédétection spatiale, il existe deux types de systèmes : actif et passif. Pour les systèmes actifs, l'onde détectée est initialement émise par le système et réfléchi par la cible. Dans ce cas, le rayonnement est enregistré par les capteurs microondes. Les données qui proviennent de ces capteurs sont nommées les images radar. Quant aux systèmes passifs, l'onde détectée est soit émise par une source externe (le soleil) et réfléchi par la cible (les surfaces observés), ou soit émise directement par la cible. Le rayonnement est enregistré dans ces systèmes par les capteurs optiques. Les données enregistrées par ces types de capteurs s'appellent les images optiques.

Dans le domaine optique, les régions de longueurs d'onde concernées comprennent le visible (0,38 - 0,7 μm), les infrarouges (0,7 μm - 1 mm) et, rarement, les ultraviolets (0,24 - 0,38 μm). Parmi ces régions de longueurs d'onde, les bandes verte (0,52 - 0,6 μm) et rouge (0,63 - 0,69 μm), dans le visible, et la bande proche infrarouge (0,7 - 1,0 μm), dans les infrarouges, sont les bandes utiles pour la distinction des types de végétation, particulièrement les bandes rouge et proche infrarouge (PIR).

La bande rouge comprend la bande d'absorption de la chlorophylle de la végétation verte en bonne santé. Cette bande est importante pour distinguer les différents types et évaluer l'état de la végétation. Elle est aussi la bande qui est moins touchée par l'atmosphère et l'absorption.

Juste au-delà de la bande rouge, le PIR s'est avéré être particulièrement utile pour distinguer les différents types de végétation ainsi que l'état de la végétation. La partie de haute réflectance de cette bande, 0,76 - 0,90 μm , est une région spectrale distinctive de la végétation en bon état (Aronoff, 2005).

La chlorophylle qui est présente dans les feuilles absorbe la lumière rouge. Dans le PIR, le rayonnement est diffusé par la structure spongieuse interne de la feuille, ce qui conduit à des valeurs plus élevées que pour les autres bandes. Cette interaction entre les feuilles et la lumière qui les frappe est déterminée souvent par leurs réponses différentes dans la bande rouge et la bande PIR de la lumière réfléchi. Cela explique la présence de la bande rouge et de la bande PIR dans les principaux systèmes optiques comme LANDSAT, SPOT, MODIS, ASTER, etc., afin de rendre possible l'observation de l'activité photosynthétique. De cette façon, la végétation, incluant les plants de riz, peut être détectée par la télédétection optique. Des indices de végétation qui se basent sur les réflectances rouge et PIR, comme par exemple l'indice VIN (*Vegetation Index Number*), la différence normalisée NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), l'indice de végétation transformé TVI (*Transformed Vegetation Index*), ont souvent été utilisés pour distinguer la végétation d'autres types non végétatif. Néanmoins, la réflectance du riz est la même que celle de toutes les végétations vertes; il est donc difficile de différencier le riz d'autres types de végétation. Ainsi, la caractéristique importante qui permet de distinguer le riz des autres types de végétation est le comportement spécifique des rizières lors de la période où les champs sont inondés (Barrs et Prathapar, 1996; McCloy et al., 1987). Une fois que les plants de riz sont assez gros pour cacher la surface d'eau sous-jacente, leur signature devient semblable à celle des autres cultures, sauf dans l'infrarouge moyen (MIR) en raison des caractéristiques d'absorption de l'eau dans ces longueurs d'ondes (Martin et Heilman, 1986; Thenkabail et al., 1994b). Les indices sensibles à l'eau et à la teneur en eau des plants faisant

intervenir la réflectance en moyen infrarouge, comme par exemple l'indice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), sont utiles pour détecter les rizières (Xiao et al., 2005; 2006).

Quant au domaine des microondes, il couvre les longueurs d'onde variant de 0,75 cm à 100 cm. Les instruments de télédétection fonctionnant dans ce domaine peuvent être soit actifs (le capteur transmet son propre signal) ou passifs (le capteur enregistre les microondes émises par la surface terrestre).

La plupart des capteurs passifs sont caractérisés par une résolution spatiale faible (10-80 km). Ils sont utiles en océanographie, en météorologie et en hydrologie, mais à l'échelle continentale. Les capteurs actifs comprennent les radars et les diffusomètres. Les diffusomètres des capteurs ne fournissent pas d'images. Ils sont utilisés pour prendre des mesures précises de la quantité d'énergie rétrodiffusée par les cibles, comme par exemple pour l'estimation de la vitesse des vents sur les océans. Cependant, le plus répandu des systèmes microondes actifs est le radar.

Le RADAR (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) est un système actif basé sur l'envoi d'une impulsion d'énergie microonde vers une cible et l'enregistrement des impulsions de retour lorsque l'énergie atteint la cible (l'onde rétrodiffusée par la cible). Le temps requis par l'énergie pour se rendre à la cible et retourner au capteur détermine la distance de la cible. La façon dont le signal retourne au capteur fournit des informations pour déterminer les caractéristiques de la cible. Un Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO), fréquemment appelé SAR (*S*ynthetic *A*peture *R*adar), est un radar imageur qui effectue un traitement permettant d'affiner l'ouverture de l'antenne afin d'améliorer la résolution en azimut.

Le signal radar (la rétrodiffusion) dépend de la manière dont l'énergie radar interagit avec la surface en fonction de plusieurs variables ou paramètres. Les paramètres principaux incluent : (1) les caractéristiques particulières des systèmes radars, soit la fréquence d'émission, la polarisation, l'angle d'incidence; et (2) les caractéristiques de la surface, soit les propriétés électriques et physiques de la cible, dont la rugosité et l'humidité du sol, la densité et la structure du type de couverture (végétation, bâtiments, eau, etc.), la pente, etc.

Le rayonnement électromagnétique dans les parties microondes peut être caractérisé par ses fréquences et longueurs d'onde. La Figure 2.5 présente les bandes de longueur d'onde les plus utilisées par les SAR. L'interaction de l'onde électromagnétique avec la cible terrestre se fait avec les diffuseurs présents dans la cellule de résolution, dont les dimensions sont du même ordre que la longueur d'onde considérée. Dans le cas du riz, la taille des diffuseurs peut aller de quelques centimètres (épis, feuilles) à quelques dizaines de centimètres (feuilles, tiges). Les SAR adaptés à l'observation des rizières fonctionnent donc *a priori* plutôt dans les bandes Ka à

L. Néanmoins, seules les bandes X, C et L sont présentes sur les satellites actuellement en opération (Bouvet, 2009).

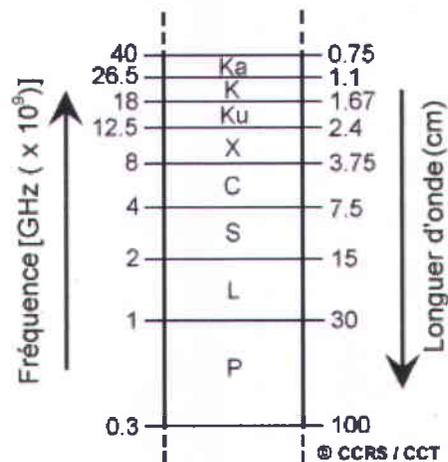


Figure 2.5 : Les bandes principales de longueur d'onde utilisées par les RSO

La polarisation d'une onde décrit l'orientation et le comportement des trois dimensions du vecteur de base, défini par la direction de son champ électrique, la direction du champ magnétique et la direction de propagation (Boerner et al, 1998). La polarisation est la propriété d'une onde électromagnétique qui décrit le lieu du vecteur du champ électrique en fonction du temps. Les radars de télédétection sont normalement conçus pour émettre soit des ondes polarisées verticalement, soit des ondes polarisées horizontalement. Cela veut dire que le champ électrique de l'onde est dans un plan vertical ou horizontal. De même, le radar peut recevoir soit des ondes polarisées verticalement, soit des ondes polarisées horizontalement, et parfois les deux. Donc, la polarisation d'une image radar peut être HH (émission horizontale, réception horizontale), VV (émission verticale, réception verticale), HV (émission horizontale, réception verticale) ou VH (émission verticale, réception horizontale). Lorsque la polarisation des ondes reçues est la même que celle des ondes émises, on dit que l'image résultante est co-polarisée. Lorsque la polarisation des ondes reçues est orthogonale à celle des ondes émises, on dit que l'image est ortho-polarisée.

L'angle d'incidence est un paramètre qui a un effet important sur le signal rétrodiffusé des structures particulières de la surface et sur leur apparence sur une image. Ce paramètre varie entre une quinzaine et une cinquantaine de degrés (60 ou 70 degrés pour un radar aéroporté), et peut être soit fixe, soit réglable par dépointage de l'antenne. À des altitudes de plusieurs centaines de kilomètres, les radars spatiaux peuvent acquérir des images dans une plus petite

gamme d'angles d'incidence, entre cinq et quinze degrés. Ceci donne une illumination radar plus uniforme.

Comme déjà mentionné, le système radar imageur reçoit le signal rétrodiffusé par la cible dans l'une ou l'autre des polarisations. Il y a trois mécanismes de diffusion de l'onde électromagnétique par la cible qui permettent un retour du signal vers le capteur : la diffusion de surface (par ex. : la réflexion de l'onde par la surface de l'eau), la diffusion de volume (par ex. : l'interaction de l'onde avec les branches et les tiges du couvert végétal) et la diffusion multiple volume-surface (interaction du sol avec la végétation aussi appelée diffusion double rebond, (par ex. : les bâtiments)). Ces trois types de diffusion sont présents dans un couvert végétal.

La Figure 2.6 représente les trois types de diffusion dans le cas d'un couvert de végétation, plus particulièrement du riz. La diffusion de la surface de l'eau (1) sous le couvert végétal a une contribution négligeable à la rétrodiffusion totale. L'interaction surface-volume (3) est aussi négligeable dans la plupart des cas. Cependant, dans le cas des rizières, lorsque le sol est recouvert d'une surface d'eau, ce type de diffusion peut devenir dominant. Cette caractéristique physique devient donc un facteur clé qui permet de distinguer les rizières en utilisant des données radar. De plus, la diffusion de volume (2), soit la réponse directe du couvert végétal, augmente à mesure que les plants de riz poussent en raison de l'augmentation de la biomasse.

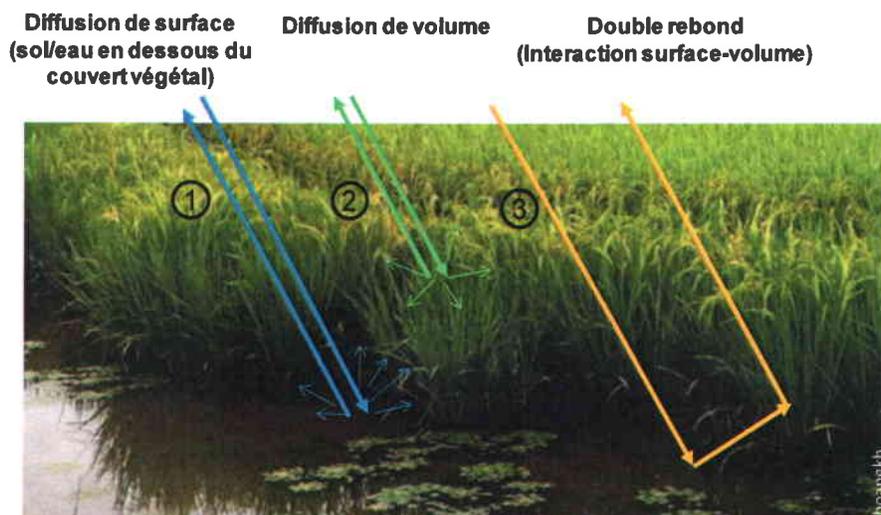


Figure 2.6: Les principaux types de diffusion sur un couvert de végétation (le cas des rizières)

2.2.2 Concept d'images polarimétriques et potentiel de la polarimétrie pour la cartographie de la végétation

a. Concept d'images polarimétriques

Les systèmes radars peuvent comprendre une, deux et même quatre combinaisons de polarisations d'émission / réception. Quand les données SAR sont acquises avec une combinaison des quatre polarisations HH, HV, VV et VH, on parle d'« images polarimétriques SAR ». On utilise aussi le terme « polarisation en quadrature » comme un synonyme de polarimétrie (Lee et Pottier, 2009). Les radars polarimétriques utilisent quatre polarisations et mesurent les différences de phase entre les canaux, ainsi que leurs amplitudes. Autrement dit, un radar polarimétrique émet les ondes dans les deux polarisations orthogonales et les détecte dans les mêmes polarisations. On choisit souvent les polarisations linéaires horizontale (H) et verticale (V), à partir desquelles on peut créer quatre canaux de réception : HH, HV, VV et VH.

Les signaux mesurés dans ces quatre canaux donnent toutes les données nécessaires à la mesure des propriétés diffusantes de la cible (Henderson et Lewis, 1998). Pour cette raison, dans l'analyse des données radars polarimétriques, la matrice de diffusion (S) représente complètement la transformation de la polarisation d'une onde incidente sur une cible (Équation 1).

D'autres matrices sont dérivées de la matrice de diffusion (S) et permettent de représenter la même information tout en facilitant l'extraction d'information sur les propriétés diffusantes de la cible, ici les rizières, soit : la matrice de Stokes, le vecteur de diffusion (vecteur-cible \underline{k}), la matrice de covariance (C) et la matrice de cohérence (T). Ces cinq matrices sont décrites en détails dans Boerner et al. (1998), Touzi et al. (2004) et Lee et Pottier (2009). La matrice (S) comporte quatre éléments (Équation 1), qui sont des nombres complexes (S_{HH} , S_{HV} , S_{VH} et S_{VV}) que l'on peut calculer à partir des amplitudes et des différences de phase enregistrées par les quatre canaux d'un capteur polarimétrique.

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le vecteur de diffusion (vecteur-cible) est une version vectorielle de la matrice de diffusion. Si on pose l'hypothèse de réciprocité (radars monostatiques), $S_{HV} = S_{VH}$ et le vecteur de diffusion \underline{k} est alors défini par l'équation (2) suivante :

$$\underline{k} = \begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2)$$

En supposant toujours le cas de la réciprocité, la vectorisation de la matrice de diffusion à l'aide des éléments de la matrice de spin de Pauli (Lee et Pottier, 2009) conduit à l'expression suivante pour le vecteur-cible :

$$\underline{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH}+S_{VV} \\ S_{HH}-S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ces deux vecteurs (Équations 2 et 3) contribuent à l'élaboration de la matrice de covariance (C) et de la matrice de cohérence (T). La matrice de covariance est un moyen d'exprimer les propriétés du signal reçu dans le domaine des puissances. En multipliant le vecteur (\underline{k}) par lui-même, on obtient la matrice de covariance, C :

$$C = \underline{k} \times \underline{k}^{*T} \quad (4)$$

où l'exposant (T) dénote le vecteur transposé et (*) est le nombre complexe conjugué.

À partir de cette matrice, on peut décrire les diffuseurs présents dans une partie donnée d'une image. De la même manière, la matrice de cohérence (T) est le produit de la multiplication du vecteur \underline{k}_p par lui-même :

$$T = \underline{k}_p \times \underline{k}_p^{*T} \quad (5)$$

On peut constater que la matrice (T) est une proche parente de la matrice C; les deux contiennent en effet les mêmes informations mais sous une forme différente. La matrice de cohérence (T) exprime la relation entre les signaux diffusés reçus dans les canaux d'un radar polarimétrique, ce qui constitue une description des cibles présentes dans une image. Dans notre étude, cette matrice a été utilisée pour la classification des rizières.

b. Potentiel de la polarimétrie pour la cartographie de la végétation

La télédétection hyperfréquence active et ses développements récents en polarimétrie ont montré un grand potentiel pour la caractérisation des paramètres géophysiques des surfaces

naturelles, en particulier l'humidité et la rugosité de la surface du sol ainsi que le couvert végétal. La plupart des radars de la première génération possèdent une seule polarisation et une seule fréquence. Cela limite les informations pouvant être extraites à partir de ce type d'images. En 1994, le capteur SIR-C, installé sur la Navette spatiale pour une mission spécifique de cartographie, était le premier système de radar à fournir des données multi-polarisation et polarimétriques. Ce capteur a fait la démonstration de la richesse des informations qui peuvent être extraites de données polarimétriques (McNairn et Brisco, 2004). Les capteurs radar récents comme PALSAR/ALOS-1 et RADARSAT-2 fournissent des modes polarimétriques, lesquels sont souvent utilisés dans les applications en agriculture, particulièrement pour la cartographie des types de culture. Les articles de synthèse (McNairn et Brisco, 2004) et les recherches récentes (Bouvet et al., 2009; Oh et al., 2009; Lam-Dao et al., 2007) ont montré le grand potentiel du mode polarimétrique pour la cartographie de la végétation, lié aux avantages des données SAR en général (1,2) et polarimétriques (3,4) en particulier :

1. La capacité de recueillir des images jour et nuit et au travers les nuages grâce à son puissant radar à synthèse d'ouverture à hyperfréquences. Ce point est important particulièrement pour la cartographie des rizières, lesquelles sont souvent plantées dans des régions tropicales nuageuses.
2. La capacité d'obtenir des séries temporelles de données SAR permet de suivre la dynamique de changement des plants tout au long de la saison de végétation. Cela permet de distinguer les différentes cultures en tirant partie des changements des propriétés diffusantes des plantations occasionnés par la croissance et le mûrissement, et qui sont caractéristiques des plantes semées.
3. En mode polarisation quadruple, quatre canaux de polarisation différents sont mis à profit. Premièrement, la combinaison des polarisations dans un composé couleur permet d'extraire de l'information supplémentaire sur les caractéristiques de surface. Deuxièmement, à partir des matrices de covariance (C) ou de cohérence (T), différents paramètres polarimétriques peuvent être calculés (entropie, anisotropie, angle alpha, corrélation entre HH et VV, span, rapport de co-polarisation, rapport de dépolarisation) afin de déterminer lesquels sont les plus appropriés pour distinguer les types de végétation à des stades différents de leur cycle de croissance.
4. La rétrodiffusion par les surfaces végétales est affectée par de nombreux facteurs, notamment la biomasse végétale, la structure (taille des feuilles, densité des tiges, etc.), l'humidité du sol, la rugosité de surface, ainsi que leurs interactions avec des configurations de capteurs, telles que la fréquence, la polarisation et l'angle d'incidence.

Pour cette raison, l'analyse du coefficient de rétrodiffusion et le calcul des paramètres physiques permettent de différencier les types de végétation.

Considérant les points mentionnés ci-dessus, on peut affirmer que l'analyse de la variation de la rétrodiffusion dans plusieurs polarisations et le calcul des paramètres polarimétriques jouent un rôle clé dans l'analyse des cultures. Ce type de données radar, par rapport aux autres types de données de télédétection, facilite la cartographie de la végétation en général et des types de culture en particulier. McNairn et Brisco (2004) ont montré que les paramètres importants pour la discrimination de la végétation sont le degré de polarisation, la hauteur du socle, les coefficients de variation, l'orientation minimale et maximale de la polarisation, et la différence de phase des canaux co-polarisés. Plus récemment, Buckley (2008) a montré l'effet de différents angles d'incidence sur les classifications à partir de données polarimétriques. En comparant ces dernières avec les classifications utilisant une image LANDSAT, Buckley (2008) a remarqué que les données polarimétriques peuvent mieux détecter les différents types de couvert forestier grâce à la réflexion double rebond (*double-bounce*). Quant à l'agriculture, des données polarimétriques sont aussi efficaces pour distinguer et classer les cultures agricoles (Silva et al., 2009) et particulièrement les rizières (Oh et al., 2009; Li et al., 2012).

L'exploitation des nouvelles données polarimétriques est encore à développer à cause de la complexité de la donnée, qui demande une connaissance approfondie des mécanismes de rétrodiffusion des ondes électromagnétiques. Cependant, les études ont démontré les avantages de leur utilisation. L'ajout de paramètres polarimétriques augmente le contenu en information des images (McNairn et Brisco, 2004; Balenzano et al., 2011).

2.2.3 Télédétection optique et radar des rizières : état de l'art

Aujourd'hui, le riz est une des composantes principales de l'approvisionnement alimentaire de la population non seulement de l'Asie mais aussi d'autres pays dans le monde. Les statistiques (de 1960 à 2010) de l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI) nous montrent que la production de riz augmente toujours afin de répondre à l'accroissement de la population mondiale (Figure 2.7).

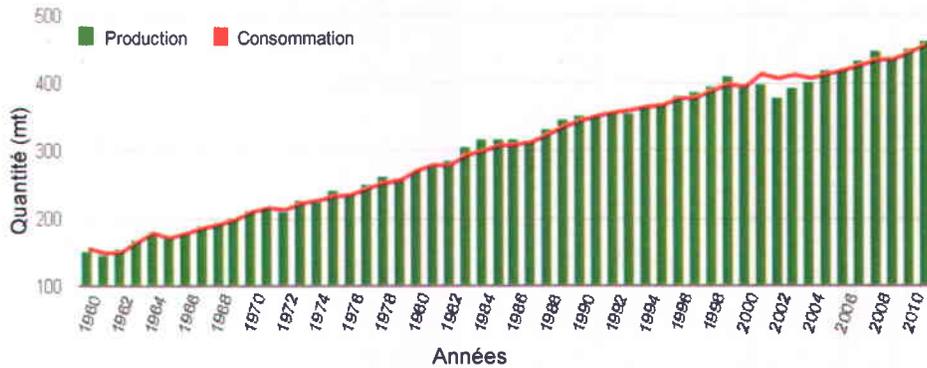


Figure 2.7: Production et consommation mondiale de riz, 1960-2010 (tiré d'IRRI, 2012)

La surveillance continue de ce type de culture devient donc un facteur important non seulement pour la stabilité de l'économie mais aussi pour le développement durable. En effet, l'estimation précise de la superficie d'un champ de riz permet d'évaluer le flux de méthane des rizières, qui contribue à l'effet de serre (Okamoto et Fukuhara, 1996).

Parmi les applications de la télédétection, le suivi des rizières est un vaste thème de recherche. Quelques séries de données mondiales concernant le riz ont été développées à la fin des années 1980 et au début des années 1990 (Aselman et Crutzen, 1989; Matthews et al., 1991; Olson, 1992; Wilson et Henderson-Sellers, 1992). Un premier ensemble de données sur le riz produit en Asie a été créé en utilisant les données statistiques agricoles à partir des années 1970 (Huke, 1982). Néanmoins, cet ensemble de données était basé seulement sur des données statistiques, et il ne répondait pas au besoin d'une recherche spatio-temporelle (Xiao et al., 2006). Leff et al. (2004) ont fourni un ensemble de données d'occupation du sol à l'échelle globale obtenue de données satellitaires. Ils ont produit une carte de la distribution globale de 18 types de cultures principales (incluant le riz) avec une résolution spatiale grossière de cinq minutes (~ 10 km).

De nombreuses méthodes d'extraction et de suivi des rizières ont été développées depuis 1973, date du lancement de LANDSAT (CRDI, 2009). Elles ont fait l'objet de plusieurs articles parmi lesquels on peut retenir : Lopez-Sanchez et al. (2011), Torbick et al. (2011), Shiu et al. (2010), Bouvet et al. (2009), Motohka et al. (2009), Oh et al. (2009), Li et al. (2008), Lam-Dao et al. (2007, 2005), Chen et Lin (2005), Li et al. (2003), Shao et al. (2001), Ribbes et LeToan (1999), Okamoto et Kawashima (1999), Liew et al. (1998), Ross et al. (1998), LeToan et al. (1989, 1997), Okamoto et Fukuhara (1996) et McCloy et al. (1987). Ces articles présentent les méthodes appliquées dans plusieurs pays du monde, mais surtout en Asie, où le riz est cultivé sur un grand domaine spatial et dans différents types de paysage (Xiao et al., 2006).

McCloy et al. (1987) ont développé un système pour suivre la superficie du riz en Nouvelle-Galles du Sud (Australie) et distinguer les rizières d'autres types d'occupation du sol en utilisant les images LANDSAT MSS. Par la suite, dans les années 1990, l'équipe d'Okamoto et al. (1996, 1999) a développé une méthode pour estimer la superficie des rizières à Hokkaido et Miyagi (Japon) à partir des images LANDSAT TM. Dans le même but, Fang et al. (1998) ont utilisé les images NOAA AVHRR et LANDSAT TM. Dans les années 2000, une nouvelle génération de capteurs optiques performants (avec l'addition d'une bande dans la portion moyenne infrarouge du spectre électromagnétique sensible à l'humidité de la végétation et à l'eau du sol) a été utilisée, tels que MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) du satellite Terra/Aqua et VGT (Végétation) du satellite SPOT-4 (Xiao et al., 2005, 2006; Motohka et al., 2009). L'équipe de Xiao et al. (2005, 2006) a développé un algorithme pour caractériser et cartographier les rizières à partir des images MODIS. Les rizières sont identifiées par l'utilisation d'une série de trois indices de végétation (LSWI - *Land Surface Water Index*, EVI - *Enhanced Vegetation Index* et NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) permettant de reconnaître les rizières inondées ou en période de repiquage. Cet algorithme a été appliqué pour créer une carte des rizières de 13 provinces en Chine du Sud. Shiu et al. (2010) a réussi à extraire des rizières en utilisant les bandes spectrales d'images FORMOSAT-2 de haute résolution (8 m) et l'indice de végétation NDVI.

Les résultats de ces recherches ont montré que la télédétection optique fournit un moyen efficace pour réaliser la cartographie du riz. Toutefois, les cibles agricoles sont très dynamiques au cours de la saison de croissance (McNairn et Brisco, 2004). De plus, en raison des limitations associées à l'acquisition des données de télédétection optique (leur faible résolution spatiale ou leur faible résolution temporelle), il est très difficile d'effectuer un suivi temporel réel de la croissance des cultures et d'évaluer la production rizicole (Li et al., 2003). Même à la résolution spatiale 8 m de FORMOSAT-2, Shiu et al. (2010) ont mentionné qu'il y a beaucoup d'erreurs de classification provenant de l'état divergent des rizières ainsi que de la texture similaire entre le riz et d'autres cultures. De plus, dans les régions tropicales, la couverture nuageuse continue sur une bonne partie de l'année devient un facteur entravant de façon importante l'observation optique (Okamoto et Kawashima, 1999; Shao et al., 2001). La cartographie et le suivi des caractéristiques des cultures sont limités dans les régions tropicales pour les capteurs optiques (McNairn et Brisco, 2004).

En ce qui a trait au suivi de la production du riz, il a été proposé, dès le début des années 1990, d'utiliser la courbe expérimentale du coefficient de rétrodiffusion versus l'âge des plants pour

évaluer le stade de croissance du riz à partir d'images acquises par un capteur RSO. Suite au lancement du satellite européen ERS-1, en juillet 1991, et à celui du satellite canadien RADARSAT-1, en novembre 1995, une nouvelle vague d'études a été lancée.

À l'aide des données RSO du satellite européen ERS-1 (bande C (5,3 GHz), polarisation VV) les équipes de Kurosu et al. (1995) et de LeToan et al. (1997) ont fait ressortir que les images radar constituent un outil prometteur en ce qui concerne plusieurs aspects socio-économiques et environnementaux des rizières. Ils ont montré la forte variation temporelle de la rétrodiffusion radar aux différents stades de la croissance du riz. Parallèlement à ces recherches, la présence du programme ADRO de l'Agence spatiale canadienne a permis à des équipes de partout dans le monde, particulièrement des pays asiatiques, de réaliser des projets portant sur la surveillance des rizières à partir de données SAR de RADARSAT-1 (Staples et al., 1994; Staples et Hurley, 1996; Rabaute et al., 1998; Ross et al., 1998; Ribbes et LeToan, 1999; Shao et al., 2001) et sur l'estimation de la production du riz (Shao et al., 2001; Li et al., 2003).

Plus récemment, les capteurs ASAR (Advanced SAR) d'ENVISAT (lancé en mars 2002 et tombé en panne 10 ans plus tard, en avril 2012), PALSAR/ALOS (lancé en janvier 2006 et dysfonctionnel depuis mai 2011), TerraSAR-X (lancé en juin 2007) et son jumeau TanDEM-X (lancé en juin 2010) ainsi que RADARSAT-2 (lancé en décembre 2007) offrent des modes multi-polarisations et polarimétriques. La recherche a démontré que la multi-polarisation et la polarimétrie permettent d'augmenter le contenu en information dans un ensemble de données SAR, de la même manière que les approches multi-spectrales utilisées dans le spectre de l'optique (McNairn et Brisco, 2004).

Dans les travaux de Chen et Lin (2005), les images ASAR (polarisation HH et VV) sont utilisées pour estimer l'indice LAI (Leaf Area Index), en vue de mesurer la croissance et par la suite la production du riz à partir du modèle MIMICS (*Michigan Microwave Canopy Scattering*), un modèle semi-empirique de rétrodiffusion développé pour prévoir la rétrodiffusion des peuplements forestiers (Ulaby et al., 1990). Pour cartographier le riz, Chen et al. (2007) ont classifié trois images ASAR (mode APS, polarisation VV et VH) par la méthode Wishart (Lee et al., 1999) de classification supervisée.

Malgré qu'il n'y ait pas beaucoup de publications touchant spécifiquement l'apport des données PALSAR/ALOS, TerraSAR-X, RADARSAT-2 et polarimétriques pour la surveillance et la cartographie des rizières, McNairn et al. (2000), Van der Sanden (2004), McNairn et Brisco (2004) et Touzi et al. (2004) ont anticipé une grande potentialité d'application en agriculture pour ce type de données dès le début des années 2000. Les travaux de l'équipe d'Oh et al. (2009),

portant sur les coefficients de rétrodiffusion des champs de riz inondés en bandes L- et C et en polarisations VV, HH, HV et VH, ont permis de démontrer la capacité des données polarimétriques pour estimer la croissance du riz. En utilisant les données double polarisation (HH et VV) de TerraSAR-X, Lopez-Sanchez et al. (2011) ont montré une corrélation significative entre le rapport de polarisation HH/VV en bande X et les phases végétative et reproductive du riz, comme d'autres l'avaient fait pour la bande C. La valeur de rétrodiffusion augmente de 0 à 10 dB durant la phase végétative et diminue ensuite durant la phase reproductive. Torbick et al. (2011) ont intégré des données PALSAR et MODIS pour détecter et suivre les champs de riz durant la période inondée, dans la vallée de Sacramento (Californie, États-Unis). Afin d'estimer la production de riz dans le contexte de la sécurité alimentaire et d'évaluer les impacts environnementaux des écosystèmes du riz comme la consommation d'eau, la dégradation du sol et l'eutrophisation des cours d'eau dans le delta du fleuve Yangtze (Chine), Zhang et al. (2011) ont identifié les rizières en utilisant des images en polarisation double PALSAR/ALOS en bande L.

L'analyse de l'évolution des méthodes montre une tendance à l'utilisation des données SAR dans des applications en agriculture, en général, et pour la surveillance des rizières, en particulier.

Examinons maintenant les études faites au Vietnam, le deuxième pays exportateur mondial de riz et le cinquième parmi les plus gros consommateurs de riz au monde. Il est aussi le cinquième producteur au monde, avec environ 5,74 % de la production mondiale en 2010 (FAOSTAT, 2012). Le grenier du riz vietnamien se trouve dans le delta du Mékong au Sud du pays. Néanmoins, le delta du fleuve Rouge, où le bassin versant de la rivière Càu est situé, représente le deuxième pôle de production du riz du Vietnam. Il est donc le principal fournisseur de riz pour le Nord, bien que la production de riz provenant de cette région soit faible par rapport à celle du Sud du pays. Pour cette raison, la plupart des recherches et des applications de la télédétection pour suivre et estimer la production du riz se sont surtout concentrées sur la région du Mékong. En utilisant une série d'images SAR d'ERS-2, Liew et al. (1998) ont délimité et cartographié la répartition spatiale des différents systèmes de culture du riz. Le travail de Pham et al. (2003) s'est intéressé à la cartographie du riz afin de comprendre la relation entre la distribution spatio-temporelle du riz et les terres agricoles disponibles dans le delta du Mékong par l'utilisation des images RADARSAT-1. Le projet de Lam-Dao et al. (2005, 2007), de même que celui de Bouvet et al. (2009), a ouvert la voie aux méthodes opérationnelles d'observation,

d'estimation de la production et de suivi des cultures de riz (à An Giang) à l'aide du SAR d'ERS-2 et de l'ASAR d'ENVISAT.

Par contre, les études sur les cultures au Nord du Vietnam sont peu nombreuses. À notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude portant sur la télédétection comme outil d'aménagement agricole dans le delta du fleuve Rouge à l'aide d'images SPOT, réalisée par Nguyen et al. (1994). Au cours d'une période de cinq ans (1998-2002), le programme SAM (Systèmes Agraires de Montagne), un grand programme de coopération entre le *Vietnam Agricultural Science Institute (VASI)*, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), l'*International Rice Research Institute (IRRI)* et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), a porté sur les changements de l'utilisation du sol et les stratégies de subsistance des agriculteurs dans la province de Bac Kan (Castella et Dang, 2002). De plus, il n'y a pas de travaux dans la littérature portant sur l'observation et le suivi des rizières au Nord du Vietnam en utilisant des données SAR de RADARSAT-2, multi-polarisation ou polarimétriques.

En résumé, les recherches antérieures nous ont permis de constater tout d'abord l'efficacité de la télédétection (optique et microonde) dans le domaine du suivi et de la détection des rizières. Ensuite, on constate que les données optiques sont moins utilisées que les données SAR à cause de la présence persistante des nuages en région tropicale. Les données multi-spectrales de haute résolution, comme celles des satellites QUICKBIRD (2,4 - 2,8 m), IKONOS (4 m), GEOEYE-1 (1,65 m) et RAPIDEYE (5 m), sont utiles pour la détection des types de végétation (Xie et al. 2008), mais la petite taille et le prix d'une scène de ce type de données limitent leur application à l'échelle régionale. De plus, les indices de végétation et d'eau sont souvent calculés sur des images optiques issues de fréquences d'observation de l'ordre de la dizaine de jours (8 à 10 jours pour MODIS ou SPOT/VGT). Cette fréquence est insuffisante pour s'assurer de détecter le comportement spectral spécifique de la phase d'inondation, qui dure entre 5 et 15 jours en général (Bouvet, 2009). Par contre, les données radar présentent l'avantage d'être sensibles aux stades de croissances du riz et permettent un suivi temporel des rizières tout au long des saisons (capteur tout temps). On a remarqué aussi l'absence de travaux concernant le suivi et la détection des rizières au Nord du Vietnam. Pourtant la topographie, le type de riziculture et les habitudes de culture au Nord de ce pays sont intrinsèquement différents par rapport au Sud. Ce sont des raisons qui nous ont orientées à nous consacrer à la télédétection radar pour identifier les rizières du bassin versant choisi.

2.2.4 Méthodes et techniques de traitement des images SAR en vue de la cartographie des champs de riz

Il existe plusieurs méthodes et techniques de traitement des images SAR pour identifier et cartographier les rizières. Les outils employés dépendent des types d'images utilisées et du produit à développer. Néanmoins, la technique de seuillage du rapport d'images et les classifications sont les méthodes les plus utilisées (McCloy et al., 1987; LeToan et al., 1989 et 1997; Okamoto et Fukuhara, 1995; Bouvet et al., 2009).

a. Les techniques de seuillage

Depuis quelques années, des recherches se développent pour élaborer des méthodes destinées à la cartographie des champs de riz, spécifiquement adaptées aux images radar. Ces méthodes se basent sur les travaux antérieurs de Korusu et al. (1995) et de LeToan et al. (1997) et s'orientent vers le potentiel de l'utilisation de données multi-polarisation et polarimétriques en agriculture, comme les travaux de Ferro-Famil et Pottier (2001), de Davidson et al. (2002), de Chen et al. (2007), Tan et al. (2007) et de Wu et Chen (2007).

Selon ces méthodes, une analyse des images est d'abord effectuée afin de bien comprendre la dynamique de la variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0) des rizières ainsi que des autres types d'occupation du sol. Cette analyse est un point clé pour détecter les rizières à partir d'images SAR, puisque le riz a un comportement de rétrodiffusion temporel spécifique qui est différent de celui des autres cultures (Chen et al., 2007). Cette étape va donc aider au choix d'un seuil de rétrodiffusion pour identifier les rizières dans l'étape suivante. En fait, cette étape est l'approche traditionnelle du suivi des rizières (Korusu et al., 1995; Ribbles et LeToan, 1999). La détermination des seuils dans ce cas se base sur la variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion d'une série d'images en polarisation simple comme celles d'ERS-1,2 (C-VV) ou de RADARSAT-1 (C-HH).

La division d'images (rapport d'images) est une méthode connue comme une des méthodes de détection des changements (Mas, 2000; Lu et al., 2004). Toutefois, dans le domaine du suivi des rizières, la division d'image, est considérée une méthode de traitement d'images qui permet de fournir l'information la plus importante pour la cartographie des rizières (Le Toan et al., 1997). En divisant, pixel à pixel, deux images prises à deux dates différentes, cette méthode permet de produire une image de changement qui représente le rapport de l'intensité des objets. Dans les zones non changées, ces rapports sont de 1, alors que celles où il y a des changements

présentent des valeurs soit supérieures ou soit inférieures à 1. Dépendant de la période d'acquisition des deux images SAR, les valeurs du rapport de rétrodiffusion peuvent identifier des stades particuliers de la croissance du riz. Les valeurs négatives correspondent à la période qui va du semis à la maturité et celles positives indiquent la période allant de la fin d'un cycle au début du prochain cycle (LeToan et al., 1997). Finalement, en regardant le calendrier agricole et la dynamique de la variation du coefficient de rétrodiffusion, un seuil (\pm dB) est défini afin d'identifier les pixels riz / non-riz à partir du rapport d'images et de créer une carte des rizières.

La division s'effectue donc sur une paire d'images. Ces images sont acquises soit toutes les deux durant le même cycle de croissance, ou soit une à la fin d'un cycle et l'autre au commencement d'un autre cycle, d'une polarisation ou de deux polarisations. LeToan et al. (1997) ont utilisé des images en polarisation VV d'ERS-1 (5,3 GHz). En se basant sur leur méthode, Ribbes et LeToan (1999) ont réalisé leur étude sur deux séries d'images RADARSAT-1, polarisation HH, mode standard (S1) et mode fin (F3). En comparant leurs résultats avec la carte existante, ils ont obtenu une précision de 88 % sur l'identification des rizières. Tandis que Lam-Dao et al. (2007) et Bouvet et al. (2009) ont développé une approche basée sur le rapport de deux polarisations, HH/VV, d'images ASAR/ENVISAT en double polarisation. Ainsi, une technique de seuillage sur le rapport d'images a été développée en vue de décider si un pixel appartient à la classe riz ou non-riz. Une observation de la variation du coefficient de rétrodiffusion du riz sur les images ratio HH/VV a été réalisée par Lopez-Sanchez et al. (2011). Cette recherche a montré que le comportement de l'image ratio HH/VV de TerraSAR-X est très similaire à celui de l'image ratio HH/VV mesuré en bande C d'ASAR/ENVISAT dans la recherche de Bouvet et al. (2009), mais que la dynamique est plus grande en bande X. À partir d'images du capteur PALSAR (bande L, polarisation HH, mode FBS/D - *fine-beam single/dual*), Torbick et al. (2011) ont déterminé les seuils afin d'identifier les rizières. Pour chaque champ de riz délimité à partir du FBS, le statut inondé ou non (les pixels eau et non-eau) a été extrait à partir d'images ScanSAR multi-temporelles. Toutefois, puisque le cycle de répétition de PALSAR est de 46 jours, des images MODIS composites sans nuages (à l'intervalle de 8 jours à partir d'observations à la fois des satellites Terra et Aqua) ont été intégrées pour permettre de suivre les rizières tout au long de l'année. Les champs inondés ont été extraits d'images MODIS par un seuil basé sur la relation des indices LSWI (*Land Surface Water Index*) et EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Ces indices sont calculés à partir des bandes visibles (bleu, rouge) et infrarouges (proche infrarouge et infrarouge court) d'images MODIS. Les résultats de cette recherche montrent une précision de 96 % pour la classification des rizières (en comparant avec les données de référence utilisées).

Une autre approche a été développée par l'équipe de Liew et al. (1998). Cette méthode se base sur la classification de l'indice de changement (CI). Cet indice consiste en un rapport d'images dérivé d'une série d'images ERS-2 multi-temporelles. Dans cette étude, le seuillage a été appliqué sur les CI. Lorsqu'un pixel satisfait les conditions du seuil, il est classifié dans une des trois classes qui indiquent le changement de rétrodiffusion : augmentation, diminution ou constance. Ces classifications basées sur le seuillage ont été utilisées pour créer une carte de changement, le nombre de classes identifiées, s , étant une fonction en puissance (a^n) de deux grandeurs : le nombre d'images classifiées (n) et le nombre de classes (a). Finalement, pour créer la carte thématique des récoltes de riz, les classes de changement qui avaient une rétrodiffusion temporelle similaire ont été groupées dans une catégorie thématique, en mettant l'accent sur le système de culture de riz.

Ces méthodes montrent la capacité à identifier les rizières, sur la base d'images SAR comme celles d'ERS-1 ou 2, d'ASAR/ENVISAT ou de RADARSAT-1. Les facteurs affectant la précision de la méthode sont la dimension des rizières, la topographie, les effets du vent et les pratiques agricoles dans les champs non inondés (LeToan et al., 1997; Liew et al., 1998). La fréquence de répétition des orbites influence également le résultat puisque certaines phases de croissance prennent environ 27 à 35 jours; on risque donc de perdre des informations lorsque le cycle de répétition des orbites est long (ex : 35 jours pour le capteur ENVISAT).

Ces types de méthodes de seuillage ont aussi été appliqués sur des images optiques. Toutefois, au lieu du coefficient de rétrodiffusion, ces études ont examiné la variation des caractéristiques spectrales de la réflectance des rizières comme, par exemple, avec l'algorithme développé par l'équipe de Xiao et al. (2005, 2006). Afin de détecter et de distinguer les champs inondés et les rizières en Chine, les auteurs ont élaboré une méthode qui se base sur la variation de la valeur spectrale des bandes indices pendant les périodes d'inondation des champs et de repiquage. Ces indices comprennent : NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), LSWI et EVI. Ils ont été calculés à partir des valeurs de réflectance de la surface provenant des bandes bleue, rouge, proche infrarouge (841-875 nm) et moyen infrarouge (1628-1652 nm) d'images MODIS de dates différentes. L'hypothèse de cette méthode est que l'inversion temporaire des indices de végétation, où la valeur de LSWI est soit proche de ou supérieure aux valeurs de NDVI ou d'EVI, peut correspondre aux champs au moment de l'inondation et du repiquage. L'analyse de la dynamique temporelle de l'indice LSWI durant la période d'inondation des champs et du repiquage en utilisant une technique de seuillage, liée à l'indice NDVI et EVI, permet d'identifier les pixels inondés et les rizières. Des données auxiliaires (le calendrier du cycle agricole, un

modèle numérique de terrain) ont aussi été utilisées afin d'établir la carte finale. Malgré les résultats obtenus, il existe certaines sources d'erreur qui sont inhérentes aux capteurs optiques, comme la contamination par les nuages, les effets topographiques et les limites de résolution (Xiao et al., 2006).

La synthèse de la littérature a montré l'efficacité des techniques de seuillage appliquées sur les images radar, particulièrement celles se basant sur le rapport d'images, puisqu'elles permettent d'obtenir plus d'information sur les rizières.

Pour cette raison, afin d'identifier les rizières du bassin versant de la rivière Càu une méthode de seuillage a été choisie. Pour adapter la méthode à la complexité de l'occupation du sol sur bassin étudié, par rapport aux travaux précédemment publiés, la détermination des seuils dans notre cas ne s'est pas basée sur la variation du coefficient de rétrodiffusion d'un seul rapport d'images (une seule image de référence) mais de plusieurs rapports d'images, en polarisation HH pour des images RADARSAT-2 en mode standard.

b. Méthodes de classification

La classification de l'occupation du territoire devient une des applications importantes des images SAR, particulièrement de la polarimétrie SAR (Lee et Pottier, 2009), puisque les données composant les images polarimétriques contiennent des entités différentes des autres ensembles de données en télédétection, et compte tenu du fait que ces entités sont associées à des propriétés physiques du sol qui sont particulières. Divers algorithmes de classification pour les données polarimétriques ont été proposés (CCT, 2008). Plusieurs algorithmes ont été développés pour la classification supervisée et non supervisée, comme par exemple, la distribution Gaussienne (Lillesand et al., 2004), la C-moyenne floue (Dunn, 1974; Bezdek et al., 1984), la distribution de Wishart complexe (Lee et al., 1999), etc. L'application d'un algorithme ou d'un autre varie selon les différents domaines de recherche et aussi selon les avantages apportés par chaque algorithme. Nous présentons quelques méthodes utilisées régulièrement dans les applications en agriculture, particulièrement en rapport avec la cartographie des types de culture comme celle du riz : le maximum de vraisemblance (Davidson et al., 2002), la distribution de Wishart complexe (Chen et al., 2007; Wu et Chen, 2007), la décomposition des paramètres Entropie/Anisotropie/Alpha ($H/A/\alpha$) et le SVM- Support Vector Machine (Ferro-Famil et Pottier, 2001; Tan et al., 2007). Ces méthodes se basent sur les statistiques des caractéristiques des données SAR et sur le mécanisme physique de la diffusion. La matrice de

diffusion (S), la matrice de covariance (C) et la matrice de cohérence (T) jouent un rôle important puisque toute l'information polarimétrique est contenue dans ces matrices (Lee et Pottier, 2009).

Le maximum de vraisemblance, une méthode de classification supervisée, présuppose que les statistiques des sites d'entraînement de chaque classe suivent une distribution gaussienne. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas, et en particulier pour le radar. L'algorithme utilise les statistiques des sites d'entraînement pour calculer la probabilité d'appartenance du pixel à une classe. Une fois la loi probabiliste est formulée le pixel est affecté à la classe qui offre la probabilité la plus élevée (Caloz et Collet, 2001).

La méthode du maximum de vraisemblance a été développée pour l'image polarimétrique mono-visée. Dans la plupart des cas en télédétection radar, on obtient cependant des données multi-visées pour réduire les effets du bruit sur les images, le *speckle* (tavelures). Des algorithmes ont donc été mis au point pour les images polarimétriques multi-visées. C'est le cas des algorithmes comme celui de la distribution de Wishart complexe, des décompositions ou du SVM, etc. Le détail de ces méthodes est décrit dans Cloude et Pottier (1997), Ferro-Famil et Pottier (2001), Tan et al. (2007) et Lee et Pottier (2009). Parmi ces méthodes, celle de la décomposition Entropie/Alpha (H/α ou $H/A/\alpha$) sont les méthodes les plus utilisées pour les données polarimétriques (Lardeux et al., 2006). Le SVM est aussi un outil populaire, qui a été essentiellement appliqué sur les données de télédétection radar, en général, et polarimétriques, en particulier, pour la classification et la détection (Zhang et al., 2010; Lardeux et al., 2006).

En 1997, Cloude et Pottier ont proposé une méthode de classification non supervisée utilisant un plan 2-D H/α . Cette méthode de classification est liée aux caractéristiques physiques de la diffusion. Le plan H/α (Figure 2.8) est une représentation utile de l'information contenue dans la matrice de cohérence, puisque H et α sont tous deux des invariants, quelle que soit la base de polarisation utilisée (Lee et Pottier, 2009). L'entropie (H) est un paramètre qui indique le type de cible impliquée dans l'image et le nombre de mécanismes de diffusion dominants ($H \sim 0$: mécanisme de diffusion unique, $H \sim 1$: mécanismes de diffusion multiples). L'angle alpha (α) indique le type de diffusion qui domine l'image ($\alpha = 0^\circ$: diffusion de surface, $\alpha = 45^\circ$: diffusion de volume; $\alpha = 90^\circ$: diffusion double rebond).

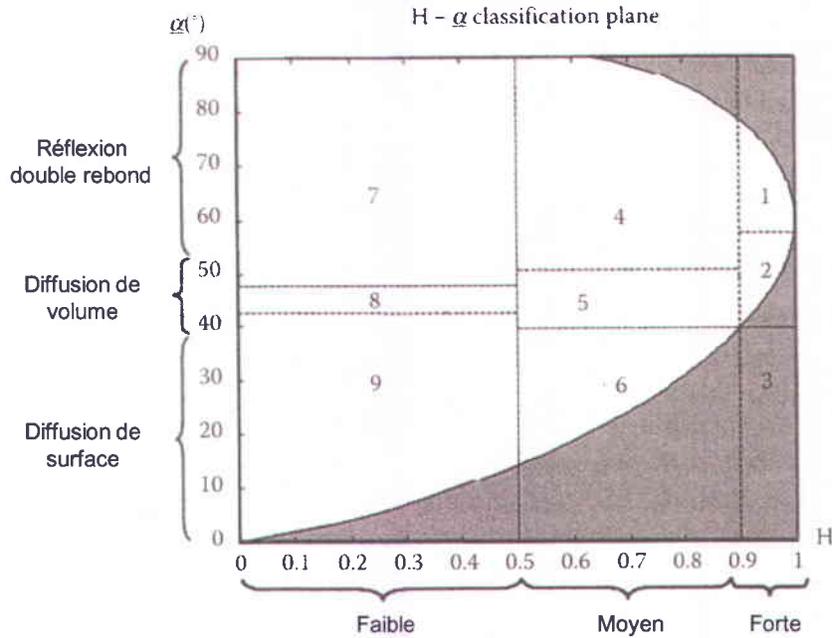


Figure 2.8: Plan H/ α (tiré de Lee et Pottier, 2009)

Le plan H/ α est subdivisé en neuf zones caractéristiques de différentes classes de diffusion afin de séparer les données selon les mécanismes de base de la diffusion. L'explication détaillée de ces zones est présentée dans Cloude et Pottier (1997) et Lee et Pottier (2009). En bref, les différentes zones représentent (1) : la double réflexion dans un environnement fortement entropique; (2) : la diffusion multiple, fortement entropique (tel que pour le couvert forestier); (3) : fortement entropique de la surface de diffusion (région non-réalisable du plan, dans cette région il est impossible de distinguer la diffusion quand l'entropie $H > 0,9$); (4) : la diffusion multiple, d'entropie moyenne; (5) : la diffusion dipolaire (par la végétation), d'entropie moyenne; (6) : la diffusion de surface, d'entropie moyenne; (7) : la diffusion multiple, faiblement entropique (réflexion double ou paires); (8) : la diffusion dipolaire, faiblement entropique; et (9) : la diffusion de surface (très lisse), faiblement entropique.

La méthode SVM (Machine à Vecteurs de Support ou encore Séparateur à Vastes Marges), quant à elle, se base sur la théorie statistique de l'apprentissage. Elle délimite deux classes en mettant un hyperplan séparateur optimal dans un espace multi-dimension (Mermoz et al, 2009). La méthode est basée sur la transformation de l'espace de représentation des données d'entrée (Boser et al., 1992; Cortes et Vapnick, 1995). En fait, l'hyperplan optimal est défini comme l'hyperplan qui maximise la distance entre l'hyperplan séparateur et les échantillons les plus proches. Dans les cas où les données d'entrée ne sont pas linéairement séparables, le SVM va

transformer l'espace de représentation des données en un espace multi-dimension dans lequel il est probable qu'il existe un séparateur linéaire (Tan et al., 2007; Mermoz et al., 2009; Plaza et al., 2009; Kavzoglu and Colkesen, 2009).

Le SVM a récemment été utilisé pour de nombreuses applications de la télédétection. Selon la synthèse de Mountrakis et al. (2010), le SVM a été appliqué dans plusieurs domaines et pour plusieurs capteurs. Parmi les capteurs les plus utilisés, les capteurs multi-spectraux sont dominants. Il s'agit presque d'une égale utilisation entre les capteurs de haute et moyenne résolution, essentiellement liée à une forte préférence pour les images IKONOS et LANDSAT et aussi pour les capteurs aéroportés de haute résolution.

Dans le domaine de la végétation / agriculture, le SVM a montré son efficacité. Gualtieri et Cromp (1998) ont évalué la performance du SVM dans la classification de la végétation en utilisant l'imagerie hyperspectrale AVIRIS. Les résultats ont indiqué que, sur le même ensemble de données, le SVM montre sa supériorité par rapport aux classificateurs développés antérieurement (Euclidienne, bLOOC+DAFE_ECHO (Tadjudin et Langrebe, 1998). Keramitsoglou et al. (2006) ont testé deux algorithmes de SVM, dont le SVM-KRC (*Kernel-based spatial Re-Classification*) et le SVM-RBF (*Radial Basis Function*), pour la cartographie des types de végétation, appliqués aux images IKONOS. Ils ont constaté que le SVM-RBF a un peu mieux performé que le SVM-KRC pour cette application. Une étude de Huang et al. (2008a) a utilisé des images LANDSAT TM/ETM+ afin de développer une solution automatisée à la détection des changements de la couverture forestière. L'évaluation approfondie de la classification sur plusieurs sites a indiqué une précision d'environ 90 %. En utilisant aussi des images captées par LANDSAT TM/ETM+, entre 1988 et 2007, Kuemmerle et al. (2009) ont appliqué l'algorithme SVM pour détecter les changements de la couverture forestière (forêt / non-forêt) et l'exploitation forestière illégale dans les Carpates Ukrainiennes. Toutefois, aucune évaluation quantitative de la performance de la classification n'a pu être faite. Pour classifier la végétation tropicale dense en utilisant des données, SAR Lardeux et al. (2009) ont aussi utilisé le SVM. La classification SVM s'est avérée plus précise de 20 % environ que l'approche de classification Wishart. Ils ont souligné le SVM performe mieux que l'approche Wishart lorsque les valeurs enregistrées ne suivent pas la distribution statistique de Wishart. Finalement, l'équipe de Tan et al. (2007) a utilisé cette méthode pour classifier des rizières à partir d'images SAR multi-temporelles. En effet, ils ont développé une méthode de combinaison (EDSVM) impliquant la décomposition entropie (H) et le SVM et l'ont comparée avec les classifications par SVM et le maximum de vraisemblance. La précision obtenue pour la classification des rizières

par chaque méthode est respectivement de 92,3 % (EDSVM), 74,63 % (SVM) et 67,66 % (maximum de vraisemblance).

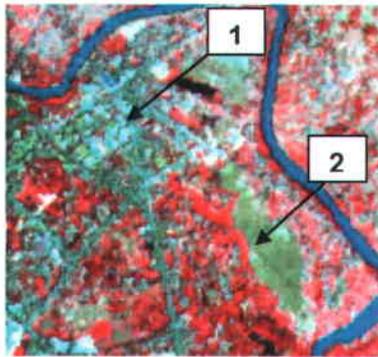
Les travaux précédents ont montré l'efficacité de l'approche pour classifier l'occupation du sol en général et la végétation en particulier. Dans le cas du bassin versant étudié, tel que mentionné, l'occupation du sol est morcelée et les données d'entrée ne sont pas linéairement séparables, l'application des méthodes traditionnelles de classification (comme par exemple le Maximum de vraisemblance) reste limitée due à la distribution normale de la signature des classes (Huang et al., 2002). C'est donc l'approche de la classification SVM que nous allons privilégier pour la classification des rizières à partir des données multi-polarisation et polarimétriques RADARSAT-2 du bassin versant d'étude.

2.2.5 Classification orientée-objets : une approche efficace pour la classification des zones complexes

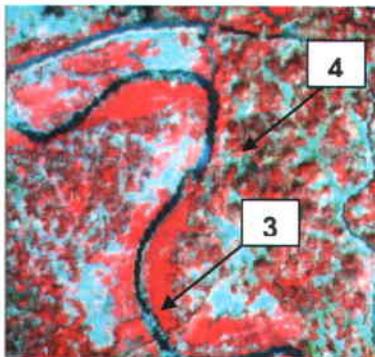
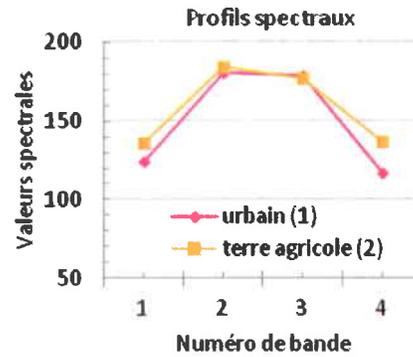
Sur une image de résolution moyenne, comme celles de LANDSAT TM (28,5 m), d'ETM+ (30 m) ou bien HRVIR de SPOT-4 (20 m), on trouve des signatures similaires pour des types d'objets différents, comme entre le milieu urbain et les terres agricole (sans récolte) ou entre les différents types de végétation. La Figure 2.9 montre un exemple de confusion entre le milieu urbain et le milieu terre agricole sans récolte (a), ainsi que la similitude des signatures spectrales entre les différents types de végétation, comme celles des plantations et des cultures vivrières en saison sèche (b). Visuellement, on remarque que le milieu urbain et les terres agricoles s'affichent sur l'image multi-spectrale de SPOT-4 (composition en fausses couleurs Rouge = X11; Vert = X12; Bleu = X13) par une même gamme de couleur. Leur graphique de valeur spectrale (Figure 2.9a) montre un comportement similaire sur quatre bandes spectrales. Il est difficile de séparer l'une et l'autre classe en bande 2 et 3. La Figure 2.9b présente le même phénomène entre les plantations et les cultures vivrières, particulièrement la similitude de leur signature sur les bandes 3 et 4.

Pour diminuer ce problème, on pourrait utiliser des images de haute résolution comme celles de QUICKBIRD, d'IKONOS et de SPOT-5. Néanmoins, en raison des limites mentionnées à la section 2 (couverture nuageuse, coût d'achat élevé), ces images ne peuvent être considérées comme un système opérationnel pour un grand bassin versant.

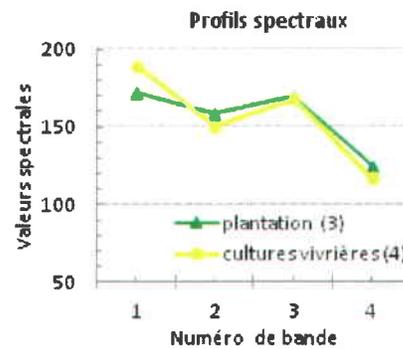
Dans ce cas, il est important de choisir une méthode de classification adéquate pour classifier les images de résolution moyenne comme les images HRVIR de SPOT-4 (20 m de résolution).



a)



b)



Composite RVB = XI1, XI2, XI3 d'images SPOT-4

Figure 2.9 : Confusion des signatures spectrales dans quatre bandes optiques pour des objets différents : a) Milieu urbain et terre agricole, b) Plantations et cultures vivrières

Les méthodes de classification traditionnelles ont été développées dans les années 70, après le lancement du satellite LANDSAT en 1972 (Blaschke et Strobl, 2001), et elles se basent sur l'analyse statistique des pixels individuels. Les algorithmes classiques sont K-Moyenne et ISODATA, pour la classification non supervisée, et le maximum de vraisemblance, pour la classification supervisée (Caloz et Collet, 2001; Jensen 2005). Ils sont régulièrement utilisés dans la classification de l'utilisation / occupation du sol (Xie et al., 2008; Riggan et Weih, 2009; Weih et Riggan, 2010). Le principe de ces algorithmes est l'analyse des propriétés spectrales de chaque pixel à l'intérieur de la zone d'intérêt, sans tenir compte des informations spatiales ou contextuelles concernant le pixel d'intérêt. Les méthodes qui se basent sur ce principe sont appelées méthodes de classification à base de pixel (*pixel-based*) ou pixel par pixel. Elles sont utiles pour la classification d'une occupation du sol homogène. Toutefois, ces méthodes traditionnelles ne sont pas souvent efficaces dans les zones d'utilisation complexe (Xie et al., 2008; Riggan et Weih, 2009). Cela a été aussi mentionné dans les travaux précédents du

VTGEO (2004a, 2004b), portant sur la cartographie de l'occupation du sol de la banlieue de Hanoi et des zones montagneuses au Nord du Vietnam. La confusion des signatures spectrales pour différents types d'objets est une des contraintes que l'on rencontre dans la classification d'images en utilisant la méthode traditionnelle. Ces confusions peuvent, à des degrés divers, rendre l'identification des objets plus difficile, diminuer les performances des méthodes d'extraction d'objets (pixels erronés), et donc donner des résultats moins précis (Hoang, 2007). L'apparition de la méthode de classification orientée-objets a contribué à régler certains problèmes causés par la classification pixel par pixel (Baatz et Schäpe, 2000; Whiteside et Ahmad, 2005). Plusieurs études portant sur la comparaison entre la méthode de classification à base de pixel et celle orientée-objets ont indiqué que la classification orientée-objets permet d'obtenir une meilleure classification. En réalisant la carte de l'occupation du sol d'une région du Territoire du Nord de l'Australie, Whiteside et Ahmad (2005) ont appliqué la méthode de la classification par maximum de vraisemblance et la classification orientée-objets sur les bandes visibles et proche infrarouge d'images ASTER. Malgré des confusions dans les différents types de forêt, la précision de la classification orientée-objets (78 %) est meilleure que celle de la classification par maximum de vraisemblance (69,1 %). Ils ont noté aussi que l'orientée-objets permet de régler certains des problèmes rencontrés en utilisant des méthodes à base de pixels pour classer les types d'occupation hétérogènes alors qu'il est évident que la classification à base de pixels réussit à classer la couverture du sol de nature homogène, comme la forêt à canopée fermée. Tout comme Whiteside et Ahmad (2005), Yan et al. (2006) ont appliqué la classification par maximum de vraisemblance et l'orientée-objets sur des images ASTER (15 m de résolution) pour la cartographie de l'occupation du sol d'une zone de feux de charbon (*coal fire area*). La précision globale de la méthode orientée-objets est 77 %, supérieure à celle obtenue par le maximum de vraisemblance. Une autre étude en Australie, d'un milieu urbain de la Nouvelle-Galles du Sud, de Syed et al. (2005), a indiqué que la classification orientée-objets est plus flexible et précise que celle à base de pixels. Une autre comparaison des classifications, faite par Mantinfa et al. (2007) en utilisant des images LANDSAT ETM+, a montré que la précision de la classification orientée-objets (91 %) est meilleure. En appliquant cette méthode de classification sur des images SPOT-5 de haute résolution (10 m), Riggan et Weih (2009), Chen et al. (2009) et Weih et Riggan (2010) en sont venus à la même conclusion : la méthode de classification orientée-objets a un grand avantage par rapport aux méthodes traditionnelles, en fournissant la possibilité de combiner des informations spatiales et spectrales dans la classification. Cela permet d'améliorer la précision de la classification.

Quelle est l'approche de la classification orientée-objets? Le détail de cette approche sera décrit dans le chapitre portant sur la méthodologie. En bref, l'idée de base de la méthode est d'opérer la classification non pas sur des pixels, mais sur des groupes de pixels homogènes (régions). Les éléments de base de l'analyse orientée-objets sont des objets ou des segments d'image (un groupe de pixels) et non le pixel isolé. Autrement dit, l'approche orientée-objets se base sur l'hypothèse selon laquelle l'information sémantique nécessaire à l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans les pixels individuels, mais dans des objets d'image significatifs et leurs relations mutuelles (Definiens Imaging, 2004; Hofmann, 2001; Baatz et Schäpe, 2000). Cette méthode divise une image en régions ou entités homogènes. Elle tient compte non seulement des caractéristiques spectrales des pixels, mais également des notions de forme, de texture et de voisinage dans le processus de classification, tel que mentionné dans les travaux de Jensen (2005), de Riggan et Weih (2009), de Chen et al. (2009), de Weih et Riggan (2010) et de Robertson et King (2011). Elle s'effectue selon deux phases principales (Willhauck et al., 2000; Jensen, 2005). La première est la création des régions individuelles, ou le groupement des éléments d'image selon certains critères d'homogénéité spectrale et spatiale, appelées segments. Ces segments sont considérés comme des objets totalement indépendants. Cette phase s'appelle la segmentation. La seconde est la classification (étiquetage) des segments à l'aide des attributs spectraux (moyenne des niveaux de gris de l'objet), spatiaux (forme, texture), structuraux (relation spatiale entre les objets) et d'autres variables géographiques (altitude, pente, exposition ou densité de population). Pour cette raison, cette méthode de classification est connue aussi sous le nom de classification contextuelle (Hoang, 2007).

Cette méthode de classification a été utilisée dans plusieurs recherches : détection de changement de l'occupation du sol (Gamanya et al., 2009; Dissanka et al., 2009; Hoang et al., 2007; Desclée et al., 2006; Blaschke, 2005; Walter, 2004; Hall et Hay, 2003), cartographie de l'occupation du sol (Xu et al., 2008; Lewinski et Zaremski, 2004; Mansor, 2002), détection des objets urbains (Kux et al., 2006; Hofmann, 2001), surveillance d'écosystèmes (Blaschke et al., 2001) et autres domaines. Elle se montre efficace pour classifier l'occupation du sol en utilisant des données satellite de moyenne et de haute résolutions, lorsqu'appliquée sur des régions où le paysage est fragmenté et hétérogène dans les zones agricoles et périurbaines (Walter, 2004; Whiteside et Ahmad, 2005; Weih et Regan, 2010). De plus, la classification orientée-objets donne un résultat plus réaliste (les classes classifiées se rapprochent des classes réelles) que celui de la classification pixel par pixel (Robertson et King, 2011). Ce qui ressort de tous ces travaux est la capacité de la méthode à mieux distinguer les différentes classes de l'occupation du sol, parce qu'elle permet de diminuer les confusions, de mieux distinguer les objets dans les

zones caractérisées par une intercalation de type côte à côte des différents types d'état de surface, comme c'est le cas dans le bassin de la rivière Càu, et donc d'obtenir un meilleur résultat.

Les avantages et l'efficacité de la méthode de classification orientée-objets sont des raisons qui nous ont orientés à l'appliquer sur notre région d'étude, où l'utilisation du sol est caractérisée par le morcellement.

2.3 Sommaire

Au Nord du Vietnam, le riz est principalement cultivé dans le delta du fleuve Rouge par irrigation. Il y a deux récoltes de riz par année. Entre deux récoltes, les agriculteurs profitent de ces champs pour planter des cultures à cycle court comme des haricots, des pommes de terre, du manioc, ou du maïs. Les plants de riz connaissent trois phases de croissance : végétative, de reproduction et de maturation. À chacune de ces phases, le plant affiche un aspect différent, lequel fait varier sa réponse spectrale tout au long de la saison de culture. De plus, les données collectées sur le bassin de la rivière Càu ont montré que les dates du repiquage et de récolte du riz varient dans le temps et l'espace en fonction de plusieurs facteurs tels que la météorologie, la qualité et le type de riz, la qualité du sol et du système d'irrigation ou les agriculteurs.

Parmi les applications de la télédétection spatiale, la cartographie des rizières et l'évaluation de la production rizicole est un vaste thème de recherche. Tant les données optiques que microondes ont été utilisées depuis les années 70. Cependant, les études sur les cultures au Nord du Vietnam sont peu nombreuses. À notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude portant sur la télédétection comme outil d'aménagement agricole dans le delta du fleuve Rouge à l'aide d'images SPOT, réalisée par Nguyen et al. (1994). De plus, il n'y a pas de travaux spécifiques sur le suivi et la détection des rizières au Nord du Vietnam qui ont été publiés. Pourtant la topographie, le type de riziculture et les habitudes de cultures au Nord sont intrinsèquement différents par rapport au Sud Vietnam, d'où l'intérêt et la spécificité de notre étude sur la cartographie des rizières du bassin versant de la rivière Càu.

En région tropicale, les données optiques sont moins utilisées que les données SAR à cause de la présence persistante des nuages et du dynamisme des cultures au cours de la saison de croissance. Même à la résolution spatiale de 8 m de FORMOSAT-2, Shiu et al. (2010) ont mentionné qu'il y a beaucoup d'erreurs de classification provenant de l'état divergent des rizières ainsi que de la texture similaire entre le riz et d'autres cultures. Par contre, les données

radar permettent un suivi tant en saison humide qu'en saison sèche (capteur tout temps) et présentent l'avantage d'être sensibles aux stades de croissance du riz. D'autre part, aucune étude n'a été recensée utilisant des données de RADARSAT-2 multi-polarisation ou polarimétriques, pour détecter et suivre les rizières au Vietnam. Ce sont ces raisons qui nous ont orientés à nous consacrer à la télédétection radar pour identifier les rizières du bassin versant choisi.

Concernant les techniques de cartographie des rizières, notre revue de littérature a montré l'efficacité des techniques de seuillage se basant sur un rapport d'images et appliquées aux images radar monopolarisation (HH ou VV). Pour s'adapter à la complexité de l'occupation du sol et à l'existence de différents stades de croissance en un temps donné dans le bassin de la rivière C  u, la d  termination des seuils dans notre cas ne sera pas bas  e sur la variation du coefficient de r  trodiffusion d'un seul rapport d'images mais sur plusieurs rapports d'images en polarisation HH pour des images RADARSAT-2 en mode standard (Chapitre 3). En ce qui concerne la classification des rizi  res    partir des donn  es multi-polarisation et polarim  triques de RADARSAT-2, nous avons privil  gi   l'approche de la classification SVM, qui s'av  re plus efficace que les algorithmes traditionnels (maximum de vraisemblance, Wishart).

Afin de cartographier l'occupation du sol complexe de tout le bassin versant, cinq images HRVIR de SPOT-4 de moyenne r  solution (20 m) ont   t   acquises par temps clair (co  t raisonnable, courte p  riode d'acquisition (deux orbites voisines)). Vu le morcellement du bassin versant, les avantages et l'efficacit   de la m  thode de classification orient  e-objets nous ont orient  s    l'appliquer. Cette m  thode divise une image en r  gions ou entit  s homog  nes. Elle tient compte non seulement des caract  ristiques spectrales des pixels mais   galement des notions de forme, de texture et de voisinage dans le processus de classification. Plusieurs   tudes portant sur la comparaison entre la m  thode de classification    base de pixel et celle orient  e-objets ont indiqu   que la classification orient  e-objets permet d'obtenir une classification globale plus pr  cise, diminue les confusions et distingue mieux les objets dans les zones caract  ris  es par une intercalation de type c  te    c  te des diff  rents types d'  tat de surface, comme c'est le cas dans le bassin de la rivi  re C  u.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre décrit la méthodologie pour obtenir une carte de l'occupation du sol, incluant les rizières, d'un bassin versant (objectifs 2 et 4) et celle pour classifier les rizières à l'échelle d'un sous-bassin à partir d'images SAR polarimétriques (objectif 3). Il introduit en premier le bassin versant de la rivière Cáu et les zones d'étude retenues sur ce bassin versant (3.1). Ensuite, il présente les données utilisées dans cette recherche (3.2). Par la suite, il décrit les étapes du traitement des images SPOT-4 (3.3) ainsi que les étapes du traitement des images RADARSAT-2 en double polarisation (3.4) et celles des images RADARSAT-2 polarimétriques (3.5). Finalement, il présente l'intégration des rizières dans la classification de l'occupation du sol (3.6) et l'estimation de l'impact des rizières sur le régime hydrologique (3.7).

3.1 Le bassin versant de la rivière Cáu

Cette section introduit le bassin versant de la rivière Cáu. Diverses zones d'étude ont été sélectionnées sur ce bassin pour nos travaux de recherche, dépendamment de l'objectif de recherche et de la disponibilité des données satellitaires. Ces diverses zones d'étude sont également présentées dans cette section.

3.1.1 Localisation géographique et caractéristiques naturelles

Le bassin versant de la rivière Cáu est situé au nord du Vietnam entre 21,07° et 22,18° de latitude nord et entre 105,28° et 106,08° de longitude est (Figure 3.1). Sa superficie totale est de 6 030 km²; il inclut le territoire (entier ou partiel) de six provinces au nord-est du Vietnam : Bac Kan, Thai Nguyen, Vinh Phuc, Bac Giang, Bac Ninh et Ha Noi. Avec une longueur de 288,5 km, la rivière Cáu est la plus grande, la plus importante dans le système du fleuve Thai Binh. Elle prend sa source sur le mont Van On (de la province de Bac Kan) à une altitude de 1 175 m, coule en direction sud et se déverse dans le fleuve Thai Binh près de la ville de Pha Lai. La rivière est alimentée par cinq principaux affluents qui sont, de l'amont vers l'aval, la rivière Cho Chu, la rivière Nghinh Tuong, la rivière Du, la rivière Công et la rivière Ca Lô. Celles-ci drainent environ 51,3 % de la superficie totale du bassin (Nguyen Viet Pho et al, 2001; ASTV et MST,

2003). Le bassin versant de la rivière Cáu est constitué de 68 sous-bassins de dimension variables. La densité de drainage est d'environ 0,95 km/km².

Le relief de ce bassin versant est complexe. Il va de la région montagneuse (en rouge sur la Figure 3.1), à une région au relief modéré, puis à la plaine. Cependant, les collines et les montagnes représentent la majorité de la superficie du territoire.

À cause de sa position géographique, la zone d'étude est soumise à un climat tropical humide de mousson caractérisé par deux saisons principales : l'hiver (de novembre à mars), froid et sec, et l'été (de mai à octobre), chaud, humide et pluvieux. Alternant avec ces deux saisons, les deux périodes de transition tombent aux mois d'avril et d'octobre. Les caractéristiques climatiques du bassin versant sont présentées à la Figure 3.2.

La température est différenciée par l'altitude et les saisons (ASTV et MST, 2003). En ce qui concerne l'altitude, les températures moyennes annuelles vont de 22,5°C à 23,5°C dans la plaine (< 100 m). Elles sont d'environ 20°C de 100 m à 500 m et varient entre 18°C et 19°C à 1 000 m. Les saisons amènent aussi un décalage de la température en fonction de l'altitude : en hiver, les températures moyennes varient de 12°C à 13°C et elles sont inférieures à 10°C entre 500 m et 1 000 m d'altitude. En été, à 100 m d'altitude, la température est souvent de 24°C. Les températures minimale et maximale annuelles peuvent être respectivement de -1°C à la province de Bac Kan et d'environ 40°C à la province de Bac Giang (Institut de la planification des ressources en eau (IWARP), 2003; ASTV et MST, 2003). L'humidité de l'air varie de 81 % à 87 % en moyenne annuelle. La Figure 3.2 montre que la province de Bac Kan et la région montagneuse de Tam Dao (Figure 3.1) sont les secteurs les plus humides.

Dans le bassin versant, les précipitations présentent une grande fluctuation à cause de la forte variation du relief. Les précipitations annuelles atteignent 1 500 à 2 700 mm (Figure 3.2). Parfois, celles-ci peuvent même atteindre 3 000 mm. C'est le cas, par exemple, dans la région montagneuse de Tam Dao. Les précipitations annuelles varient d'une province à l'autre du bassin, mais, en général, les précipitations sont surtout concentrées pendant les mois d'été, notamment les mois de juillet et d'août (Figure 3.3).

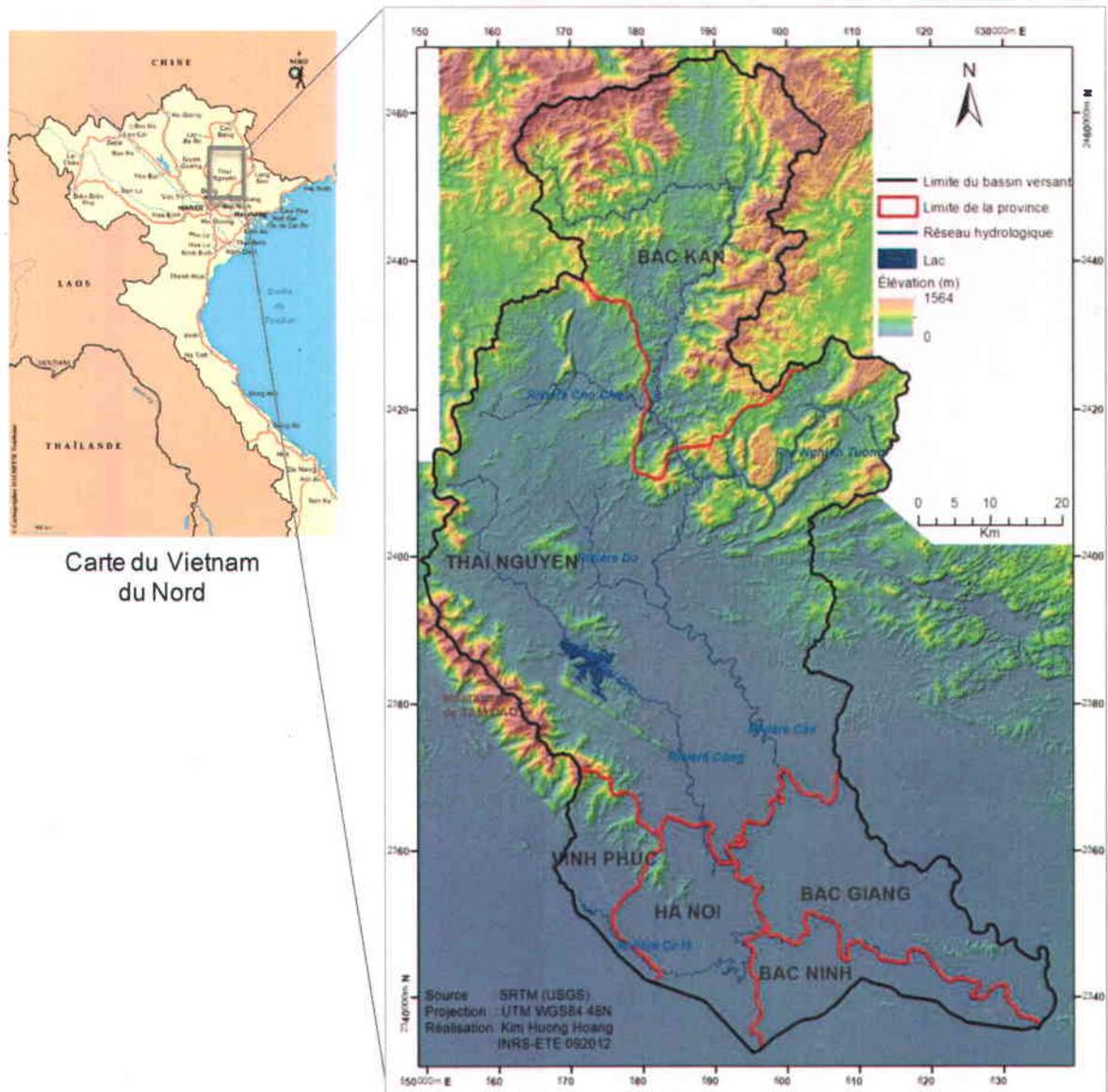


Figure 3.1: Représentation physiographique du bassin versant de la rivière Cáu illustrant ses cinq affluents et les zones montagneuses. L'encadré montre sa localisation au nord du Vietnam

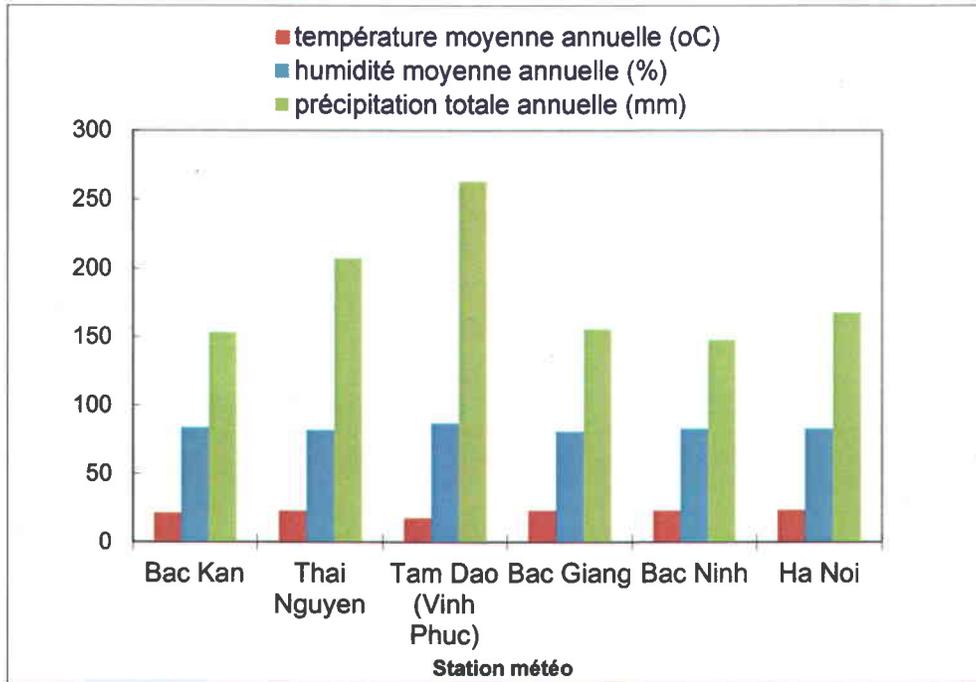


Figure 3.2: Moyennes annuelles des caractéristiques climatiques des provinces du bassin versant (Adapté d'IWARP, 2003; ASTV et MST, 2003)

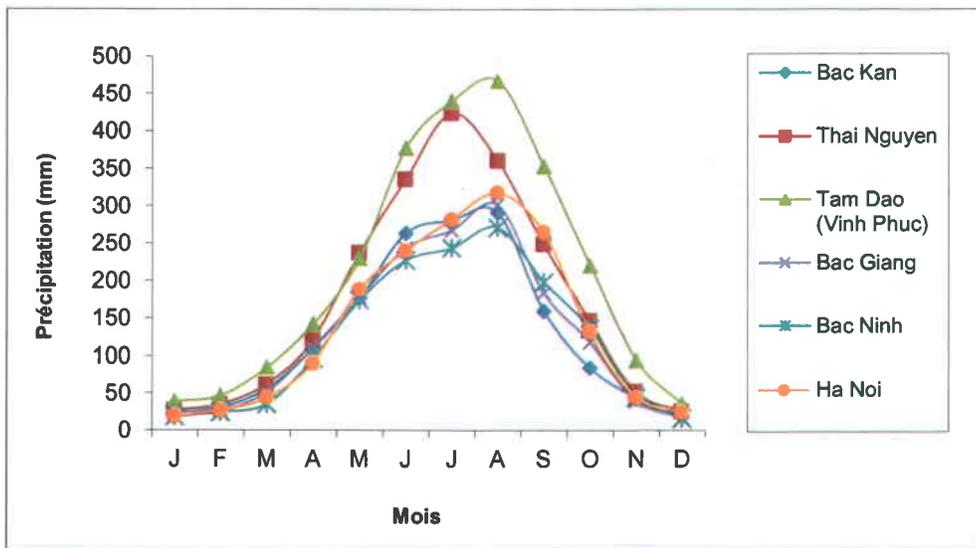


Figure 3.3: Précipitations moyennes mensuelles de six provinces du bassin versant (Adapté d'IWARP, 2003; ASTV et MST, 2003)

3.1.2 Régime hydrologique

Le bassin versant de la rivière Cáu est caractérisé par un réseau hydrographique complexe et de type dendritique. Il y a deux principaux sous-bassins, soit le bassin versant de la rivière Công

et celui de la rivière Ca Lô. Ces deux sous-bassins apportent environ 39,3 % du débit total de la rivière Càu. Sur tout le bassin versant, il y a 68 rivières et ruisseaux d'une longueur d'au moins 9 km qui totalisent, ensemble, 1 602 km.

Le régime hydrologique varie suivant deux saisons : la saison des pluies (la saison d'inondation) et la saison sèche (la saison de faible débit). Le commencement de la saison des pluies est le mois de juin, mais sa fin n'arrive pas en même temps sur tout le bassin. En effet, la saison des pluies se termine soit en septembre, soit en octobre, sur les différentes régions ou provinces du bassin versant. Elle finit même souvent plus tard dans les secteurs de la rivière Cồng et de la rivière Du. Durant cette saison (qui dure 3 ou 4 mois), le débit représente environ 80 % à 85 % du débit annuel total. Durant la saison sèche, d'octobre à mai (8 à 9 mois), le débit diminue; il ne compte que pour 20 % à 25 % du débit annuel total (APEV, 2005; ASTV et MST, 2003).

À cause de l'influence de différentes conditions météorologiques extrêmes (tempêtes tropicales, basse pression, etc.) et des activités humaines (coupes intenses de forêts pour les besoins en bois et en terres agricoles (brûlis), etc.), ce bassin versant devient un endroit susceptible de subir des crues importantes (APEV, 2005).

3.1.3 Ressources naturelles et caractéristiques environnementales

Le bassin versant de la rivière Càu est riche en ressources naturelles, y compris les forêts, l'eau, les minéraux, etc. Il y a plusieurs mines dans le bassin versant, soit des mines de fer, de zinc, de charbon, d'or, d'étain, etc. La couverture forestière moyenne dans l'ensemble du bassin versant est d'environ 45 %. Les éléments du paysage naturel dans le bassin ont considérablement changé au cours des dernières années. Il n'y a plus de forêt naturelle le long des rivières et des ruisseaux. Ceci réduit la capacité du sol à retenir l'humidité pendant la saison sèche et à prévenir les inondations en saison des pluies. La déforestation est aussi accompagnée du développement des activités socio-économiques comme l'industrialisation, l'exploitation des mines, les villages d'artisanat et l'agriculture, qui ont créé une pression élevée sur l'environnement naturel du bassin (MRE, 2006).

3.1.4 Zones d'étude

Pour développer la méthodologie de la classification orientée-objets, un sous-bassin versant situé en situation intermédiaire du bassin versant de la rivière Càu a été choisi, incluant la

plupart du territoire de la province de Thai Nguyen et une partie de la province de Bac Kan (Figure 3.4). La superficie de ce sous-bassin versant est de (4 432 km²), occupe environ 73 % de la superficie totale du bassin versant de la rivière C au. La raison pour laquelle nous avons choisi cette partie en amont du bassin versant dans notre étude est que la carte de l'occupation du sol produite servira   des simulations hydrologiques de ce sous-bassin faites dans le cadre du projet GIBVC en utilisant le modèle HYDROTEL. Aussi, en aval du bassin versant, le débit de la rivière C au est fortement influencé par les marées et le modèle HYDROTEL n'a pas été adapté pour pouvoir reproduire cette influence, d'où le retranchement de cette section du bassin versant des simulations.

La province de Thai Nguyen se situe   80 km au Nord de Hanoi, dans la région moyennement montagneuse du nord-est du Vietnam. Sa superficie est de 3 526 km². Gr ce   une position géographique favorable, cette province est reconnue comme l'un des centres socio-économiques et politiques du Viet Bac (la région au nord du Vietnam qui comprend les provinces Cao Bang, Bac Can, Lang Son, Thai Nguyen, Tuyen Quang et H  Giang), en particulier, et de la région montagneuse du nord et du centre, en général. Thai Nguyen est donc « la porte » pour les échanges socio-économiques entre la région et le delta du fleuve Rouge. On y trouve un riche potentiel de ressources minérales, ce qui est un avantage pour le développement de l'industrie métallurgique et minière. En ce qui concerne l'utilisation du sol, la statistique de l'Office de Statistique de la province de Thai Nguyen a montré, en 2009, que la superficie des terres agricoles occupait 78,08 % de la superficie naturelle de la province de Thai Nguyen et que les rizières occupaient 12,25 % de cette superficie naturelle. La superficie du terrain inutilisée représentait 9,92 % de la superficie totale, ce qui comprend notamment les collines et les montagnes dénudées, qui occupaient 6,5 % du territoire.

Quant   la province de Bac Kan, une province adjacente   la province de Thai Nguyen, elle se situe au nord-est du Vietnam. Bac Kan est une province montagneuse; sa superficie est de 4 869 km². C'est une région de ressources naturelles, en particulier les ressources minières et forestières. Effectivement, cette province a un grand potentiel pour le développement de l'économie, notamment par l'industrie minière, mais qui, jusqu'  présent, n'a pas été complètement exploité. En raison de cela, Bac Kan demeure une province où les infrastructures et le développement économique sont encore faibles. L'agriculture est donc une source de subsistance pour de nombreux habitants de cette province. La superficie de cette activité occupe environ 5,2 % de la province; les cultures vivrières principales sont, par ordre d'importance, le riz, le maïs, la pomme de terre et le manioc (Office de Statistique de la province

de Bac Kan - OSB, 2009). En ce qui concerne l'écologie, Bac Kan attire l'attention du Ministère de l'agriculture et du développement rural en raison du nombre important d'agriculteurs cultivant encore sur brûlis sur les coteaux. Ces populations vivent dans des régions éloignées difficiles d'accès et l'irrigation est limitée pour les rizières (Castella et Dang, 2002).

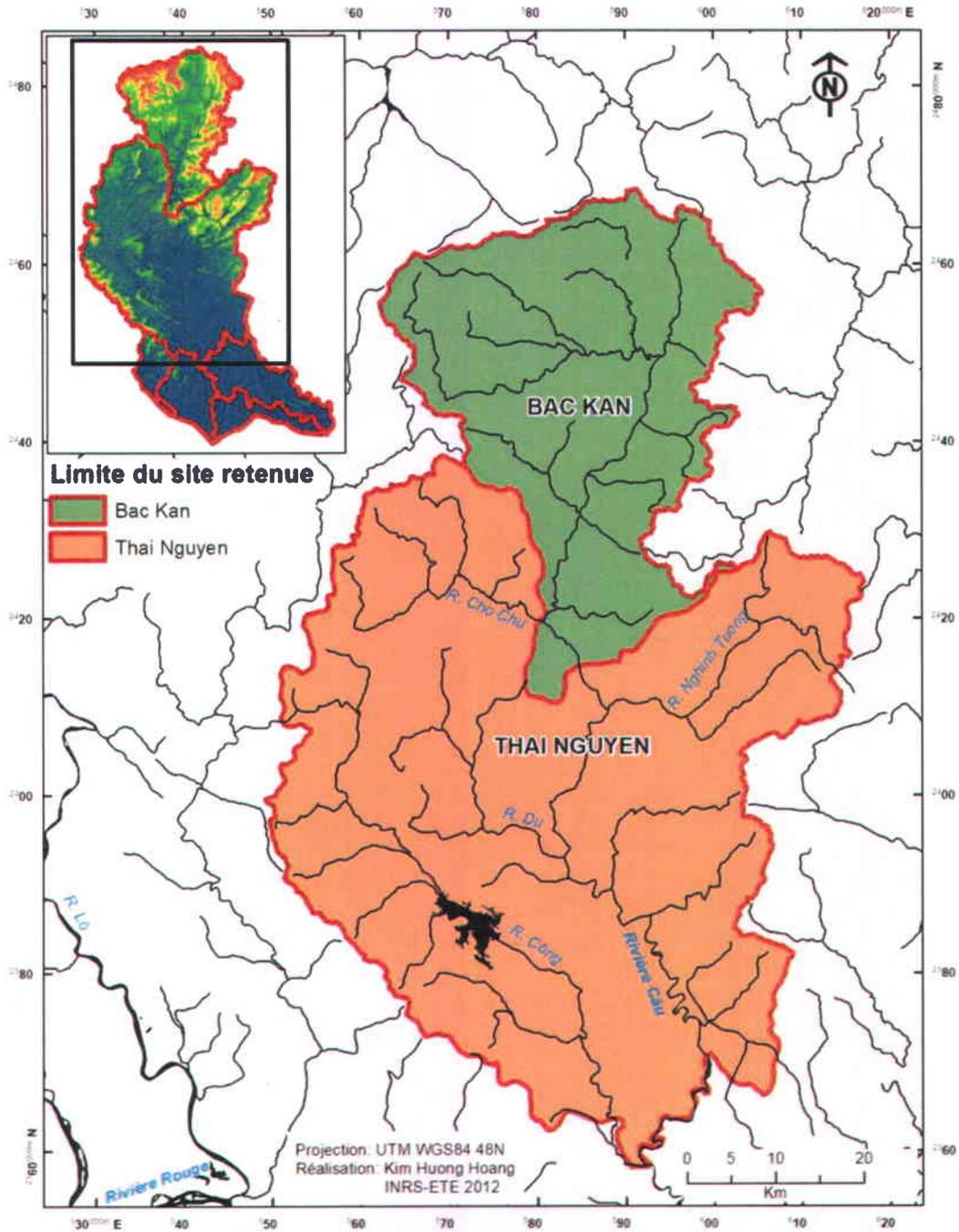


Figure 3.4: Localisation des sous-bassins retenus pour la classification de l'occupation du sol et la modélisation hydrologique

Afin de mettre en œuvre l'approche choisie pour les données de double polarisation et d'estimer le potentiel des données polarimétriques à mieux distinguer les rizières, le choix des régions expérimentales (Figure 3.5) s'est porté sur deux zones faisant partie du sous-bassin décrit ci-dessus (Figure 3.4), sur lesquelles les modes d'occupation du sol et les pratiques agricoles sont morcelés. De plus, la totalité des rizières se trouve sur ce territoire. Pour ce faire, une interprétation visuelle de tout le bassin versant a été effectuée sur la composition colorée RVB à partir de bandes spectrales XI1, XI2, XI3 d'images SPOT-4 (20 m) en consultant les cartes topographiques et les informations collectées sur le terrain. Ces deux zones sont situées au centre du bassin versant de la rivière Cáu.

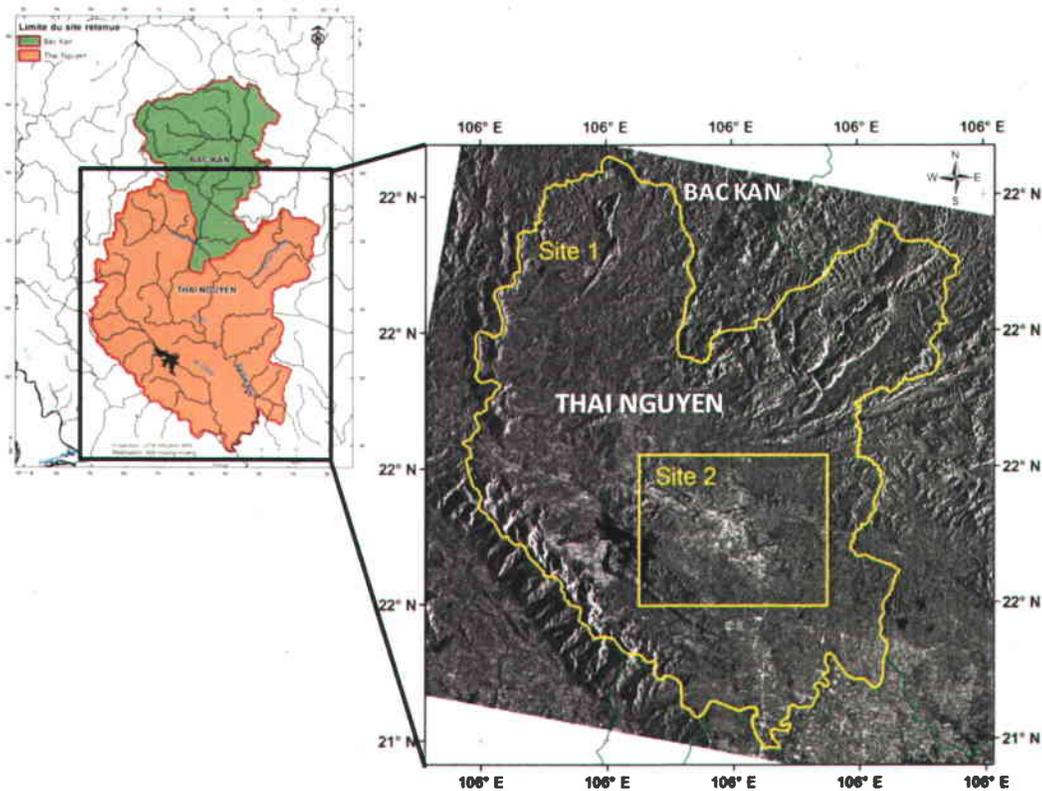


Figure 3.5: Illustration des deux sites de test (en jaune) affichés sur une image RADARSAT-2. Site 1, le plus grand, est un sous-bassin versant. Site 2 est la partie centrale du bassin versant, où l'occupation du sol est complexe

3.2 Données utilisées

3.2.1 Données SPOT4 du capteur HRVIR

En raison de la taille du sous-bassin versant étudié (4 432 km², Figure 3.4), cinq scènes (Figure 3.6) SPOT-4 du capteur HRVIR-2 ont été nécessaires pour produire une carte de l'occupation du sol qui couvre l'ensemble de la région. Le Tableau 3.1 et la Figure 3.6 présentent les caractéristiques des images SPOT-4, ainsi que la date et la localisation des scènes acquises.

Le satellite SPOT-4 a été lancé le 24 mars 1998. Son altitude est de 830 km; son orbite est polaire héliosynchrone avec une inclinaison de 98 degrés et une période de révolution de 101 minutes. Dérivé de la plate-forme multi-mission de SPOT 1, 2 et 3, le satellite SPOT-4 porte deux capteurs : le capteur HRVIR (Haute Résolution Visible et InfraRouge) et le capteur VEGETATION. Le capteur HRVIR est très similaire aux capteurs HRV des générations précédentes. Il acquiert des images en deux modes : en mode multi-spectral (avec 4 bandes) à 20 m de résolution et en mode panchromatique à 10 m de résolution. La modification principale du capteur HRVIR par rapport au capteur HRV est la présence d'une bande spectrale additionnelle dans le moyen infrarouge (1,58-1,75 μm) et le remplacement de la bande panchromatique (0,51-0,73 μm) par la bande XI2 (0,61-0,68 μm). Cette bande panchromatique est désignée comme le mode mono-spectral (M). Au niveau mécanique, un dispositif d'orientation du miroir de changement de visée augmente les performances opérationnelles du satellite (CNES, 2000). Dans notre recherche, nous utilisons des images en mode multi-spectral (quatre bandes) à niveau 1A, ce qui signifie qu'un prétraitement radiométrique a été fait pour corriger les défauts, mais qu'aucune correction géométrique n'est appliquée (SPOT Image, 2005). Il faut noter que la bande spectrale moyenne infrarouge (XI4), qui existe aussi sur les capteurs TM et ETM de LANDSAT, est particulièrement sensible au couvert végétal. Cela explique le choix de ce type d'images.

Tableau 3.1: Caractéristiques des images SPOT-4, capteur HRVIR

| Bande | Longueur d'onde (μm) | Résolution (m) |
|-------------|-----------------------------------|----------------|
| XI1 (Vert) | 0,50 - 0,59 μm | 20 m x 20 m |
| XI2 (Rouge) | 0,61 - 0,68 μm | 20 m x 20 m |
| XI3 (PIR) | 0,79 - 0,89 μm | 20 m x 20m |
| XI4 (MIR) | 1,58 - 1,75 μm | 20 m x 20 m |
| M (PAN) | 0,61 - 0,68 μm | 10 m x 10 m |

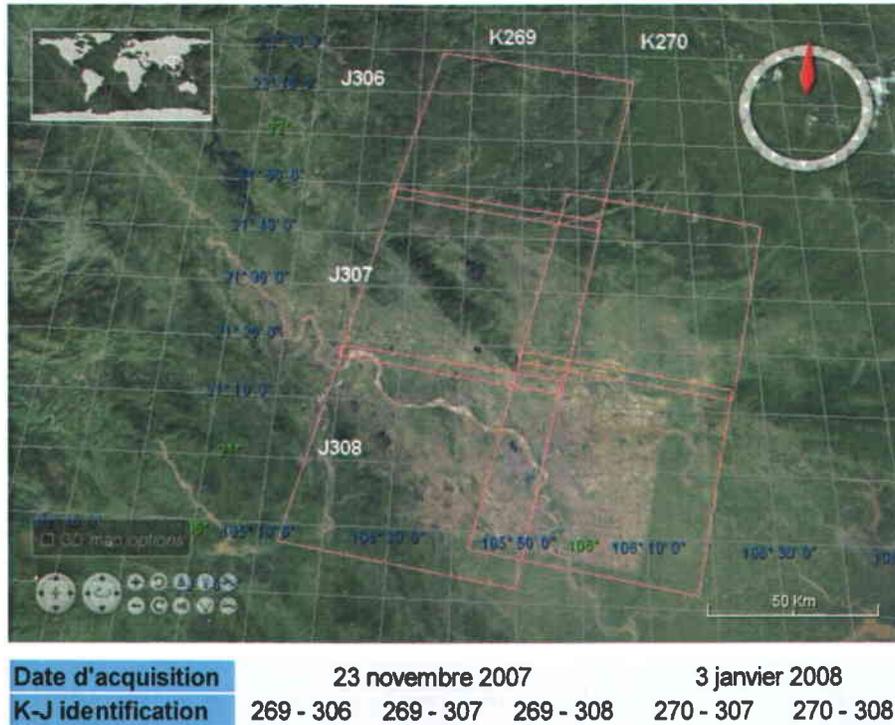


Figure 3.6: Localisation (encadrés orange) et dates des scènes acquises

3.2.2 Données SAR de RADARSAT-2

RADARSAT-2, le successeur de RADARSAT-1, un satellite commercial canadien, a été lancé le 14 décembre 2007. RADARSAT-2 a la même orbite, offre le même cycle de répétitivité (24 jours) et projette la même trace au sol que RADARSAT-1. C'est un radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) fonctionnant en bande C (5,405 GHz). Son altitude moyenne est de 798 km; son orbite est héliosynchrone avec une inclinaison de 98,6 degrés et une période de révolution de 100,7 minutes. Par rapport à RADARSAT-1, RADARSAT-2 offre de nombreuses innovations techniques. Il a la capacité de transmettre les ondes radar horizontalement (H) et verticalement (V) et, selon le mode d'acquisition choisi, le capteur reçoit les signaux soit en H, en V ou les deux simultanément. Ainsi, RADARSAT-2 génère des produits co-polarisés verticalement (VV), en polarisation croisée (HV ou VH), en double polarisation (HH+HV ou VV+VH) ou en quadruple polarisation (HH+VV+HV+VH) et ce, avec une variété de résolutions spatiales. Le mode ultra-fin permet l'acquisition d'images avec une résolution spatiale de 3 mètres, soit la meilleure résolution spatiale disponible commercialement par télédétection radar. Quant à la direction de visée, RADARSAT-2 en a deux; il a donc la capacité d'acquérir des images à gauche ou à droite

du satellite (ASC - *Agence Spatiale Canadienne*, 2008). Toutefois, par défaut, la visée est à droite.

Grâce au programme SOAR-E (*Science and Operational Applications Research - Education*), supporté par l'ASC et le CCT, deux séries de données RADARSAT-2 couvrant deux zones différentes (Figure 3.7) au centre du bassin versant ont été acquises (de mai 2009 jusqu'à mai 2010). Ces deux séries consistent en des images polarimétriques (quatre polarisations HH, VV, HV et VH + leur différence de phase) en mode fin (FQ21, résolution spatiale de 9 m) et des images à double polarisation (HH et HV) en mode standard (S5, résolution spatiale de 25 m).

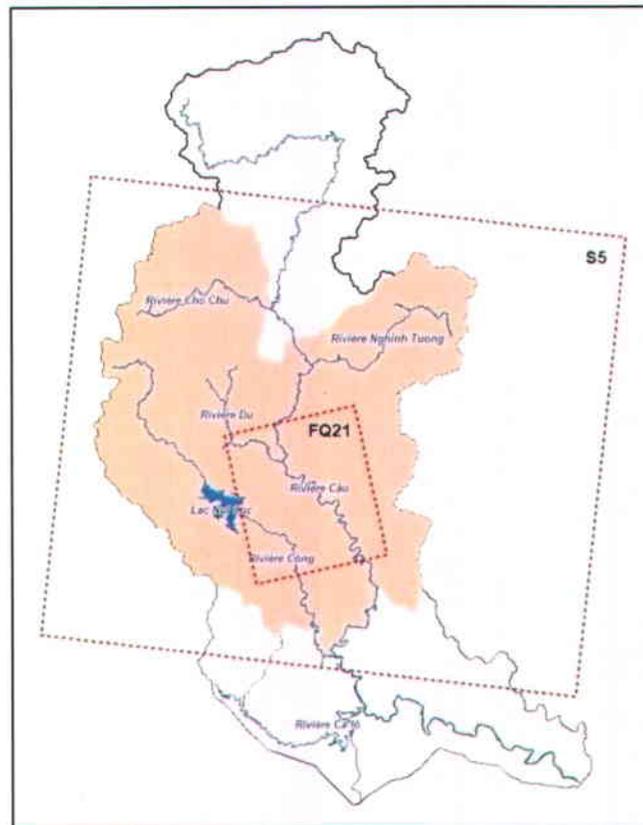


Figure 3.7: Localisation des images acquises (encadrés rouges), modes S5 et FQ21

Le Tableau 3.1 détaille les paramètres d'acquisition des images utilisées. Ces images possèdent des différences quant à leur polarisation, leur largeur de fauchée, leur direction et le nombre de visées et leur résolution au sol. Le choix des modes et des polarisations dans les études de rizières varie selon le type de capteur. Kuroso et al. (1995) et LeToan et al. (1997) ont démontré la capacité de la bande C, polarisation VV, du satellite ERS-1 pour ce type d'étude. Parallèlement, Staples et Hurley (1996), Ribbes et LeToan (1999) et Shao et al. (2001) ont réussi à différencier les rizières d'autres types de culture en utilisant la polarisation HH de

RADARSAT-1. Plus récemment, Lam-Dao et al. (2005, 2007) ainsi que Bouvet et al. (2009) ont montré l'efficacité de données double polarisation HH et VV du capteur ASAR. Toutefois, RADARSAT-2 ne fournit pas les produits double polarisation avec deux polarisations parallèles. Pour cette raison, nous avons choisi les images à double polarisation HH et HV. Parmi les modes standards (fauchées de 100 km) de RADARSAT-2, le mode S5 de l'orbite descendante a été choisi parce qu'il couvrait toute la zone d'étude. De plus, des angles d'incidences de l'ordre de 40° favorisent la diffusion de volume, d'où une meilleure distinction des types de couverture végétale (Staples et al., 1994; Liew et al., 1998; Panigrahy et al., 1999; Shao et al., 2001). Ces images nous ont été transmises en format SGF (*SAR Georeferenced Fine-Resolution*) ce qui signifie la géocodage appliqué sur ce type de produit de RADARSAT-2.

Des données polarimétriques ou quad-pol (Q) du satellite RADARSAT-2 en mode Fin (F) ont aussi été acquises et ce dans les mêmes angles d'incidence que les images S5. Ce mode se nomme FQ21. Les données quad-pol sont transmises en format complexe (SLC) ce qui signifie que chaque pixel d'image est représentée par une valeur d'amplitude complexe (Tableau 3.2).

Tableau 3.2: Principaux paramètres d'acquisition des images RADARSAT-2 utilisées

| Paramètres | FQ21 | S5 |
|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Angle d'incidence (°) | 40,34 - 41,56 | 36,79 - 41,84 |
| Longueur d'onde | 5,405 GHz | 5,405 GHz |
| Orbite | Ascendante | Descendante |
| Polarisation | HH, VV, HV, VH | HH, HV |
| Largeur de fauchée nominale | 25 km | 100 km |
| Dimension des pixels (m)⁽¹⁾ | 4,7 x 5,1 | 12,5 x 12,5 |
| Résolution approximative (m) | 9 | 25 |
| Direction et nombre de visées | 1 x 1 | 1 x 4 |
| Format des produits | Complexe | SGF |
| Dates d'acquisition | du 17 mai 2009 au 12 mai 2010 | du 15 mai 2009 au 10 mai 2010 |

(le cycle de répétitivité de RADARSAT-2 est de 24 jours)

⁽¹⁾ Distance au sol x azimut

3.2.3 Données auxiliaires

a. Modèle numérique d'altitude (MNA)

Un MNA a été utilisé pour prendre des points de contrôle et effectuer une ortho-rectification des images SPOT-4. Ce MNA a été créé par VTGEO, à partir des courbes de contour extraites d'une carte topographique à l'échelle du 1 : 25 000; sa résolution spatiale est de 30 m. Ce MNA a été ré-échantillonné à 9 m de résolution spatiale lors de la correction géométrique des résultats dérivés de données polarimétriques.

b. Carte topographique et cartes d'occupation du sol

Le Tableau 3.3 présente les trois cartes de référence utilisées durant l'étude, qui sont :

- La carte topographique numérique (2005) couvrant l'ensemble du bassin versant. Cette carte a été utilisée lors de la correction géométrique des images et du choix des zones étudiées.
- La carte d'occupation du sol de la province de Thai Nguyen (2000), obtenue par interprétation visuelle d'images LANDSAT ETM+, qui a été utilisée en vue de choisir les sites d'entraînement lors de la classification.
- La carte d'utilisation du sol (2010) de la province de Thai Nguyen, qui a été utilisée pour la validation de la précision des classifications dérivées des images SPOT-4 et des images RADARSAT-2. Pour être capable d'utiliser cette carte d'utilisation du sol lors de la validation, elle a été transformée en carte d'occupation du sol en consultant le système de classification d'utilisation/d'occupation du sol de l'USGS (U.S Geological Survey) (Anderson et al., 1976). La raison pour laquelle nous devons réaliser la transformation est la différence entre l'occupation du sol et l'utilisation du sol. D'après FAO/UNEP (1999) et NRC (2013), l'occupation du sol est une description physique de l'espace, elle est définie comme la couverture (bio-) physique de la surface des terres émergées, c'est-à-dire ce qui recouvre le sol. L'utilisation du sol est caractérisée par les arrangements, les activités et les intrants introduits par l'homme sur un certain type d'occupation du sol, visant à en tirer des produits et/ou des bénéfices. On parle donc d'une description des surfaces terrestres selon leurs finalités socio-économiques. Autrement dit, l'occupation du sol définit ce qui se retrouve à la surface du sol, comme

par exemple de la végétation, des infrastructures urbaines, de l'eau, des sols nus ou autre, tandis que l'utilisation du sol identifie ce à quoi les terres servent, comme par exemple les loisirs, l'habitat de la faune, l'agriculture, etc. Cette transformation d'utilisation vers occupation a donc permis de regrouper et de renommer les classes pour que la carte soit compatible avec celle de la classification.

Tableau 3.3: Liste des cartes de référence

| | Type de carte | Échelle | Date | Source |
|---|---|------------|------|---|
| 1 | Topographie | 1 : 50 000 | 2005 | CIREN (Information Center of Natural Resource and Environment) |
| 2 | Occupation du sol de la province de Thai Nguyen | 1 : 25 000 | 2000 | VTGEO |
| 3 | Utilisation du sol de la province de Thai Nguyen | 1 : 50 000 | 2010 | Office des Ressources et de l'Environnement de la province de Thai Nguyen |

c. Données statistiques

Les données statistiques recueillies comprennent la superficie des types d'utilisation du sol en 2007 et celle de deux saisons de riz en 2009. Elles servent à l'étape de validation qualitative des classifications en comparant la superficie issue des statistiques et celle issue de la classification, pour le milieu agricole et les rizières. Ces données proviennent de l'Office de la Statistique, de l'Office de l'Agriculture et du Développement Rural des provinces de Thai Nguyen et de Bac Kan et de l'Office Général de la Statistique.

d. Données de terrain

Les informations de 25 points d'observation et de 10 champs expérimentaux ont été collectées sur le terrain lors de trois campagnes. Une première campagne de terrain a été effectuée à Thai Nguyen en décembre 2007, soit pendant la période d'acquisition des images SPOT-4. La Figure 3.8 présente la localisation des points d'observation. Dans cette mission, la carte de l'occupation du sol dérivée de l'image LANDSAT ETM+ (2003) et la carte topographique à l'échelle 1 : 50 000 ont servi à vérifier les classifications de l'étude précédente (Hoang, 2007) et à identifier les types d'utilisation du sol des parties centrale et nord-est de la province de Thai

Nguyen, où l'occupation du sol est complexe. Chaque point d'observation a été photographié et des informations sur l'occupation du sol ont été notées (Figure 3.9).

Les deux autres campagnes terrain ont été effectuées sur des périodes plus longues, soit de décembre 2009 à février 2010, durant l'acquisition de quelques images RADARSAT-2, et ensuite de février 2012 à juin 2012, et cela une fois par mois. La campagne terrain de 2012 couvre une saison complète du riz. Le but de ces missions était de recueillir des informations à propos de l'activité agricole (calendrier agricole, irrigation, localisation des divers types de culture) et d'identifier l'état des champs au moment de l'acquisition des images RADARSAT-2. La Figure 3.10 représente la localisation des champs expérimentaux de riz choisis pour la mission de 2012. Pour chaque champ, des informations sur l'occupation du sol autour du champ et sur les caractéristiques des parcelles de riz et des plants de riz ont été notées et des photos ont été prises. Les informations de la mission de 2012 ne peuvent pas être utilisées pour la validation des classifications de rizières. Toutefois, elles permettent de documenter les caractéristiques des parcelles et des plants de riz durant la croissance ainsi que les facteurs qui affectent la croissance et le développement des plants de riz. Il était prévu que ces informations soient utilisées comme données d'entrée de simulations hydrologiques, afin d'analyser l'impact des rizières sur le régime hydrologique. Cependant, ce travail n'a pas pu être réalisé, pour les raisons qui seront présentées dans le chapitre portant sur les résultats (section 4.5).

Les deux premières campagnes ont été réalisées par la candidate elle-même. Celle de 2012 a aussi été planifiée par la candidate (choix des données à prendre, préparation de la fiche (Tableau 3.4), etc.), mais elle a été réalisée par une équipe de l'Université de l'Agriculture et des Forêts de la province de Thai Nguyen.

Le Tableau 3.4 et la Figure 3.11 présentent un exemple d'informations collectées sur un des champs du bourg Cho Chu, district de Dinh Hoa, au Nord-Ouest de la province de Thai Nguyen (site #1 sur la Figure 3.10). Ces informations sont utilisées pour la validation des classifications des rizières à partir des images RADARSAT-2.

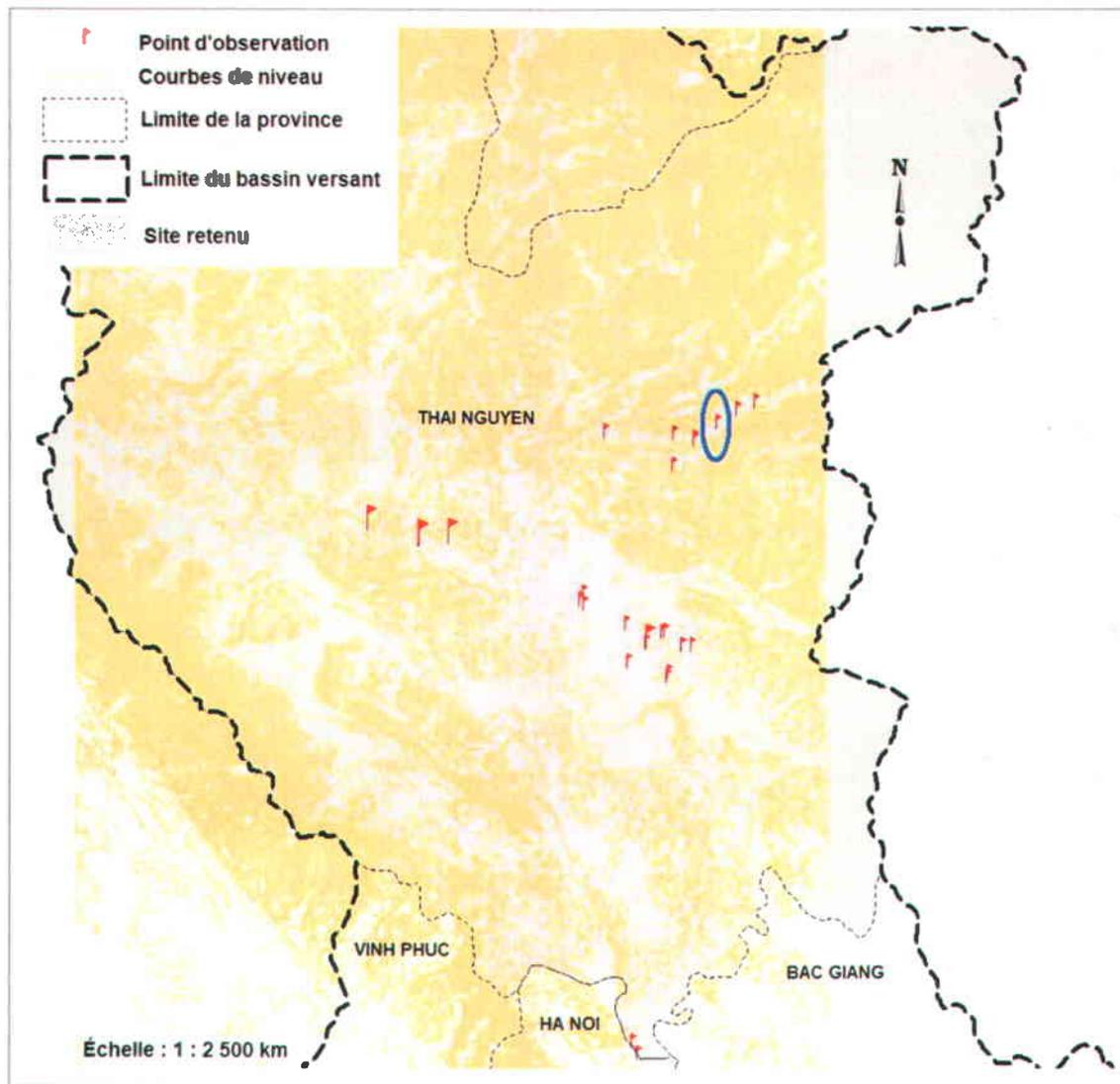


Figure 3.8: Localisation des 25 points observés sur le terrain en 2007, 2009 et 2010. L'ellipse bleue montre la localisation du point observé lié à la fiche sommaire présentée à la Figure 3.9

Date : 14 décembre 2007

Météo : Brouillard

Numéro de point : 05

Coordonnées : X: 595849 Y: 2400413 Z: 46m

Commune : montagne La Hien - district Vo Nhai - province Thai Nguyen

Observateur : Kim Huong Hoang

Note (Point d'observation): Sur l'ensemble du secteur, les rizières (déjà récolté) alternent avec les champs de maïs. Le milieu urbain est de faible densité, les maisons sont éparées et elles sont entourées par des végétaux comme des plantations d'acacias et divers types de plantes cultivés. Plus loin, les collines où les montagnes sont dénudées.

| | Information d'occupation du sol | Carte interprétée | Image SPOT-4 | Photo |
|-------|---|---|--|-------|
| Est | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), zones résidentielles + jardins | urbain faible densité + sol nu | Le mélange des couleurs : gris-vert et rose pâle, ton clair. Texture : fin | 24 |
| Ouest | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), montagnes dénudées | urbain faible densité + sol nu, mélange | Le mélange des couleurs : gris-vert et rouge pâle, ton clair. Texture : fin | 26-28 |
| Sud | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), zones résidentielles + jardins + plantations. | Milieu forestier sol nu, mélange, | Le mélange des couleurs : rouge, rose clair. Texture : grain fin | 29-31 |
| Nord | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), zones résidentielles + jardins + plantations. | Mélange d'agricole, d'habitations et de plantations | Le mélange des couleurs vert, rose pâle et ton clair. Texture : fin et grain | 25 |



Figure 3.9: Exemple d'une fiche résumant les informations recueillies au point d'observation No 5 (marqué par une ellipse bleue sur la figure 3.8)

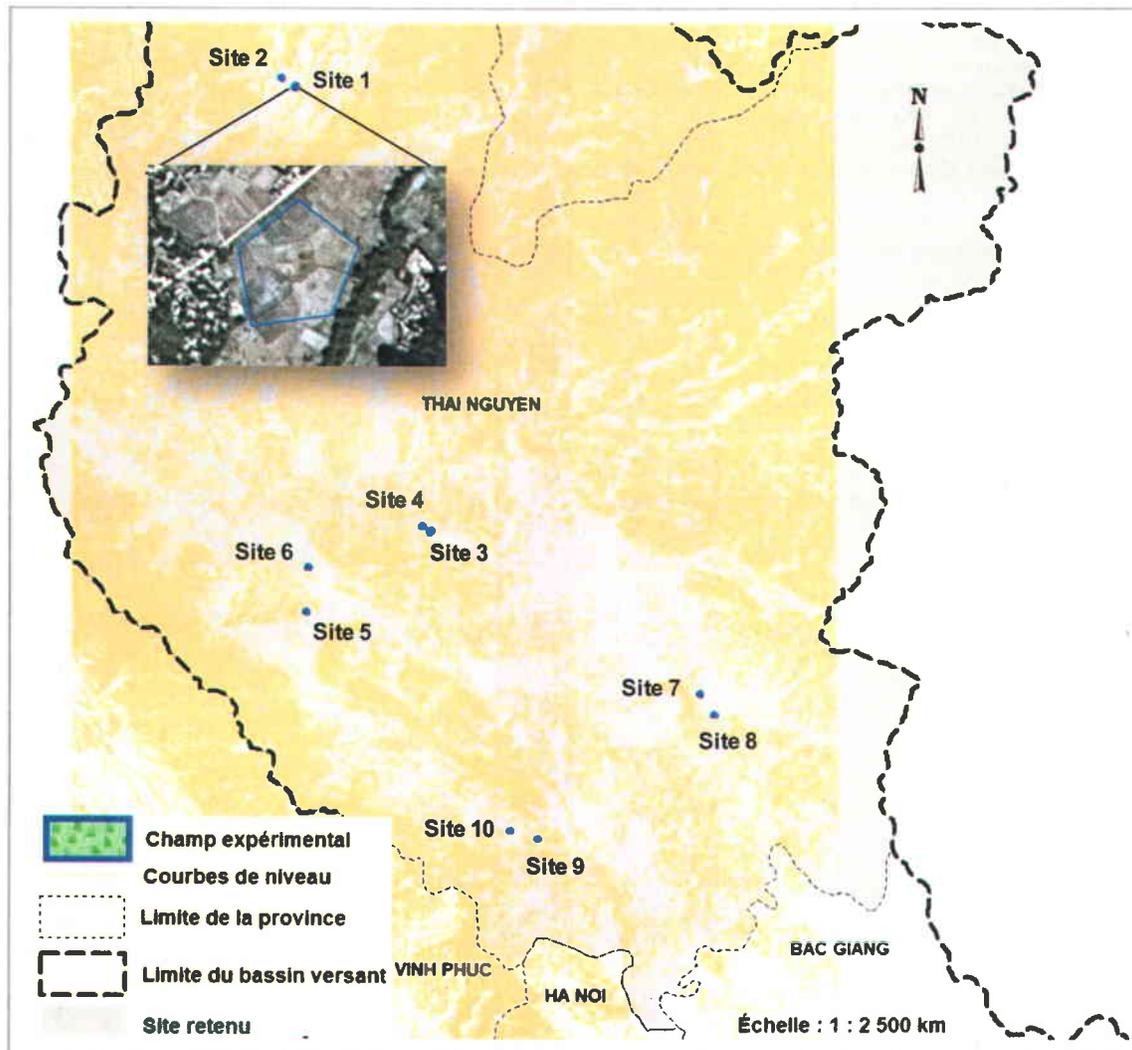


Figure 3.10: Localisation de dix champs expérimentaux pour la mission de 2012 (polygones en bleus). La photo illustre l'agrandissement d'un site (1) sur l'image de haute résolution (tiré de Google Earth)

Tableau 3.4: Exemple d'une fiche résumant les informations recueillies pour un champ expérimental

| | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------|--|---|--|--|---------------|------------------------|
| Date : 02 juin 2012 | | Météo : Ensoleillé | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 566928 | | Y : 2422591 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Chợ Chu/Định Hóa/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | | Photo |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 566896 | | | 2422803 | | | 144 |
| | coin 2 | 567014 | | | 2422713 | | | 153 |
| | coin 3 | 566963 | | | 2422579 | | | 155 |
| | coin 4 | 566807 | | | 2422557 | | | 157 |
| coin 5 | 566781 | | | 2422707 | | | 158 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18, riz hybride | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis direct | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | 101,102, 104 |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 89, 125, 112, 114, 147 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough | |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 87, 133, 137, 162, 165 |
| | | | 18 - 34 | 70 - 75 | 82 - 95 | 85 - 100 | 100- 105 | |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 83, 148, 119, 149 |
| | | | 1.5 – 2.5 | 0 - 3 | 0 | 0 | 0 | |
| Autres caractéristiques : hauteur de diguettes : 18-19 cm | | | | | | | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 24/2 - 15/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | Début juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : la qualité du riz est moins bonne, il y a beaucoup de mauvaises herbes dans les rizières (160, 161) | | | | | | | | |

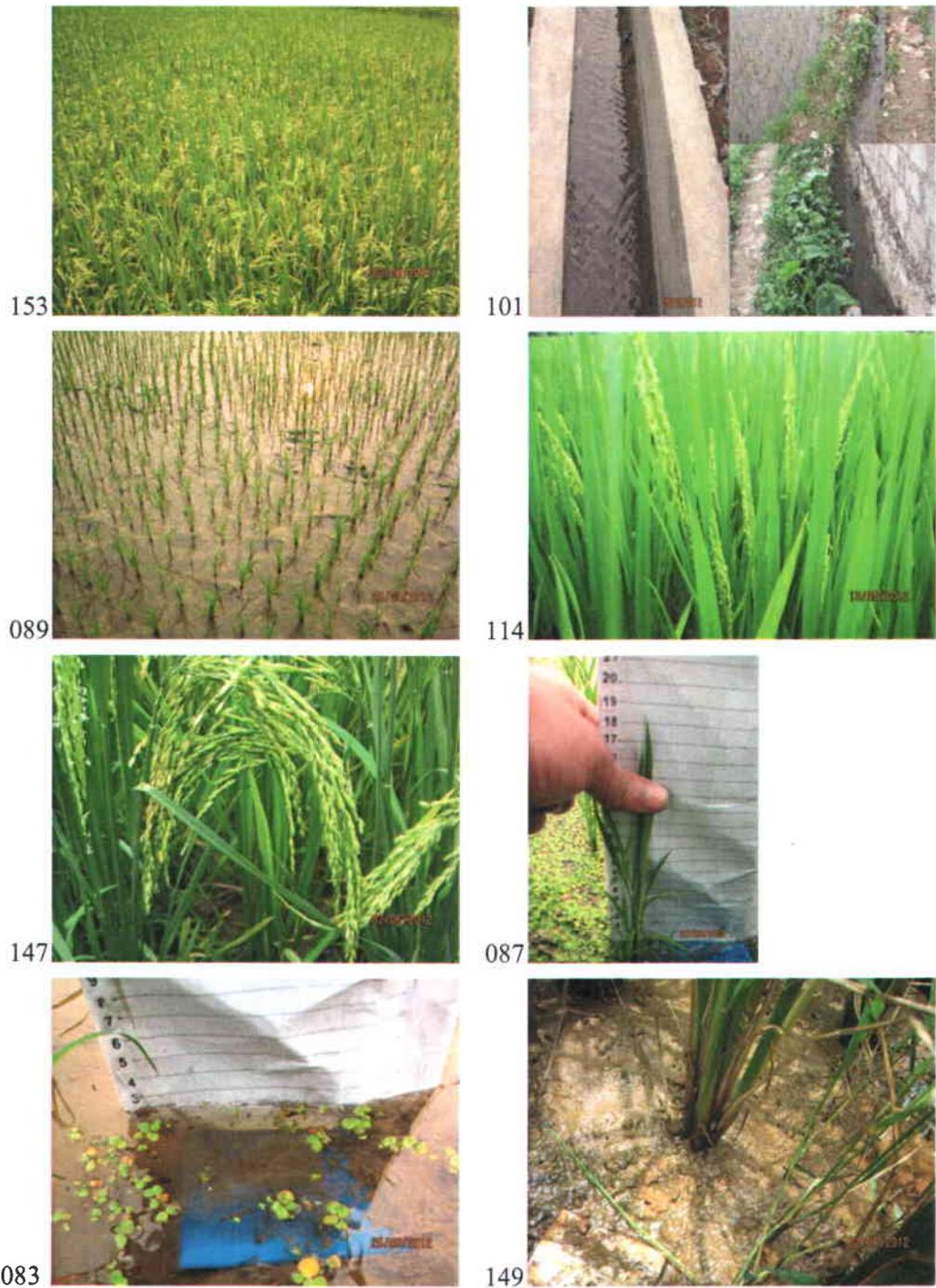


Figure 3.11: Photos illustrant certaines des informations représentées au tableau 3-4 pour le site 1. Les numéros de photos permettent de faire le lien entre le descriptif du tableau et ces dernières.

3.3 Traitement et analyse des images SPOT-4

Cette section présente d'abord l'étape du prétraitement des images SPOT-4 suivie de la détermination des classes thématiques, qui constitue le 1^{er} objectif de la thèse. Ensuite, elle décrit la stratégie de traitement des images pour atteindre le deuxième objectif de la recherche, soit la classification orientée-objets adaptée à des images SPOT-4 afin de cartographier l'occupation du sol d'un bassin versant.

3.3.1 Prétraitement des images

a. Correction géométrique

Chaque système d'acquisition d'images produit des distorsions géométriques lors de la formation de l'image, causées par différents facteurs qui sont présentés dans Toutin (2004) et Jensen (2005). Il est difficile d'obtenir une correction géométrique impeccable, mais la transformation géométrique permet de corriger les distorsions et d'obtenir une projection cartographique.

Dans cette étude, la transformation géométrique locale (Caloz et Collet, 2001) a été appliquée sur les images SPOT-4. Cette transformation, reposant sur la prise en compte de la géométrie de prise de vue et du relief, permet de produire une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle *Satellite Orbital Modelling*, intégré dans le logiciel PCI Geomatica. Ce modèle a été développé par Toutin (1983, cité par Toutin, 1992); il permet de réaliser l'ortho-rectification d'images de haute et de basse résolutions, comme celles d'IKONOS, de SPOT et de LANDSAT, et des images radar, comme celles d'ASAR et de RADARSAT (PCI Geomatics, 2005). Un MNA de 30 m de résolution, créé par VTGEO, les images optiques déjà géoréférencées et des données vectorielles extraites de la carte topographique ont été utilisés afin de prendre des points de contrôle (GCP - *Ground Control Point*). Toutes les cinq images ont été géoréférencées dans le système de coordonnées UTM (*Universal Transverse Mercator*), zone 48 Nord, WGS84. La précision des corrections pour chacune des images SPOT-4 est présentée au Tableau 3.5.

Tableau 3.5: Précision de la correction géométrique des images SPOT-4

| Date d'acquisition | K-J identification | RMS X (pixel) | RMS Y (pixel) | RMS (pixel) | Nombre de GCPs (point) |
|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------|------------------------|
| 23 - 11 - 2007 | 269 - 306 | 0,38 | 0,33 | 0,5 | 20 |
| 23 - 11 - 2007 | 269 - 307 | 0,34 | 0,48 | 0,59 | 18 |
| 23 - 11 - 2007 | 269 - 308 | 0,41 | 0,33 | 0,53 | 9 |
| 03 - 01 - 2008 | 270 - 307 | 0,47 | 0,28 | 0,55 | 18 |
| 03 - 01 - 2008 | 270 - 308 | 0,44 | 0,47 | 0,64 | 9 |

b. Détermination des classes thématiques

Le premier objectif de notre recherche est de déterminer les classes d'occupation du sol. Le choix des classes thématiques est l'étape préalable dans le processus de classification. Cette étape est soulignée dans cette recherche parce que les classes choisies doivent convenir non seulement à la capacité des images à fournir des informations, mais aussi aux critères requis pour une base de données d'entrée d'un modèle hydrologique tel HYDROTEL (Fortin et al., 1995). Pour choisir des classes appropriées, nous avons donc consulté 1) le système de classification d'utilisation/d'occupation du sol de l'USGS (Anderson et al., 1976), 2) les confusions entre les catégories lors de la classification précédente réalisée par Hoang (2007) à partir d'images LANDSAT-ETM+ et 3) les critères de sélection des classes d'occupation du sol pour le modèle HYDROTEL.

Le Tableau 3.6 montre six classes principales et leur description pour la classification de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cáu. Toutefois, il faut considérer avec prudence la détermination des classes du milieu agricole parce que la présence de végétation varie selon l'évolution saisonnière. De la même manière, pendant la période de temps entre les récoltes (champs nus), les terres agricoles présentent sur les images des valeurs de réflectance similaires à celles d'un sol sans couverture végétale.

Tableau 3.6: Les six classes thématiques de la carte de l'occupation du sol

| Classes thématiques | | Description |
|---------------------|-----|--|
| Milieu agricole | (1) | Terre agricole (humide, sèche) utilisée pour le riz ainsi que pour des cultures autres que le riz. |
| Milieu urbain | (2) | Urbain forte densité : ville ou centre-ville des districts |
| | | Urbain faible densité : villages, incluant des jardins |
| | | Constructions, routes, zones industrielles |
| Milieu forestier | (3) | Feillus, plantations d'acacias, d'eucalyptus et de pins |
| Arbustif | (4) | Buissons, herbages et arbustes |
| Eau | (5) | Lacs, réservoirs, rivières |
| Rizières (*) | (6) | Champs de riz |

(*) Classe distinguée à partir d'images RADARSAT-2

En réalité, la période des champs nus n'est qu'un état temporaire. Si on identifie des surfaces nues dans une classification, il faut donc vérifier si ces surfaces demeurent toujours dans cet état ou si elles sont couvertes d'une végétation quelconque à une autre période de l'année. Si c'est le cas, on ne peut pas identifier comme « sol nu » les surfaces qui ne le demeurent pas constamment. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du riz. Dans cette recherche, la classe du riz est donc séparée des autres types de culture, à cause de son cycle de culture spécial, mais aussi en raison de l'inondation ponctuelle des champs, qui peut avoir des effets importants sur la modélisation hydrologique. Cependant, l'identification de cette classe a été dérivée à partir d'images RADARSAT-2, selon l'approche méthodologique qui sera présentée aux prochaines sections (3.4 et 3.5).

Les six classes thématiques choisies jouent un rôle important lorsque des simulations dans HYDROTEL parce qu'elles contribuent à la détermination de deux paramètres, qui ont une influence sur l'évapotranspiration, soit l'indice foliaire et la profondeur racinaire ainsi que sur les coefficients de rugosité des surfaces qui a un impact sur les écoulements.

Des photographies et la description détaillée des classes de la carte de l'occupation finale sont présentées à l'Annexe II.

3.3.2 Classification orientée-objets de l'occupation du sol

Tel que décrit au Chapitre 2, l'approche orientée-objets s'effectue selon deux phases principales : la segmentation et la classification. Le processus de ces deux phases a été réalisé par le logiciel eCognition (Trimble, 2011). Une segmentation multi-résolution ou bien multi-échelle (Baatz et Schäpe, 2000; Schiewe et al. 2001) a été appliquée, laquelle permet de créer des objets à différentes échelles simultanément sur une même image. Les différents paramètres de segmentation utilisés ont été formalisés en consultant les résultats de la classification Landsat-TM antérieure (Hoang, 2007) ainsi que sur la base de tests réalisés sur les images SPOT-HRVIR utilisées. La segmentation et la classification sont donc réalisées selon deux niveaux. En tenant compte de la complexité de l'occupation du sol de la zone d'étude, une classification hiérarchique a été appliquée. Le premier niveau permet non seulement d'identifier un maximum d'objets de forte homogénéité, et plus grossiers, mais aussi de préparer la recherche d'objets plus complexes. Le deuxième niveau vise à identifier les objets plus petits et hétérogènes qui n'ont pas pu être séparés lors de la classification primaire. La démarche générale de la classification orientée-objets est présentée à la Figure 3.12. À partir des couches (bandes) choisies, l'algorithme de segmentation multi-résolution a été appliqué afin de créer une image, appelée image segmentée, incluant des objets-images (segments) qui deviendront le support pour les classifications à venir. Cette image nous permet de réaliser l'étape suivante, la création hiérarchique, qui comprend le choix des classes thématiques et la définition de ces classes. Une fois la hiérarchie des classes établie, la classification est effectuée en utilisant le classificateur choisi. Finalement, la validation de la précision permet de décider de garder le résultat de classification obtenu ou de retourner à la définition des classes pour refaire une autre classification. Le détail de chaque phase de traitement est présenté dans les deux sous-sections suivantes (3.3.2a et 3.3.2b).

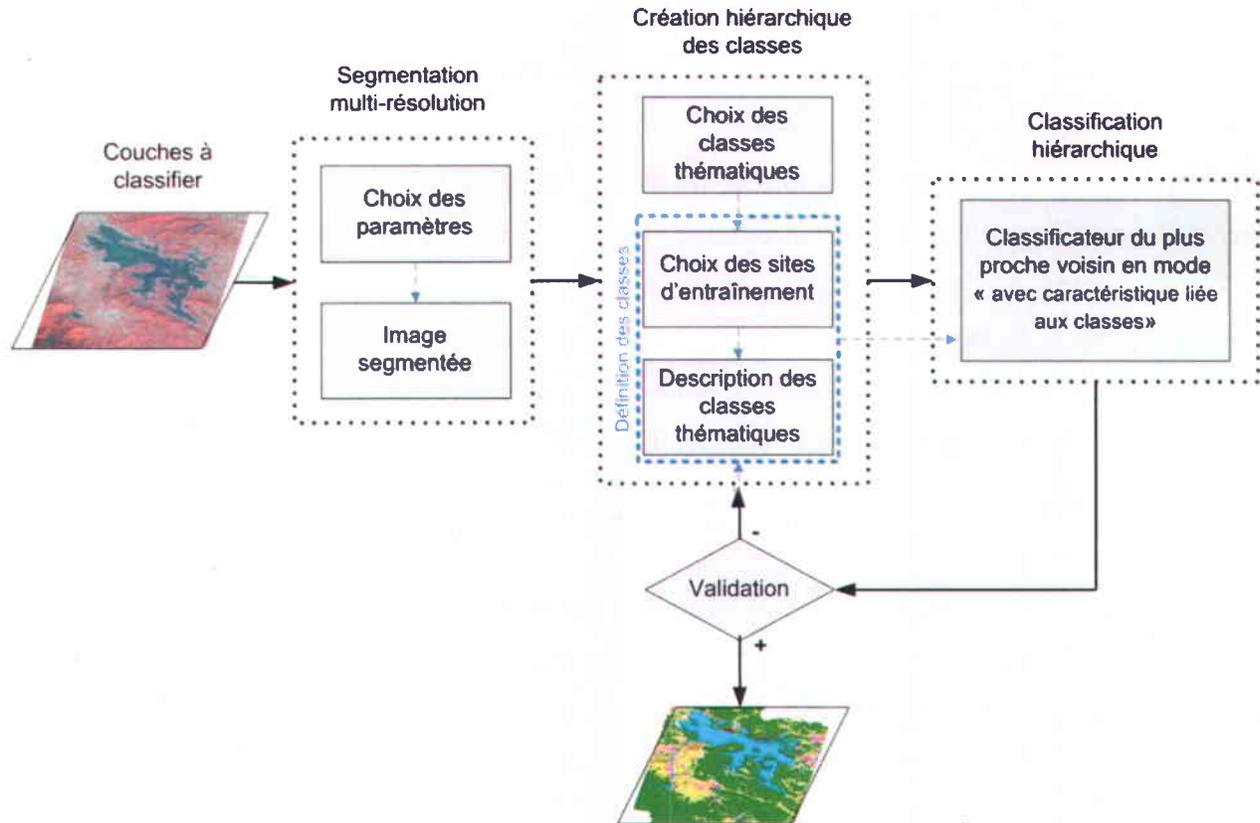


Figure 3.12: Organigramme de la classification orientée-objets

a. Segmentation multi-résolution

L'étape préliminaire dans l'approche de la classification orientée-objets est la segmentation de l'image afin de diviser l'image en objets (segments) homogènes.

Dans le cadre de ce projet, on a utilisé la segmentation multi-résolution, un algorithme considéré performant pour la classification d'un milieu hétérogène (Burnett et Blaschke, 2003; Rahman et Saha, 2008). Cet algorithme (équations 6, 7 et 8) est implémenté dans le logiciel eCognition; il se base sur la fonction générale de segmentation (Baatz et Schäpe, 2000; Benz et al., 2003; Definiens Imaging, 2004; Jensen, 2005) :

$$f = w_{couleur} h_{couleur} + (1 - w_{couleur}) \cdot h_{forme} \quad (6)$$

$$h_{couleur} = \sum_c w_c \left(n_{fusion} \cdot \sigma_c^{fusion} - \left(n_{Obj1} \cdot \sigma_c^{Obj1} + n_{Obj2} \cdot \sigma_c^{Obj2} \right) \right) \quad (7)$$

$$h_{forme} = w_{cmpct} \cdot h_{cmpct} + (1 - w_{cmpct}) \cdot h_{lissage} \quad (8)$$

où : f est la valeur de fusion globale (ou bien la croissance de l'hétérogénéité); $w_{couleur}$ est le poids donné pour l'information spectrale (couleur), défini par l'utilisateur ($0 \leq w_{couleur} \leq 1$); $h_{couleur}$ est l'hétérogénéité spectrale d'un objet d'image, calculée par la somme du produit des écarts-types des valeurs spectrales (σ_c) et du poids de chaque couche (bande) de l'image (w_c); h_{forme} est l'hétérogénéité de forme, définie par la compacité (*compactness*, h_{cmpct}) et le degré de lissage (*smoothness*, $h_{lissage}$); w_{cmpct} est le poids donné pour la compacité; et n est le nombre de pixels dans l'objet comme par exemple : objet 1 (Obj1), objet 2 (Obj2) et objet fusionné (fusion).

La segmentation multi-résolution est considérée être une technique de fusion basée sur la région. Elle commence en considérant chaque pixel comme un objet distinct et, par la suite, des paires d'objets sont fusionnés pour former des objets plus grands. La décision de fusion est basée sur les critères d'homogénéité décrivant la similitude entre des objets d'image adjacents. Lorsqu'une fusion éventuelle d'une paire d'objets est examinée, la valeur de f entre ces deux objets est calculée et comparée avec le paramètre d'échelle (défini ci-dessous) pour définir le critère de rupture qui arrêtera le processus.

Afin d'obtenir des objets adaptés à la classification, le procédé de segmentation a été effectué en définissant les trois paramètres suivants : le poids des couches (bandes spectrales) employées (1, Figure 3.13), l'échelle (2, Figure 3.13) et la composition des critères d'homogénéité (3 et 4, Figure 3.13).

Cette phase est effectuée sur les quatre bandes spectrales du capteur HRVIR (SPOT-4) selon la procédure suivante, tel qu'illustré sur la Figure 3.13 :

- Le poids (1) des couches (bandes) détermine l'importance relative des bandes utilisées dans la segmentation. Dans le cadre de cette recherche, les quatre bandes spectrales (vert, rouge, PIR et MIR) sont utilisées et leur poids est égal à 1 puisque les informations sur ces bandes sont importantes pour la segmentation de la zone d'étude.
- Le paramètre d'échelle (2) est une valeur abstraite qui détermine l'hétérogénéité maximale permise pour les objets résultants de l'image. Pour des données hétérogènes, il est recommandé de fixer un paramètre d'échelle plus petit que pour des données plus homogènes. La segmentation à un seul niveau ne permet pas de bien distinguer des objets qui ont la même valeur spectrale à partir d'images à faible ou moyenne résolution,

en particulier pour une occupation du sol morcelée comme celle du bassin versant étudié. L'idée de cette étape est de segmenter l'image SPOT-4 en deux niveaux d'échelle (Figure 3.14) : le Niveau 1 à grande échelle (G) et le Niveau 2 à petite échelle (P). Après avoir testé quelques valeurs, les valeurs de 80 (G) et de 20 (P) sont attribuées au facteur d'échelle pour chacun des niveaux d'échelle. Ces valeurs représentent un équilibre entre les données hétérogènes de l'image, comme les secteurs urbanisés, et les données plus homogènes, comme les secteurs boisés et les parcelles agricoles.

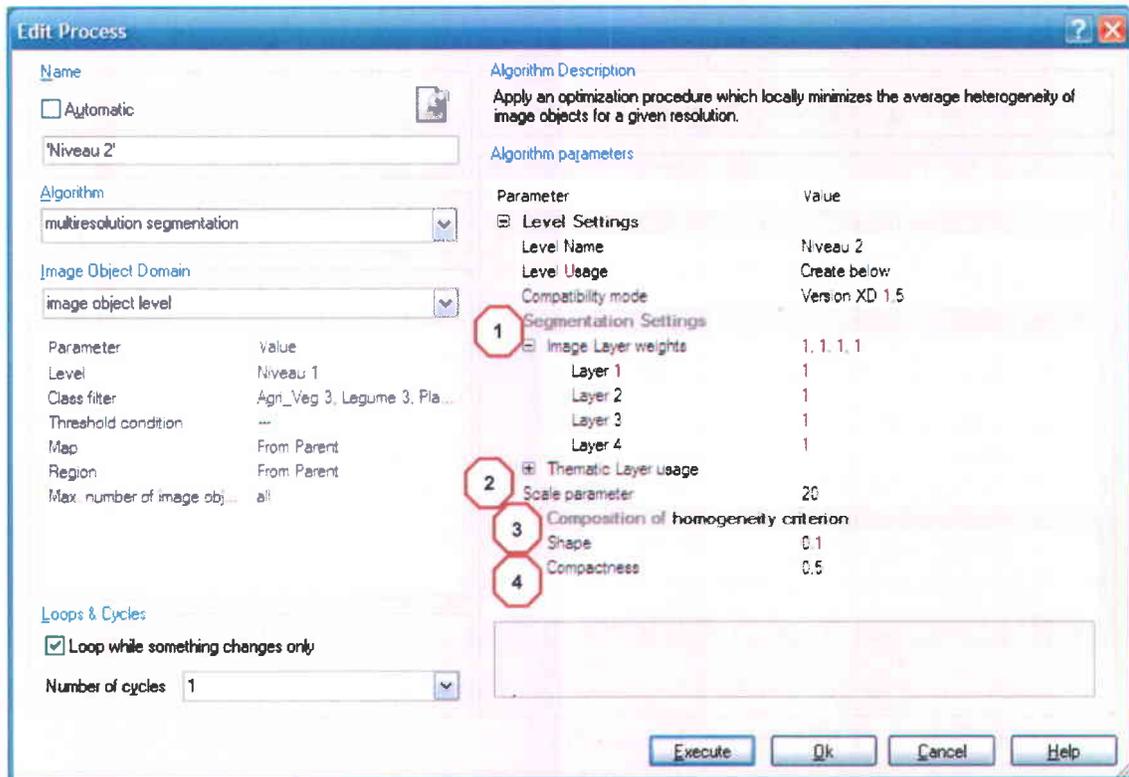


Figure 3.13: Paramètres du niveau 2 (P) de la segmentation de l'image SPOT

- La composition du critère d'homogénéité ³ : l'homogénéité de l'objet auquel se réfère le paramètre d'échelle est défini par la composition du critère d'homogénéité. L'homogénéité est utilisée ici comme synonyme d'hétérogénéité réduite et est définie par la couleur et la forme (*shape*), la compacité (*compactness*) et le lissage (*smoothness*) ⁴.

Critère de couleur/forme : Le paramètre de couleur est un facteur qui balance l'homogénéité de la couleur et de la forme d'un objet (segment). La valeur de ce paramètre varie de 0 à 1. Si on désire mettre un plus grand accent sur les caractéristiques spectrales, la valeur du paramètre couleur est plus forte. Par contre, pour mettre en évidence les

caractéristiques spatiales, cette valeur est faible, c'est-à-dire que celle de la forme est plus élevée. Le facteur de forme prévient la segmentation fractale d'objets en présence de données fortement texturées. Néanmoins, un certain niveau d'homogénéité, selon la forme, améliore parfois la qualité de l'extraction des objets (Definiens Imaging, 2004).

Critère de forme : le critère de forme est à son tour séparé en deux paramètres distincts, qui sont la **compacité** et le **lissage**. Ces deux paramètres permettent d'optimiser l'homogénéité des objets en tenant compte de la forme des objets. Le paramètre de lissage est utilisé pour optimiser les objets de l'image en tenant compte de l'aspect « arrondi » des bordures d'objet. Il est conseillé d'utiliser ce paramètre lorsque les données sont très hétérogènes. Quant au paramètre de compacité, il est employé pour optimiser les objets en tenant compte de la compacité des bordures. Ce paramètre doit être utilisé en présence d'objets plutôt compacts qui sont séparés d'objets non compacts par un contraste relativement faible. Ces objets, en général, ont des signatures spectrales similaires mais des formes très différentes. Toutefois, ces deux paramètres ne sont pas antagonistes. C'est-à-dire qu'un objet optimisé pour la compacité peut très bien avoir des bordures arrondies.

Dans ce cas concret, les objets n'ont pas de forme particulière. Le facteur de couleur, relié à l'information spectrale, favorise dans ce cas la séparabilité des différentes classes. Pour les deux niveaux de segmentation (1 et 2), la valeur de ce facteur est de 0,9, alors que le critère de forme est moins important et prend une valeur de 0,1. La valeur des paramètres de compacité et de lissage est de 0,5 pour le Niveau 1, puisque le but de ce niveau est de former des grands objets en se basant sur le critère de couleur (spectrale); ainsi, l'importance de la compacité et du lissage des objets est égal. Par ailleurs, puisque l'idée du Niveau 2 de segmentation est d'extraire des petits objets qui ont des signatures spectrales similaires, il est donc préférable de choisir pour ce niveau un poids plus grand pour le paramètre de compacité (0,9) que pour le lissage (0,1). Le Tableau 3.7 présente les valeurs choisies pour les paramètres de segmentation.

En appliquant les paramètres choisis pour le Niveau 1 (Tableau 3.7), on obtient les contours des grands objets hétérogènes (Figure 3.14a), selon lesquels les zones où l'occupation du sol est complexe sont séparées des autres zones homogènes comme les forêts, l'eau et le milieu urbain de forte densité. Par la suite, le Niveau 2 de la segmentation est appliqué seulement sur les zones hétérogènes, pour obtenir des petites zones plus homogènes (Figure 3.14b). Cette étape vise à délimiter les éléments dans la plaine du bassin versant, comme le milieu urbain de

faible densité (avec les jardins de famille), les constructions, les réservoirs, etc., qui sont soit de petite taille ou soit pour lesquels la valeur spectrale s'approche de celle d'autres éléments.

Tableau 3.7: Paramètres de segmentation

| Paramètres | Niveau 1 (G) | Niveau 2 (P) |
|------------|--------------|--------------|
| Poids | 1 | 1 |
| Échelle | 80 | 20 |
| Couleur | 0,9 | 0,9 |
| Forme | 0,1 | 0,1 |
| Lissage | 0,5 | 0,1 |
| Compacité | 0,5 | 0,9 |

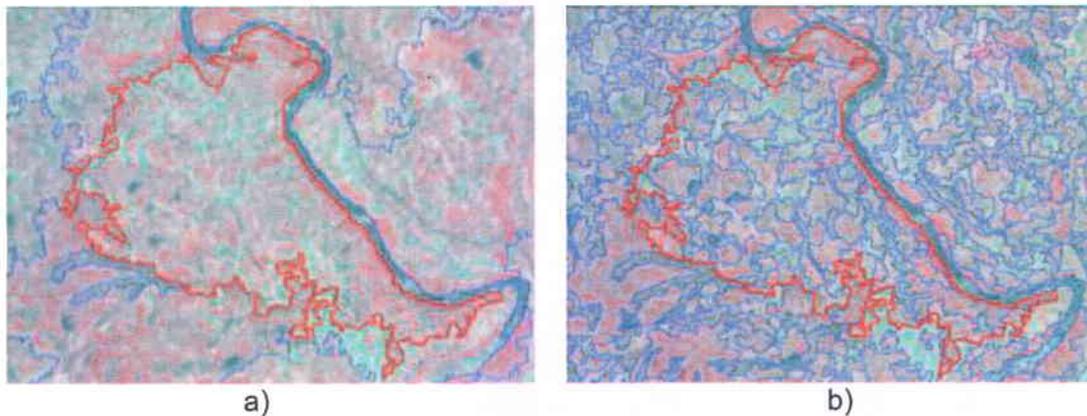


Figure 3.14: Segmentation des images SPOT-4 selon deux niveaux : a) Niveau 1, b) Niveau 2

b. Classification

La classification appliquée dans la présente étude est basée sur la logique floue (Zadeh, 1965), implantée dans le logiciel *eCognition*.

La logique floue est une approche mathématique permettant de quantifier une instruction incertaine. L'idée de cet algorithme est de remplacer l'instruction logique binaire « oui » ou « non » par des valeurs continues de 0 à 1, où la valeur 0 signifie « exactement non » et la valeur 1 signifie « exactement oui ». Toutes les valeurs entre 0 et 1 représentent un état plus ou moins possible entre « oui » et « non ». L'association d'un objet à une classe dépend donc de la valeur

attribuée (entre 0 et 1) à cet objet, faisant appel au concept de la « valeur d'appartenance » (*membership value*) (Willhauck et al., 2000).

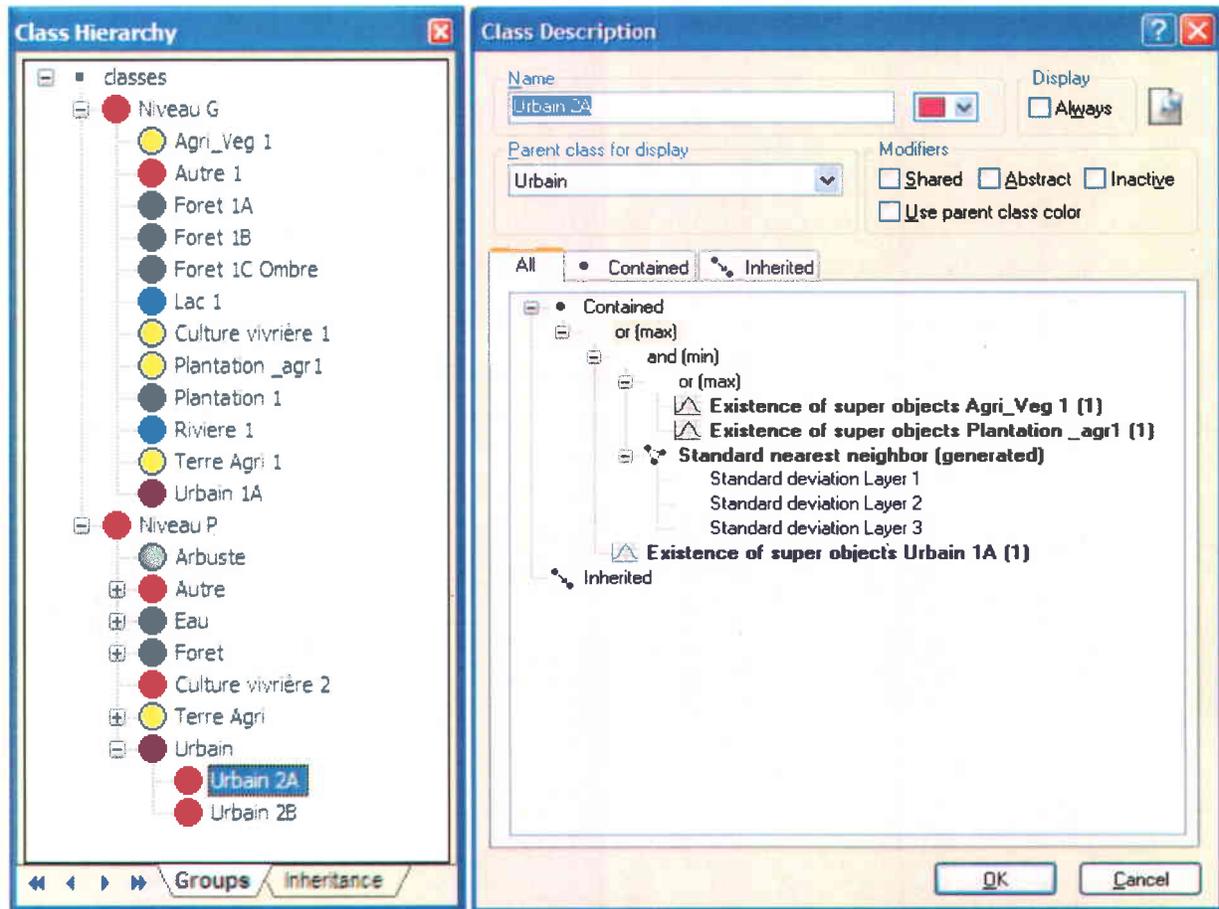
Cette approche permet de classer des objets en considérant leurs attributs ou différentes caractéristiques (par ex. spectrales, spatiales ou contextuelles), dans la description des classes, par des opérateurs logiques. Elle permet aussi d'estimer l'association possible des objets aux autres classes. Il s'agit de déterminer la classe thématique d'un objet en vérifiant si ses caractéristiques satisfont à la description ou aux conditions typiques de la classe. De cette manière, elle permet d'améliorer la classification des objets.

Lorsque la hiérarchie des classes est complexe, la classification hiérarchique est appliquée. Celle-ci utilise une logique prédéfinie pour activer et désactiver les classes en fonction de règles (Dissanska et al., 2009; Trimble, 2011). Il est d'abord important, pour appliquer cette méthode, de construire une hiérarchie des classes thématiques (Figure 3.15a) et ensuite d'effectuer la classification. La hiérarchie des classes est la base de connaissances pour la classification des objets d'une image. Elle contient l'ensemble de toutes les classes, avec leurs échantillons d'entraînement et leur description spécifique. La description des classes contient les expressions décrivant les caractéristiques des objets (Figure 3.15b), ce qui détermine l'appartenance à chaque classe. Le logiciel *eCognition* offre deux modes pour la relation des objets dans la hiérarchie créée : le mode de classification sans caractéristique liée aux classes (*without class-related feature*) et celui avec caractéristique liée aux classes (*with class-related feature*). Le premier mode est approprié dans le cas d'une hiérarchie simple, pour laquelle il n'existe pas de connexion entre les objets des classes. Par contre, le second mode sera utilisé lorsqu'un objet est lié à des objets voisins, à des sous-objets (niveau inférieur) ou à des super-objets (niveau supérieur).

Comme classificateur, on peut utiliser soit l'algorithme du plus proche voisin, soit des fonctions d'appartenance ou soit une combinaison de ces deux approches. Pour le plus proche voisin, la méthode se base sur des échantillons à l'intérieur d'un espace multidimensionnel de caractéristiques défini (*feature space*). L'objet est affecté à la classe du site d'entraînement le plus proche dans l'espace des caractéristiques. Tandis que les fonctions d'appartenance (des fonctions décrivant les propriétés spécifiques des objets) consistent à transformer une valeur arbitraire d'objet en un certain degré compris entre 0 et 1, qui indique le degré d'appartenance à une classe. L'objet est classé selon la valeur d'appartenance la plus élevée.

En consultant des travaux antérieurs (Hoang et al., 2008; Dissanska et al., 2009; Dribault, 2012) ainsi que la complexité de l'occupation du sol de notre zone d'étude, nous avons choisi d'utiliser

la classification hiérarchique supervisée avec le mode de classification avec caractéristique liée aux classes et, comme classificateur, l'algorithme du plus proche voisin ainsi qu'une combinaison de cette approche et des fonctions d'appartenance. Le processus détaillé de la classification hiérarchique appliquée sur le cas du bassin versant étudié est représenté à la Figure 3.16 et sera décrit ci-dessous.



a)

b)

Figure 3.15: Exemple d'hiérarchie des classes thématiques de niveau G et P (a) et description d'une classe (b)

Avant d'appliquer le processus de la classification hiérarchique, tel que décrit, il faut d'abord créer une hiérarchie des classes thématiques (Figure 3.15a). Celle-ci inclut les classes nécessaires pour la classification correspondant à chacun des deux niveaux (Tableau 3.8). Pour le Niveau G, il y a 12 classes correspondant aux quatre principaux types d'occupation du sol du bassin versant (Forêt incluant les plantations, Urbain, Eau, Terre agricole) à différents niveaux de densité (par ex. la classe Forêt), d'hétérogénéité (par ex. le mélange de terre agricole et du milieu urbain dont la classe AGR_VEG1). Le choix des classes du Niveau P s'est basé sur a) les

données sur l'occupation du sol collectées sur le terrain par la candidate en 2010, b) les classes utiles à la modélisation hydrologique et c) la signature spectrale des objets dans les bandes du capteur HRVIR. Le Niveau P comprend des classes thématiques pures incluses dans les classes mixtes (AGR_VEG1, PLA_AGR1 et Forêt 1B) du Niveau G. Les classes de ces deux niveaux sont reliées entre elles et appelées classes hiérarchiques.

Les deux niveaux désignés Niveau G et Niveau P sont des classes appelées « abstraites » puisqu'elles ne représentent pas des classes de l'occupation du sol mais elles permettent de garder les classes hiérarchiques en transparence. Ces classes « abstraites » sont caractérisées seulement par leur numéro de niveau de segmentation. Cette condition permet de limiter les applications aux objets correspondants à leur niveau de segmentation. C'est-à-dire que les règles de classifications du Niveau G sont appliquées aux objets d'image du Niveau 1 de la segmentation et que celles des classes du Niveau P agissent uniquement sur les objets d'image du Niveau 2 de segmentation. Chaque sous-classe est décrite par des expressions spécifiques pour que les objets soient classés dans cette classe.

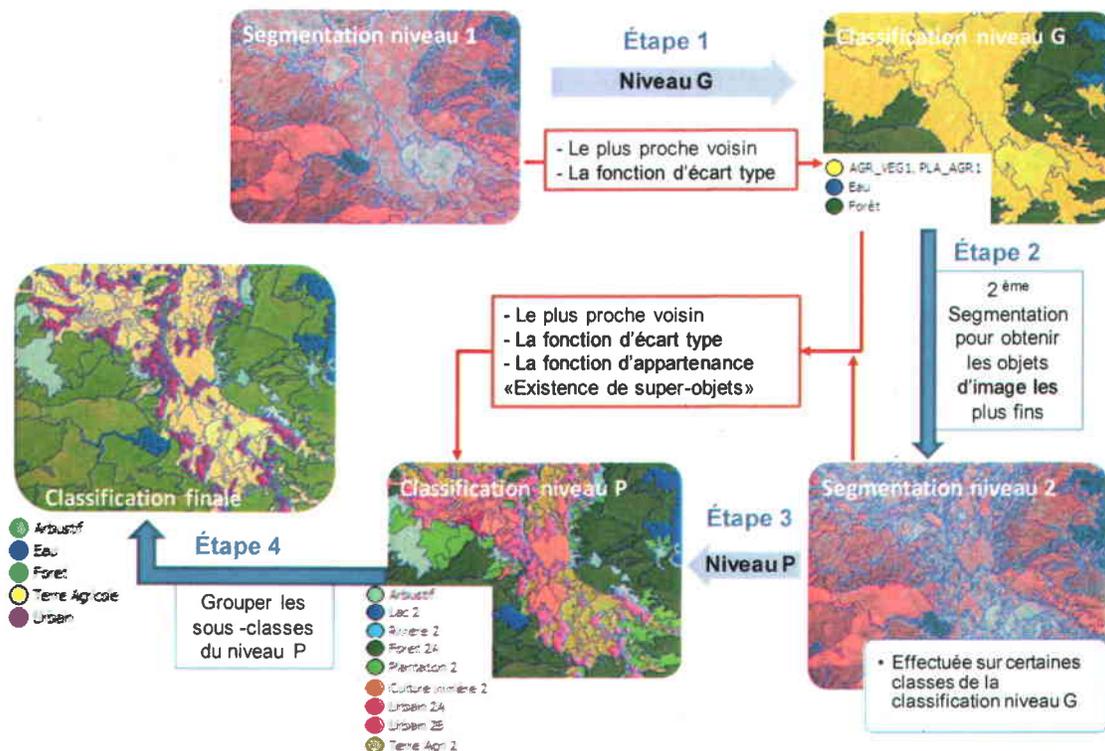


Figure 3.16: Schéma de la classification hiérarchique

La classification commence par le Niveau G; le but est alors de séparer les zones hétérogènes de l'occupation (mélange de végétation, de terre agricole et de zones résidentielles) des autres types homogènes de l'occupation (la forêt, l'eau et les zones urbaines de forte densité). Pour ce faire, 12 classes ont été créées (Tableau 3.8); elles correspondent à des classes plus homogènes (séparées par d'autres classes) comme : les lacs, les rivières, les forêts et les terres agricoles. Les classes mixtes, comme PLA_AGR1, AGR_VEG1 ainsi que les classes Forêt 1B et Terre-Agri 1, sont ensuite utilisées pour la segmentation et la classification du niveau le plus fin. Ces classes peuvent être considérées comme des classes « parents ». À ce niveau, le classificateur du plus proche voisin standard et la fonction d'écart-type (qui calcule l'écart-type des objets selon des caractéristiques définies et celles de leurs voisins) ont été appliqués (Figure 3.16, Étape 1).

Vu que l'occupation du sol dans la plaine du bassin versant est complexe (les maisons alternent avec un couvert végétal diversifié : les jardins familiaux, les cultures vivrières, les plantations), une classification directe, c.-à-d. celle à un seul niveau de segmentation ou bien la classification pixel par pixel, ne peut pas extraire de manière satisfaisante ces types d'objets. Pour cette raison, la classification hiérarchique avec caractéristique liée aux classes a été appliquée sur le Niveau P. La classification d'une classe au Niveau P (Figure 3.16, Étape 3) se base sur les connexions entre les voisins et entre les super-objets du Niveau G, en utilisant une combinaison du classificateur du plus proche voisin, de la fonction d'écart-type et de la fonction d'appartenance « Existence de super-objets » (qui contient les sous-objets du niveau inférieur de la hiérarchie qui ont une relation avec les objets du niveau supérieur). Le but de cette classification est de chercher les objets des classes « enfants »: Urbain A (zone résidentielle forte densité), Urbain B (zone résidentielle faible densité), Constructions, Terres Agricoles, Milieu Arbustif, Plantations et Petits Lacs, à partir des classes « parents » mélangées. Lorsque l'on recherche des classes au Niveau P, seuls les objets du Niveau 2 qui ont une ou plusieurs relations sémantiques avec les classes « parents » choisies à travers les fonctions d'appartenance sont classés dans la classe définie. C'est-à-dire que la classification ne fonctionne pas sur les objets du Niveau 2 qui n'ont pas de relation sémantique avec les classes « parents » choisies, même si leur valeur spectrale est la même. Le Niveau G joue donc maintenant un rôle de masque, ce qui permet de limiter au maximum la confusion entre les objets différents mais de valeur spectrale similaire. Par exemple, la classe Urbain 2A (zone résidentielle de forte densité) est formée d'objets classifiés en tant que Urbain 1A (urbain forte densité) au Niveau G et d'objets du Niveau 2 qui satisfont la valeur d'écart-type définie, et qui sont soit dans la classe AGR_VEG1 ou soit dans la classe PLA_AGR1 du Niveau G (Figure

3.15). Ce processus est effectué sur chaque sous-classe du Niveau P, mais leur relation avec les classes « parents » du niveau super-objets est différente (Tableau 3.8). Une telle organisation des relations horizontales (les voisins) et verticales (super-objets) nous permet de diminuer la confusion entre les classes. Cela est une amélioration dans la méthode proposée, par rapport à la méthode appliquée dans l'étude précédente de Hoang (2007), où la relation « parents/enfants » a été utilisée seulement pour grouper les petits objets du niveau P au niveau le plus grand afin d'établir la carte finale. Autrement dit, dans l'étude de Hoang (2007), il y avait seulement les relations verticales entre des objets.

Tableau 3.8: Classes thématiques de chaque niveau de la classification et la relation super-objets des sous-classes

| Classes du niveau G | Description de la classe | Classes du niveau P | Classes finales du niveau regroupé |
|-------------------------|---|---|------------------------------------|
| AGR_VEG1 ^(*) | Mélange de terre agricole et du milieu urbain | • Terre Agri 2 ^(**) | Terre agricole |
| | | • Urbain 2A ^(***) • Urbain 2B | Urbain |
| | | • Lac 2, Rivière 2 | Eau |
| PLA_AGR 1 | Mélange de plantations, de terre agricole et du milieu urbain | • Plantation 2 | Forêt |
| | | • Terre Agri 2 | Terre agricole |
| | | • Urbain 2A • Urbain 2B | Urbain |
| | | • Lac 2, Rivière 2 | Eau |
| Terre Agri 1 | Terre agricole | Terre Agri 2 | Terre agricole |
| Culture vivrière 1 | Culture vivrière | Culture vivrière 2 | |
| Forêt 1A | Forêt sempervirente, canopée fermée | Forêt 2A | Forêt |
| Forêt 1B | Forêt sempervirente, canopée ouverte | • Forêt 2B | Forêt |
| | | • Arbustif | Arbustif |
| Forêt 1C | Forêt + ombre | Forêt 2C | Forêt |
| Plantation 3 | Plantation (eucalyptus, pins, acacia) | Plantation 2 | |
| Urbain 1A | Zone résidentielle forte densité | Urbain 2 | Urbain |
| Lac 1 | Lac | Lac 2 | Eau |
| Rivière 1 | Rivière | Rivière 2 | |
| Autre 1 | Constructions | Autre 2 | Urbain |

(*) (**): le numéro indique le niveau de la classification correspondant au niveau de segmentation G et P

(***) : A et B indiquent un niveau décroissant de la densité

À l'étape finale (Figure 3.16, Étape 4) les vingt sous-classes du niveau P sont regroupées en cinq classes thématiques, tel que montré au Tableau 3.8.

3.3.3 Validation de la classification

Les informations extraites de données de télédétection sont souvent employées dans un modèle d'aide à la décision (soit un Système d'Information Géographique - SIG, un modèle hydrologique comme HYDROTEL ou un outil de gestion intégrée des bassins comme GIBSI), pour lequel une bonne précision de l'information est requise.

La validation de la précision de la classification devient donc une étape essentielle qui détermine la qualité de la classification et permet de la perfectionner. Autrement dit, l'idée de cette étape est d'identifier les sources d'erreur à corriger pour améliorer la qualité de l'information sur la carte (Congalton et Green, 1999, 2009).

Essentiellement, l'évaluation de la précision peut être un processus quantitatif ou qualitatif. Nous avons appliqué ces deux processus sur notre résultat de la classification.

Avec les données statistiques qui proviennent de l'Office Général de la Statistique (OGS), nous avons fait une validation qualitative, qui consiste à comparer la superficie cultivée en 2007 avec celle de la classification du milieu agricole issue des images SPOT-4 de l'hiver 2007-2008. Seul le milieu Agricole a été choisi pour cette validation parce qu'il s'agit de la seule classe pour laquelle nous avons des données statistiques à l'échelle du district.

L'évaluation quantitative de la précision se fait à l'aide de la matrice d'erreurs ou matrice de confusion (Congalton et Green, 1999, 2009). Ce processus implique la comparaison de deux sources d'information, celle de l'image classifiée vis-à-vis l'information de référence pour le même site. L'information de référence est soit collectée sur le terrain, soit extraite d'autres types de données comme des photos aériennes ou des cartes de la même période que l'image classifiée.

La démarche d'évaluation de la précision consiste à déterminer un nombre d'échantillons de référence, qui est le même pour toutes les catégories de la classification. Néanmoins, puisque la collecte de données de référence pour chaque catégorie est souvent coûteuse, le nombre d'échantillons est réduit au minimum. Les équations basées sur la distribution binomiale, sur l'approximation d'une loi binominale par la loi normale ou sur la distribution multinomiale sont utilisées dans plusieurs recherches pour calculer le nombre d'échantillons (Jensen, 2005).

Toutefois, les équations basées sur la distribution multinomiale sont recommandées lorsqu'on souhaite estimer la précision de multiples classes par la matrice d'erreurs (Congalton and Green, 2009) :

$$n = \frac{B \Pi_i (1 - \Pi_i)}{b_i^2} \quad (9)$$

où :

- n est le nombre d'échantillons
- Π_i ($i = 1, \dots, k$) est la proportion de la surface de la classe i pour laquelle cette proportion est le plus proche de 50%
- b_i est la précision souhaitée de la classe i
- B est le $(\alpha/k) \times 100^{\text{ième}}$ centile de la distribution χ^2 avec 1 degré de liberté. Cette valeur est déterminée à partir de la table de la loi de χ^2 pour $1 - \alpha/k$;
- α est le degré de confiance
- k est le nombre de classes

L'Équation (9) a été appliquée pour calculer le nombre total d'échantillons de référence nécessaire afin de valider la précision des deux niveaux de la classification. Étant donné un intervalle de confiance attendue de 90 %, une erreur admissible de 5 % et une proportion des classes dominantes de 71 % (Niveau P) et de 60 % (Niveau G), pour les cinq classes, on obtient un nombre de 458 échantillons pour le Niveau P, soit 92 échantillons par classe, et de 637 échantillons pour le Niveau G, soit 212 échantillons par classes. Ces échantillons ont été choisis aléatoirement par la méthode d'échantillonnage aléatoire à partir de la carte de l'occupation du sol de référence de 2010 (Tableau 3.3). Les informations issues des échantillons de référence sont ensuite comparées avec celles de la classification dérivée d'images SPOT-4. À cette étape, la matrice d'erreurs (matrice de confusion) a été créée. Cette matrice est un tableau de chiffres qui montre la relation entre deux sources d'information, celle de la classification (des pixels ou des polygones) et celle de référence (qui peut être une carte ou des données collectées sur le terrain). La matrice d'erreurs est utilisée pour évaluer la précision de la classification de données de télédétection. Les colonnes de la matrice représentent les données de référence collectées sur la zone de vérification alors que les lignes représentant la classification générée par des données de télédétection. Le point d'intersection des lignes et des colonnes résume le nombre d'échantillons assigné à une classe particulière par rapport à la même classe selon les données de référence. Les valeurs indiquées sur la diagonale de la matrice représentent la concordance entre la classification et la vérification.

Comme son nom l'indique, la matrice d'erreurs est un outil qui permet de calculer les erreurs de la classification. Il existe deux types d'erreurs en classification : les erreurs de commission et les

erreurs d'omission. Ces deux types d'erreurs permettent d'établir les mesures de précision d'une classification : la précision du producteur (qui est le complément de la mesure des erreurs d'omission) et la précision de l'utilisateur (qui est le complément de la mesure des erreurs de commission), lesquelles sont calculées par les équations (10) et (11). La précision de l'utilisateur est la probabilité qu'un pixel classifié dans une classe thématique donnée, par le processus de classification, représente réellement un élément de cette classe sur le terrain. La précision du producteur est la probabilité pour qu'un site de vérification d'une classe soit identifié correctement comme appartenant à cette classe sur l'image classifiée. La matrice d'erreurs permet également de calculer la précision globale (le total des pixels bien classifiés par rapport au total des pixels dans la matrice d'erreur) et l'indice Kappa (K), une autre mesure de l'accord de la précision, calculé selon l'équation (13) ici-bas. Une valeur de $K > 0,80$ représente une forte précision entre l'information de la carte de la classification et celle des données de référence. Lorsque la valeur de K varie entre 0,4 et 0,8, ceci correspond à une précision modérée (Congalton et Green, 2009).

$$\text{Précision du producteur} = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} * 100 \quad (10)$$

$$\text{Précision d'utilisateur} = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} * 100 \quad (11)$$

$$\text{Précision globale} = \frac{D}{N} * 100 \quad (12)$$

$$K = \left(\frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})} \right) \quad (13)$$

- où :
- x_{ii} est le nombre de pixels classés correctement
 - x_{+i} est la somme des valeurs de la colonne i
 - x_{i+} est la somme des valeurs de la ligne i
 - D est la somme des pixels bien classés (éléments de la diagonale dans la matrice d'erreur)
 - N est la somme des pixels dans la matrice d'erreur
 - k est le nombre de lignes dans la matrice.

3.4 Traitement et analyse des images RADARSAT-2, double polarisation

Le troisième objectif de la thèse est l'identification des rizières à partir de données RADARSAT-2 en double polarisation ou polarimétriques et la validation des approches retenues. Cette section (3.4) présente la méthodologie d'identification des rizières du bassin de la rivière Cáu à partir des images double polarisation. La section 3.5 se consacrera au traitement des données polarimétriques et à la comparaison des deux approches. D'abord, le prétraitement des images est décrit à la section 3.4.1. Deuxièmement, l'approche de seuillage des images est présentée (section 3.4.2). Finalement, la section 3.4.3 décrit la méthodologie appliquée pour valider la classification. Les approches choisies ont été appliquées à la série d'images double polarisation (HH et HV) en mode standard (S5), acquises entre les mois de mai 2009 et d'avril 2010 et transmises en format SGF.

3.4.1 Prétraitement des images SGF

La première étape est la transformation des valeurs numériques en coefficient de rétrodiffusion. Les étapes suivantes du prétraitement d'images sont la correction géométrique et le filtrage. Ces différentes étapes sont décrites aux sous-sections suivantes.

a. Transformation radiométrique

Chaque pixel d'une image numérique satellitaire est défini par un compte numérique (CN) qui est en fait une mesure de l'amplitude du champ électrique reçu par l'antenne. Ce compte dépend des paramètres d'acquisition. Afin de pouvoir effectuer des analyses multi-temporelles, comparer différentes images de différents capteurs, etc., il est nécessaire de calibrer les données. Pour des images SAR, ce travail est assuré par la calibration radiométrique des images (Freeman, 1992, Baghdadi et al. 2003), qui permettra ensuite de calculer, à partir du signal enregistré (CN), une grandeur sans dimension appelée le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) (ANNEXE III) et ce pour chaque polarisation :

$$\sigma_{ij}^0(P) = (CN^2 + A_0) / A_j \times \sin(I_j) \quad (14)$$

où :

$\sigma_{ij}^0(P)$: le rétrodiffusion du pixel (i,j) en puissance

CN : la valeur numérique

A_0 : l'offset fixe

A_j : la valeur d'étalonnage du gain

l_j : l'angle d'incidence la colonne j

Cette grandeur σ° dépend non seulement des paramètres physiques de la surface, tels que sa rugosité et son humidité, mais également de paramètres propres au capteur, comme la longueur d'onde du signal (bande C), la polarisation et l'angle d'incidence au sol.

Généralement, le coefficient de rétrodiffusion s'écrit en décibels plutôt qu'en puissance. Pour le transformer en décibels, il suffit d'appliquer la relation suivante :

$$\sigma_{ij}^0 \text{ (dB)} = 10 \times \log_{10}(\sigma_{ij}^0 \text{ (P)}) \quad (15)$$

Les données de RADARSAT-2 utilisées ont déjà calibrées au moyen du patron d'antenne du radar, mesuré avant le lancement du satellite, et de sa validation à l'aide des valeurs de rétrodiffusion de la forêt amazonienne (valeur constante de -6.6 dB quel que soit l'angle d'incidence). Aussi, des réflecteurs en coins et *des Active Radar Calibrators* installés au sol, qui retournent une quantité connue d'énergie à l'antenne, sont utilisés pour déterminer les paramètres de calibration reliant le compte numérique (CN) au coefficient de rétrodiffusion (Équation 14). Cette calibration radiométrique est faite pour chacun des canaux de polarisation et pour chaque mode d'acquisition (S1, S2,...S5, FQ21,...), puis les valeurs sont enregistrées dans le fichier d'en-tête de chaque image. Cette calibration permet une corrélation de séries de données chronologiques pour les applications telles que la détection des changements à long terme (Luscombe, 2004). La précision de la calibration est inférieure à 1 dB pour les modes (MDA, 2013).

b. Correction géométrique

L'approche photogrammétrique qui a été appliquée sur les images radar (mode S5) se base sur le modèle mathématique appelé le modèle de Toutin (1995). Ce modèle mathématique a été utilisé pour la majorité des images radar satellites (SEASAT, SIR-C, JERS, ERS, ENVISAT, RADARSAT, PALSAR, TerraSAR-X), acquises sur des environnements topographiques différents dans des conditions opérationnelles très variées (Clavet et al., 2011). Il tient compte des principes de la radargrammétrie pour traiter la géométrie spécifique des images radar. Il utilise les lois de mécanique céleste (équations de Lagrange pour une orbite perturbée) pour mieux calculer les paramètres de l'orbite osculatrice à la trajectoire, afin de créer des liens entre

les différentes positions du satellite. Quelques adaptations ont été nécessaires pour les données RADARSAT-2. Le détail du modèle est décrit dans Toutin et Chénier (2009). L'étape la plus importante de l'application de ce modèle est la collection des points d'appui (au moins 8 points) pour calculer les paramètres du modèle. Pour ce faire, des images SPOT-4 déjà géoréférencées, des données vectorielles (le réseau routier) et un MNA de 9 m de résolution couvrant l'ensemble du bassin versant ont été utilisés. Le nombre de points d'appui et la précision de la correction des images S5 sont présentés au Tableau 3.9.

Tableau 3.9: Précision de la correction géométrique des images S5 de RADARSAT-2

| | Date d'acquisition | RMS X (pixel) | RMS Y (pixel) | RMS (pixel) | Nombre de GCPs (point) |
|------|--------------------|---------------|---------------|-------------|------------------------|
| 2009 | 15 mai | 0,53 | 0,44 | 0,69 | 9 |
| | 08 juin | 0,41 | 0,45 | 0,65 | 10 |
| | 02 juil. | 0,20 | 0,28 | 0,34 | 13 |
| | 26 juil. | 0,31 | 0,20 | 0,37 | 16 |
| | 19 août | 0,21 | 0,21 | 0,03 | 12 |
| | 12 sept. | 0,20 | 0,35 | 0,41 | 18 |
| | 06 oct. | 0,53 | 0,60 | 0,80 | 10 |
| | 30 oct. | 0,32 | 0,22 | 0,38 | 16 |
| | 23 nov. | 0,32 | 0,35 | 0,47 | 10 |
| | 17 déc. | 0,38 | 0,34 | 0,51 | 13 |
| 2010 | 10 jan. | 0,08 | 0,24 | 0,25 | 13 |
| | 23 mars | 0,30 | 0,18 | 0,35 | 9 |
| | 16 avr. | 0,32 | 0,38 | 0,49 | 8 |
| | 10 mai | 0,37 | 0,25 | 0,44 | 9 |

b. Filtrage du chatoiement (speckle)

Les images SAR contiennent un certain degré de bruit appelé chatoiement (ou *speckle* en anglais), dû à l'interférence des ondes réfléchies par de nombreux diffuseurs élémentaires. Les signaux micro-ondes qui proviennent d'objets présents à la surface de la Terre peuvent être en phase, ou non, lorsqu'ils sont reçus par le capteur. Cela produit des pixels plus brillants et plus sombres dans les images radar, en leur donnant une apparence nettement granuleuse (Lee et al., 1994; Lillesand, 2004). Le chatoiement rend l'interprétation plus difficile. Cet effet réduit également l'efficacité de la segmentation, de la classification ainsi que d'autres techniques d'extraction de l'information.

Pour atténuer les effets de chatoiement, plusieurs techniques ont été développées et mises au point. Parmi les techniques de suppression du chatoiement, les filtres adaptatifs, tels que le filtre

de Lee (Lee, 1980), le filtre de Frost, le filtre de Touzi et le filtre médian (Lee et al., 1994; Touzi, 2002), sont régulièrement utilisés. Ces types de filtre modifient une image, pixel par pixel, en tenant compte des caractéristiques locales de l'image, et en adaptant leur poids selon des indicateurs statistiques calculés dans une fenêtre. Autrement dit, ces filtres modifient la valeur d'un pixel en fonction du voisinage de ce pixel. Le principe général d'un filtrage adaptatif est d'introduire une ou plusieurs conditions au remplacement de la valeur originale par celle produite par le filtre (Caloz et Collet, 2001). L'avantage des filtres est de produire une évaluation précise du coefficient de rétrodiffusion à l'intérieur de zones homogènes, tout en conservant la structure des contours et de la texture dans les zones hétérogènes (CCT, 2008). Toutefois, l'efficacité des algorithmes de filtrage peut varier d'une application à l'autre. Puisque la plupart de ces filtres sont appliqués sur une seule image à la fois, ils sont donc dits mono-canal. Dans un certain nombre d'applications, des séries de données sont disponibles sur une même scène. Des filtres multi-canaux (multi-temporels et/ou multi-polarisations et/ou multi-fréquences) ont été développés pour exploiter statistiquement cette multiplicité des observations dans le but de réduire le chatoiement dans chacune des images (Bouvet, 2009). Ces filtres consistent en des combinaisons linéaires pixel à pixel de M images d'intensité I_i , afin d'obtenir M images J_k , telles que l'information en intensité soit préservée tout en minimisant le chatoiement. Donc le nombre de vues initial de l'image augmente à un nombre équivalent de vues (ENL - *Equivalent Number of Looks*) plus élevé (Quegan et Yu, 2001; Bouvet et al. 2009), qui peut être directement relié au coefficient de variation de l'intensité $CV = \frac{1}{\sqrt{ENL}}$ (Bouvet, 2009). Le principe de ces filtres a été introduit par Lee et al. (1991) dans le cas des données polarimétriques, puis généralisé par Bruniquel et Lopes (1997). Quegan et Yu (2001) ont dérivé les formes du filtre pour des canaux non corrélés; le filtre prend alors une forme simple et plus facile à manipuler :

$$J_k = \frac{\langle I_k \rangle}{M} \sum_{i=1}^M \frac{I_i}{\langle I_i \rangle} \quad (16)$$

- où :
- J_k l'intensité de l'image de sortie k au pixel (x,y) ;
 - I_i l'intensité de l'image d'entrée i au pixel (x,y) ;
 - $\langle I_i \rangle$ l'intensité moyenne locale de l'image d'entrée i au pixel (x,y) . L'intensité moyenne locale est calculée en utilisant la moyenne d'une fenêtre de N pixels autour du pixel (x,y) .

Quegan et Yu (2001) ont aussi montré que, dans le cas d'un filtrage avec M images ayant le même nombre de vues L (Annexe V) et avec une fenêtre de N pixels, la valeur théorique d'ENL de l'image filtrée est :

$$ENL = \frac{MNL}{M+N-1} \quad (17)$$

Bouvet et al. (2009) ont utilisé ce filtre pour améliorer l'estimation du coefficient de rétrodiffusion dans des parcelles de riz au Sud du Vietnam, afin d'affiner la discrimination des différents états des champs de riz avant la période de semis. En augmentant l'ENL (Équation 17), ce filtre permet de diminuer le chatoiement tout en préservant l'information et la résolution spatiale de chaque image. Ce filtre est très performant lorsqu'utilisé avec des données multi-temporelles (Quegan et Yu, 2001). Toutefois, dans le cas des applications utilisant un rapport des intensités de rétrodiffusion, ce filtre n'est pas recommandé. Bouvet et al. (2009) ont remarqué que le rapport de deux images filtrées ensemble équivaut à avoir filtré chacune des images avec un filtre moyen utilisant une fenêtre adaptative.

Pour cette raison, dans notre étude, nous avons appliqué le filtre multi-canaux sur 14 images RADARSAT-2 en double polarisation HH et HV en vue d'améliorer l'estimation de la variation du coefficient de rétrodiffusion des champs de riz. Une fenêtre de 7×7 ($N=49$ pixels) a été choisie; le nombre de vue initial étant de $L=1$, on obtient ainsi un $ENL = 18$.

Avant l'identification des rizières, nous avons appliqué le filtre *Enhanced Lee* (Lee et al., 1994). Les filtres de Lee utilisent la distribution statistique des valeurs de CN (Compte Numérique) dans la fenêtre d'application (fenêtre de convolution) pour estimer la valeur du pixel d'intérêt. Ils minimisent la perte d'information radiométrique et texturale. Le principe des filtres de Lee est basé sur l'hypothèse que la valeur du pixel contenant le bruit peut être remplacée par celle du pixel sans le bruit, qui est la somme pondérée de la valeur de pixel (centrale) observée et de la valeur moyenne, calculée à partir d'une région homogène de l'image.

Mathématiquement, le principe des filtres de Lee s'exprime ainsi :

$$\hat{x} = \bar{x} + b(z - \bar{x}) \quad (18)$$

où b est un coefficient de filtrage adaptatif, basé sur les statistiques locales, donné par :

$$b = \frac{\text{var}(x)}{\text{var}(z)} \quad (19)$$

$$\bar{x} = \bar{z} \quad (20)$$

$$\text{var}(x) = \frac{\text{var}(z) - \bar{z}^2 \sigma_v^2}{\sigma_v^2 + 1} \quad (21)$$

où \hat{x} : la valeur du signal (x) après le filtrage ou le meilleur estimé de x
 \bar{x} : la moyenne des pixels dans la fenêtre de convolution
 $\text{var}(x)$: la variance de x dans la fenêtre de convolution
 $\text{var}(z)$: la variance locale de \bar{z}
 \bar{z} : la moyenne locale des pixels contenant le bruit (dans une fenêtre de taille n x n)
 σ_v : le rapport de l'écart-type des intensités sur la moyenne des intensités de chacune des vues (*multi-looks*) des différentes images (Lee et al., 1994).

La taille de la fenêtre d'application influence le résultat du filtrage. Si la fenêtre est trop petite, l'algorithme de filtrage n'est pas efficace. Par contre, si la fenêtre est trop large, les détails subtils de l'image seront perdus. Une petite fenêtre (3x3 ou 5x5) est recommandée lorsqu'on veut préserver la texture des informations, sinon une fenêtre de 7x7 est un bon choix (Lee, 1980, Lee et al., 1994). Dans cette étude, trois tailles de fenêtres, 5x5, 7x7 et 9x9, ont été testées. En raison du caractère morcelé de l'occupation du sol du bassin versant, la taille finalement choisie est de 5x5, afin de préserver les informations des petits objets.

3.4.2 Cartographie des rizières par le mode double polarisation

Tel que décrit au Chapitre 2, la méthode adoptée pour la cartographie des rizières du bassin versant se base sur la technique de seuillage. La méthodologie est présentée à la Figure 3.17. Après l'étape de prétraitement de données (Étape 1), des échantillons de rizières (Les classes Riz 1, Riz 2, Riz 3 et Riz 4 représentent les états de croissance du riz, différenciées par la valeur de rétrodiffusion et la couleur affichée sur l'image en composition couleurs RVB), de forêt, de plantations (eucalyptus, acacia) et de jardins familiaux ont été sélectionnés (voir des exemples à la Figure 3.18) en se basant sur les données de terrain. La moyenne des coefficients de rétrodiffusion (σ^0) intensité de chacune de ces classes d'occupation du sol a été calculée pour chacune des 14 images reçues et pour chacune des deux polarisations (Étape 2). La variation temporelle des coefficients de rétrodiffusion dans chacune des deux polarisations et dans des rapports des intensités de rétrodiffusion a ensuite été analysée (Étape 3) tant pour : a) le riz et les autres types de végétation, que b) le riz durant les deux saisons de culture. Cette analyse des signatures spectrales permet finalement de déterminer les seuils (Étape 4) qui sont appliqués pour créer la carte des rizières (Étape 5).

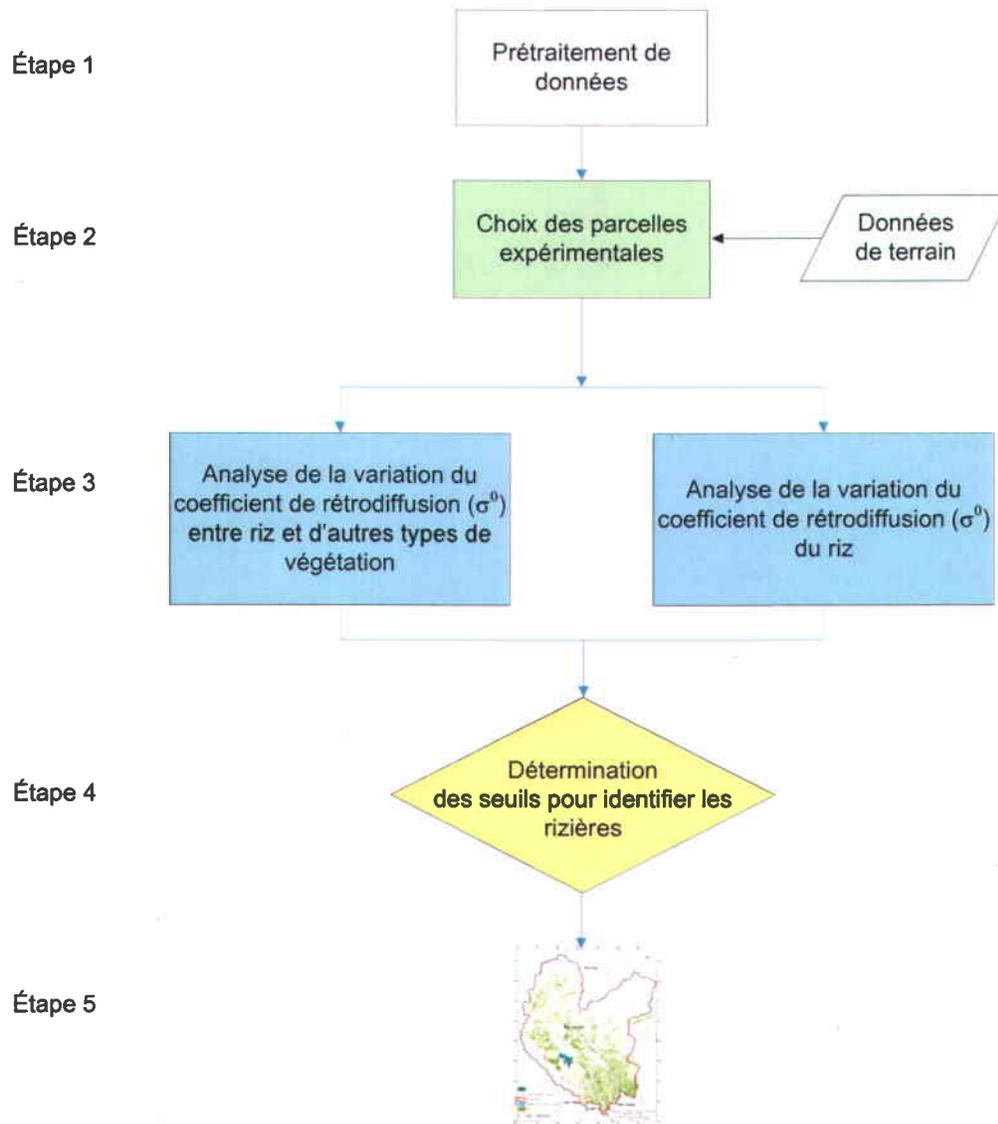


Figure 3.17: Démarche de détection des rizières en utilisant des images RADARSAT-2 en double polarisation (HH et HV)

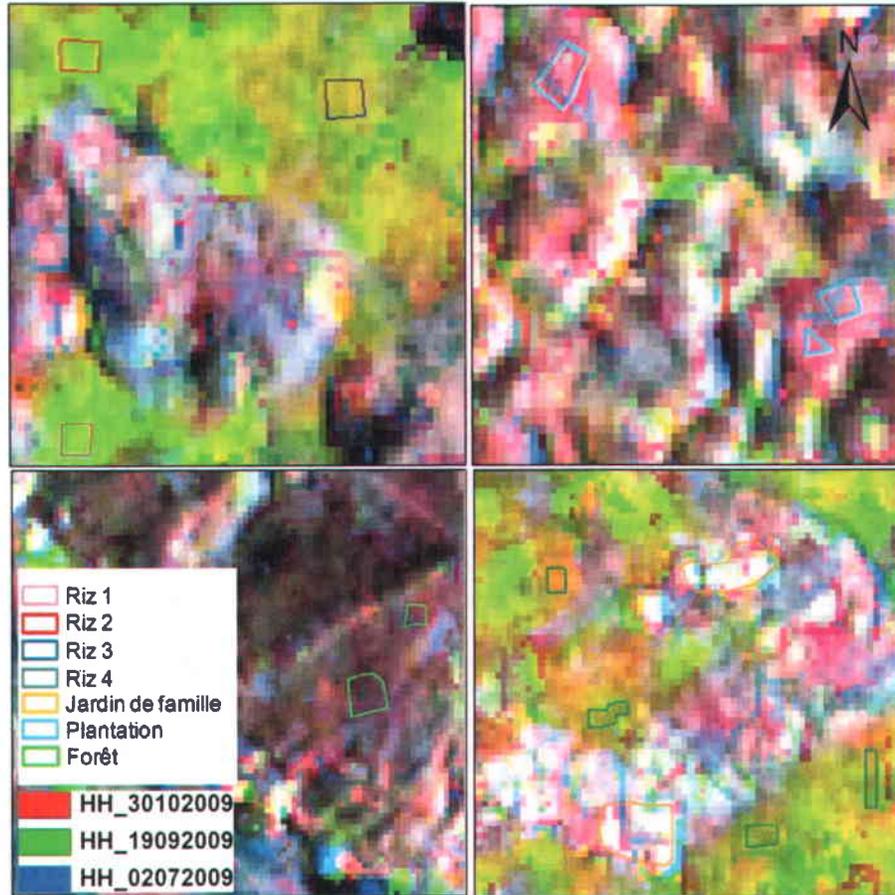


Figure 3.18: Exemples de sites d'échantillons de riz et d'autres types d'occupation du sol affichent sur l'image en composition de couleur RVB de trois dates (en polarisation HH) de la saison traditionnelle du riz 2009; bande Rouge = fin de saison; Vert = mi-saison; Bleu = début de saison

3.4.3 Validation de la classification par seuillage

La méthode utilisée pour valider les classifications d'occupation du sol extraites des images SPOT-4 a été décrite à la section 3.3.3. Toutefois, dans le cas des images RADARSAT-2, il y a seulement deux classes (riz et non-riz) à valider et donc le nombre d'échantillons a été calculé selon l'équation (22). Cette équation est recommandée lorsqu'on n'a pas d'information concernant la proportion Π_i ; on suppose alors qu'il y a une classe qui occupe 50% la surface de la zone d'étude (Congalton et Green, 2009).

$$n = \frac{B}{4b_i^2} \quad (22)$$

où : n est le nombre d'échantillons

b_i est la précision souhaitée de la classe

B est le $(\alpha/k) \times 100^{\text{ième}}$ centile de la distribution χ^2 avec 1 degré de liberté. Cette valeur est déterminée à partir de la table de la loi de χ^2 pour $1-\alpha/k$

α est le degré de confiance
 k est le nombre de classes.

Étant donnée une précision attendue de 90 %, une erreur admissible de 5 % et une proportion supposée des classes dominantes de 50 %, on obtient un nombre de 384 échantillons, soit 192 échantillons par classe. Ces échantillons ont été choisis aléatoirement par la méthode d'échantillonnage aléatoire à partir de la carte de l'occupation du sol de référence de 2010. Ils ont par la suite été comparés avec les rizières dérivées d'images RADARSAT-2. La validation a été réalisée à l'aide de la matrice d'erreurs.

De plus, une comparaison de la classification des rizières avec 10 champs expérimentaux a été réalisée pour évaluer la précision de la classification.

3.5 Traitement des images RADARSAT-2 polarimétriques

Deux images polarimétriques présentant la période de mi-saison (où le plant de riz atteintes à la phase végétative, le signal du riz est plus fort) pour les deux saisons de culture du riz ont été choisies, soit celle du 21 août 2009 et celle du 18 avril 2010. Ces images sont fournies sous forme complexe et le produit contient l'intensité du signal et la différence de phase dans les quatre polarisations (HH, HV, VV, VH).

Le processus de traitement des images polarimétriques est présenté à la Figure 3.19. La première étape est l'extraction de la matrice de cohérence (T). Tel que mentionné au chapitre 2, la matrice de cohérence (T) est le produit de la multiplication du vecteur \underline{k}_p (Équation 3) avec lui-même. À partir de l'équation (5), on peut représenter l'expression de la matrice (T) comme suit :

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2 \langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2 \langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2 \langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2 \langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4 \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (23)$$

où : $\langle \dots \rangle$ signifie la moyenne spatiale au cours du traitement, et $|\dots|$ indique la valeur absolue.

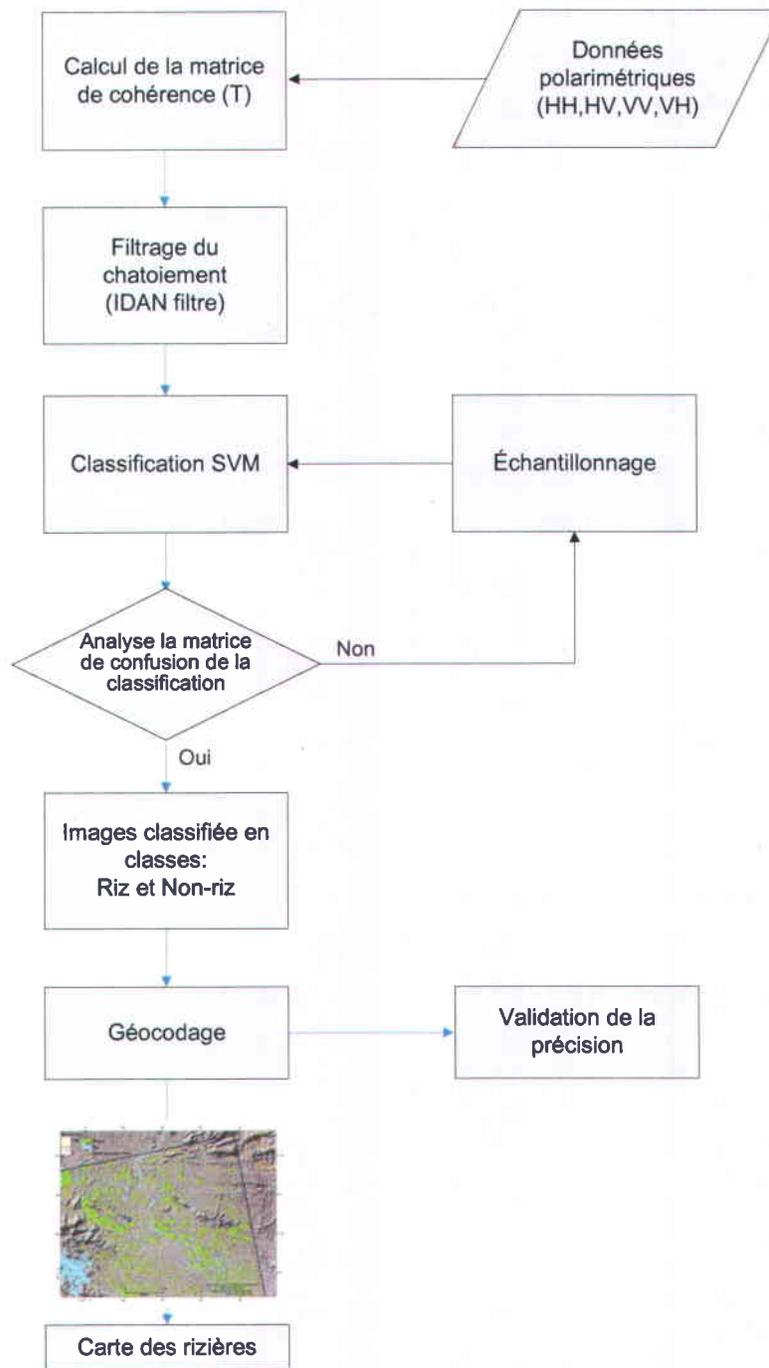


Figure 3.19: Processus de la classification des rizières au moyen d'images polarimétriques et de l'algorithme SVM.

La deuxième étape est l'application d'un filtre pour diminuer le chatoiement. La section 3.5.1 décrit le filtre choisi, soit le filtre IDAN. Ensuite, l'algorithme SVM a été utilisé comme classificateur. Cet algorithme et son application sont décrits à la section 3.5.2. Une analyse de la matrice de confusion permet d'évaluer si le résultat de la classification est bon. S'il y a de la confusion entre des classes, il est nécessaire de reprendre la classification avec de nouveaux sites d'entraînement. Sinon, le géocodage est appliqué sur les images classifiées afin d'effectuer la validation de la classification en utilisant des données de référence et créer les cartes des rizières.

L'ensemble de ce processus de traitement des images a été réalisé à l'aide du logiciel PolSARpro, développé par le professeur Éric Pottier et ses collègues et distribué par l'Agence spatiale européenne (Lee et Pottier, 2009). Le logiciel PolSARpro est un outil d'enseignement qui permet de traiter et d'exploiter des images SAR polarimétriques et interférométriques (Lee et Pottier, 2009).

3.5.1 Filtrage du chatoiement

Les causes du chatoiement présent dans les images SAR ont été présentées à la section 3.4.1. Parmi les filtres adaptatifs développés spécialement pour les images polarimétriques, le filtre IDAN (*Intensity Driven Adaptive Neighborhood*), développé par Vasile (Vasile et al., 2006), a été choisi pour être appliqué sur les deux images polarimétriques choisies (21 août 2009, 18 avril 2010) de la zone retenue (site 2, Figure 3.5). Ce filtre permet de réduire le chatoiement tout en conservant les contours et les fins détails et d'éviter l'effet de flou commun à plusieurs filtres polarimétriques (Vasile et al., 2006).

Le filtre IDAN s'appuie sur le concept du voisinage adaptatif (*Adaptive Neighborhood*), basé sur la croissance de région, introduit par Gordon et Rangayyan (Gordon et Rangayyan, 1984, cité dans Vasile, 2007) dans le contexte de l'imagerie médicale. Selon Vasile (2007), « en chaque pixel de l'image (appelé germe), un voisinage adaptatif de forme et taille variables est déterminé, la seule contrainte imposée étant celle de la connexité. Ce voisinage regroupe les pixels appartenant à la même population statistique que le germe. Ainsi, l'estimé du germe est obtenu en utilisant seulement les pixels appartenant au voisinage adaptatif ». Il s'agit d'une méthode de filtrage qui s'appuie sur l'information d'intensité SAR pour déterminer un voisinage adaptatif. Ces informations correspondent aux éléments diagonaux de la matrice de cohérence polarimétrique (POL-SAR), interférométrique (InSAR) ou polarimétrique - interférométrique (POL-

InSAR). Le détail de l'algorithme appliqué pour les données POLSAR est présenté dans Vasile et al. (2005). En bref, l'algorithme effectue sur chaque pixel une croissance de région avec un test d'agrégation qui combine les informations des composantes d'intensité disponibles (trois éléments diagonaux de la matrice de cohérence dans le cas de données polarimétriques). Après le calcul de la moyenne multi-vues des intensités (nombre complexe), une estimation approximative du bruit (*noisy estimation*) est disponible. Un vecteur multi-varié comprenant les éléments de la diagonale principale de la matrice de cohérence (T) est alors construit :

$$[p](m,n) = \begin{bmatrix} [T]_{11}(m,n) \\ [T]_{22}(m,n) \\ [T]_{33}(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1(m,n) \\ p_2(m,n) \\ p_3(m,n) \end{bmatrix} \quad (24)$$

En notant $[p]_i(k,l)$ le vecteur d'intensité de la composante $i = (1, \dots, 3)$ du germe situé au pixel (k,l) . Le processus comprend quatre étapes de croissance de région :

- Étape 1 : l'estimation approximative de la valeur de départ. Un filtre médian 3×3 (Lee, 1981) a été utilisé comme valeur de départ « germe » $\widehat{[p]}(m,n)$, (vecteur p).
- Étape 2 : la croissance de région, c'est-à-dire l'agrégation progressive des pixels connexes (k,l) , les pixels voisins de huit directions du germe. Le but de cette étape est de garder dans la fenêtre de filtrage seulement les pixels dont la différence entre leur valeur et celle du germe (m,n) est inférieure à deux fois le coefficient de variation du bruit ($\pm 2\sigma_n/\mu_n$), où μ_n et σ_n sont respectivement la moyenne et l'écart-type du bruit. Le coefficient de variation du bruit, σ_n/μ_n , est un paramètre standard de l'image SAR qui est constant dans les zones homogènes et égal à $(1/\sqrt{ENL})$, où ENL est le nombre de vues équivalent. Cette procédure est appliquée pour tous les nouveaux pixels voisins. La croissance s'arrête lorsque plus aucun pixel connexe ne satisfait le test d'agrégation ou lorsqu'un nombre maximal de pixels, N_{max} , est atteint. Les pixels testés mais pas acceptés à l'intérieur d'un voisinage adaptatif (appelés pixels fond) sont stockés dans une liste séparée.
- Étape 3 : l'estimation affinée de la valeur du germe $\overline{[p]}(m,n)$ à partir du voisinage issu de la première étape. Le processus est le même que celui des étapes 1 et 2 mais la valeur du germe initial pour l'étape 3 est mis à jour par $\overline{[p]}(m,n)$.
- Étape 4 : la réinspection des pixels fond et leur agrégation au voisinage adaptatif si l'écart de ces pixels avec le germe est inférieur à $6\sigma_n/\mu_n$.

Dans le cas d'étude, le N_{\max} choisi est de 50. La Figure 3.20 présente un exemple d'une de nos images SAR (celle du 21 août 2009) avant (Figure 3.20a) et après (Figure 3.20b) avoir appliqué le filtre IDAN. On note que les éléments linéaires comme les routes, les canaux (en noir) et les zones habitées (en blanc) ressortent davantage après le filtre.

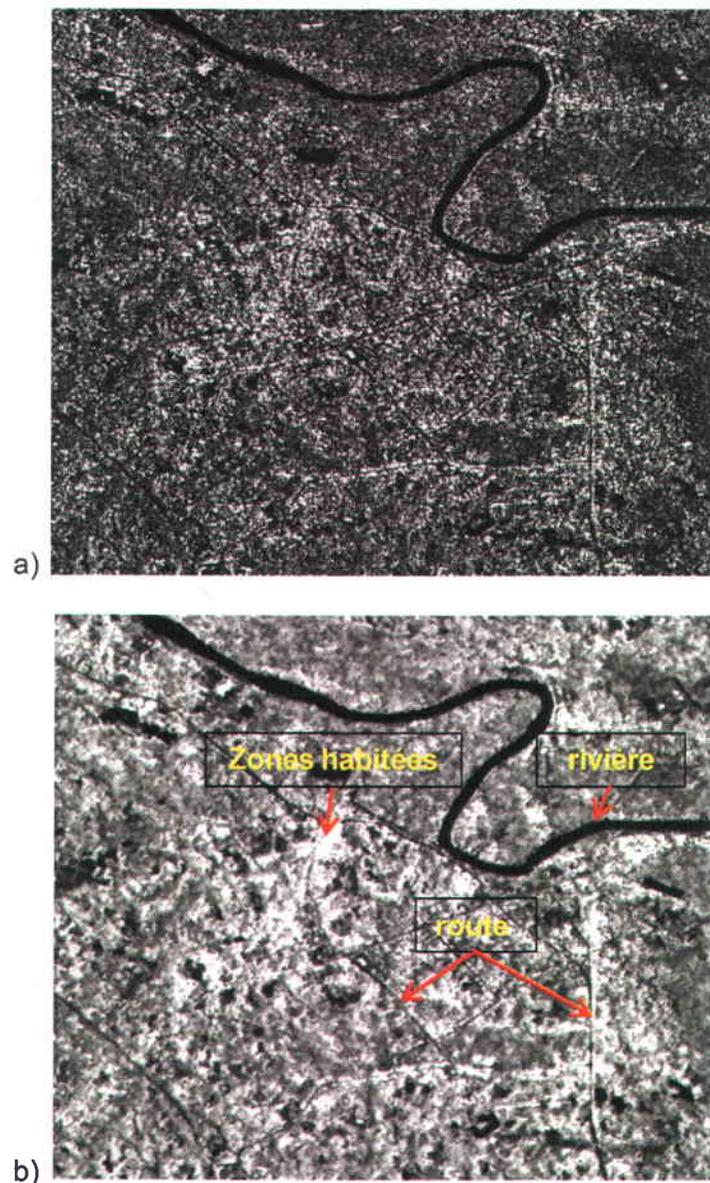


Figure 3.20: Exemple de l'image T_{11} , acquise le 21 août 2009, avant (a) et après (b) le filtrage IDAN avec $N_{\max} = 50$

3.5.2 Classification des rizières à partir de données polarimétriques

Cette section présente la classification *Support Vector Machine* (SVM) et son application pour le cas d'étude. Cet algorithme a été appliqué avec succès pour des images RSO polarimétriques mais pour d'autres thématiques (Mermoz, 2010; Zhu et Blumberg, 2002, Lardeux et al., 2009, Hosseini et al., 2011). Le SVM est une méthode de classification par apprentissage supervisée, qui fut introduite dans les années 1990 par Vapnik (Vapnik, 1999). Cette méthode repose sur l'existence d'un classificateur linéaire dans un espace approprié. Elle est basée sur l'utilisation d'une fonction noyau (*kernel function*). Le but d'une fonction noyau est de pondérer les observations par rapport à un point de référence de sorte que plus une observation est proche de la référence, plus son poids est grand (Mathieu-Dupas, 2010). Elle permet donc une séparation optimale des données.

Supposons qu'il y a deux classes d'échantillons, l'idée du SVM est de trouver un classificateur qui va séparer les données et maximiser la distance entre ces deux classes. Ce classificateur est un classificateur linéaire appelé hyperplan (frontière de décision). La Figure 3.21 montre un exemple d'hyperplan (ligne pointillée en bleu) qui sépare les deux ensembles de points. L'hyperplan est déterminé par les points les plus proches. Ces points sont appelés vecteurs supports (*support vectors*). Il existe donc une multitude d'hyperplans valides. Néanmoins, la propriété du SVM est que l'hyperplan séparateur doit être optimal. Parmi les hyperplans valides, on cherche celui dont la distance minimale aux échantillons d'apprentissage est maximale. Cette distance entre l'hyperplan et les échantillons les plus proches se nomme la marge.

La notion de marge maximale et la procédure de recherche de l'hyperplan séparateur ne permettent de résoudre que des problèmes de discrimination linéairement séparables. Dans la plupart des problèmes réels, il n'y a pas de séparation linéaire possible entre les données. L'idée du SVM est de changer l'espace des données. Une transformation (Φ) permet de transformer un problème de séparation non linéaire dans l'espace de représentation en un problème de séparation linéaire dans un nouvel espace de dimension supérieure (Figure 3.22).

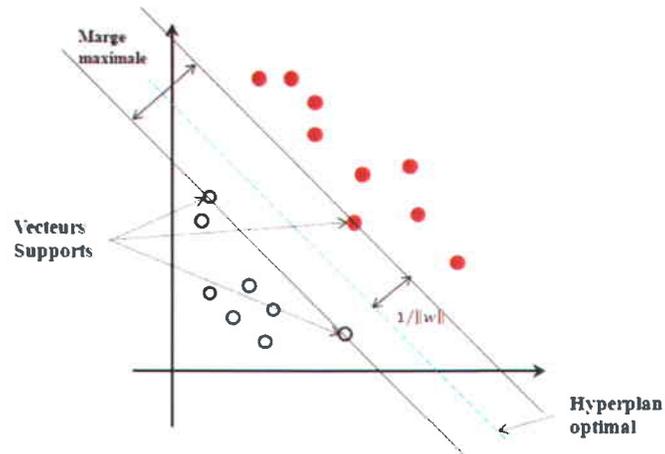


Figure 3.21: Les vecteurs supports et l'hyperplan séparateur optimal

Mathématiquement, supposons qu'on observe un ensemble d'apprentissage A de N couples (x, y) de données et d'étiquettes (Vapnik, 2000, Olivier et al., 1999) :

$A = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$, où $x_i \in \mathbb{R}^d$ est l'échantillon i , $y_i \in \{+1, -1\}$ est l'étiquette associée à x_i et d est la dimension des données.

Dans le cas linéaire, cet ensemble de données peut être séparé par un hyperplan $f(x)$ dont l'équation s'écrit :

$$f(x) = w \cdot x + b \quad (25)$$

où : $w, x \in \mathbb{R}^d$, w est un vecteur de pondération et b est un scalaire qui détermine le déplacement de l'hyperplan le long du vecteur w .

Les SVM cherchent à maximiser la distance entre l'hyperplan et les points les plus proches de cet hyperplan pour chaque classe. Cette distance est égale à $2/\|w\|$, où $\|\dots\|$ présente la norme (longueur) du vecteur. Le problème d'optimisation consiste à maximiser cette distance ou à minimiser son inverse sous les contraintes présentées à l'Équation (26). Le problème d'optimisation s'exprime donc ainsi :

$$\begin{cases} \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ w \cdot x_i + b \geq 1 & \text{pour } y_i = 1 \\ w \cdot x_i + b \leq -1 & \text{pour } y_i = -1 \end{cases} \quad (26)$$

Dans le cas fréquent où les données ne sont pas linéairement séparables, une transformation grâce une fonction non linéaire $\Phi(x)$ permet de projeter les données dans un espace F de N

dimensions et un hyperplan de (N-1) dimensions, comme celui illustré à la Figure 3.22, en utilisant la fonction noyau (K). Si l'ensemble d'apprentissage A n'est pas parfaitement séparable, la technique dite de marge souple (*soft margin*) sera appliquée. Cette technique cherche un hyperplan séparateur qui minimise le nombre d'erreurs par l'introduction de variables (ξ_i), dites variables ressorts (*slack variables*), dans les contraintes de l'Équation (26). Ces variables (ξ_i) permettent de relâcher les contraintes sur les vecteurs d'apprentissage. Le problème d'optimisation devient (Équation 27) :

$$\begin{cases} \min_{w,b,\xi_i} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C_{SVM} \sum_{i=1}^N \xi_i \\ w \cdot x_i + b \geq 1 - \xi_i & \text{pour } y_i = 1 \\ w \cdot x_i + b \leq -1 + \xi_i & \text{pour } y_i = -1 \end{cases} \quad (27)$$

Où : C_{SVM} est un paramètre défini par l'utilisateur qui permet d'exprimer la tolérance aux erreurs.

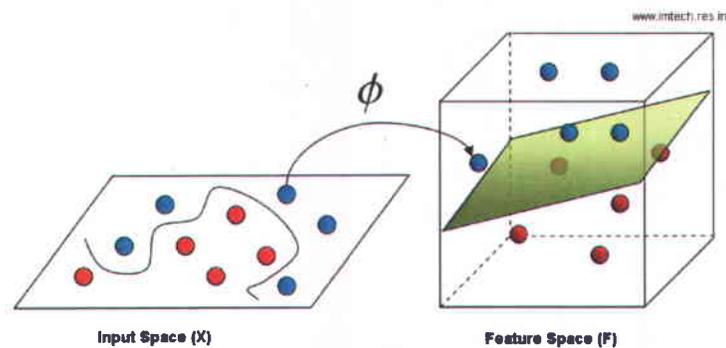


Figure 3.22: Transformation non linéaire (Φ) des données pour permettre une séparation linéaire des échantillons dans un nouvel espace.

Il existe plusieurs types de fonction noyau. Les quatre principaux sont les fonctions noyaux linéaire, polynomiale, RBF (*Radius Basis Function*) et sigmoïde. Parmi ces quatre fonctions noyaux, le RBF est largement utilisé dans les applications de la télédétection (Juan et al., 2012). C'est celle que nous avons choisie. La fonction la plus populaire de ce type est le noyau Gaussien, défini par:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad \gamma > 0 \quad (28)$$

Où : γ : est le paramètre de noyau, qui détermine la flexibilité de la SVM résultant; x_i et x_j correspondent à deux échantillons représentés comme vecteurs de caractéristiques dans l'espace d'entrée.

La classification SVM utilisant le noyau RBF a donc été appliquée sur la matrice de cohérence (T) des deux images polarimétriques correspondent à la mi-saison des saisons du riz traditionnelle (21 août 2009) et de printemps (18 avril 2010).

Pour ce faire, dans le logiciel PolSARpro, les sites d'entraînement de trois classes ont été sélectionnés, soit ceux des classes Eau, Rizières et Autre (non-eau, non-riz). À partir des valeurs échantillonnées pour chaque classe, l'algorithme a cherché la meilleure paire des deux paramètres de la fonction noyau RBF, C_{SVM} et γ . Cette étape a été réalisée par validation-croisée pour chacune des deux images.

3.5.3 Comparaison des classifications polarimétriques et double polarisation

Afin de comparer la performance, en matière de détection des rizières, des classifications extraites des données polarimétriques par rapport à celles des données en double polarisation (HH, HV), le même processus de la classification SVM (incluant les mêmes sites d'entraînements) a été appliqué sur la polarisation HH, des deux mêmes images, soit le 21 août 2009 et le 18 avril 2010.

Pour ce faire, la matrice de covariance (C) a été calculée. À partir de l'Équation (4), l'expression de la matrice (C) peut représenter comme suit :

$$C = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HH} \times S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} \times S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{HV} \times S_{HH}^* \rangle & 2 \langle |S_{HV}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HV} \times S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} \times S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{VV} \times S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (29)$$

Dans cette matrice (Équation 29) le premier élément ($C_{11} = |S_{HH}|^2$) est équivalent à la polarisation HH parce que le carré de l'amplitude est égal à l'intensité du signal SAR (Annexe III).

La polarisation HV n'a pas été retenue parce que l'analyse de la variation de la rétrodiffusion des classes (section 4.2) a montré que le signal du riz en polarisation HV est plus faible qu'en HH. De plus, elle a montré aussi qu'en polarisation HV les classes sont difficiles à séparer.

3.5.4 Correction géométrique des images polarimétriques classifiées

La correction géométrique a été appliquée après la classification, soit sur les images classifiées, afin de pouvoir les superposer aux classifications dérivées des images en polarisations double et ainsi pouvoir procéder à l'évaluation de la précision des classifications des rizières. Cette correction géométrique n'a pas été appliquée avant le processus de classification, puisque le rééchantillonnage affecte les valeurs de la matrice de cohérence (T); il est donc préférable de géocoder l'image une fois la matrice calculée ou, comme ici, une fois la classification réalisée (Lee et Pottier, 2009). Pour que les images soient bien superposées, les images classifiées ont été géocodées à l'aide de l'outil ASF MapReady (*Alaska Satellite Facility MapReady*), implanté dans le logiciel PolSARpro. Ce logiciel peut prendre en compte la topographie (élevations, pentes et orientations des pentes); il peut également enregistrer les données en plusieurs formats communs, y compris le format GeoTIFF⁽¹⁾ avec lequel on peut réaliser les calculs dans le logiciel ArcGIS.

3.6 Intégration des rizières dans la classification de l'occupation du sol (SPOT-4)

L'intégration de la carte des rizières dérivée des classifications de RADARSAT-2 avec la classification de l'occupation du sol dérivée des images SPOT-4 est le quatrième objectif de cette thèse. Cette intégration a été faite en deux étapes : 1) ré-échantillonnage de la classification des images RADARSAT-2; 2) Intégration les classifications.

- Étape1 : la dimension des pixels des deux sources de données est différente, soit 20 m pour l'image SPOT-4 et 12,5 m pour les images RADARSAT-2 en double polarisation; les classifications obtenues sont donc de résolution différente. Afin d'intégrer les résultats, il a fallu effectuer un ré-échantillonnage de la classification des images RADARSAT-2 de 12,5 m à 20 m, cette résolution correspondant mieux à la résolution spatiale des images en mode Standard, qui est voisine de 25 m.

En réalité, tel que d'écrit à la section 3.3.1, les images SPOT-4 ont été utilisées pour prendre des points d'appui pour la correction géométrique des images Standard en double polarisation; la précision obtenue varie entre 0,25 - 0,69 pixel (Tableau 3.9) pour les images RADARSAT-2 à 12,5 m. Pour le ré-échantillonnage, la méthode d'interpolation choisie est celle du plus proche voisin. Cette méthode d'interpolation ne change pas la valeur de pixel et l'erreur spatiale

¹ http://www.asf.alaska.edu/downloads/software_tools

maximale est moins de 0,5 pixel. Pour cette raison, l'influence de la superposition entre des images et celle du ré-échantillonnage est mineure.

- Étape 2 : l'intégration de la couche des rizières dans la classification de l'occupation du sol a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS.

Malgré la différence d'année entre les acquisitions des images SPOT-4 (novembre 2007 et janvier 2008) et les images RADARSAT-2 (2009 et 2010), ce qui n'est pas idéal nous en convenons, la carte des rizières peut être intégrée à la classification SPOT-4. Les mois de novembre à janvier sont les mois où les sols cultivés sont en repos (pas de culture). Comme il n'y a pas de pratique agricole dans cette période (saison sèche), l'état du sol des terres agricoles est le même entre les mois de novembre 2007 et de janvier 2008 et ce d'année en année. Les rizières occupent une partie des terres agricoles. Bien que les superficies en rizières puissent varier d'une saison à l'autre (surtout) et d'année et année, nous avons constaté qu'elles varient à l'intérieur des terres identifiées agricoles (au repos) sur les images SPOT-4. Pour les autres types d'occupation du sol, des changements (expansion des zones urbaines au dépend des friches, coupes forestières, etc.) ont pu avoir lieu entre 2007/2008 et 2009/2010. Toutefois, l'utilisation d'images RADARSAT-2 deux ans plus récentes n'affecte pas la démonstration de la procédure, puisque la seule information extraite des images SAR est celle des rizières.

3.7 Estimation de l'impact des rizières sur le régime hydrologique

Le dernier objectif de cette recherche consiste à estimer la demande en eau pour la culture du riz du bassin versant afin de savoir le rôle des rizières dans les simulations hydrologiques et l'importance d'identifier les rizières.

Tel que mentionné au Chapitre 1, dans le cadre du projet « Gestion intégrée du bassin versant de la rivière Cáu », les informations de l'occupation du sol sont utilisées comme données d'entrée pour les simulations hydrologiques à l'aide du modèle HYDROTEL (Fortin et al., 1995).

Comme données d'entrée, HYDROTEL requiert des données vectorielles (le réseau hydrographique) et des données matricielles comme : l'occupation du sol, les types de sol, etc. La description et le fonctionnement du modèle sont présentés dans Fortin et al. (2001a). Lors de simulations hydrologiques, le bilan hydrologique vertical peut être effectué sur chaque unité hydrologique relativement homogène (UHRH). Ces derniers sont les petits sous-bassins versants correspondant à chacun des tronçons de rivière; ils sont déterminés à l'aide du modèle

numérique d'altitude (MNA) et du réseau hydrographique à l'étape de détermination de la structure d'écoulement. Pendant le processus de la simulation, les informations sur les caractéristiques des types de sol et sur les classes d'occupation du sol contribuent à déterminer le bilan vertical d'écoulement. Ce bilan est calculé sur trois couches de sol : une couche de surface, d'où il y aura ruissellement en cas de saturation, une couche intermédiaire, produisant l'écoulement retardé, et une couche plus profonde, liée à l'écoulement de base (Fortin et al., 2007).

Les informations spatialisées sur l'occupation du sol, obtenues par télédétection, fournissent la distribution spatiale des classes d'occupation dans le modèle hydrologique. En connaissant la position spatiale et la dimension des pixels, de même que l'identification de chaque classe, on obtient le pourcentage de chaque classe d'occupation du sol pour chacune des UHRH constituant le bassin. Ce pourcentage et deux autres paramètres concernant l'occupation du sol, soit l'indice foliaire et la profondeur racinaire, permettent de calculer l'évapotranspiration moyenne sur chaque unité hydrologique. L'occupation du sol a un très grand impact sur le bilan hydrologique, puisqu'elle affecte l'infiltration, l'évapotranspiration et les écoulements.

Plus précisément dans le cas des rizières, les processus hydrologiques qui les distinguent des autres occupations du sol sont : (1) Une partie de la quantité d'eau provenant de la pluie est interceptée directement par les rizières (et peut y demeurer sans s'écouler, en fonction de la date du calendrier de culture). (2) Le sol correspondant à l'occupation « rizières » est plus compacté que pour les autres cultures et est considéré comme saturé lorsque les rizières sont inondées, ce qui modifie l'infiltration par rapport aux autres types d'occupation du sol agricole. (3) Les rizières, lorsqu'inondées, interceptent et retardent une partie du ruissellement de surface et modifient donc l'écoulement de surface et l'écoulement retardé. (4) L'évapotranspiration est plus élevée durant la période de culture à cause des besoins de la plante et de la présence des surfaces d'eau.

Certaines des étapes du cycle de croissance du riz vont avoir plus d'impact sur le bilan hydrologique, puisque les rizières sont alternativement mises en eau et asséchées pendant le cycle des cultures. D'un point de vue global, les besoins en eau de la culture du riz sont très importants sur le bassin versant de la rivière Cáu, d'où l'importance de pouvoir identifier les rizières sur les cartes d'occupation du sol servant comme support à la modélisation hydrologique.

Pour réaliser les calculs du besoin en eau du bassin versant, les données suivantes sont utilisées :

- Les données du MADR concernant le besoin en eau moyen pour la culture du riz dans les plaines du Nord Vietnam.
- La carte des rizières de la saison de riz du printemps dérivée de données RADARSAT-2 (section 4.2).
- Le débit à l'exutoire des sous-bassins versant choisis pour l'étude.

À titre d'exemples, les besoins en eau du riz et les écoulements totaux pour une saison de culture ont été comparés pour deux sous-bassins versants. Il s'agit de la partie amont du bassin versant de la rivière Cáu (Figure 3.23a) et de la partie amont du bassin versant de la rivière Cồng (Figure 3.23b). Ces deux sous-bassins ont été choisis comme exemples en raison de la disponibilité de mesures de débit à leur exutoire. Le choix de la partie amont du bassin versant de la rivière Cáu (Figure 3.23a), et des années 1997 à 2006, se justifie par le fait qu'il est nécessaire de disposer d'une série la plus continue possible de données de débit observés et ces données ne sont disponibles que pour cette partie du bassin versant à la station Gia Bay (le point jaune, Figure 3.23a). Quant au bassin versant de la rivière Cồng, il est un bassin versant dans lequel il y a beaucoup de rizières. La superficie du riz y représente 33 % de l'ensemble des terres agricoles (selon la statistique de la carte de l'occupation en 2008). De plus, l'irrigation y joue un rôle important en aval du lac Nui Coc (Figure 3.23b). La période de débits observés sélectionnée pour ce bassin versant, de 1961 à 1972, a été choisie parce qu'elle est la période où les écoulements dans le bassin versant sont naturels, sans le contrôle du barrage du lac Nui Coc construit en 1973 (CNGBV, 2011).

La saison du riz de printemps a été choisie pour les calculs parce qu'elle correspond à la saison sèche du régime hydrologique; pendant cette période, le débit du bassin versant diminue et l'eau dans les champs de riz est contrôlé par le système d'irrigation.

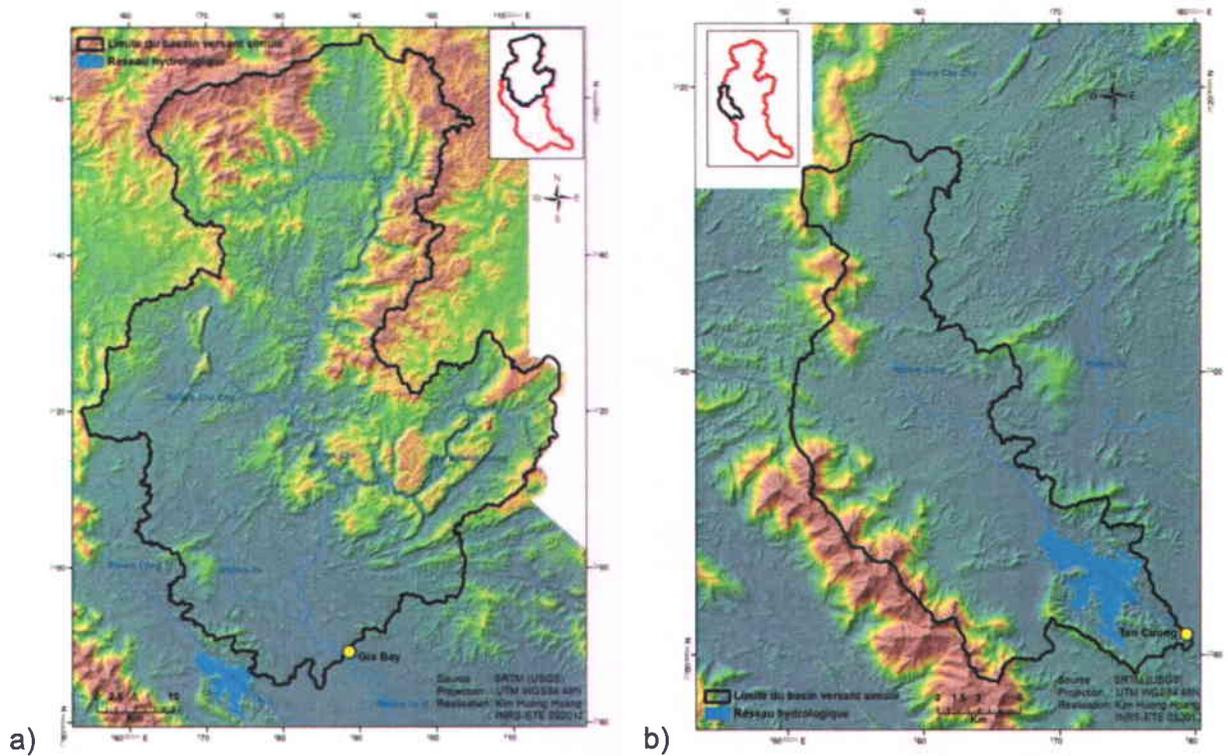


Figure 3.23: Localisation des deux bassins versants étudiés : a) celui de l'amont du bassin versant de la rivière Càu, b) celui de la rivière Cồng

Finalement, afin de mieux appréhender, dans un contexte opérationnel, comment la méthodologie proposée devrait être mise en œuvre, la Figure 3. 24 représente le diagramme descriptif de l'enchaînement des différents traitements de données, depuis la détermination des classes thématiques, l'exploitation des images SPOT-4 et RADARSAT-2 à la cartographie de l'occupation du sol, incluant les rizières, et l'estimation de l'importance du besoin en eau des rizières dans le bilan hydrologique.

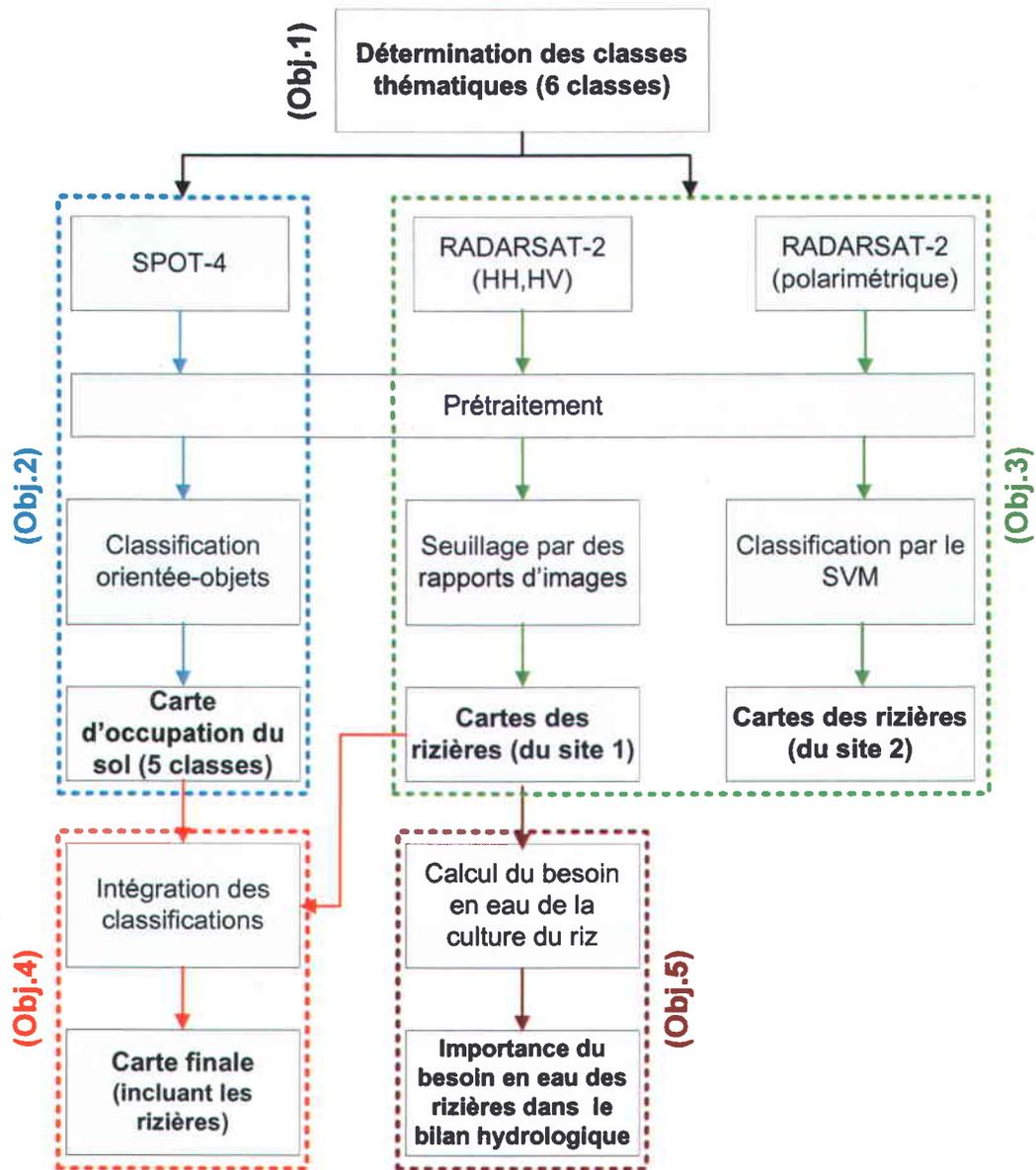


Figure 3. 24 : Enchaînement des différents traitements de données, depuis la détermination des six classes thématiques, l'exploitation des images SPOT-4 et RADARSAT-2 à la cartographie de l'occupation du sol, incluant les rizières, et l'estimation de l'importance du besoin en eau des rizières dans le bilan hydrologique.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de la classification de l'occupation du sol à partir de l'image SPOT-4 (4.1) et des rizières dérivée d'images RADARSAT-2 en double polarisations (4.2) et polarimétriques (4.3). La précision des résultats de classification y est discutée. Une présentation de l'intégration des classifications obtenues pour élaborer la carte finale de l'occupation du sol de l'ensemble du bassin versant y est proposée (4.4). Ce chapitre discute également de l'impact des rizières sur le cycle de l'eau, dans le cas des sous-bassins du bassin versant de la rivière Cáu (4.5).

4.1 Classification orientée-objets des images SPOT-4

4.1.1 Classification de l'occupation du sol

Au moyen de l'approche de classification orientée-objets développée, l'objectif visant à cartographier l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cáu en utilisant des images de moyenne résolution (SPOT-4) a été réalisé. La carte obtenue est présentée à la Figure 4.1. Elle est constituée de cinq classes : Arbuste, Eau, Milieu Agricole, Milieu Forestier et Milieu Urbain. La plupart de la superficie du bassin versant occupe par le milieu Forestier (plus de 70 %). La carte démontre la complexité de l'occupation du sol dans les plaines du bassin versant, particulièrement en aval où les terres agricoles et le milieu urbain sont alternatifs. Cela explique une des difficultés lors de l'utilisation uniquement des données optiques de résolution moyenne pour détecter les champs de riz qui ont une taille petite (inférieure à une pixel de 20 x 20 m d'image SPOT-4)

Les rizières sont donc extraites à partir d'images RADARSAT-2 et ont été ensuite intégrées dans la carte d'occupation pour obtenir la carte finale de l'occupation du sol du bassin versant (incluant les rizières). Celle-ci est présentée à la section 4.4.

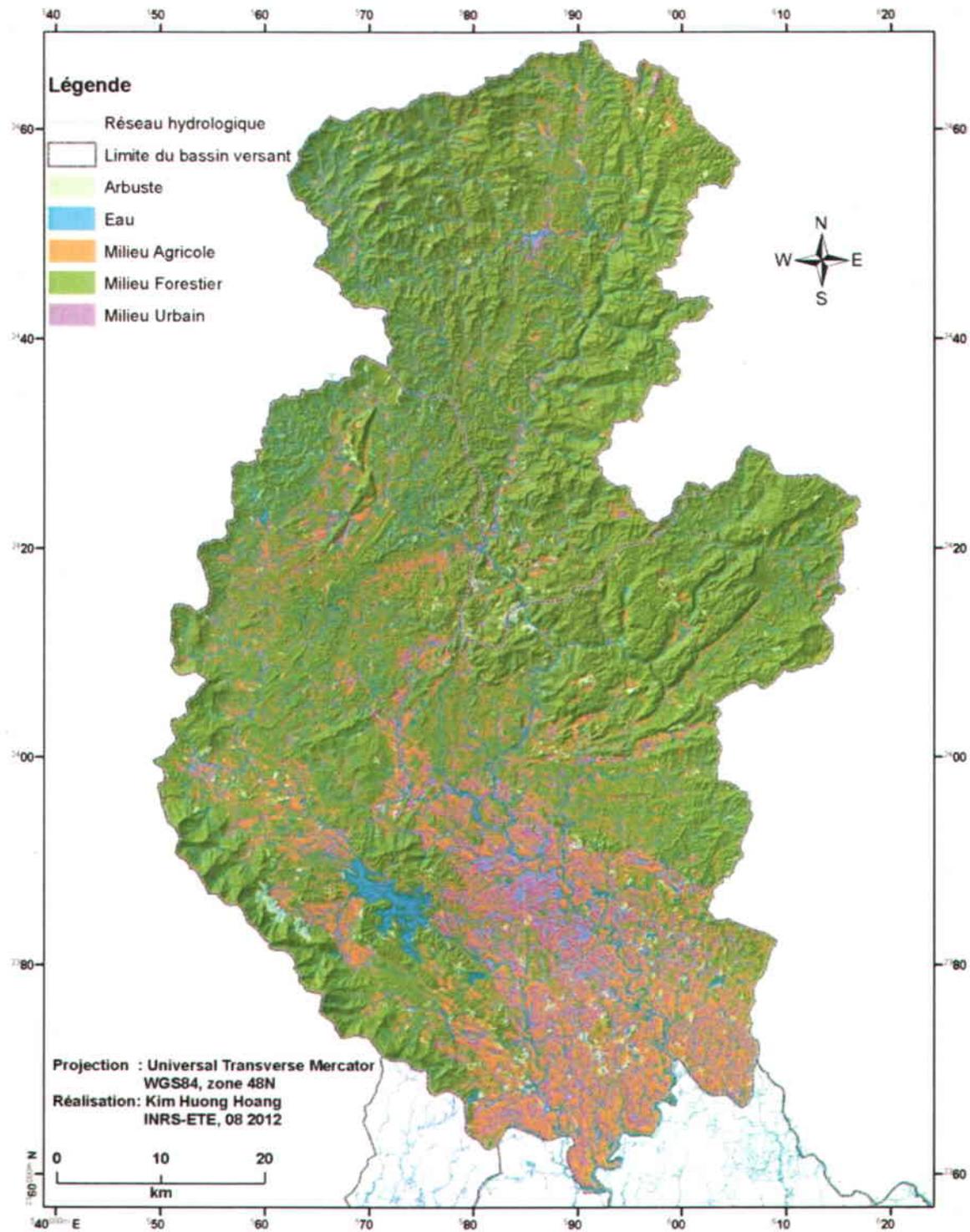


Figure 4.1: Carte de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cău (sans rizières), dérivée des images SPOT-4

4.1.2 Validation des classifications de l'occupation du sol

La superficie cultivée en 2007, issue des données provenant de l'Office Général de la Statistique (OGS, 2007), a été comparée à celle de la classification du milieu agricole issue des images SPOT-4 de l'hiver 2007-2008. Le résultat de cette validation qualitative est présenté au Tableau 4.1. On remarque l'absence de la superficie classifiée pour le district Vo Nhai parce que la moitié de la superficie de cette région est à l'extérieur du territoire du bassin versant. La comparaison montre une forte concordance entre les superficies issues des statistiques officielles (OGS, 2007) et celles issues de la classification du milieu agricole; le pourcentage de concordance varie entre 81 % et 97 %, dépendamment du district. On constate que les superficies de la classification sont toujours inférieures aux superficies de l'OGS. Cela peut s'expliquer par la méthode de calcul des superficies statistiques. Selon les documents de l'OGS (2011), la superficie des terres agricoles comprend les superficies ensemencées de riz, maïs, cannes à sucre, haricots et arachides pour une saison de culture; parfois il y a une rotation entre les différentes plantés cultivées sur une même surface, tandis que la superficie du milieu agricole de la classification correspond aux surfaces (objets) réellement cultivées et détectées au moment de l'acquisition des images. D'autre part, dans la classification, il reste un certain degré de confusion entre des terres agricoles et d'autres types d'occupation du sol (par ex. le milieu urbain). Cela se remarque lorsqu'on analyse la matrice d'erreur (Tableau 4.2) des cinq classes de la carte finale. En effet, un pourcentage de 9,8 % (3 967 pixels) des pixels de l'occupation Terre Agricole a été classifié à la classe Urbain; 19 % (7 731 pixels) a été classifié à la classe Forêt et 4,7 % (1 899 pixels) a été classifié à la classe Eau.

Tableau 4.1: Comparaison de la superficie totale (statistique et classification) du milieu agricole en 2007

| District | Superficie (ha) | | % de concordance |
|----------------------|-----------------|----------------|------------------|
| | Statistique | Classification | |
| Ville de Thai Nguyen | 6 899 | 5 558 | 80,6 |
| Song Cong | 4 432 | 3 590 | 81 |
| Dinh Hoa | 9 291 | 8 305 | 89,4 |
| Vo Nhai | 9 302 | - | - |
| Phu Luong | 8 840 | 7 505 | 84,9 |
| Dong Hy | 9 731 | 9 430 | 96,9 |
| Dai Tu | 14 265 | 11 614 | 81,4 |
| Phu Binh | 17 253 | 14 190 | 82,2 |
| Pho Yen | 12 835 | 11 108 | 86,5 |

Tableau 4.2: Matrice d'erreur de la classification du Niveau P, dérivée des images SPOT-4

| | | Référence | | | | |
|-------------------------|----------------|-----------|--------|---------|----------------|---------|
| | | Urbain | Eau | Forêt | Terre Agricole | Arbuste |
| Classification Niveau P | Urbain | 17 594 | 1 074 | 1 347 | 2 065 | 205 |
| | Eau | 42 | 13 534 | 50 | 133 | 28 |
| | Forêt | 787 | 2 277 | 231 514 | 965 | 3 058 |
| | Terre Agricole | 3 967 | 1 899 | 7 731 | 25 734 | 990 |
| | Arbuste | 58 | 254 | 2 494 | 509 | 10 903 |

L'évaluation quantitative de la précision a été faite à l'aide de la matrice d'erreur, en utilisant les données de la carte de référence (voir section 3.2.3). Les douze classes (Tableau 3.8) du Niveau G ont été regroupées en trois classes principales, soit Eau (Rivière 1, Lac 1), Forêt (Forêt 1A, 1B, 1C, Plantation 1), Autre (non Eau, non Forêt), et les classes du Niveau P ont été regroupées en cinq classes correspondent à cinq classes de la carte finale, soit Urbain, Eau, Forêt, Terre Agricole et Arbuste.

Le Tableau 4.3 présente la précision globale des classifications au Niveau G (Étape 1, Figure 3.16) et au Niveau P (Étape 4, Figure 3.16), soit le total de pixels bien classifiés par rapport au total de pixels dans la matrice d'erreur, qui est de 90% et 91%. Malgré une différence légère entre la précision du producteur et de l'utilisateur (5% pour le Niveau G et 2% pour le Niveau P), les pixels ont été bien classifiés pour chacune des classes définies (88% Niveau G, 81% Niveau P). La précision du producteur a montré que les classes du Niveau G ont été mieux classifiées qu'au Niveau P, en comparant aux données de références. Cela s'explique par le fait que le niveau de détail des classes du Niveau est moins que celui du Niveau P, la confusion entre les classes sont donc moins. Une précision de l'utilisateur de 83% signifie que 83% des pixels classifiés représentent « la réalité » par rapport aux données de référence. L'indice Kappa (K) de l'ordre de 0,80 représente une forte précision entre l'information de la carte de la classification dérivée des images SPOT-4 et celle des données de référence.

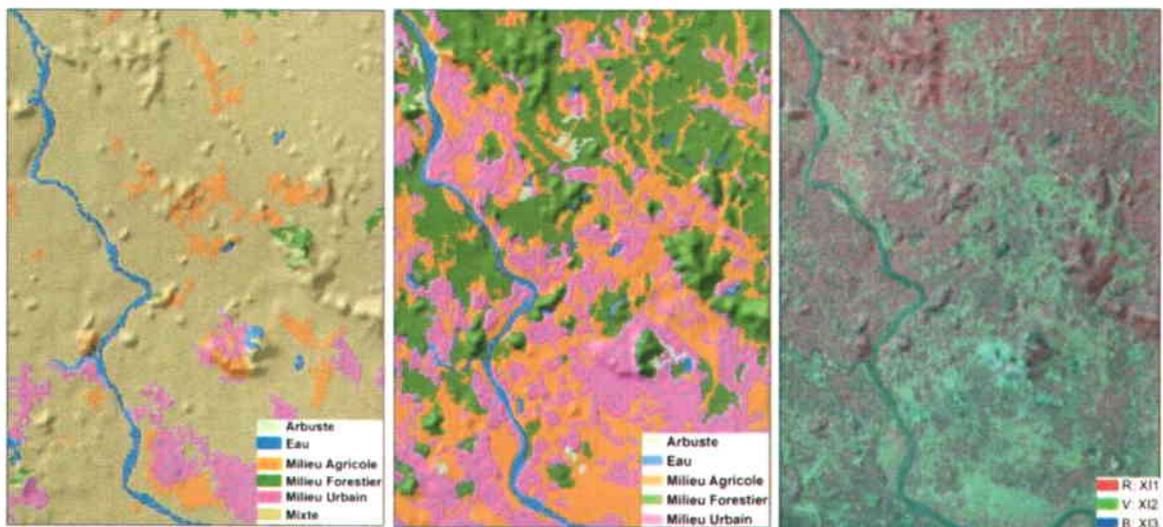
Malgré une forte précision de la classification finale (Niveau P), tel qu'analysé ci-dessus, il demeure une confusion entre des classes. Le Tableau 4.2 montre que la plupart de la confusion est entre les classes Terre Agricole vs. Urbain, et Terre Agricole vs. Forêt. La confusion de la première paire d'occupation du sol peut s'expliquer par la similitude du signal spectral entre ces deux classes. Tandis que la confusion entre les deux classes de la deuxième paire peut être liée

à des petits groupes de pixels de plantations, situés sur les petites collines (et alternés avec les maisons) dans le milieu agricole, qui n'ont pas pu être séparés des terres agricoles.

Tableau 4.3: Précision de la classification des niveaux G et P, dérivée des images SPOT-4

| Valeur | Niveau G | Niveau P |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Précision du producteur (%) | 88 | 81 |
| Précision de l'utilisateur (%) | 83 | 83 |
| Précision globale | 90 | 91 |
| <i>Kappa</i> | 0,78 | 0,80 |

En regardant les résultats obtenus à partir de l'image LANDSAT-7 ETM+ (2003) (Figure 4.2a) dans les travaux de Hoang et al. (2008), on constate que le résultat obtenu de cette nouvelle étude (Figure 4.2b) est plus détaillé. On remarque visuellement qu'avec la classification hiérarchique et la résolution de 20 m de l'image SPOT-4 (par rapport à la résolution spatiale de 30 m de l'image LANDSAT-7 ETM+), la classe mixte de la classification antérieure (dans laquelle on retrouvait des parcelles agricoles, des habitations et des plantations) a été bien séparée. Il serait pertinent de comparer les résultats de la classification hiérarchique avec ceux de l'approche publiée en 2008, et cela pour la même image, soit l'image LANDSAT-7 (2003), afin d'estimer leur efficacité dans le contexte de ce bassin versant au Nord du Vietnam. Toutefois, nous n'avons pas de données de référence pour construire et valider une classification hiérarchique détaillée en 2003. Une autre comparaison possible aurait été d'utiliser l'approche publiée en 2008 sur une image SPOT-4 acquise en 2003 afin de comparer l'effet de la résolution des deux capteurs. Plusieurs personnes ont été contactées au Vietnam, mais aucune n'avait au moins une image SPOT de ce bassin acquise en 2003. Malgré cela, le résultat a montré que les classes étaient déjà bien distinguées avec les bandes du visible d'origine de l'image SPOT-4. La classification hiérarchique est donc un choix convenable pour l'application de la télédétection avec des images de résolution moyenne dans des régions où l'occupation du sol est complexe, comme c'est le cas dans le bassin versant de la rivière C u.



a) Occupation du sol 2003

b) Occupation du sol 2008

c) Image SPOT-4 2008, en composition colorée RVB

Figure 4.2: Illustration de l'occupation du sol: a) dérivée d'une image LANDSAT-7 ETM+, 2003, b) dérivée d'une image SPOT-4, 2007 et 2008

4.2 Identification et cartographie des rizières par le mode double polarisation

4.2.1 Analyse de la variation temporelle de la rétrodiffusion (σ^0) des rizières et d'autres types de végétation

L'analyse de la variation temporelle de la rétrodiffusion (σ^0) des rizières et d'autres types de végétation se base sur la statistique des pixels échantillonnés pour chaque classe. L'échantillonnage a été réalisé en consultant les informations collectées sur le terrain (Chapitre 3). Des échantillons de trois types de végétation et de différents champs de riz (incluant les pixels des dix champs expérimentaux) ont donc été pris sur les 14 images en double polarisation. Les pixels de riz se retrouvent autour de trois milieux : le milieu urbain forte densité (ville de Thai Nguyen ou les bourgs), le milieu forestier (zones montagneuses au Nord et Sud-Est du bassin versant, voir Figure 3.1) et le milieu agricole (les terres agricoles dans la vallée).

Les classes Riz 1, Riz 2, Riz 3 et Riz 4 tel que montré au Chapitre 3, se différencient visuellement par leur couleur sur l'image composite RVB en polarisation H, où : bande Rouge = date de fin de saison, bande Verte = date de mi-saison; bande Bleue = date de début de saison. La Figure 4.3 montre un exemple des échantillons des classes de Riz 2 et Riz 3. Ces

échantillons ont servi également à l'analyse de la variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières (section 4.2.2).

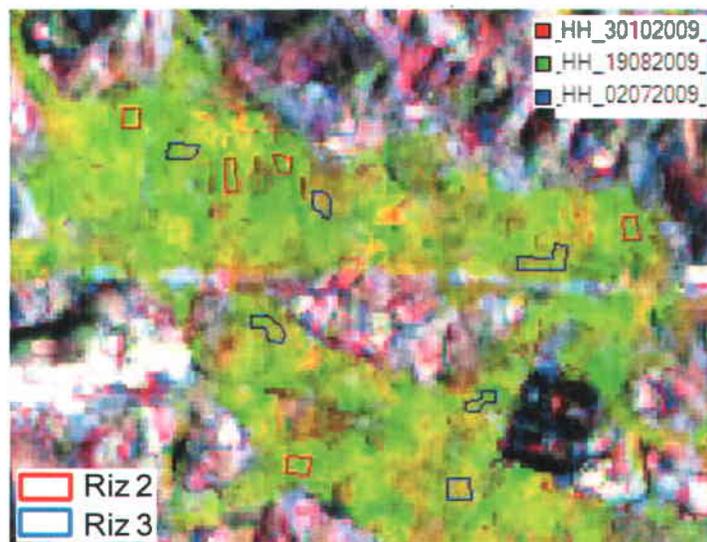


Figure 4.3: Exemple des échantillons de riz sur une image composite RVB de trois dates différentes. Les rizières s'affichent sur l'image en vert et en jaune-vert foncé

La comparaison des σ^0 moyens entre les rizières et les autres types de végétation a été réalisée sur les polarisations HH et HV. Cette étape permet non seulement de savoir comment le signal de rétrodiffusion (σ^0) du riz se distingue de celui des autres types de végétation, mais permet également de choisir la polarisation la plus adéquate, parmi les polarisations HH et HV, pour identifier les rizières.

La Figure 4.4 présente la variation de σ^0 de quatre types de végétation : la forêt, les plantations (eucalyptus, acacia), les rizières et les jardins de famille (un mélange de différents végétaux et des plants de thé) durant la saison du riz traditionnel (de juillet à l'octobre) en polarisations HH et HV.

D'une façon générale, le signal des différents types de végétation en polarisation HH (Figure 4.4a) est plus élevé qu'en polarisation HV (Figure 4.4b). Aussi, l'ampleur de la variation du signal est plus grande dans la polarisation HH que dans la polarisation HV. Cela s'explique par le fonctionnement même du radar, qui émet un signal dans une polarisation donnée et enregistre le signal qui revient à l'antenne dans l'une ou l'autre polarisation. Pour la co-polarisation (HH), le signal est émis en polarisation horizontale et l'antenne mesure le signal de retour dans la même polarisation, suite à la diffusion du signal par la végétation. Pour la polarisation HV, le plan de polarisation du rayonnement microonde reçu (V) est différent du plan

du signal émis (H). Seule la partie du signal émis (H) qui est dépolarisée a le potentiel d'être enregistrée dans la polarisation croisée (V). Pour cette raison, la rétrodiffusion en polarisation HV est plus faible que la rétrodiffusion en polarisation HH pour toutes les classes.

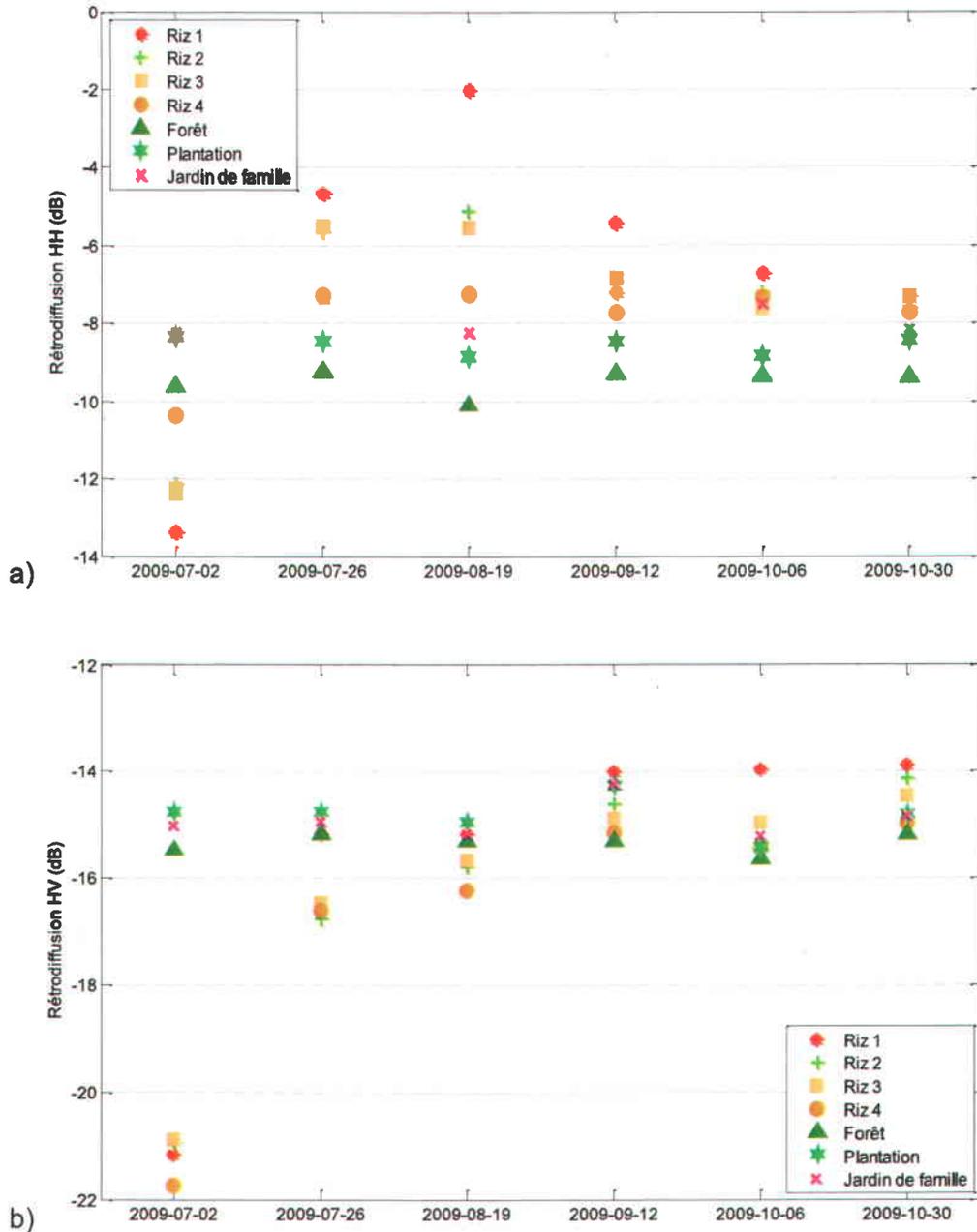


Figure 4.4: Rétrodiffusion moyenne du riz (saison traditionnelle) et d'autres types de végétation en polarisation: a) HH; b) HV.

La Figure 4.4b illustre la grande ampleur de la variation du signal riz en polarisation HV (par rapport à d'autres types de végétation) en début de saison (mois de juillet) jusqu'à la mi-saison

(mois d'août). Cette ampleur s'explique par la diffusion multiple causée par les tiges de riz (double rebond, plus de dépolarisation du signal). Quant aux autres types de végétation (la forêt sempervirente, les plantations, les jardins de famille), ils recouvrent bien le sol; la diffusion volumique est donc dominante dans ce cas et la rétrodiffusion est influencée par différents facteurs, comme par exemples : la taille de la canopée des éléments diffusants (les feuilles, les troncs, etc.), la constante diélectrique du matériau de végétation, la forme et l'orientation des éléments diffusants, etc.

L'analyse de la variation temporelle du signal de chaque type de végétation dans les deux polarisations, particulièrement en polarisation HH, nous permet de constater que le signal varie différemment pour le Riz que pour la Forêt, la Plantation et le Jardin de famille, grâce aux deux mécanismes de diffusion qui dominant durant son cycle de croissance, c'est-à-dire la diffusion de double rebond et la diffusion volumique. Pour les autres types de végétation, le mécanisme principal de diffusion est la diffusion de volume et leur signature spectrale est plus stable dans le temps que celle du Riz. On peut bien voir cette différence sur la Figure 4.5, qui montre les écarts de rétrodiffusion pour quatre types de végétation durant la saison traditionnelle de culture du riz. Tel que décrit précédemment, on trouve que contrairement aux rizières, les autres types de végétation affichent une étroite gamme dynamique temporelle en polarisations HH et HV. À l'opposé, la valeur de σ^0 du riz a une large gamme dynamique temporelle entre le début et la mi-saison et ce pour les deux polarisations (-9 dB en HH et -7 dB en HV). Parmi les classes de Forêt, Plantation et Jardin de famille, cette dernière montre une légère variation temporelle, un peu plus grande que celle de la Forêt et de la Plantation. Cela s'explique par le mélange des différents types de végétation inclus dans cette classe, laquelle inclut les champs de légumes, dont l'interaction sol-volume peut varier selon leur croissance et leur récolte tout au long de la saison. En résumé, l'analyse de la variation temporelle du signal de quatre types de végétation nous a permis d'observer que : 1- Le signal en polarisation HH est plus fort qu'en polarisation HV. 2- Les classes sont plus faciles à distinguer dans la polarisation HH grâce à la grande ampleur de variation de leur σ^0 dans cette polarisation. 3- Par rapport à d'autres types de végétation, la rétrodiffusion du Riz montre un écart évident dans les premiers mois de la saison de culture du riz. Ce qu'il est important maintenant de comprendre est le comportement du signal du riz durant son cycle de croissance, qui sera expliqué dans la prochaine section (4.2.2), afin de pouvoir déterminer les seuils pour identifier les rizières.

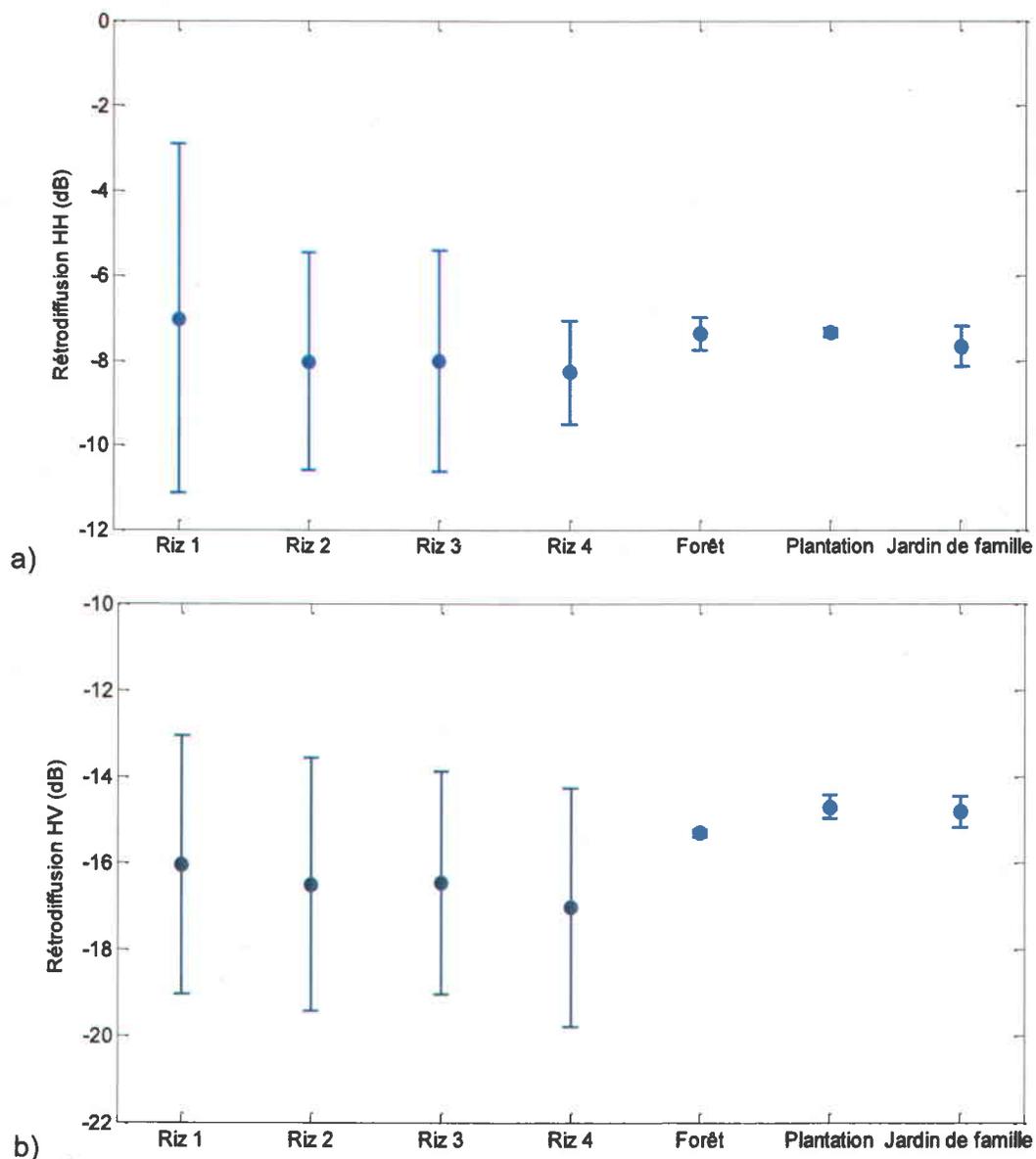


Figure 4.5: Moyenne et écart-type de la rétrodiffusion du riz (saison traditionnelle 2009) et d'autres types de végétation en polarisation : a) HH; b) HV

4.2.2. Analyse plus détaillée de la variation temporelle de la rétrodiffusion (σ^0) des rizières

Le cycle de répétition de 24 jours de RADARSAT-2 permet de surveiller la variation du signal des plants de riz sur une base annuelle et saisonnière. De plus, les études précédentes de LeToan et al. (1989) ont montré que les rizières présentent une grande variation temporelle dans leurs réponses radar. Par conséquent, avant de déterminer les seuils pour distinguer les rizières, l'analyse de la variation temporelle de σ^0 a été réalisée sur les images en polarisations

HH et HV, afin de comprendre le comportement du signal radar en fonction de chaque stade du cycle de croissance du riz.

La Figure 4.6 présente la variation temporelle et les Figure 4.7 et Figure 4.8 présentent la dispersion de la rétrodiffusion σ^0 du riz en polarisations HH et HV durant deux saisons de culture du riz : traditionnelle 2009 (de juillet à octobre) et printemps 2010 (de février à mai). Ces graphiques ont été élaborés en se basant sur la valeur moyenne σ^0 des échantillons de riz à chaque 24 jours.

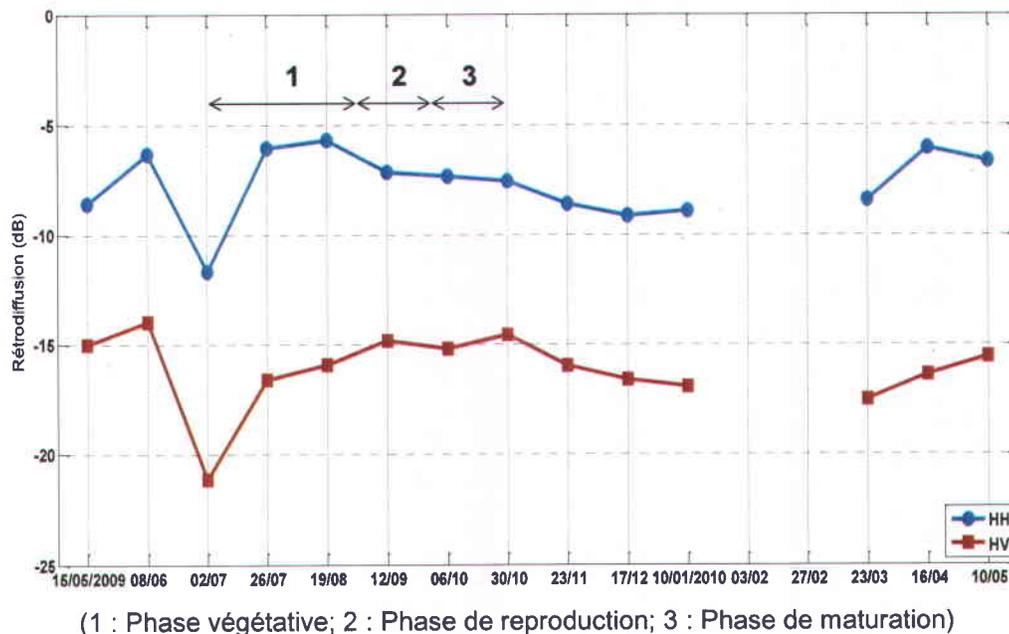


Figure 4.6: Variation temporelle de σ^0 moyenne du riz en HH et HV, de mai 2009 à mai 2010. La discontinuité est due à l'absence d'acquisition des images

Tel qu'analysé à la section précédente, la Figure 4.6 montre que le signal du riz en polarisation HH est plus élevé que celui en HV. Elle montre également un changement significatif de σ^0 entre chaque phase de croissance des plants de riz pour les deux polarisations, bien que cette observation soit plus évidente dans la polarisation HH. Pour la saison de culture de printemps, la valeur de σ^0 la plus faible est celle du mois de mars. En réalité, ces valeurs sont semblables à celles du mois de février. Cependant, en raison d'un problème technique ou d'une erreur de programmation, les images du début et à la fin de la saison de printemps, en février et juin, n'ont pas été acquises. Étant donné le manque d'images pour la saison de riz du printemps, l'analyse de la variation de σ^0 du riz s'est portée principalement sur la saison traditionnelle de culture du riz.

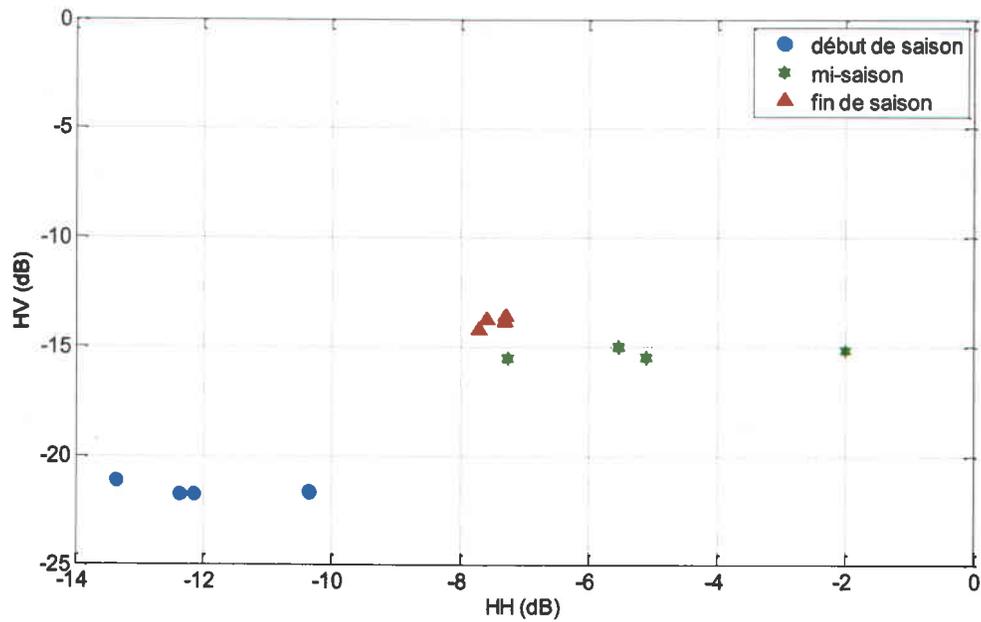


Figure 4.7: Dispersion de σ^0 (HH vs HV) du riz, durant la saison de riz traditionnelle de l'année 2009

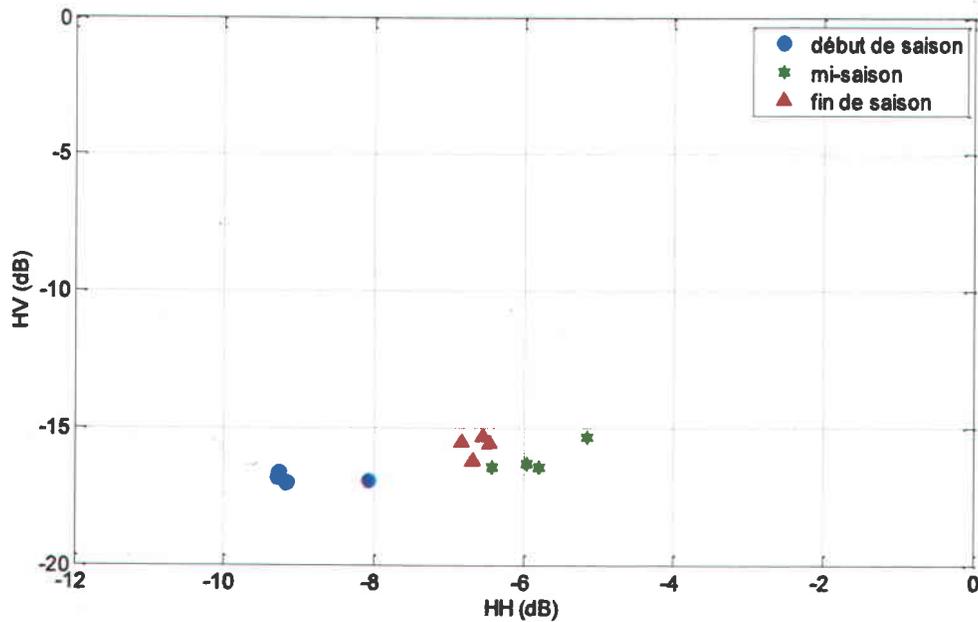


Figure 4.8: Variation temporelle de σ^0 (HH vs HV) du riz, durant la saison de riz du printemps de l'année 2010

Pour comprendre le comportement du riz, il est intéressant d'interpréter la variation temporelle de la rétrodiffusion en tenant compte de l'évolution du riz durant son cycle de croissance. Tel que mentionné dans le Chapitre 2, la croissance du riz passe par plusieurs stades qui sont

regroupés par trois phases principales : phase végétative, phase de reproduction et phase de maturation.

- La phase végétative (février jusqu'à avril ou juillet jusqu'à août) : la rétrodiffusion du riz augmente avec le temps (Figure 4.6), elle passe de valeurs très faibles (autour de -13,5 dB en HH et -22 dB en HV) à des valeurs environ deux fois plus élevées (autour de -4 dB en HH et -15 dB en HV). Au début de la saison (juillet et février), le σ^0 est faible parce que les champs sont inondés (Figure 4.9a); le signal radar incident est donc diffusé vers l'avant (diffusion spéculaire). Il n'y a qu'une faible proportion de l'énergie émise qui est rétrodiffusée vers le capteur. Le σ^0 des champs est alors très faible dans les deux polarisations (phase 1, Figure 4.6; points bleus, Figure 4.7 et Figure 4.8). Par contre, à la fin de la phase végétative ou à la mi-saison, où les talles du plant augmentent en nombre et en hauteur Figure 4.9b et c), le signal du riz devient particulièrement fort (phase 1, Figure 4.6; étoiles vertes, Figure 4.7 et Figure 4.8). Ce signal fort s'explique par l'importante proportion d'énergie émise qui retourne vers le capteur à cause de l'effet des réflecteurs en coin (diffusion double rebond) causé par les talles au-dessus de la surface d'eau calme. Les σ^0 atteignent leurs valeurs maximales le 19 août 2009 et le 16 avril 2010 en polarisation HH.

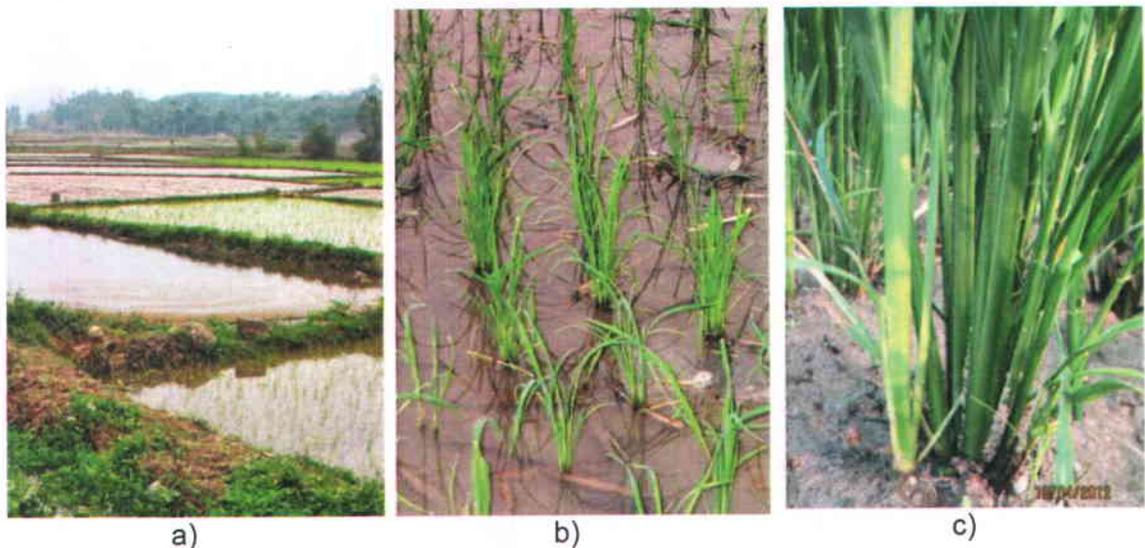


Figure 4.9: États d'un champ de riz à la phase végétative

- La phase de reproduction (mai et septembre) : les plants atteignent leur hauteur maximale (85 - 111 cm), les panicules se développent (Figure 4.10), les feuilles

changent d'orientation et la tige devient plus sèche qu'avant. Le niveau de l'eau dans les champs baisse (0 - 1 cm). En polarisation HH, la rétrodiffusion du riz diminue à partir de cette phase jusqu'à la fin de la saison. Par contre, on observe une légère augmentation de σ^0 en polarisation HV durant la phase de reproduction (phase 2, Figure 4.6). Cela s'explique par l'augmentation de la proportion du signal émis qui change de polarisation (de la polarisation horizontale, H, vers la polarisation verticale, V) due à l'augmentation du volume de végétation. Il y a donc une signature spécifique du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) selon les différentes polarisations à chaque stade de la croissance du riz.



Figure 4.10: Les panicules de riz, mai 2012

- La phase de maturation (juin et octobre) : à cette période, les plants de riz entrent en phase de sénescence, les feuilles et la tige continuent à sécher, avec les grains de riz, et les plants s'orientent vers le sol (Figure 4.11). Durant cette période, le signal du riz diminue en polarisation HH mais cette observation n'est pas évidente en polarisation HV. C'est la diminution de la teneur en eau dans le plant qui affecte σ^0 , les plants secs ayant une plus faible constante diélectrique.



Figure 4.11: Le riz à la phase de maturation, saison de riz de printemps, juin 2012

Cependant, la variation temporelle de la rétrodiffusion du riz interprétée ci-dessus n'est pas toujours la même dans les différents champs. La statistique de la rétrodiffusion moyenne des champs expérimentaux montre qu'il y a des champs où le σ^0 est faible durant la saison de culture; c'est le cas des champs DX1, DX2, LB2 et MD2, leur valeur de σ^0 moyenne étant supérieure à celle des autres de - 7 dB (en saison traditionnelle). On remarque aussi que, dans certains cas (champs CC2, DX1, voir Figure 4.12), la valeur de σ^0 à la mi-saison (fin de la phase végétative) ne montre pas de différence importante avec celle des autres phases de croissance (phases de reproduction et de maturation). Certains champs (CC2, DX1, LB2, MD1, MD2) obtiennent la valeur maximale en fin de juillet (lignes pointillées colorées, Figure 4.12), alors que les autres champs présentent leur valeur maximale en août (lignes noires continues, Figure 4.12). Pour cette raison, la statistique des valeurs de σ^0 des dix champs expérimentaux montre deux pics. Cela veut dire que l'on risque de perdre des pixels de riz lorsque l'identification des rizières se base sur une seule date.

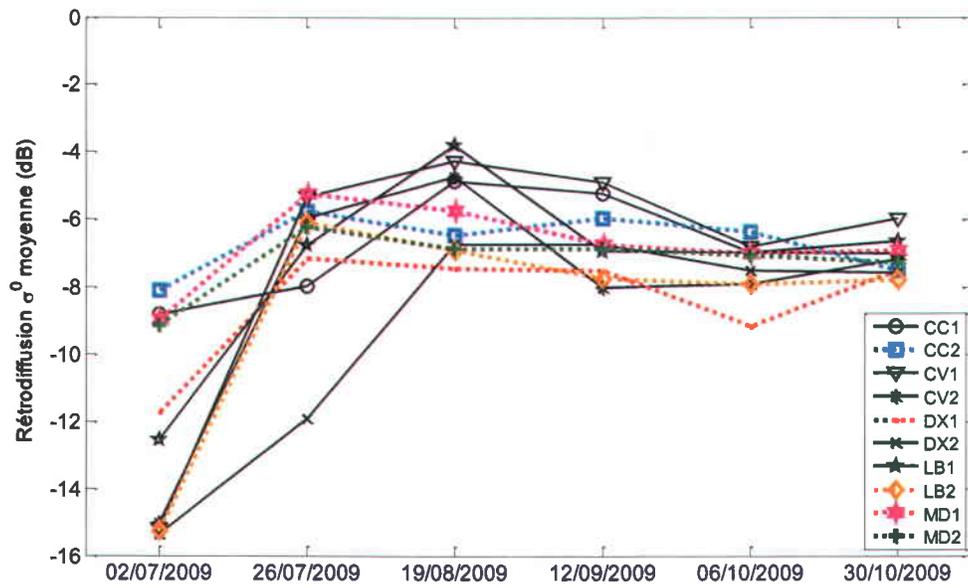
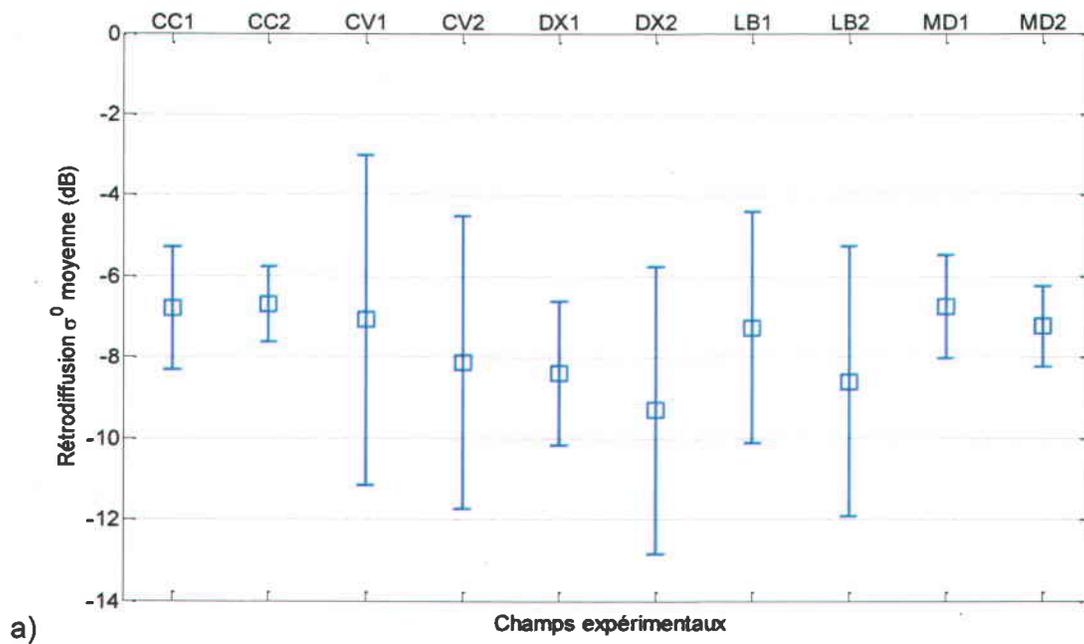


Figure 4.12: Rétrodiffusion σ^0 moyenne du riz de dix champs expérimentaux, saison de riz traditionnelle en polarisation HH (de juillet à octobre 2009)



a)

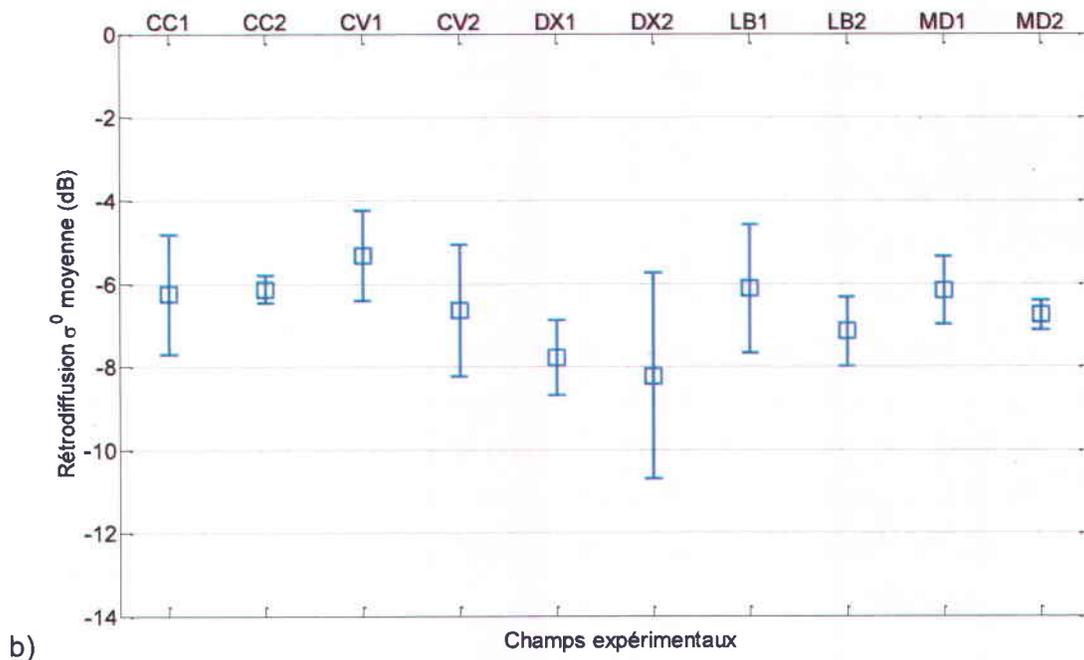


Figure 4.13: Moyenne et écart-type de σ^0 du riz de dix champs expérimentaux, saison traditionnelle de riz 2009 en polarisation HH: a) du début de la phase végétative à la fin de la phase de maturation; b) de la fin de la phase végétative au début de la phase de maturation

La Figure 4.13a montre la dispersion de σ^0 moyenne du riz dans les dix champs expérimentaux durant toutes les phases de croissance de la saison traditionnelle du riz. On remarque que les signaux du riz des champs CC1, CC2, MD1 et MD2 ne changent pas beaucoup pendant la croissance. Tandis que les signaux du riz dans les champs CV1, CV2, DX2, LB1 et LB2 montrent un grand écart dû à un niveau d'eau plus élevé dans ces champs que dans les autres champs. Leur σ^0 moyenne varie entre -12,5 dB et -15,5 dB, alors que cette valeur est entre -8 dB et -9 dB pour les champs CC1, CC2, MD1 et MD2. Si l'on regarde la Figure 4.13b, qui présente la dispersion de σ^0 moyenne du riz entre la fin de la phase végétative et le début de la phase de maturation (pas d'influence de l'eau), on observe que les champs où l'écart de signal du riz durant la croissance est réellement faible sont les champs CC2, DX1, LB2, MD1 et MD2. Les champs CC2 et MD2 présentent un écart mineur du signal entre les phases de croissance. Particulièrement, le signal du riz dans le champ DX1 montre un comportement irrégulier; en effet, à l'exception d'une diminution à -9 dB au début de la phase de maturation, le σ^0 est faible et stable (autour de -7,1 dB et -7.5 dB) à partir de la fin de la phase végétative.

Cette observation nous montre que le comportement du signal du riz dans la région d'étude est complexe. La rétrodiffusion des champs atteint son maximum à des mois différents. Le manque d'images de la saison de riz du printemps ne nous permet pas une analyse approfondie, mais la

statistique des données existantes montre un même comportement du signal pour cette saison que pour la saison traditionnelle de riz. L'hypothèse expliquant la variation irrégulière est l'influence de certains facteurs sur la réponse du signal radar et le retard des pratiques agricoles, tel que précisé ici-bas.

En effet, dans le cas des rizières, il est nécessaire de tenir compte des facteurs liés à la constante diélectrique, qui dépend fortement de la teneur en eau, et de la qualité de la croissance des plants. Les phénomènes météorologiques comme la pluie ou le vent peuvent affecter l'intensité du signal radar. Le manque d'eau, les parasites agricoles et les maladies du riz sont des facteurs qui influencent la croissance du riz et donc la réponse du signal. Dans cette étude, il est difficile de déterminer le facteur dominant à cause du manque de données de terrain ainsi que du manque de données météorologiques (à l'échelle des districts) aux dates d'acquisition des images.

Cependant, en regardant les fiches de terrain du printemps 2012 (Annexe I), la statistique et la Figure 4.13b, on peut constater, jusqu'à un certain degré, l'impact de la croissance des plants sur la rétrodiffusion radar. En effet, on a noté sur les fiches de terrain que le riz pousse lentement dans les champs listés (particulièrement CC2, DX1, LB2, MD2), en raison de la présence de parasites agricoles comme la mineuse des feuilles (*Phyllocnistis citrella*, Figure 4.14a), de la pyriculariose, une maladie des organes aériens (feuilles, tiges et panicules) du riz liée à une espèce de champignon qui diminue l'activité photosynthétique des feuilles (Figure 4.14b), ou les *Ampullariidae* (Figure 4.14c), qui vont détruire complètement la tige du riz.

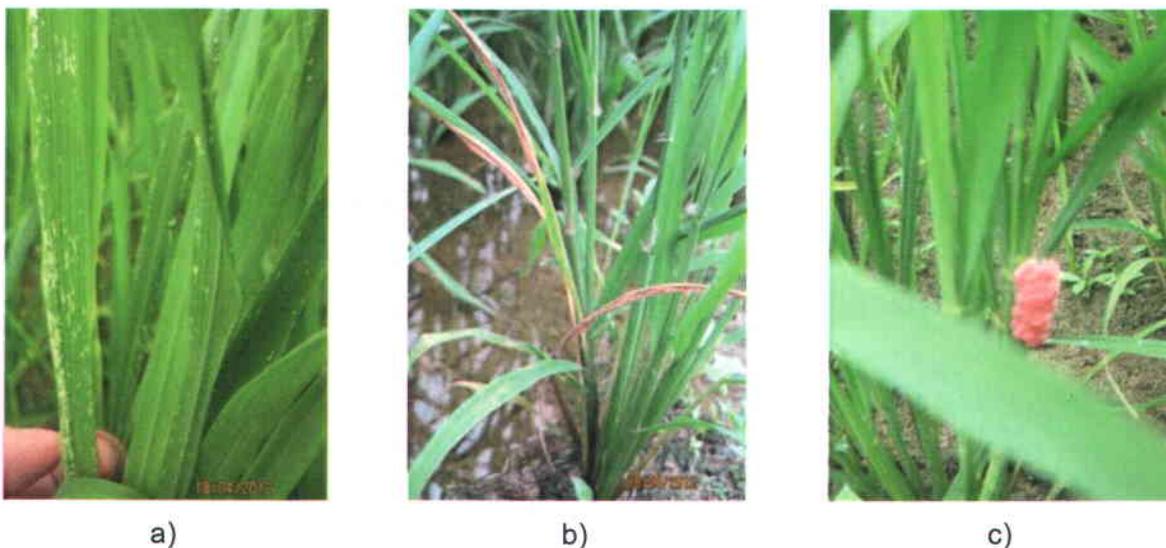


Figure 4.14 : Les agents pathogènes pour le riz: a) Mineuse des feuilles, b) Les feuilles brûlées causées par la Pyriculariose, c) Œufs d'Ampullariidae

4.2.3. Identification des rizières par seuillage d'images du rapport

Les analyses de la rétrodiffusion des rizières en polarisation HH et HV permettent de faire ressortir les points principaux suivants :

- La rétrodiffusion du riz et d'autres types de végétation montre une différence plus évidente dans la polarisation HH que dans la polarisation HV.
- Parmi les deux polarisations HH et HV, le signal du riz en polarisation HH montre un changement significatif entre chaque stade de la croissance.
- La rétrodiffusion σ^0 en polarisation HH dans les rizières inondées est dominée par l'interaction couvert-sol, donc la diffusion double rebond, lorsque le riz est bien développé. La rétrodiffusion augmente considérablement dans la première phase de la saison de riz (phase végétative) et a tendance à diminuer légèrement dans la deuxième phase de la saison (phase de reproduction).

Pour ces raisons, afin d'extraire les rizières par la méthode du seuillage, les seuils ont été déterminés sur la base de la variation de la rétrodiffusion du riz en polarisation HH. Puisque le comportement du signal du riz entre la saison de riz traditionnelle et de printemps est différent, le choix des seuils se base sur deux images, qui correspondent à la fin de la phase végétative (ou bien à la mi-saison) des deux saisons de culture.

Toutefois, tel qu'analysé à la section 4.2.2, la variation irrégulière de σ^0 durant la saison du riz en polarisation HH ne permet pas une bonne classification avec les seuils choisis. En revanche, le grand écart de σ^0 entre le début et la mi-saison ainsi que la présence de deux pics de σ^0 durant la saison de riz nous orientent vers l'application des rapports d'images de la polarisation HH entre le début de saison et la mi-saison. Le Tableau 4.4 montre le σ^0 en polarisation HH de différents types de végétation sur des rapports d'images de deux saisons de riz. Ces images ont été calculées selon la formule :

$$R = HH_{(date1)} / HH_{(date2)} \quad (30)$$

où: R est le rapport des intensités de rétrodiffusion; date 1: image en intensité du début de saison (alors que la rétrodiffusion est plus faible); date 2 : image en intensité de mi-saison (alors que la rétrodiffusion du riz atteint sa valeur maximale).

L'Équation (30) a été appliquée sur des paires d'images pour calculer les rapports R pour chaque saison de riz, comme par exemple indiqué au Tableau 4.4, le R1 est le rapport des images de 02 et 26 juillet 2009.

Le Tableau 4.4 montre que le rapport de rétrodiffusion des rizières dans la saison traditionnelle de riz est beaucoup plus faible que celui d'autres types d'occupation du sol. Pour cette raison, les rizières s'affichent sur l'image du rapport (Figure 4.15) sous la teinte noire, tandis que les autres types d'occupation du sol apparaissent sous des tons de gris foncé à blanc. Toutefois, cette observation est moins évidente dans la saison du riz du printemps dû à l'absence d'image de début de saison en février. La saison de riz du printemps commence en février, donc le niveau d'eau dans les champs en janvier (image utilisée pour calculer l'image rapport) est moins profond qu'en février.

On constate aussi que sur l'image du rapport, à l'exception des rizières, les zones d'ombre dues au relief ont une valeur de σ^0 faible. Pour limiter la confusion entre l'ombre et les rizières, un masque des zones montagneuses et forestières a été utilisé lors de l'extraction des rizières.

Tableau 4.4: Rapport des intensités de rétrodiffusion (σ^0) en polarisation HH de deux saisons de riz

| Type de végétation | Saison traditionnelle | | Saison de printemps | |
|--------------------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------|
| | R1 | R2 | R3 | R4 |
| Riz 1 | -8.69 | -11.36 | -4.11 | -2.60 |
| Riz 2 | -8.73 | -10.74 | -4.43 | -3.22 |
| Riz 3 | -9.39 | -6.84 | -4.65 | -3.28 |
| Riz 4 | -3.07 | -4.32 | 0.87 | -1.50 |
| Forêt | -0.39 | 0.49 | -0.22 | -0.57 |
| Plantation | 0.14 | 0.50 | -1.98 | -1.27 |
| Jardin de famille | -0.88 | 0.00 | -1.05 | -1.03 |
| Date 1 | 02 juil. 2009 | 02 juil. 2009 | 10 jan. 2010 | 10 jan. 2010 |
| Date 2 | 26 juil. 2009 | 19 août 2009 | 16 avr. 2010 | 10 mai 2010 |

À partir des résultats du Tableau 4.4 et de l'analyse de la variation de σ^0 sur l'ensemble des images du rapport des deux saisons de culture, les nouveaux seuils choisis pour extraire les rizières sont :

- En saison de culture traditionnelle (2009):

$$\sigma_{R1}^0 \leq -3 \text{ dB ou } \sigma_{R2}^0 \leq -4 \text{ dB} \quad (31)$$

- En saison de culture de printemps (2010) :

$$\sigma_{R3}^0 \leq -4 \text{ dB ou } \sigma_{R4}^0 \leq -2,5 \text{ dB} \quad (32)$$

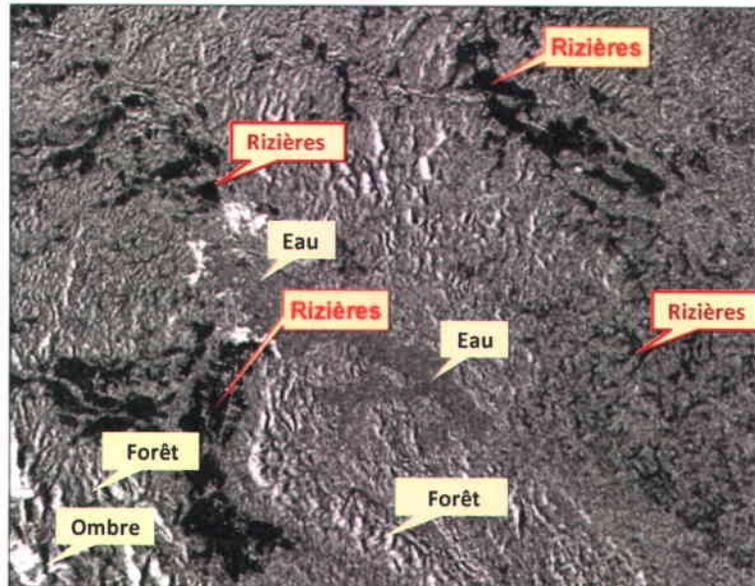


Figure 4.15: Image de rapport de rétrodiffusion R2 entre les images acquises le 02 juillet et 19 août 2009. Les rizières de la saison du riz traditionnelle apparaissent en noir, la forêt en gris pâle, l'eau en gris foncé et l'ombre due au relief en noir

Les seuils choisis ont permis d'extraire les rizières des deux saisons de culture du bassin versant. Les Figure 4.16 et Figure 4.17 présentent des exemples de la distribution des rizières pour les deux saisons au centre-ouest du bassin versant. Ce sont des résultats dérivés de l'image du rapport de différentes dates, soit l'image R1 et l'image R2, pour la saison traditionnelle, et les images R3 et R4, pour la saison de printemps.

On remarque en premier lieu qu'il y n'a pas vraiment de différence dans la distribution spatiale entre les deux saisons. Cependant, il existe une plus grande densité de parcelles de riz (plus de parcelles cultivées) durant la saison traditionnelle. Sur la Figure 4.16, les cercles pointillés en blanc mettent l'accent sur des régions où l'absence de plusieurs petites parcelles de riz est notable dans la saison de riz du printemps. De fait, il y a moins de parcelles de riz cultivées au printemps par rapport à l'été-automne (saison traditionnelle) dû au climat rigoureux de l'hiver-printemps (le froid, le manque d'eau, etc.). Toutefois, il existe d'autres raisons influençant la présence ou non de rizières dans les deux saisons. Ces raisons seront discutées dans la section de la validation (4.2.4).

À la Figure 4.17, on constate aussi que, dans certains endroits comme celui encadré en rouge, les rizières sont séparées par des zones d'habitation, lesquelles sont entourées par des plantations ou des jardins de famille (Figure 4.18). Notre expérience avec la classification hiérarchique des images SPOT-4 nous a montré qu'il est difficile, voire impossible, de séparer ces deux types de zones en utilisant les données optiques de résolution moyenne dû à la confusion entre les rizières et les plantations et les jardins (voir section 2.2.5). Les cartes de la distribution des rizières de toute la zone d'étude sont présentées à l'Annexe IV.

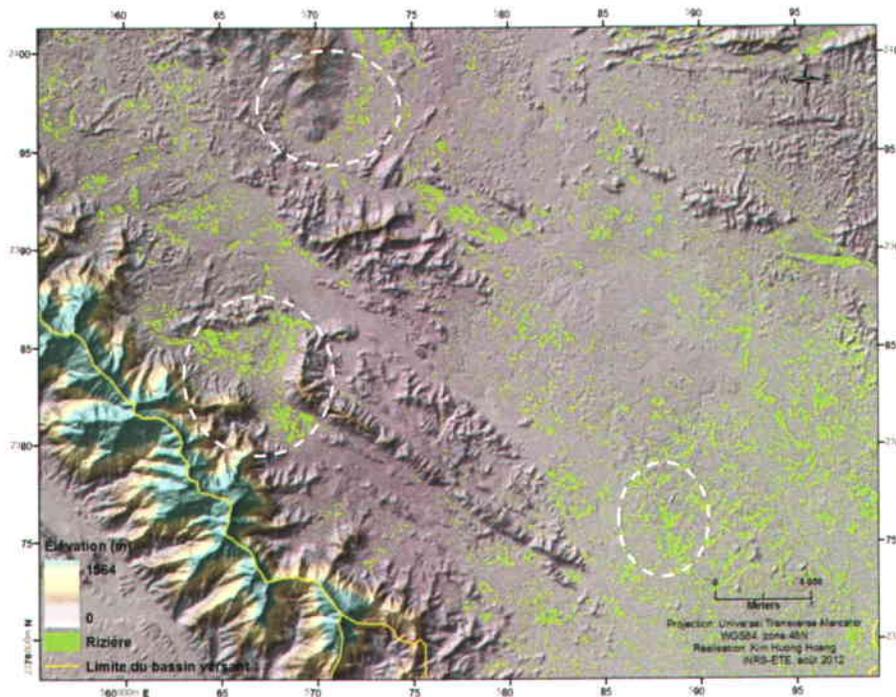


Figure 4.16: Distribution du riz (en vert) de la récolte de printemps de 2010, dérivée du rapport de trois Images RADARSAT-2 en polarisation HH, acquises le 10 janvier, le 16 avril et le 10 mai. Le fond de la carte est un modèle numérique d'altitude (créé par VTGEO) où les hautes altitudes sont en bleu et les basses en gris (inférieures à 250 m au-dessus du niveau de la mer)

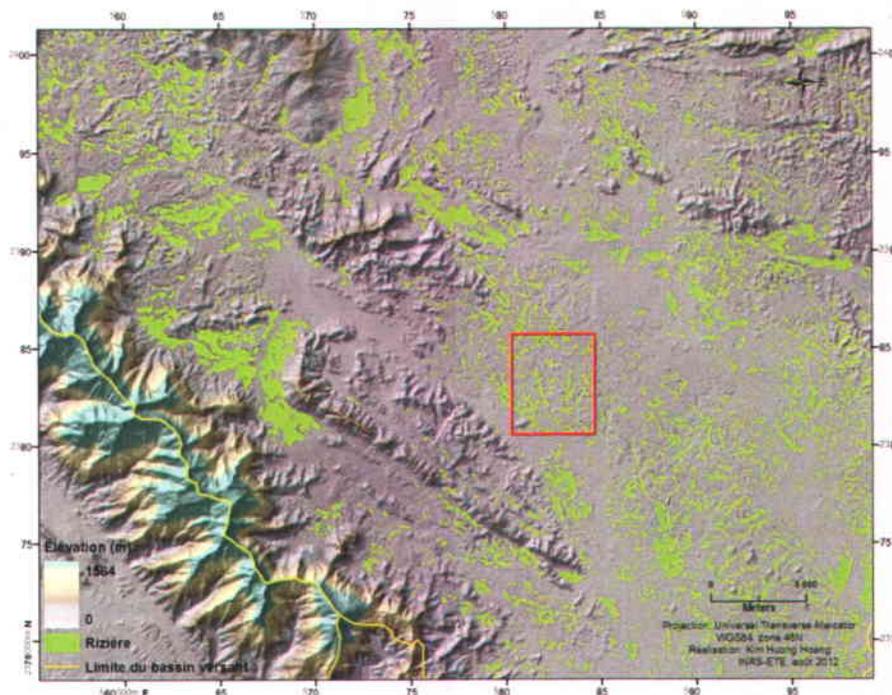


Figure 4.17: Carte de la distribution du riz (en vert) de la récolte traditionnelle de 2009, dérivée du rapport de trois images RADARSAT-2 en polarisation HH, acquises le 02 juillet, le 26 juillet et le 19 août. Le fond de la carte est un modèle numérique d'altitude (créé par VTGEO) où les hautes altitudes sont en bleu et les basses en gris (inférieures à 250 m au-dessus du niveau de la mer)

4.2.4 Validation de la classification des rizières par seuillage

La validation de la classification des rizières dérivée des images RADARSAT-2 a été réalisée en utilisant 384 échantillons choisis de la carte de référence (voir section 3.4.3). On constate que cette validation, présentée au Tableau 4.5, montre une précision modérée. La précision globale est de 71 % pour la saison traditionnelle de riz et de 67 % pour la saison de riz du printemps. La précision de la classification de la saison du printemps est inférieure à celle de la saison traditionnelle.

Tableau 4.5: Précision de la classification des rizières par rapport aux échantillons de la carte de référence pour la province de Thai Nguyen

| Valeur | Riz Traditionnelle 2009 | Riz Printemps 2010 |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Précision du producteur (%) | 81 | 78 |
| Précision d'utilisateur (%) | 72 | 71 |
| Précision globale (%) | 71 | 67 |

Pourquoi les résultats de la validation montrent-ils que la classification du riz en saison traditionnelle semble un peu plus précise qu'en saison de printemps? Tel qu'expliqué dans la section 4.2.2 ci-dessus, étant donné l'absence des images de la saison de printemps, l'écart de la rétrodiffusion du riz entre le début de saison et la mi-saison est moins grand en saison de printemps que celui de la saison traditionnelle. Pour cette raison, l'écart de la rétrodiffusion entre les rizières et les autres types de végétation sur l'image du rapport est mineur (Tableau 4.4); il y a donc de la confusion entre ces classes. De plus, une autre hypothèse expliquant la faiblesse de la précision de la classification du riz en saison de printemps peut être la qualité des plants de riz lors de la phase végétative, liée au manque d'eau et à l'apparition des parasites agricoles durant le printemps. Malgré le manque de données d'enquête sur le terrain aux dates d'acquisition des images, les Départements de l'Agriculture des districts et le Département de la Protection des Végétaux de la province de Thai Nguyen ont noté que les agriculteurs de cette province avaient fait face à la sécheresse et aux parasites agricoles durant la saison de culture du printemps 2010. Des milliers d'hectares de rizières qui n'étaient pas cultivés, en raison du manque d'eau, ont été utilisés pour des cultures vivrières en terre sèche (JAV, 2010). Ces deux hypothèses expliqueraient pourquoi plusieurs parcelles de riz (33% de la superficie totale de la carte de référence) n'ont pas été identifiées dans la saison du riz du printemps 2010.

Pourquoi une précision modérée de la classification pour les deux saisons? D'une part, de même que pour la saison du riz de printemps, il y avait probablement des rizières où les plants de riz n'ont pas bien poussé dans la saison traditionnelle de culture. D'autre part, il faut noter qu'il existe quelques limites associées aux données de référence utilisées pour la validation de la précision de la classification des rizières. Premièrement, les rizières de la carte de référence représentent la surface de riz annuelle totale (comprends la superficie de deux saisons de culture), tandis que celles dérivées des images RADARSAT-2 sont des rizières saisonnières. Deuxièmement, à l'échelle 1 : 50 000 de la carte de référence, les petites zones d'habitation sont groupées dans les terres agricoles (Figure 4.18). Cela contribue à l'augmentation de la superficie totale du riz sur la carte de référence. La Figure 4.18 montre un exemple de rizières (deux polygones en jaune) des données de références superposées sur une image de haute résolution (*GoogleEarth*, 2007); on y remarque bien qu'il y a beaucoup de zones d'habitation (a : de la commune Think Duc ; b : de la ville de Thai Nguyen) à l'intérieur d'un polygone « rizière ». On constate aussi cet écart lors de la comparaison, donnée au Tableau 4.6, de la superficie totale du riz de la classification (3) avec celle de la carte de référence (1) et celle de la statistique (2). La classification de données RADARSAT-2 (saison traditionnelle) donne des superficies qui sont inférieures aux données statistiques (10 729 ha) et à la carte de référence

(29 358 ha). Même la superficie annuelle totale des rizières des données statistiques de la province de Thai Nguyen est plus grande de 18629 ha que celle de la carte de référence. Dû à la limite des données de référence, il existe donc un certain niveau d'erreurs en raison desquelles la précision de la validation qui se base sur les 384 échantillons de la carte de référence n'atteint qu'une valeur modérée. Néanmoins, il faut dire aussi qu'une partie des erreurs provient des limites de la méthode de seuillage appliquée sur le bassin versant. Malgré que les images du rapport aient permis d'extraire des rizières en diminuant la confusion avec les autres types de végétation, le calendrier de culture et l'utilisation de l'occupation du sol sont complexes et c'est pourquoi les seuils choisis ne couvrent pas toutes les rizières du bassin versant.

Avec les limites mentionnées, la méthode a permis de détecter 74 % des rizières de la saison traditionnelle du riz et 63 % des rizières de la saison de riz du printemps, en comparant avec des données statistiques de la province de Thai Nguyen (Tableau 4.6), lesquelles considèrent toutes les terres agricoles comme exploitées en rizière ce qui ne correspond pas à la réalité. Les rizières occupant plus de 66% des terres agricoles (OGS, 2009).



Figure 4.18: Illustration de la qualité de la carte de référence (ligne jaune), affichée sur l'image de haute résolution téléchargée de Google Earth.

Tableau 4.6: Comparaison de la superficie totale (hectares) du riz (classification, carte de référence et statistiques) pour la province de Thai Nguyen.

| Saison de riz | S _{Carte} (1) | S _{statistiques} (2) | S _{classification} (3) | % concordance entre (2) et (3) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Traditionnelle 2009 | 59 829 | 41 200 | 30 471 | 74 |
| Printemps 2010 | | 28 300 | 17 770 | 63 |

Les résultats obtenus montrent que l'approche de seuillage par des rapports multiples d'images est pertinente pour identifier les rizières d'une région morcelée ou les jours d'ensemencement varient selon le climat et la nature du sol. Pour que la méthode (les seuils) soit applicable dans les autres régions au Nord du Vietnam, une des conditions importantes est d'avoir au moins trois images radars du début de la saison (lorsque les champs sont inondés) jusqu'à la mi-saison (la phase végétative) pour que l'écart entre la rétrodiffusion du riz et celle des autres types d'occupation du sol soit maximal lors du calcul des rapports d'images.

4.3 Classification des rizières par données polarimétriques

4.3.1 Résultats de la classification par le SVM

Les Figure 4.19 et Figure 4.20 présentent la distribution des rizières d'une partie du site 2 (Figure 3.5) pour deux saisons de culture, dérivée de la matrice de cohérence (T) par la classification par le SVM.

Comme pour les résultats de la classification par seuillage à partir d'images du rapport de la polarisation HH, les résultats de la classification SVM au site 2 indiquent également que la densité des plants de riz est différente en saison traditionnelle et en saison de printemps. Les cartes des rizières de tout le site 2 sont présentées à l'annexe IV.

Les valeurs optimales de C_{SVM} et γ pour la classification des deux images polarimétriques mentionnées sont : $C_{SVM} = 2^{10}$ et $\gamma = 2^{-4}$ pour la saison traditionnelle, et $C_{SVM} = 2^8$ et $\gamma = 2^{-2}$ pour la saison du printemps.

Afin de comparer l'efficacité d'extraction des rizières à partir des données polarimétriques, une classification SVM a été appliquée sur la polarisation HH à la mi-saison des deux saisons de riz. Les résultats de cette classification sont présentés aux Figure 4.21 et Figure 4.22. Les valeurs optimales obtenues de C_{SVM} et γ pour ces deux classifications, dans ce cas, sont : $C_{SVM} = 2^{12}$ et $\gamma = 2^{-1}$ pour la saison traditionnelle, et $C_{SVM} = 2^{12}$ et $\gamma = 2^{-2}$ pour la saison du printemps.

En comparant visuellement les résultats de la classification SVM dérivée des données polarimétriques (Figure 4.19 et Figure 4.20), on remarque que la classification dérivée de la polarisation HH semble donner des résultats similaires. En réalité, la statistique montre la superficie du riz classifié de données polarimétriques est plus grande 1598 ha que celle dérivée de la polarisation H. De plus, l'analyse de la matrice de confusion des classifications montre qu'il

y a des confusions dans les résultats de la classification en utilisant une seule polarisation HH. Cette confusion influence la qualité de la classification, qui sera discutée à la section prochaine.

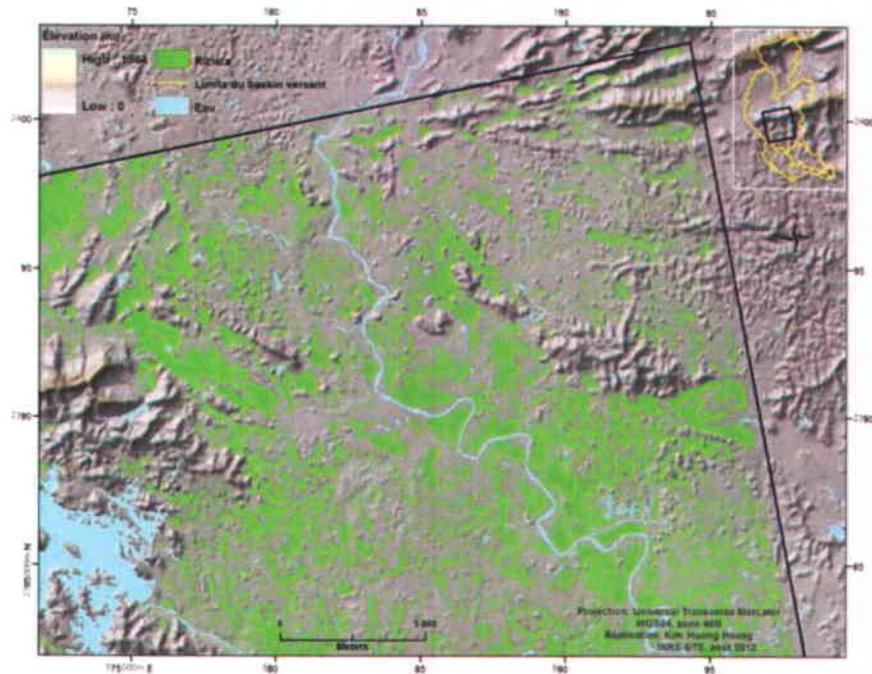


Figure 4.19: Distribution du riz (en vert) de la récolte traditionnelle de 2009 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 polarimétrique, acquise le 21 août, par la classification SVM

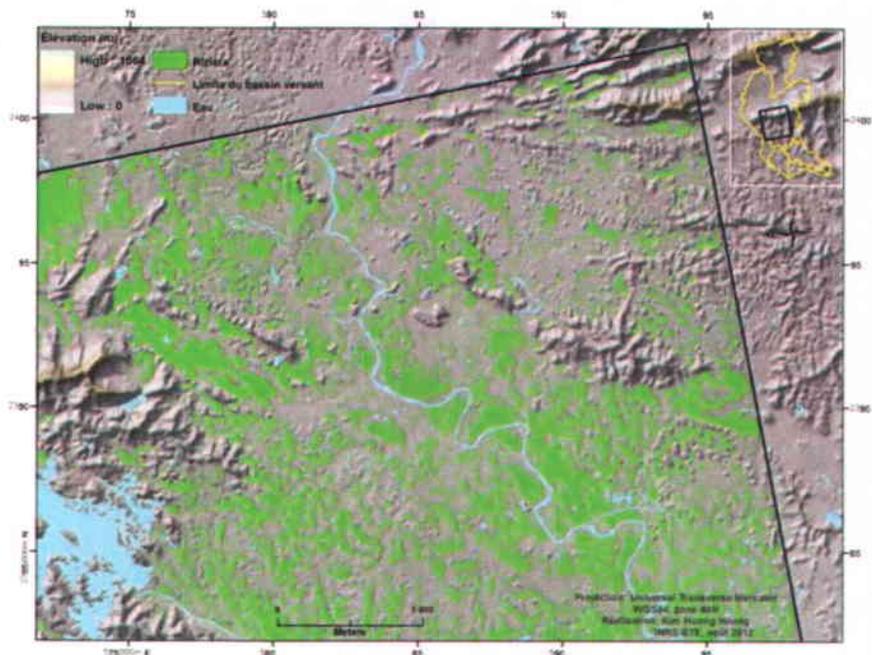


Figure 4.20: Distribution du riz (en vert) de la récolte de printemps de 2010 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 polarimétrique, acquise le 18 avril, par la classification SVM

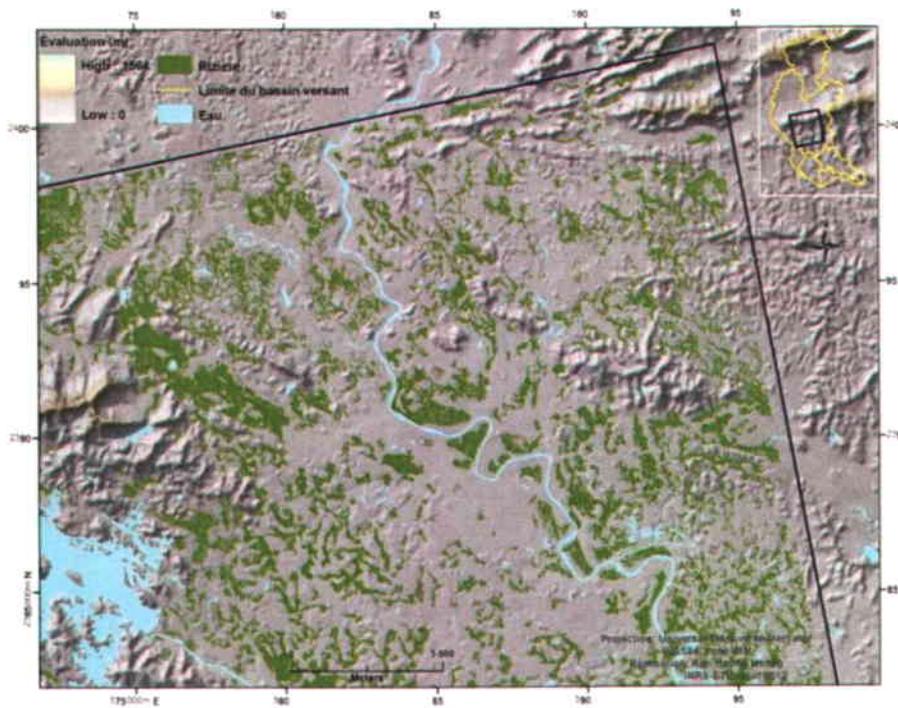


Figure 4.21: Distribution du riz (en vert foncé) de la récolte traditionnelle de 2009 (carré noir) dérivée de l'image RADARSAT-2 en polarisation HH, par la classification SVM

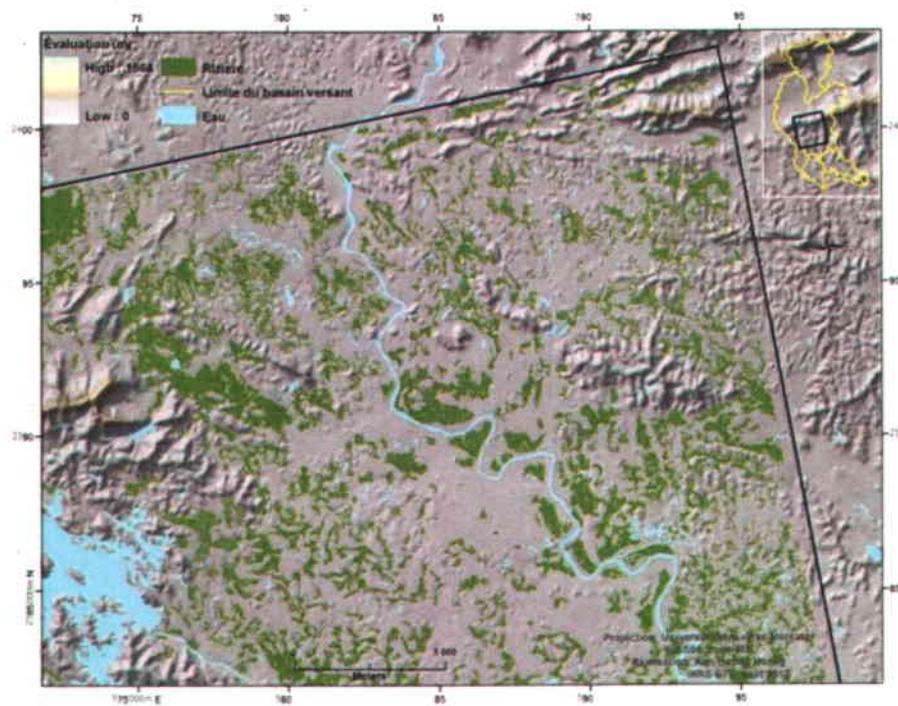


Figure 4.22: Distribution du riz (en vert foncé) de la récolte de printemps de 2010 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 en polarisation HH, par la classification SVM

4.3.2 Validation de la classification

Le processus de la validation de la classification des rizières par le SVM reste le même que celui pour la méthode de classification par seuillage. Il se base sur un total de 384 échantillons (riz / non-riz) choisis aléatoirement sur la carte de référence (voir section 3.4.3). La validation est appliquée sur les résultats de la classification des deux saisons de culture de deux types de données.

Cependant, le logiciel PolSARpro fournit une matrice de confusion à la sortie de la classification SVM. Lorsque la confusion entre les classes est grande, il faut reprendre des échantillons pour une reclassification. L'analyse de cette matrice (Tableau 4.7) est donc considérée comme étant la première étape de la validation de la qualité et de la précision de la classification (Tableau 4.8). La validation de la classification en utilisant les 384 échantillons de la carte de référence est la deuxième étape du processus de validation de la classification (Tableau 4.9).

Tout d'abord, sur les matrices de confusion (Tableau 4.7), qui montrent le pourcentage de séparabilité, on observe que :

- Les trois classes Riz, Eau et Autre (non-riz, non-eau) sont bien séparées (diagonale principale de chaque matrice). Leur séparabilité est plus haute dans la saison traditionnelle que dans la saison de riz du printemps, pour les deux types de données. Cependant, les classes sont mieux distinguées par les données polarimétriques que par une seule polarisation.
- Les classes Riz et Eau sont mieux séparées que la classe Autre. La séparabilité de ces deux classes varie entre 76,9 % et 99,6 % dépendamment des données d'entrée et de la saison de culture. Ce pourcentage pour la classe Autre est plus faible et varie entre 63,6 % et 95,5 %.
- La confusion dominante remarquable est entre les classes Riz et Autre. Le pourcentage de confusion est plus haut en saison de printemps qu'en la saison traditionnelle, ainsi que pour une seule polarisation par rapport à la polarimétrie. En regardant les Tableau 4.7 (c) et (d), on trouve que sur la polarisation HH, durant la saison traditionnelle de riz, il y a 7,15 % des pixels de Riz qui ont été classifiés à la classe Autre et 29,46 % des pixels de l'occupation du sol Autre qui ont été classifié à la classe Riz. Ces pourcentages pour la saison du riz de printemps sont de 8,42 % (de l'occupation du sol Riz à la classe Autre) et de 13,67 % (de l'occupation du sol Autre à la classe Riz). Tandis que ces

pourcentages sont très faibles et ne varient qu'entre 0,41 % et 0,97 % en utilisant les données polarimétriques (Tableau 4.7 a et b).

Le Tableau 4.8 présente la précision et le Kappa (voir section 3.3.3) de la classification. Si on exclut la classification de la saison du printemps 2010 dérivée la polarisation HH, ce tableau montre une haute précision des classifications (de 88 % à 96 %) et une valeur de Kappa qui varie entre 0,78 et 0,88. Seule la classification de la saison du printemps 2010 (en utilisant la polarisation HH) présente une précision et une valeur de Kappa modérées (79 % et 0,63).

Tableau 4.7: Matrice de confusion de la classification SVM

| a) Saison traditionnelle 2009, FQ21 | | | | b) Saison du printemps 2010, FQ21 | | | |
|-------------------------------------|-------|------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | Riz | Eau | Autre | | Riz | Eau | Autre |
| Riz | 99,03 | 0,00 | 0,97 | Riz | 99,59 | 0,41 | 0,00 |
| Eau | 0,00 | 99 | 1,00 | Eau | 0,64 | 87,26 | 12,10 |
| Autre | 1,37 | 3,15 | 95,49 | Autre | 0,18 | 24,63 | 75,19 |

| c) Saison traditionnelle 2009, HH | | | | d) Saison du printemps 2010, HH | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | Riz | Eau | Autre | | Riz | Eau | Autre |
| Riz | 92,85 | 0,00 | 7,15 | Riz | 91,58 | 0,00 | 8,42 |
| Eau | 0,00 | 97,03 | 2,97 | Eau | 13,03 | 76,91 | 10,05 |
| Autre | 29,46 | 5,47 | 65,08 | Autre | 13,67 | 22,73 | 63,6 |

Tableau 4.8: Précision de la classification SVM calculée à partir de la matrice de confusion

| | | Précision (%) | Kappa |
|------|------|---------------|-------|
| 2009 | HH | 88 | 0,78 |
| | FQ21 | 96 | 0,88 |
| 2010 | HH | 79 | 0,63 |
| | FQ21 | 88 | 0,78 |

La haute séparabilité obtenue provient du fait que les échantillons ont été bien choisis et qu'on a une classification simple avec seulement trois classes à différencier. Ces classes sont en fait de nature très différente. La confusion demeure entre les classes Riz et Autre dans le cas de

l'utilisation de la polarisation HH. Elle s'explique par la confusion entre les rizières et les cultures vivrières, d'une part. D'autre part, elle peut s'expliquer aussi par la différence entre les données utilisées dans l'espace d'entrée de chaque classification par le SVM, c'est-à-dire la différence entre les neuf éléments de la matrice (T) des données polarimétriques et une seule polarisation HH.

Quant à la validation de la précision de la classification en utilisant les échantillons de la carte de référence, elle montre une tendance similaire concernant la précision globale de la classification (Tableau 4.9). Selon cette validation, on observe que la classification SVM n'obtient qu'une précision globale modérée (entre 71 % et 82 %) mais, comme à l'étape 1 de la validation, la précision de la classification de la saison traditionnelle est plus haute que celle de la saison de printemps, pour les données polarimétriques, et la classification dérivée de la polarisation HH obtient une précision moindre que celle dérivée des données polarimétriques.

En regardant l'ensemble de la validation de la classification, on remarque que la classification dérivée de données polarimétriques en saison traditionnelle du riz montre la meilleure classification parmi les résultats obtenus. Cela peut se comprendre si on retourne à l'analyse de la variation de la rétrodiffusion dans la section précédente. Par rapport à la saison du riz de printemps, la croissance du riz durant la saison traditionnelle du riz 2009 est plus évidente. De plus, les neuf éléments de la matrice de cohérence (T) donnent plus d'information et permettent de mieux séparer les classes qu'une seule polarisation. Cela explique aussi pourquoi la précision obtenue à partir des données polarimétriques est toujours plus haute que celle qui provient de la polarisation HH seule.

L'écart de la précision entre l'étape 1 (Tableau 4.8) et l'étape 2 (Tableau 4.9) de la classification s'explique par les différentes modalités de la validation. À l'étape 1, la validation se base sur les échantillons d'entraînement pour la classification par le SVM. Tandis que l'étape 2 de la validation, tel que mentionné précédemment, se base sur les échantillons choisis aléatoirement de la carte de référence. Pour cette raison, le même problème que celui présenté dans la section 4.2.4 demeure concernant la qualité des données de référence. Pour la saison de printemps, en particulier, la précision des classifications a été influencée, comme dans le cas des classifications des images double polarisation, par l'état de croissance (maladie, manque d'eau) des plants et le retard du calendrier agricole.

Tableau 4.9: Précision de la classification des rizières dérivée des données polarimétriques FQ21 et en polarisation HH de RADARSAT-2

| Valeur | Saison traditionnelle 2009 | | Saison de printemps 2010 | |
|------------------------------------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|
| | HH | FQ21 | HH | FQ21 |
| Précision du producteur (%) | 60 | 86 | 61 | 82 |
| Précision d'utilisateur (%) | 62 | 81 | 62 | 75 |
| Précision globale (%) | 72 | 82 | 71 | 74 |

Enfin, les résultats obtenus nous permettent de confirmer que la classification SVM est une méthode appropriée pour identifier les rizières sur le bassin versant étudié, où l'occupation du sol est complexe. Les résultats montrent aussi que les données polarimétriques sont plus efficaces qu'une seule polarisation pour identifier les rizières.

4.4 Cartographie de l'occupation du sol et de la croissance du riz du bassin versant

4.4.1 Carte de l'occupation du sol servant à la simulation hydrologique

Le quatrième objectif de la thèse est de créer une nouvelle carte de l'occupation du sol (par rapport à la carte créée sur la base d'une image LANDSAT 7 - ETM+ en 2003) qui servira à la simulation hydrologique par le modèle HYDROTEL (Fortin et al., 1995).

Afin de faire la mise à jour de la carte de l'occupation du sol du bassin versant, qui est très complexe, une intégration de la classification de l'occupation du sol dérivée d'images HRVIR2 (Haute Résolution Visible et Infrarouge, 20 m) du satellite SPOT-4 et des rizières extraites d'images RADARSAT-2 (en utilisant les rapports d'images en polarisation HH) a été réalisée. La raison pour laquelle les rizières identifiées à partir des rapports d'images des images Standard ont été choisies (au lieu des rizières classifiées par les données polarimétriques) est que les images Standard couvrent la plupart des superficies du riz du bassin versant.

La Figure 4.23 présente une carte de l'occupation du sol pour l'année 2007 (5 classes) intégrant les rizières de l'année 2009, soit la partie aval du sous-bassin versant de Thai Nguyen. On constate l'imbrication du milieu urbain, des terres agricoles et des rizières dans cette partie. Cela démontre la raison pour laquelle on a utilisé une combinaison des images optiques et radars

pour cartographier l'occupation du sol du bassin versant étudié. Les cartes de l'occupation du sol de l'ensemble du bassin versant, dans lesquelles sont intégrées les rizières des deux saisons de culture, sont présentées à l'Annexe IV.

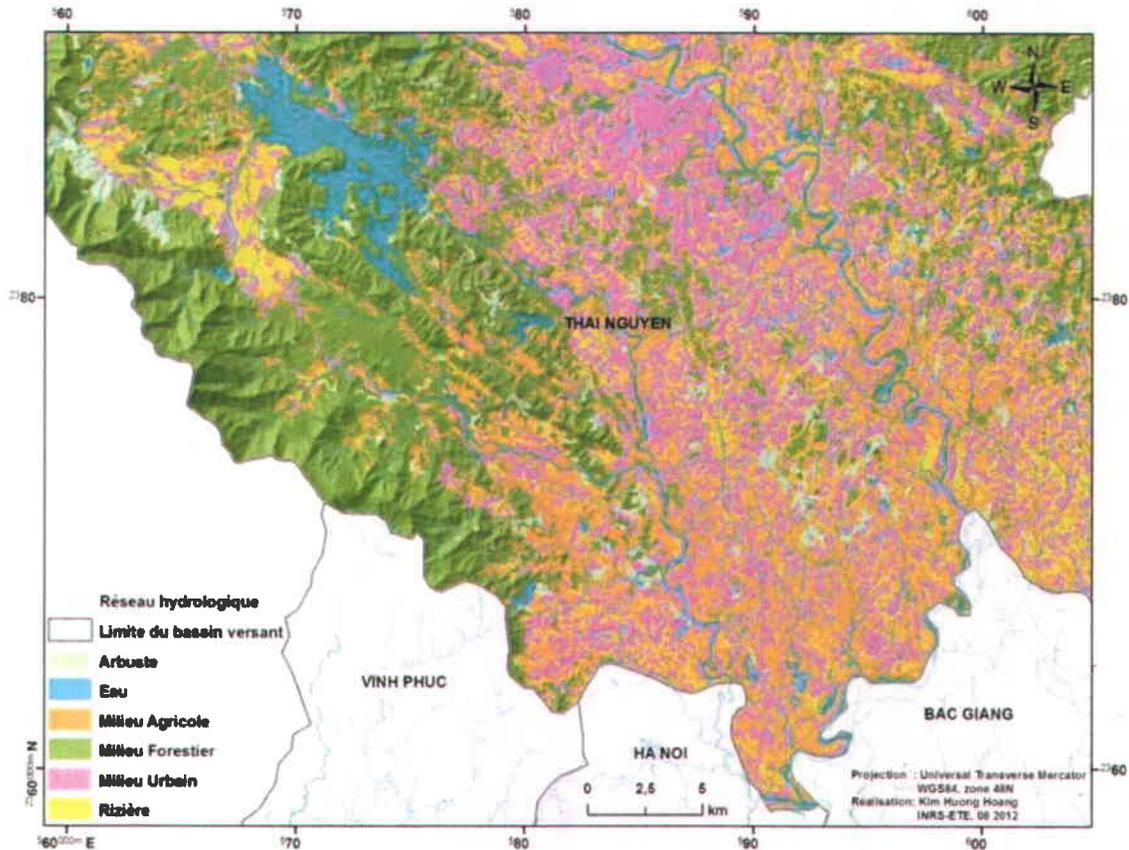


Figure 4.23: Carte de l'occupation du sol en aval du sous-bassin versant de Thai Nguyen extraite des images SPOT de 2007. Les rizières (en jaune) de l'année 2009 y sont intégrées

4.4.2 État de croissance des rizières

Étant donné que sans avoir les données de référence sur le terrain aux dates d'acquisition des images de deux saisons de riz, il était difficile de déterminer les seuils pour chaque stade de croissance du riz. La réussite de l'extraction des rizières à partir d'images du rapport permet de créer un masque de riz afin d'élaborer la carte de croissance des rizières (à un niveau global d'information). L'algorithme de classification non supervisée ISODATA (Jensen, 1996), implanté dans le logiciel Geomatica PCI, a été appliqué (sous masque) sur deux images en polarisation HH au début (26 juillet 2009) et à la mi-saison (19 août 2009) de la saison traditionnelle de riz. Sur chaque image, les pixels de riz ont été classifiés en huit groupes (*clusters*) différents. En consultant la variation de la rétrodiffusion du riz et la valeur moyenne de la rétrodiffusion (σ^0

moyen) du riz de chaque groupe, fournie par l'algorithme ISODATA, ces huit classes ont été regroupées en trois classes concernant l'état des rizières au début de la saison (le σ^0 moyen est inférieur de -8,3 dB), à la mi-saison lors que la phase végétative (le σ^0 moyen varie entre - 2 dB et - 6 dB) et à la fin de la saison lors que les phases de reproduction et maturation (le σ^0 moyen est autour de - 7 dB). Les Figure 4.24 et Figure 4.25 présentent les deux cartes qui montrent l'état de l'évolution des rizières (voir section 2.1.1) pour la saison traditionnelle de riz 2009.

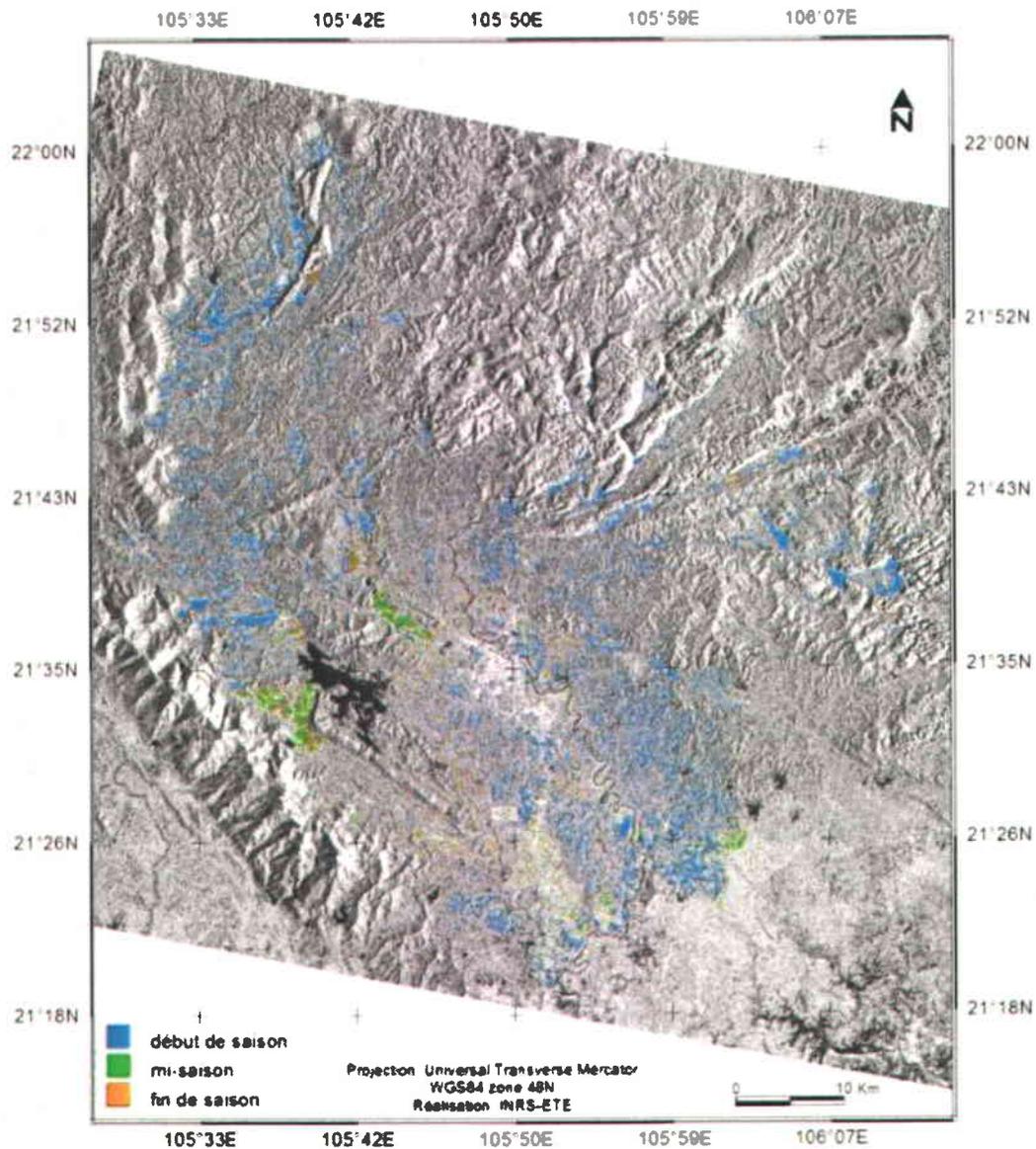


Figure 4.24: État des rizières de la saison traditionnelle du riz, dérivée de l'image en polarisation HH, acquise le 26 juillet 2009

La Figure 4.24 permet de mieux voir le décalage du calendrier agricole du bassin versant. La plupart des rizières sont inondées (couleur bleu) au début de la saison (le 26 juillet). Toutefois, on constate que la saison a commencé plus tôt dans les zones (couleur vert) autour du lac Nui Coc que dans les autres endroits du bassin versant. À cette date, les zones en orange représentent les rizières qui ne sont pas encore cultivées. Au contraire, la Figure 4.25 montre que la plupart des rizières atteignent la phase végétative (vert) le 19 août. Certains champs de riz montrent une croissance lente des plants de riz ou bien ils sont déjà rendus à la phase de maturation (orange).

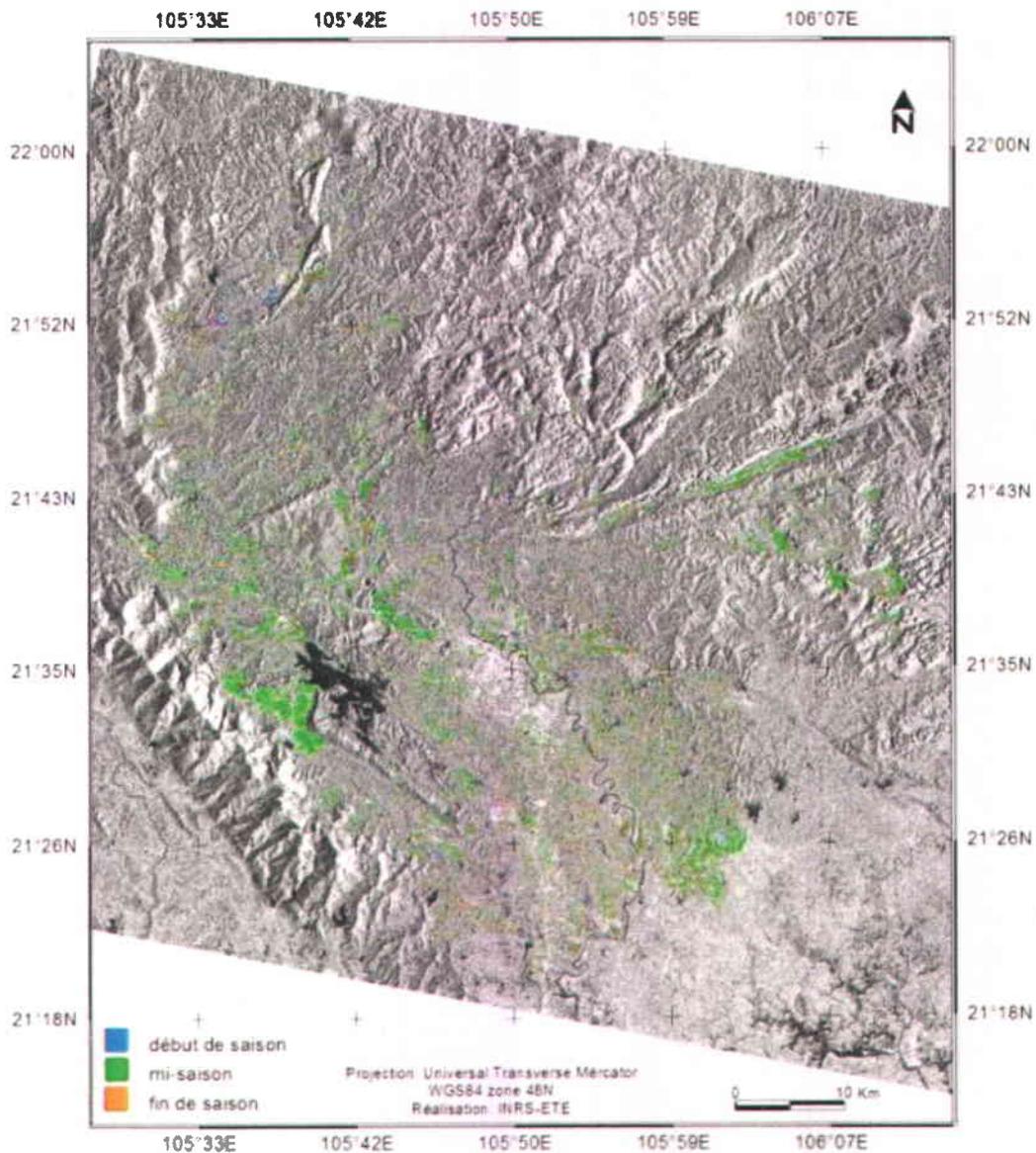


Figure 4.25: État des rizières de la saison traditionnelle du riz, dérivée de l'image en polarisation HH acquise le 19 août 2009

On ne peut pas nommer les stades exacts de la croissance du riz sur ces cartes, toutefois elles nous permettent de savoir l'état d'avancement de la croissance de riz dans le bassin versant durant la saison de culture. Cette étude sur l'état de croissance du riz est exploratoire car les données sur terrain n'étaient pas disponibles. Néanmoins, c'est un test pour montrer qu'il est possible de produire des cartes des étapes (au moins trois) de croissance du riz une fois que les superficies en les rizières ont bien identifiées (classées et masquées).

4.5 Impact des rizières sur le régime hydrologique

Le Tableau 4.10 présente le résultat des calculs du besoin en eau pour les rizières et des écoulements des deux sous-bassins versants durant la saison du riz de printemps, soit du 5 février au 3 juin (voir chapitre 2). Tel que mentionnée (chapitre 3, section 3.7), le besoin en eau du bassin versant a été calculé en utilisant la carte des rizières de la saison de riz printemps et le débit à l'exutoire des sous-bassins versant choisis, selon l'équation (33) suivant :

$$V_{\text{besoin/saison}} \text{ (m}^3\text{/saison)} = S_{\text{riz}} * V_{\text{moyen}} \quad (33)$$

où : S_{riz} : Superficie du riz printanier (ha); V_{moyen} : le besoin en eau moyen pour la culture du riz (saison sèche) dans les plaines du Nord du Vietnam (m³/saison/ha).

Les données du MARD ont montré que le besoin en eau moyen (V_{moyen}) pour la culture du riz dans les plaines du Nord Vietnam est de 4 759,7 m³/ha (Doan et al., 2011). À partir de ce chiffre, nous avons obtenu le besoin en eau ($V_{\text{besoin/saison}}$), pour une superficie de 4 793,8 ha (S_{riz}), de la culture du riz de printemps en 2010 de la partie amont du bassin versant de la rivière Côm, qui est de 22 816 x 10³ m³. Ce volume d'eau correspond à 29,2% du débit moyen mesuré à l'exutoire de ce sous-bassin ($Q_{\text{sortant}} = 78\ 162 \times 10^3 \text{ m}^3$) pour les saisons de culture du printemps de 1961 à 1972 (12 ans; ces années ont été choisies car elles correspondent à la période d'écoulement naturel, avant la construction du barrage).

Pour la partie amont du bassin versant de la rivière Câm, le $V_{\text{besoin/saison}}$ nécessaire pour 12 828,4 ha de riz est de 61 059 x 10³ m³. On constate que le besoin en eau pour les rizières représente 23,5 % du débit moyen (260 157 x 10³ m³) à l'exutoire de ce sous-bassin pendant les saisons de culture du printemps de 1997 à 2006 (10 ans).

Tableau 4.10: Importance des besoins en eau pour la culture du riz sur le bassin versant de la rivière C au

| | Bassin versant de la rivière C ng (1961 - 1972) | Bassin versant de la rivière C u (1997 - 2006) |
|--|--|---|
| Q_{sortant} (m ³ /saison) | 78 162E+03 | 260 157E+03 |
| V_{moyen} (m ³ /ha/saison) | 4,76E+03 | |
| S_{riz} (ha) | 4,79E+03 | 12,83E+03 |
| $V_{\text{besoin/saison}}$ (m ³ /saison) | 22 816E+03 | 61 059E+03 |

Ces calculs rapides montrent que les besoins en eau des rizières comptent pour une grande proportion des écoulements sur le bassin versant de la rivière C u. Il est donc important d'intégrer les rizières et leurs particularités dans les modèles hydrologiques utilisés sur ce bassin versant.   cette fin, un « modèle rizière » est en cours d'élaboration (par un autre étudiant participant au projet) pour intégrer les phases de culture des rizières ainsi que leurs particularités hydrologiques par rapport   d'autres cultures (ex. : modification de l'infiltration, de l'évaporation et des écoulements) dans le modèle HYDROTEL. Ces développements et leur validation sont rendus possibles grâce aux résultats de la présente thèse (identification des rizières sur les cartes d'occupation du sol). Pour cette raison, les résultats quantitatifs des simulations hydrologiques pouvant montrés l'impact des rizières sur le régime hydrologique ne sont pas encore disponibles. Cependant, le résultat des calculs ci-dessus a démontré que la demande en eau pour la culture du riz prend une grande proportion du débit total dans les deux sous-bassins utilisés en exemple, ce qui est aussi probablement le cas dans l'ensemble du bassin versant de la rivière C u. Il est donc nécessaire d'identifier les rizières pour améliorer l'information des données d'occupation du sol afin d'améliorer les évaluations et prédictions liées au cycle hydrologique.

4.6 Sommaire

Dans ce chapitre, les objectifs d'établir une carte de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière C u en utilisant des données SPOT-4, d'identifier les rizières   partir de données RADARSAT-2 et d'établir une carte de l'occupation du sol comprenant l'information des rizières

ont été réalisés. Les résultats obtenus nous permettent de saisir l'importance de l'identification des rizières sur le bassin versant.

La première partie de ce chapitre a été consacrée aux résultats de la cartographie de l'occupation du sol à partir d'images SPOT-4. La méthode de classification proposée est celle de la classification orientée-objets en utilisant l'algorithme de classification hiérarchique. Six classes thématiques ont été déterminées, incluant : milieu agricole, milieu urbain, milieu forestier, arbuste, eau et rizière. Cependant, la classe « rizière » a été classifiée à partir des images RADARSAT-2, donc cinq classes thématiques sont distinguées à partir d'images SPOT-4. L'algorithme de classification hiérarchique à deux niveaux (G : classification à l'échelle grande et P : classification à l'échelle petite) a été appliqué sur les images SPOT-4. Différents critères et paramètres pour faire fonctionner la classification ont été mis en œuvre. Les classifications obtenues ont montré une haute précision (90 % et 91 % respectivement pour les deux niveaux G et P). La méthode proposée a permis d'obtenir une carte de l'occupation qui a une échelle d'information plus détaillée par rapport à la carte de l'occupation élaborée à partir de l'image LANDSAT 7 ETM+ en 2003.

La deuxième partie de ce chapitre était l'identification des rizières à partir d'images RADARSAT-2 en double polarisation. Les acquisitions radar ont été effectuées par le système RADARSAT-2 (bande C), du 15 mai 2009 au 10 mai 2010 en polarisations HH et HV; elles couvrent deux saisons de culture du riz, soit celle du printemps et la saison traditionnelle. Nous avons travaillé sur un site d'étude qui est situé au milieu du bassin versant de la rivière Cáu, soit la province de Thai Nguyen.

En analysant le signal du riz et d'autres types de végétation, on peut noter que la différence de rétrodiffusion (σ^0) du riz entre le début et la mi-saison, en polarisation HH et HV, est notable tandis que les autres types de végétation ont une étroite gamme dynamique temporelle et ce pour les deux polarisations. Le coefficient σ^0 du riz en polarisation HH est plus sensible à la variation qu'en polarisation HV. On a constaté un changement significatif de σ^0 entre chaque stade de croissance des plants de riz pour les deux polarisations, bien que cette observation soit plus évidente dans la polarisation HH. Parmi les phases de croissance, à la phase végétative le signal du riz devient particulièrement fort. Ces résultats sont en accord avec la littérature liée aux autres études sur les rizières en Indonésie et au Japon de l'équipe de LeToan (LeToan et al., 1997) et à celles au sud du Vietnam (Bouvet et al., 2009).

En se basant sur cette analyse, les seuils pour identifier les rizières de deux saisons du riz ont été déterminés; les rizières sont extraites à partir d'images du rapport (R1, R2, R3 et R4) en

polarisation HH. La validation montre une précision globale modérée des classifications de 71 % pour la saison du riz traditionnelle et de 67 % pour la saison du riz de printemps. Plusieurs facteurs affectent les résultats, soit l'échelle des données de référence, le retard par rapport aux usages des pratiques agricoles dû aux conditions climatiques ou économiques et la qualité de la croissance des plantes; ainsi, le signal du riz à la phase végétative n'était pas le même dans l'ensemble du bassin versant. Malgré leurs limites, ces résultats permettent d'obtenir des informations sur la distribution spatiale des rizières de la zone d'étude. Ces informations sont actuellement utilisées pour les simulations hydrologiques du bassin versant de la rivière Cáu. Des cartes permettant de suivre les étapes de croissance du riz du bassin versant ont aussi réalisées. Cependant, dû au manque de données sur le terrain, nous n'avons pas pu détailler les phases de croissance; cette carte contient donc des informations sur les stades généraux.

La troisième partie de ce chapitre était l'identification des rizières par la classification par le SVM en utilisant des données polarimétriques. Le potentiel des données polarimétriques RADARSAT-2 en mode fin pour la détection des rizières d'un bassin versant au Nord du Vietnam a été étudié en condition expérimentale. Une classification SVM a été aussi appliquée sur les images en polarisation HH afin de comparer l'efficacité de ce type de données avec celle des données polarimétriques pour identifier les rizières.

Les résultats montrent que la classification par le SVM appliquée sur la matrice de cohérence (T) permet de distinguer les rizières d'autres types de végétation. Des informations sur la distribution spatiale des rizières de deux saisons du riz du site 2 ont été obtenues. La classification des rizières de la saison traditionnelle du riz 2009 a eu une bonne précision globale (82 %), tandis que celle de la saison du riz de printemps 2010 est de 74 %. On observe la même tendance pour les résultats obtenus dans le cas des images en polarisation HH, soit une précision globale de 72 % pour la saison traditionnelle de culture en 2009 et de 71 % pour la saison de culture de printemps en 2010. Ces résultats permettent de ressortir l'efficacité des données polarimétriques dans l'identification des rizières du bassin versant.

La dernière partie du chapitre a confirmé l'importance de détecter des rizières de la zone d'étude puisque les besoins en eau pour la culture du riz occupent un grand pourcentage du débit sortant du bassin versant. Les calculs ont montré que les besoins en eau sur la partie en amont du bassin versant de la rivière Cống et de la rivière Cáu représentent respectivement 29,2% et 23,5% du débit sortant. La présence des rizières ne peut donc être ignorée si nous souhaitons améliorer les évaluations et les prédictions liées au cycle hydrologique au nord Vietnam

CHAPITRE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE

5.1 Résumé des travaux

L'objectif des travaux présentés dans cette thèse était de mettre au point une méthode pour cartographier l'occupation du sol, et plus particulièrement l'étendue des surfaces consacrées à la culture du riz, qui soit adaptée à la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Càu. La complexité de l'utilisation du sol au Nord du Vietnam, en général, et dans le bassin versant étudié, en particulier, rend difficile la classification à partir d'images satellites de moyenne résolution. Pourtant, les informations de la couverture du sol sont importantes dans plusieurs actions concrètes en matière de gestion, de protection et de conservation de l'environnement, et de l'eau particulièrement. Les propositions méthodologiques formulées visent donc à développer une méthodologie pour cartographier l'occupation du sol et extraire les rizières dans une région hétérogène en utilisant des données optiques et radar. Cette méthode a permis d'améliorer la qualité de la carte de l'occupation du sol du bassin versant par rapport à une carte dérivée en 2007 à partir d'une image LANDSAT-7 ETM+ de 2003. Elle pourrait être adaptée à d'autres sites au nord du Vietnam, possédant les mêmes caractéristiques d'utilisation du sol que le bassin versant étudié.

Au moment de conclure cette étude, il convient d'en rappeler les objectifs spécifiques et les principaux résultats. Dans l'introduction, nous avons déterminé qu'il fallait privilégier l'élaboration d'une carte de l'occupation du sol du bassin versant en utilisant la combinaison des données optiques et radar. Cette thèse avait pour premier objectif spécifique de déterminer des classes thématiques de l'occupation du sol importantes pour la modélisation hydrologique. Le second objectif était la classification orientée-objets de l'occupation du sol, adaptée au contexte de la zone d'étude en utilisant des bandes spectrales d'images SPOT-4 HRVIR 2 (résolution de 20 m). Le troisième objectif consistait à l'identification des rizières en s'appuyant sur des données en double polarisation et polarimétriques de RADARSAT-2 en bande C. Le quatrième objectif était d'établir la carte de l'occupation du sol en intégrant les rizières et les cartes des rizières. Le dernier objectif était d'estimer l'impact des rizières sur le régime hydrologique. Ces objectifs ont tous été atteints. Les quatre hypothèses scientifiques qui ont été validées dans cette étude sont: 1) la classification orientée-objets est une approche adéquate pour obtenir une carte de l'occupation du sol de la rivière Càu assez précise pour son utilisation dans un modèle

hydrologique distribué; 2) les images radar double polarisation ou polarimétriques en mode fin de RADARSAT-2 permettent de bien distinguer et de cartographier les rizières; 3) l'utilisation conjointe des résultats de la classification de l'imagerie radar et optique améliore la classification de l'occupation du sol; et 4) l'identification des rizières sur la carte d'occupation du sol améliore les évaluations et prédictions liées au cycle hydrologique. L'hypothèse 1 de l'objectif 1 n'a pas pu être validée parce que l'adaptation du modèle hydrologique pour inclure le comportement hydrologique des tourbières est toujours en cour d'élaboration.

Le premier objectif spécifique a été réalisé en consultant les critères requis en ce qui concerne les données d'entrée du modèle hydrologique HYDROTEL et en évaluant la capacité des données satellites utilisées à fournir ces informations. Six classes thématiques ont été déterminées, soit le Milieu Agricole, le Milieu Urbain, le Milieu Forestier, le Milieu Arbustif, l'Eau et les Rizières. Ces classes représentent les principales catégories d'occupation du sol du bassin versant.

Dans une perspective de cartographie de l'occupation du sol, l'approche de classification orientée-objets montre des résultats convaincants pour la discrimination entre les cinq classes autres que les Rizières présentes sur le site d'étude. Le deuxième objectif a donc été réalisé. La segmentation à deux niveaux et la flexibilité (par l'implantation des expressions spécifiques) de la classification hiérarchique permettent de mieux adapter la classification d'images de moyenne résolution (20 m) à la complexité et à la structure hiérarchique des occupations du bassin versant. La validation des classifications a montré une haute précision globale de la classification, 90 % pour le Niveau G (classification à l'échelle grossière) et 91 % pour le Niveau P (classification à l'échelle détaillée). La carte obtenue montre une bonne qualité tant en matière de précision que du détail à l'échelle régionale.

L'algorithme de classification hiérarchique, en implantant la relation des objets à travers le mode de classification avec caractéristique liée aux classes, a permis de diminuer les confusions causées par les similitudes de valeur spectrale, particulièrement la confusion entre les occupations du sol « Milieu Urbain (faible densité) », « Milieu Agricole » et « Plantations » (lesquelles avaient été regroupées en une seule classe « mixte » lors de la classification d'une image LANDSAT-7 ETM+ acquise en 2003). De plus, la résolution spatiale de 20 m de l'image SPOT-4 a contribué à faciliter la séparation des petits objets.

Le troisième objectif de cette thèse était de détecter les rizières de deux saisons du riz (printemps et traditionnelle) dans le bassin versant en utilisant des données RADARSAT-2 en double polarisation et polarimétriques. Ce travail a été réalisé sur une zone au milieu du bassin

versant de la rivière C u, soit la province de Thai Nguyen. Les acquisitions ont été effectuées par le système RADARSAT-2 (bande C), du 15 mai 2009 au 10 mai 2010 en polarisations HH et HV, et du 17 mai 2009 au 12 mai 2012 en quad-polarisation.

La première partie du travail réalisé dans le cadre de cet objectif était d'appliquer la classification par seuillage sur les images en double polarisation. L'analyse de la signature du riz et d'autres types de végétation sur les polarisations HH et HV a permis de noter que la valeur de rétrodiffusion (σ^0) du riz a une importante gamme dynamique temporelle entre le début et la mi-saison, en polarisation HH et HV, tandis que les autres types de végétation ont une étroite gamme dynamique temporelle, et ce pour les deux polarisations. Il est ressorti également que les classes sont plus faciles   distinguer dans la polarisation HH grâce   la grande amplitude de variation de leur σ^0 dans cette polarisation. De plus, le coefficient σ^0 du riz en polarisation HH est plus sensible au stade de croissance qu'en polarisation HV. Les seuils pour identifier les rizières ont donc été déterminés en se basant sur l'analyse de la variation de σ^0 du riz en polarisation HH, tout le long de sa croissance. Malgré le fort signal du riz en polarisation HH, l'occupation du sol complexe et le décalage du calendrier agricole du bassin versant ne permettent pas une bonne classification avec la méthode de seuillage appliquée sur une seule image. Cependant, l'image du rapport entre la date du début de saison et celle de la mi-saison a été calculée pour les deux saisons rizicoles et a permis d'obtenir un meilleur résultat.

Cette méthode nous permet de détecter 74 % des rizières de la saison traditionnelle du riz et 63 % des rizières de la saison de riz du printemps, en comparant avec des données statistiques de la province de Thai Nguyen. La validation a montré un résultat modéré des classifications, soit une précision globale de 71 % pour la saison traditionnelle et de 67 % pour la saison de riz du printemps. Plusieurs facteurs affectent ces résultats, soit l'échelle des données de référence, le retard par rapport aux usages des pratiques agricoles et la mauvaise qualité de la croissance des plants de riz; ainsi, le signal du riz   la phase végétative n'était pas le même dans l'ensemble du bassin versant.

La deuxième partie du travail réalisé pour le troisième objectif a été consacrée   la polarimétrie radar. Le but était d'évaluer la contribution des données polarimétriques RADARSAT-2   la distinction des rizières d'une région où l'utilisation du sol est complexe. La détection des rizières s' st appuyée sur la classification par le *Support Vector Machine* (SVM), les neuf éléments de la matrice de cohérence (T) ayant été utilisés comme données d'entrée. Pour appliquer la classification SVM, des échantillons de trois classes, soit ceux des classes Rizières, Eau et Autre (non-eau, non-riz) ont été choisis. Les résultats de la classification dans ce cas d'étude

ont montré, tout d'abord, une bonne séparabilité entre les classes, ensuite une bonne précision, soit 82 %, pour la saison traditionnelle du riz, mais une précision modérée, soit 74 %, pour la saison de riz du printemps (par rapport à la carte de référence). Afin de comparer l'efficacité entre les données polarimétriques et les données en monopolarisation de RADARSAT-2, le même processus de classification SVM a été effectué sur la polarisation HH de deux dates à la mi-saison de deux saisons rizicoles. Les échantillons de trois classes étaient alors les mêmes que ceux utilisés lors de la classification SVM dérivée des données polarimétriques. Les résultats obtenus de la classification dérivée de la polarisation HH ont montré que la séparabilité entre les trois classes est plus faible que celle dérivée de la matrice de cohérence (T). Il existe des confusions entre les rizières et les autres occupations du sol (comme par exemple les cultures vivrières). La précision de la classification dérivée de la polarisation HH est donc modérée pour les deux saisons rizicoles, soit 72 % (saison traditionnelle du riz) et 71 % (saison de riz du printemps).

À partir des classifications dérivées des images SPOT-4 et RADARSAT-2 en polarisation HH, l'objectif 4 de la thèse a été réalisé; une carte de l'occupation du sol pour l'ensemble du bassin versant, qui comprend six classes, a été établie. Les rizières extraites d'images du rapport ont permis également de créer un masque de riz afin d'élaborer la carte d'état de croissance des rizières.

Le dernier objectif était l'estimation de l'impact des rizières sur le régime hydrologique; les calculs réalisés ont démontré l'importance de détecter les rizières du bassin versant pour y réaliser des simulations hydrologiques réalistes. Les calculs de la demande en eau pour la culture du riz, durant la saison de riz du printemps dans deux sous-bassins versant utilisés en exemples, ont montré que les besoins en eau des rizières correspondent à une grande proportion du débit total dans les parties amont du bassin versant de la rivière Côm (29,2 %) et du bassin versant de la rivière Câm (23,5 %).

5.2 Conclusion et perspectives

Les limites rencontrées dans les recherches précédentes (Hoang, 2007) lors de la classification de l'occupation du sol dans les milieux d'utilisation du sol complexe au nord du Vietnam, en général, et dans le bassin versant de la rivière Câm, en particulier, ainsi que le besoin des données d'entrée pour le modèle hydrologique HYDROTEL nous ont conduit à élaborer la méthodologie de cette étude.

Dans le contexte général de notre étude, nous avons abordé ce problème sous l'angle de la télédétection, et plus particulièrement sous l'angle de la télédétection en hydrologie. En ce sens, afin d'identifier les besoins, nous avons tout d'abord analysé les concepts, les méthodes et les outils de la télédétection, puis les concepts de la croissance du riz, et enfin le rôle des données de l'occupation du sol dans un modèle hydrologique.

Des solutions d'amélioration ont été proposées. L'évaluation des résultats a montré la capacité de la méthode à cartographier l'occupation du sol et à identifier les rizières dans des zones d'utilisation du sol complexe comme celles du bassin versant de la rivière Càu.

Les images SPOT-4 semblent être un bon choix pour la cartographie de l'occupation du sol à l'échelle régionale. Ces données, issues du capteur HRVIR, sont très sensibles au couvert végétal. À une résolution spatiale de 20 m, les images SPOT-4 permettent de mieux distinguer les zones mixtes par rapport à des images LANDSAT-7 de résolution 30 m.

La classification orientée-objets avec l'algorithme de classification hiérarchique est une méthode efficace pour classifier les zones où l'occupation du sol est morcelée. Elle permet d'implanter plusieurs expressions pour bien définir les objets ainsi que leur relation dans la hiérarchie des classes. De cette façon, on peut bien distinguer les petits objets qui ont une valeur spectrale similaire. Malgré le résultat obtenu, qui est très bon, la méthode a également montré certaines limites d'applicabilité, en particulier dans le cas de petits objets dans les milieux très hétérogènes, ou dans le cas des objets qui ont la même valeur spectrale ou la même texture (p. ex. les cultures vivrières et les jeunes forêts).

Quant à l'identification des rizières, malgré une précision faible (due à plusieurs facteurs tel que présenté au Chapitre 4), la méthode de la classification par seuillage appliquée sur les images du rapport de la polarisation HH s'avère utilisable pour détecter les rizières à l'échelle régionale au nord du Vietnam. Une condition préalable pour que cette méthode soit plus efficace à détecter les rizières dans ces régions est d'avoir une bonne base de données sur le terrain. Cela permettrait d'améliorer l'efficacité des seuils et donc d'améliorer la qualité de la méthode de classification par seuillage. En effet, un inconvénient de cette étude était le nombre limité de données de référence et de données sur le terrain. Dans une future étude, il est fortement recommandé de collecter des informations concernant la croissance des rizières, selon les dates d'acquisition des images SAR, et d'obtenir des données de référence précises. Puisque les parcelles de riz dans ces régions sont petites et que la date du démarrage des cultures dépend de plusieurs facteurs comme, par exemple, les conditions météorologiques ou la

disponibilité du système d'irrigation, un ensemble détaillé de données sur le terrain est très important de même que la sélection des meilleurs échantillons pour la classification par le SVM.

La méthode de classification par le SVM effectuée sur la matrice de cohérence (T) des images polarimétriques RADARSAT-2 en mode fin et sur la polarisation HH en mode standard a montré les perspectives d'application de la classification SVM et des données polarimétriques pour distinguer les rizières dans le bassin versant de la rivière Cáu, malgré qu'il existe toujours un certain degré de confusion entre les rizières et les cultures vivrières. Le processus de la classification par le SVM a montré les limites du logiciel PolSARpro pour le choix des échantillons. Cet outil est difficile à utiliser pour déterminer de bons échantillons quand la zone d'application est grande, comme celle de cette étude. Pourtant, cette étape est très importante pour la classification par le SVM. Cette méthode pourrait être adaptée à d'autres sites au nord du Vietnam en se basant sur la connaissance du type de culture et sur le calendrier agricole. Les résultats de la méthode suscitent de fortes attentes pour l'analyse des milieux agricoles et urbains au nord de ce pays. Ces deux milieux sont hétérogènes et se confondent sur des images optiques de résolution spatiale grossière. Même si la confusion entre ces deux classes est très faible lors de la classification des rizières, il est nécessaire de faire des tests pour confirmer le potentiel des données polarimétriques et de la classification SVM dans les milieux urbanisés au nord du pays.

Malgré tout, les résultats de l'identification des rizières permettent d'élaborer les cartes de l'occupation du sol requises pour les simulations hydrologiques du modèle HYDROTEL et les cartes de la distribution et de l'état de croissance des rizières dans le bassin versant de la rivière Cáu. Une méthode a été donc développée pour cartographier l'occupation du sol et identifier les rizières dans les zones d'utilisation du sol représentative de la complexité et du morcellement au Nord du Vietnam.

Les informations concernant l'occupation du sol, en général, et les rizières, en particulier, sont nécessaires lors des simulations hydrologiques. Il serait intéressant de montrer l'impact des rizières sur le régime hydrologique, mais il a été difficile de tirer des conclusions en raison, notamment, de l'absence de résultats quantitatifs des simulations hydrologiques puisque le « modèle rizière » est toujours en cours d'élaboration et de validation. Des recherches supplémentaires doivent donc être effectuées dans ce sens. Cependant, les résultats du calcul des besoins en eau pour la culture du riz du bassin versant ont montré que la présence des rizières ne peut pas être ignorée si on veut améliorer les évaluations liées au cycle hydrologique au nord Vietnam. Ces résultats nous ont aidé à confirmer, même indirectement, une partie de

l'hypothèse 1 qui n'a pas pu être validée par des simulations hydrologiques, donc une bonne détermination des classes d'occupation du sol améliore le réalisme des simulations.

Au-delà des résultats obtenus, le principal apport de notre étude se situe, selon nous, au niveau de l'originalité de l'approche proposée pour la cartographie de l'occupation du sol et des rizières d'un grand bassin versant qui présente des caractéristiques d'utilisation/occupation du sol morcelée. Cette originalité offre l'avantage d'ouvrir des pistes d'application des images SAR et de la classification SVM pour détecter les rizières dans d'autres sites au Nord Vietnam, un sujet peu abordé en raison de la complexité du paysage. L'approche proposée ouvre également des pistes d'application de l'algorithme de classification hiérarchique pour diminuer les confusions des objets hétérogènes dans les milieux complexes, tels que ceux rencontrés au Vietnam. De plus, notre étude contribue à l'amélioration d'une base de données de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Càu.

RÉFÉRENCES

Agence Spatiale Canadienne (2008).

<http://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/radarsat2/default.asp>. Consultation en 2008.

Amstrong RN & Martz LW (2008) Effects of reduced land cover detail on hydrological model response. *Hydrol. Process*, (22): 2395–2409.

Anderson JR, Hardy EE, Roach JT & Witmer RE (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. USGS, Washington, D.C. 964. 41 p.

Aronoff S (2005) *Remote Sensing for GIS managers*. ESRI Press, California. 487 p.

Aselman I & Crutzen PJ (1989) Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 8, 307-358.

Baatz M & Schäpe A (2000) Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBLJ. et al. (Édit.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag. AGI, 12-23.

Baghdadi N, Bonnifait L, King C & Bourguigon A (2003) Utilisation des images RSS pour un étalonnage empirique du modèle IEM dans un contexte de sols nus limoneux en zones agricoles. *Téledétection*. 3(1): 1-6.

Balenzano A, Mattia F, Satalino G & Davidson M (2011) Dense temporal series of C- and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops. *IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Obser. Remote Sens.* 4(2) : 439-450.

Banque Mondiale et Danish International Development Assistance (DANIDA) (2003) Rapport annuel : Vietnam Environment Monitor 2003, Water. Hanoi, 74 p.

Barnaud G & Fustec E (2007) *Conserver les milieux humides: Pourquoi? Comment?* Educagri Éditions, France. 295 p.

Barrs HD & Prathapar SA (1996) Use of satellite remote sensing to estimate summer crop areas in the Coleambally Irrigation Area, NSW. CSIRO, Division of Water Resources Consultancy Report 96/17, 35 p.

Benz UC, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I & Heynen M (2003) Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 58(2004): 239– 258.

Blaschke T & Strobl J (2001). What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GeoBIT/GIS*, 6: 2-17.

Blaschke T (2005) Towards a framework for change detection based on image objects. Remote sensing and GIS for Environment Studies. *Göttinger Geographische Abhandlungen*. 113: 1-9.

Blaschke T, Conradi M & Lang S (2001) Multi-scale image analysis for ecological monitoring of heterogeneous, small structured landscapes. *Proceedings of SPIE 2001*, (Toulouse, le 17 septembre 2001). SPIE, 35-44.

Bezdek JC, Ehrlich R & Full W (1984) FCM: the fuzzy c-means clustering algorithm, *Comput. Geosci.* 10:191-203.

Boerner WM, Mott H, Lüneburg E, Livingstone C, Brisco B, Brown RJ & Paterson S (1998) Polarimetry in Radar Remote Sensing : Basis and applied concepts. Principles and applications of image radar. *Manual of Remote Sensing*. 3rd ed., Vol.2. Henderson FM & Lewis A (Édit.) American Society for Photogram. Remote Sens. p 271:357.

Boser BE, Guyon I & Vapnik V (1992) A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory 1992*. ACM Press, 144-152. Doi:10.1145/130385.130401.

Bouman BAM, Lampayan RM & Tuong TP (2007). *Water Management in Irrigated Rice: Coping with Water Scarcity*. IRRI, Philippines. 54 p.

Bouvet A (2009) Télédétection radar appliqué au suivi des rizières. Méthodes utilisant le rapport des intensités de rétrodiffusion. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. France. 186 p.

Bouvet A, LeToan T & Lam-Dao N (2009) Monitoring of rice cropping system in Mekong Delta using ENVISAT/ASAR dual polarization data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47(2): 517-526.

Bruniquel J & Lopes A (1997) Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery. *Int. J. Remote Sens.* 18(3): 603-627.

Buckley JR (2008) Polarimetric classification of vegetation in prairie landscapes. *Proceedings of IGARSS 2008*, (Boston, Massachusetts, le 6 -11 July 2008). IGARSS08, 704-707.

Burnett C & Thomas Blaschke T (2003) A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. *Ecol. Modell.* 168 (2003) 233-249.

Caloz R & Collet C (2001) *Précis de Télédétection Vol. 3. Traitement numériques d'image de télédétection*. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy. 386 p.

Castella JC & Dang DQ (2002) *Doi Moi* in the mountains. Land use changes and farmers' livelihood strategies in Bac Kan Province, Viet Nam. Agricultural Publish House. 283 p.

CCT - Centre Canadien de Télédétection (2008) Tutoriels. Notions fondamentales de télédétection. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/polarim/chapter1/06_f.php. (Visité le 15 septembre 2008).

Centre National d'Études Spatiales (CNES). <http://spot4.cnes.fr>. (Visité en 2009).

Centre de recherches pour le développement international (CRDI), http://www.idrc.ca/fr/ev-5530-201-1-DO_TOPIC.html. (Visité le 21 août 2009).

Chapelle O, Haffner P & Vapnik VN (1999) Support vector machines for histogram-based Image classification. *IEEE Trans. Neural Networks*. 10(5): 1055-1064.

Chen J & Lin H (2005) The application of ENVISAT ASAR data for rice growth monitoring based on semi-empirical backscattering model. *Proceedings online of the Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*.

<http://www.aars-acrs.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/SSR-3.pdf>. Consultation le 01 septembre 2009.

Chen EX, Li ZY, Tan BX, Pang Y, Tian X & Li BB (2007) Supervised Wishart classifier for rice mapping using multi-temporal ENVISAT ASAR APS data. *Proceedings Envisat Symposium 2007*, (Montreux, Switzerland, le 23-27 avril 2007).

Chen M, Su W, Li L, Zhang C, Yue A & Li H (2009) Comparison of Pixel based and Object-oriented Knowledge-based Classification Methods Using SPOT5 Imagery. *WSEAS Trans. Inf. Sci. App.* 3(6): 477-489.

Clavet D, Toutin T & Kharbouche S (2011) Radarsat-2: une nouvelle source pour l'acquisition de données topographiques dans l'Arctique Canadien sans contrôle terrain. *Can. J. Remote Sens.* 37(5): 529-534.

Cloude SR & Pottier E (1997) An entropy based classification scheme for land applications of polarimetrics SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35(1): 68-78.

Congalton RG & Green K (2009) *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and Practices*. 2^e ed. CRC Press. 200 p.

Cortes C & Vapnik V (1995) Support-vector network. *Machine Learning*. 20:273-297.

Davidson G, Ouchi K, Saito G, Ishitsuka N, Mohri K & Uratsuka S (2002) Performance evaluation of maximum likelihood SAR segmentation for multi-temporal rice crop mapping". *IEE Conference RADAR 2002*, (Edinburgh, Royaume-Uni, le 15-17 October 2002). 490: 390-394.

Definiens Imaging (2004) *eCognition Professional. User Guide 4.0*. Germany. 486 p.

Definiens (2006) *Definiens Professional 5. Reference book*. Definiens AG. Germany. 122 p.

Desclée B, Bogaert P & Defourny P (2006) Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sens. Environ.* 102(1-2): 1-11.

Dissanka M, Bernier M & Payette S (2009) Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Can. J. Remote Sens.* 35(2): 189-215.

Doan DT, Tran VĐ, Tran VD (2011) Nhu cầu nước, chế độ tưới thích hợp cho lúa được canh tác theo phương pháp truyền thống và cải tiến ở vùng đồng bằng Bắc Bộ. *J. Water Resour. Sci. Technol. Vietnam Acad. Water Resour.* (2): 47-53.

Dunn JC (1974) A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact, well separated clusters. *J. Cybern.* 3(3): 32-57.

Dribault Y (2012) *Caractérisation de la dynamique saisonnière de l'hydrologie des tourbières minérotrophes du Moyen-Nord Québécois, à l'aide de l'imagerie satellitaire multispectrale à très haute résolution spatiale*. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec). 104 p.

Fang H, Wu B, Liu H & Huang X (1998) Using NOAA AVHRR and Landsat TM to estimate rice area year-by-year. *Int. J. Remote Sens.* 19(3): 521-525.

FAO/UNEP (1999) Land Cover Classification System. <http://www.fao.org/nr/land/use/en/>

FAOSTAT (2012). <http://faostat.fao.org>. Consultation le 03 octobre 2012.

Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E & Boerner WM (2001) Multi-baseline polarimetric SAR data classification using the complex Wishart distribution and principal component analysis. *IEEE 2001 Int. Geosci. Remote Sens. Sym.* 6: 2712 -2714.

Fortin JP, Turcotte R, Massicotte S, Moussa R, Fitzback J & Villeneuve JP (2001 a) Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *J. Hydrol. Eng.* 6(2): 91-99.

Fortin JP, Duchesne S, Bernier M, Hoang KH, Villeneuve JP (2007) HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant générer des informations spatialisées détaillées très utiles pour la gestion de bassins versants de tailles diverses. *Actes des Journées Scientifiques Inter-Réseaux AUF* (Hanoi, 6-9 novembre 2007).

Fortin JP, Moussa R, Bocquillon C & Villeneuve JP (1995). Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Rev Sci Eau.* 8(1): 97-124.

Fortin JP & Bernier M (1991) Processing of remotely sensed data to derive useful input data for the HYDROTEL hydrological model. *IEEE Proceedings of IGARSS 1991* (Espoo, Finland, 3 - 6 June 1991). 1: 63:65.

Freeman A (1992) SAR calibration : an overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 30(6): 1107-1121.

Gamany R, Maeyer P. De & Dapper M. De (2009) Object-oriented change detection for the city of Harare, Zimbabwe. *Expert Systems with Application.* 36: 571-588.

Getachew HE & Melesse AM (2012) The Impact of Land Use Change on the Hydrology of the Angereb Watershed, Ethiopia. *Int. J. Water Sci.* (1): 1-7.

Gualtieri JA & Crompton RF (1998) Support vector machines for hyperspectral remote sensing classification. *Proceedings of the 27th AIPR Workshop: Advances in Computer Assisted Recognition* (Washington, DC, 27 October). SPIE, Washington, DC, 221-232.

Hall O & Hay GJA (2003) Multiscale object-specific approach to digital change detection. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 4(4): 311-327.

Henderson FM & Lewis J (Édit.) (1998) *Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing.* 3^e éd. Vol.2. John Wiley and Sons, Inc. 866 p.

Hoang KH (2007) *Les changements de l'occupation du sol et ses impacts sur les eaux de surface du bassin versant le cas du bassin versant de la rivière Cáu (Viêt-nam)*. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau (Université du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec). 111 p.

Hoang KH, Bernier M & Villeneuve JP (2008) Les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Cáu (Viêt-Nam). Essai sur une approche diachronique. *Rev Télédétection*. 8(4) : 227-236.

Hoang KH, Bernier M, Duchesne S & Tran M.Y (2011) Identification of rice fields in a complex land-use region using RADARSAT-2 data. *Proceedings of 3th International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, (Seoul, 26-30 September 2011). IEEE Xplore, 1-4.

Hofmann P (2001) Detecting urban features from IKONOS data using an object-oriented approach. *Proceedings of the RSPS 2001 Algorithms*, (London, 12-14 September 2001). RSPS, 79-91.

Hofmann, P. (2001) Detecting informal settlements from IKONOS data using methods of object oriented image analysis – an example from Cape Town (South Africa). In: *Jürgens, C. (Editor): Remote Sensing of Urban Areas / Fernerkundung in urbanen Räumen (Regensburger Geographische Schriften, Heft 35)*. Regensburg, 107-118.

Homdee T, Pongput K & Kanae S (2011) Impacts of land cover changes on hydrological. *J. Hydraul. Eng.* (55): 31-37.

Huang C, Davis LS & Townshend JRG (2002) An assessment of support vector machines for land cover classification. *Int. J. Remote Sens.* 22(4): 725-749.

Huang C, Song K, Kim S, Townshend JRG, Davis P, Masek JG & Goward SN (2008a) Use of a dark object concept and support vector machines to automate forest cover change analysis. *Remote Sens. Environ.* 112(3): 970-985.

Huke RE (1982) *Rice Area by Type of Culture : South, Southeast and East Asia a revised and updated data base*. Manila IRRI. 32p.

INRS, 2010. Description du projet. <http://www.rivierecau.org/project>, 2010.

IRRI - International Rice Research Institute/Institut International de Recherche sur le Riz (2009). <http://www.knowledgebank.irri.org/>. Consultation en 2009.

IRRI - International Rice Research Institute/Institut International de Recherche sur le Riz (2010). http://ricestat.irri.org/vis/wrs_quickCharts.php. Consultation le 09 février 2012.

ISG - International Support Group. Ministry of Agriculture and Rural Development (MARD). Decision No.661/QDTTg.

<http://www.isgmard.org.vn/InformationService/LegalDocs/Forestry/decision20661-e.pdf>.

Consultation en 2010.

JAV (Journal d'Agriculture du Vietnam) (2010) Thai Nguyen: Gạn nước cấy lúa, thấp đền bắt sâu. <http://nongnghiep.vn/nongnghiepv/vi-vn/25/45905/Khuyen-nong/Thai-Nguyen-Gan-nuoc-cay-lua-thap-den-bat-sau.html>.

Jensen JR (2005) *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. 3^e ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 526 p.

Jensen, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 318 p.

Juan X, Li Z, Lei L, Tian B & Shan Z (2012) Land cover classification of polarimetric SAR image for the yellow river delta based on Support Vector Machine. *International Conference on Computer Vision in Remote Sensing*, (Xiamen, China, le 16-18 déc 2012). 256-261.

Kavzoglu T & Colkesen I (2009) A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 11(2009): 352-359.

Kawamura M, Jayamamana S & Tsujiko Y (1997) Comparison of urbanization and environmental condition in Asian cities using satellite remote sensing data. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ps1/ps2008.shtml>. Consultation le 11 janvier 2007.

Keramitsoglou I, Sarimveis H, Kiranoudis CT, Kontoes C, Sifakis N & Fitoka E (2006) The performance of pixel window algorithms in the classification of habitats using VHSR imagery. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 60(4): 225-238.

Kuemmerle T, Chaskovskyy TKO, Knorn J, Radeloff VC, Kruhlov I, Keeton WS & Hostert P (2009) Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sens. Environ.* 113(6): 1194-1207.

Kurosu T, Fujita M & Chiba K (1995) Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33(4): 1092-1096.

Kux HJH & Araujo EHG (2006) Multi-temporal object-oriented classifications and analysis of Quickbird scenes at a metropolitan area in Brazil (Belo Horizonte, Minas Gerais State). *Proceedings of OBIA2006*. ISPRS, 36, 4/C42, ISSN 1682-1777. Austria. www.commission4.isprs.org

Lam-Dao N, Apan A, Young FR, Le-Van T, LeToan T & Bouvet A (2007) Rice monitoring using ENVISAT ASAR data: Preliminary results of a case study in the Mekong River Delta, Vietnam. *Proceedings online of the Asian Conf. Remote Sens.*, (Kuala Lumpur, le 12-16 novembre 2007). <http://www.aars-acrs.org/acrs/proceeding/ACRS2007/Papers/TS1.3.pdf>. Consultation le 11 août 2009.

Lam-Dao N, LeToan T & Floury N (2005) The Use of SAR Data for rice crop monitoring A case study of Mekong river delta - Vietnam. *Proceedings online of the Asian Conf. Remote Sens.* (Hanoi, le 7-11 novembre 2005). <http://www.aars-acrs.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/AGC1-4.pdf>. Consultation le 11 fév. 2009.

Lee JS (1981) Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Comput. Graphics and Image Proc.* 17(1981): 24-32.

- Lee JS (1980) Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. PAMI-2(2): 165-168.
- Lee JS, Grunes MR, Mango SA (1991) Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 29(4): 535-544.
- Lardeux C, Frison PL, Tison C, Souyris JC, Stoll B, Fruneau B & Rudant JP (2009) Support vector machine for multifrequency SAR polarimetric data classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47(12): 4143-4152.
- Lardeux C, Frison PL, Rudant JP, Souyris JC, Tison C & Stoll B (2006) Classification of fully polarimetric SAR data for land use cartography. *Proceedings of ISPRS Symposium "From Sensors to Imagery"*. (May 4-6, 2006 Paris, France). 34 (1).
- Lee JS., Jurkevich I, Dewaele P, Wambacq P & Oosterlinck A (1994) Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A review. *Remote Sens. Rev.* 8: 313-340.
- Lee JS, Grunes MR, Ainsworth TL, Du LJ, Schuler DL & Cloude SR (1999) Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the Complex Wishart Classifier. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37(5): 2249-2258.
- Lee JS & Pottier E (2009) *Polarimetric Radar Imaging: From basics to applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group, NW, USA. 398 p.
- Leff B, Ramankutty N & Foley JA (2004) Geographic distribution of major crops across the world. *Glob. Biogeochem. Cycles.* 18(1). GB1009, doi:10.1029/2003GB002108.
- LeToan T, Laur H, Mougin E & Lopes A (1989) Multitemporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-bands SAR images. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.* 27(6): 709-718.
- LeToan T, Ribbes F, Wang LF, Floury N, Ding KH, Kong JA, Fujita M & Korosu T (1997) Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35(1): 41-52.
- Lewinski S & Zaremski K (2004) Examples of object-oriented classification performed on high-resolution satellite images. *Miscellanea Geographica.* 11: 349-358.
- Li B, Yang S, LeToan T, Tan B & He W (2008) Rice mapping and monitoring using ENVISAT ASAR data. *Proceedings Dragon 1 Programme Final Results 2004-2007*, (Beijing, P.R. China, le 21-15 avril 2008).
- Li K, Brisco B, Shao Y & Touzi R (2012) Polarimetric decomposition with RADARSAT-2 for rice mapping and monitoring. *Can. J. Remote Sens.* 38(2): 169-179.
- Li Y, Liao Q, Li X, Liao S, Chi G & Peng A (2003) Towards an operational system for regional-scale rice yield estimation using a time-series of Radasat ScanSAR images. *Int. J. Remote Sens.* 24(21): 4207-4220.

Liew SC, Kam SP, Tuong TP, Chen P, Vo QM & Lim H (1998) Application of multitemporal ERS-2 Synthetic Aperture Radar in delineating rice cropping systems in the Mekong River Delta, Vietnam. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36(5): 1412-1420.

Lillesand TM, Keifer RW, Cipman JW (2004) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 5^e ed. New Jersey, John Wiley & Sons. 645 p.

Lopez-Sanchez JM, Ballester-Berman JD & Hajnsek I (2011) First results of rice monitoring practices in Spain by means of time series of TerraSAR-X dual-pol images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 4(2): 412-422.

Lu D, Mausel P, Brondizio E & Moran E (2004) Change detection techniques. *Int. J. Remote Sens.* 25(12): 2365-2407.

Luscombe AP (2004) RADARSAT-2 SAR image quality and calibration operations». *Can. J. Remote Sens.* 30(3): 345-354.

Maclean JL, Dawe DC, Hardy B & Hettel GP (2002) *Rice Almanac*. International Rice Research Institute (IRRI). CABI (Commonwealth Agricultural Bureaux International.) Publishing. 270 p.

Mansor S, Hong WT & Shariff ARM (2002) Object oriented classification for land cover mapping. www.gisdevelopment.net. Consultation le 09 septembre 2008.

Martin RDJ & Heilman JL (1986) Spectral reflectance patterns of flooded rice. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 52: 1885-1890.

Mas JF (2000) Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *J. Can. Télédétection*. 26(4): 349-362.

Mathieu-Dupas E (2010) Algorithme des K plus proches voisins pondérés (WKNN) et Application en diagnostic. *Comptes Rendus de 42^{ème} Journées de Statistique*, (Marseille, France, 2010).178 p.

Matthews E, Fung I & Lerner J (1991) Methane emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions. *Global Biogeochemical Cycles*. (5): 3-24.

McCloy KR, Smith FR & Robinson MR (1987) Monitoring rice areas using LANDSAT MSS data. *Int. J. Remote Sens.* 8(5): 741-749.

McNairn H & Brisco B (2004) The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. *Can. J. Remote Sens.* 30(3): 525-542.

McNairn H, Van Der Sanden JJ, Brown RJ & Ellis J (2000) The potential of RADARSAT-2 for crop mapping and assessing crop condition. *International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake*, (Buena Vista, Florida le 10-12 January 2000).

MDA (2013) *Radarsat-2 product description*. McDonald, Dettwiler and Associates. Canada. 84 p.

Mermoz S (2010) Contribution de la polarimétrie radar pour l'analyse de la glace de rivière. Thèse de doctorat en Sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec). 473 p.

Mermoz S, Dribault Y, Bernier M, Allain S, Pottier S & Gauthier Y (2009) Investigation of Radarsat-2 and Terrasar-X data for river ice characterization from remote sensing. *15th Workshop on River Ice*, (St. John's, Newfoundland and Labrador, le 15-17 juin 2009). CRIPE, 390-400.

Molle F & Chu TH (2009) *Implementing integrated river basin management: Lessons from the Red River Basin, Vietnam*. International Water Management Institute, Sri Lanka, 26 p.

Motohka T, Nasahara KN, Miyata A, Mano M & Tsuchida S (2009) Evaluation of optical satellite remote sensing for rice paddy phenology in monsoon Asia using a continuous in situ dataset. *Int. J. Remote Sens.* 30(17) : 4343-4357.

NRC Natural Resources Canada (2013) Land Cover and Land Use. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9373>

Nguyen HT (2012) *Apport de la modélisation hydrologique distribuée à la gestion intégrée par bassin versant des ressources en eau*. Thèse de doctorat en Sciences de l'eau. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec). 184 p.

Nguyen ND (2008) Note de cours, Le riz. Mekong *Institut de la Recherche et Développement du Delta Mekong. Faculté des ressources cultivées*. Université Càn Tho, Càn Tho, Vietnam.

Nguyen VP, Le VS, Tran TX, Tran T, Tran BN, Doan TH & T.T.H. Nguyen (2001) Part Vietnam. *Catalogue of rivers for Southeast Asia and the Pacific*. 4: 312-326.

Nguyen XD, Pham VC, Bruneau M, LeToan T, Maire G, Platel N & Usselman 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. *Télédétection de l'environnement - dans l'espace francophone*. Bonn F (dir.). Presse de l'Université du Québec, Québec, 532 p.

OGS - Office Général de la Statistique (2007). <http://www.gso.gov.vn>. Consultation le 06 août 2009 et le 06 janvier 2013.

OGS - Office Général de la Statistique (2009). <http://www.gso.gov.vn>. Consultation le 15 décembre 2010.

OGS - Office Général de la Statistique (2011) Système des indicateurs statistiques du district. <http://www.gso.gov.vn/default.aspx?tabid=452&idmid=7>. Consultation en 2013.

Oh Y, Hong SY, Kim Y, Hong JY & Kim YH (2009) Polarimetric backscattering coefficients of flooded rice fields at L- and C-bands: Measurements, Modeling, and data analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47(8): 2714-2721.

Okamoto K & Fukuhara M (1996) Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM. *Int. J. Remote Sens.* 17(9): 1735-1749.

Okamoto K & Kawashima H (1999) Estimation of rice-planted area in the tropical zone using a combination of optical and microwave satellite sensor data. *Int. J. Remote Sens.* 20(5): 1045-1048.

Olson JS (1992) World Ecosystems (WE1.4): Digital Raster Data on a 10- minute geographic 1080_2160 grid. In Kineman JJ & Ochrensall MA (Eds.), *In Global Ecosystems Database version 1.0: Disc A, Documentation manual*. US. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.

Panigrahy S, Manjunath KR, Chakraborty M, Kundu MN & Parihar JS (1999) Evaluation of RADARSAT Standard Beam data for identification of potato and rice crops in India. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54(4): 254-262.

PCI Geomatics (2005) *Geomatica 10. Ortho Engine - User guide*. Canada. 172 p.

Pham TN (2013a) *Modélisation de l'érosion et du transport sédimentaire sur les bassins versants soumis à un régime de mousson dans un contexte de gestion intégrée des ressources en eau*. Thèse. (Université du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec). 278 p.

Pham TTH (2013b) *Choix des meilleures interventions pour l'amélioration de la qualité de l'eau à l'aide d'un outil informatique de gestion intégrée: cas du bassin versant de la rivière Cau au Vietnam*. Thèse. (Université du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec). 260 p.

Pham VC, Tran QC, Le XT, Nguyen VP, Tran TV, Le TH, Gairns J, Jones K & Huley J (2003) Rice mapping by SAR in the service of land resources exploitation in Mekong Delta. *Regional Conference Digital GMS*, (Bangkok le 26-28 février 2003).

Plaza A, Benediktsson JA, Boardman JW, Brazile J, Bruzzone L, Camps-Valls G, Chanussot J, Fauvel M, Gamba P, Gualtieri A, Marconcini M, Tiltoni JC & Trianni G, (2009) Recent advances in techniques for hyperspectral image processing. *Remote Sens. Environ.* 113: 110-122.

Pohl C & Van Genderen JL (1998) Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and application. *Int. J. Remote Sens.*, 19(5): 823-854.

Rabaute T, LeToan T & Ribbes F (1998) Use of RADARSAT data for rice monitoring in Indonesia. ADRO Final Symposium, (Montréal, Canada, le 13-15 Octobre 1998).

Rahman Md. R & Saha SK (2008) Multi-resolution Segmentation for Object-based Classification and Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification using Remotely Sensed Data. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 36:189-201.

Ribbes F & LeToan T (1999) Rice field mapping and monitoring with Radarsat data. *Int. J. Remote Sens.* 20(4): 745-765.

Riggan ND & Weih RC (2009) A Comparison of Pixel-based versus Object-based Land Use/Land Cover Classification Methodologies. *J. Arkansas Acad. Sci.* 63: 145-152.

Robertson DL & King DJ (2011). Comparison of pixel-and object-based classification in land cover change mapping. *Int. J. Remote Sens.*, 32(6): 1505-1529.

Ross S, Brisco B, Brown RJ, Yun S & Staples GC (1998) Paddy rice monitoring with RADARSAT-1. *Proceedings of 19th Asian Conference on Remote Sensing*, (Manila, le 16-20 novembre 1998). <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1998/ts1/ts1004.shtml>.

Rousseau AN, Mailhot A, Turcotte R, Duchemin M, Blanchette C, Roux M, Etong N, Dupont J & Villeneuve JP (2000) GIBSI - An integrated modelling system prototype for river basin management. *Hydrobiologia*. 422/423: 465-475.

Schiewe J, Tuffe L & Ehlers M (2001) Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *GIS*. 6: 34-39

Shao Y, Fan X, Liu H, Ross S, Brisco B, Brown R & Staples G (2001) Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT. *Remote Sens. Environ.* 76 : 310-325.

Shiu YS, Chiang SH, Chu TH & Chang KT (2010) Mapping Paddy Rice Agriculture using Multi-temporal FORMOSAT-2 Images. *World Academy of Science, Eng. and Technol.* 43: 621-627.

Shiu YS, Chu TH, Lin ML & Huang CH (2012). Mapping paddy rice agriculture in a highly fragmented area using a geographic information system object-based post classification process. *J. Appl. Remote Sens.* 6(1): 1-16.

Silva WF, Rudorff BFT, Formaggio AR & Paradella W (2009) Discrimination of agricultural crops in a tropical semi-arid region of Brazil based on L-band polarimetric airborne SAR data. *J. Photogramm. Remote Sens.* 64: 458-463.

SPOT image (2005) Niveaux de prétraitement et précision de localisation. Les fiches techniques. www.spotimage.com. Consultation le 19 septembre 2008.

Staples GC, Rossignol S, Nazarenko D, Elms G, Wang C, Guo H, Brown R & Brisco B (1994) Rice Crop Monitoring Using RADARSAT simulated SAR Imagery. *Proceedings of 15th Asian Conference on Remote Sensing 1994*, (Bangalore, India, le 17- 23 novembre 1994). <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1994/ts1/ts1001pf.htm>.

Staples GC & Hurley J (1996) Rice Crop Monitoring in Zhaoqing, China using RADARSAT SAR. Initial Results. *Proceedings of 17th Asian Conference on Remote Sensing*, (Sri Lanka, le 04 - 08 novembre 1996). <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1996/ts1/ts1001.asp>

Syed S, Dare P & S Jones (2005) Automatic classification of land cover features with high resolution imagery and LIDAR data: an objectoriented approach. *Proceedings of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The National Biennial Conf. Spatial Sci. Inst.*, Melbourne, Australia, 512- 522.

Tadjudin S & Langrebe D (1998) *Classification of high dimensional data with limited training sample*. ECE Technical Report. Purdue University West Lafayette, Indiana. 123p.

Tan CP, Koay JY, Lim KS, Ewe HT & Chuah HT (2007) Classification of multi-temporal SAR images for rice crops using combined entropy decomposition and support vector machine technique. *Progress In Electromagnetic Research, PIER*. 71: 19-39.

Thai Nguyen. (OADR) Office de l'Agriculture et du Développement Rural (2007) Annuaire statistique. Office de statistique de la province de Thai Nguyen.

Thenkabail PS, Ward AD, Lyon JG & Merry CJ (1994b) Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 60: 437-442.

Trimble, 2011. eCognition Developer 8.7. Reference Book. München, Germany.

Torbick N, Salas WA, Hagen S & Xiao X (2011) Monitoring rice agriculture in the Sacramento Valley, USA with multitemporal PALSAR and MODIS imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 4(2): 451-457.

Toutin T & Chénier R (2009) 3-D Radargrammetric Modeling of RADARSAT-2 Ultrafine Mode: Preliminary results of the reometric calibration. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 6(3): 611-615.

Toutin T (2004) Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *Int. J. Remote Sens.* 25(10): 1893-1924.

Toutin T (1995) Generating DEM from stereo images with a photogrammetric approach: examples with VIR and SAR data. *EARSel J. Adv. Remote Sens.* 4(2): 110-117.

Toutin T (1992) An integrated method to rectify airborne radar imagery using DEM. *Photogramm. Remote Sens.* 58(4): 417-422.

Touzi R, Boerner WM, Lee JS & Luenegurg E (2004) A review of polarimetry in the context of SAR concept and information extraction. *Can. J. Remote Sens.* 30(3): 380-407.

Touzi R (2002) A Review of Speckle Filtering in the Context of Estimation Theory. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40(11): 2392-2404.

Turcotte R, Rousseau AN, Fortin JP & Villeneuve JP (2003) Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure. In: Duan Q, Sorooshian S, Gupta H, Rousseau AN, & Turcotte R « Advances in Calibration of Watershed Models ». *Water Science and Application* 6. American Geophysical Union. 153-163.

Ulaby FT, Sarabandi K, McDonald KC, Whitt M & Dobson MC (1990) Michigan microwave canopy scattering model (MIMICS). *Int. J. Remote Sens.* 11:1223-1253.

Van Der Sanden JJ (2004) Anticipated applications potential of Radarsat-2 data. *Can. J. Remote Sens.* 30(3): 369-379.

Van Niel GT & McVicar TR (2001) *Remote sensing of rice-based irrigated agriculture: A Review*. Technical Report P1105-01/01. Rice CRC (Cooperative Research Centre), Australie. 52p. www.ricecrc.org. Consultation le 22 avril 2009.

Vapnik V (2000) *The Nature of statistical learning theory*. 2^e ed. Springer-Verlag, New York, NY 2000. 314 p.

Vapnik NV (1999) An Overview of Statistical Learning Theory. *IEEE Trans. Neural Networks.* 10(5): 988-999.

Vasile G (2007) *Imagerie radar à Synthèse d'Ouverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins*. Thèse de doctorat (Université de Savoie, France). 230 p.

Vasile G, Trouvé E, Lee JS & Buzuloiu V (2006) Intensity Driven Adaptive Neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44(6): 1609-1621.

Vasile G, Trouvé E, Ciuc M, Bolon P & Buzuloiu V (2005) Intensity-Driven Adaptive – Neighborhood technique for POLSAR parameters estimation. *Proceeding Geosci. Remote Sens. Sym.*, (Seoul, Korea). VIII: 5509-5512.

Vietnam. ASTV - Académie des sciences et des technologies et (MST) Ministère des sciences et technologies (2003) *Environnement du bassin versant de la rivière Cáu*. Hanoi, 422 p.

Vietnam. ASTV - Académie des Sciences et des Technologies. Centre de Télédétection et Géomatique-VTGeo (2005) *L'application de Télédétection et SIG en planification du développement d'économie-sociale. Le cas de la ville Hanoi*. Hanoi, 79 p.

Vietnam. APEV - Agence de Protection de l'Environnement du Viêt-nam (2005) *Rapport de l'état de l'environnement du bassin versant Cáu*. 23 p.
http://www.nea.gov.vn/Sukien_Noibat/Luuvuc_Song/songCau/SOE_SCau.pdf. Consultation le 9 avril 2007.

Vietnam. CNGVB-Comité National des Grands Barrages et du développement des ressources en eau du Vietnam (2011) Hồ Núi Cốc, Thái Nguyên (Lac Núi Cốc, Thai Nguyen).
<http://www.vncold.vn/Web/Content.aspx?distid=516>

Vietnam. MADR - Ministère de l'Agriculture et du développement rural. Institut de la plantation de ressources en eau - IWARP (2003). *Rapport hydraulique agricole*. Hanoi, 111 p.

Vietnam. MRE - Ministère de Ressources et Environnement (2005). Rapport annuel de l'état de l'environnement du pays, Partie générale. Hanoi, 94 p.

Vietnam. MRE - Ministère de Ressources et Environnement (2006) *L'état de l'environnement de l'eau du bassin versant de la rivière Cáu, Nhue-Day et du système de la rivière Dong Nai*. Rapport annuel de l'état de l'environnement du pays. Hanoi, 92 p.

Vietnam. MOSTE - Ministry of Science, Technology and Environment (2000). *National Strategy for Environmental Protection until 2010 and vision 2020*. Ministry of Science, Technology and Environment of Vietnam, Hanoi. 36 p.

Vietnam. VTGeo Centre de Télédétection et Géomatique (2004a) *Recherche la relation entre l'utilisation des terres et les éléments géomorphologie. Le cas du district Soc Son - la banlieue de Hanoi*. Académie des sciences et des technologies du Vietnam - Institut de Géologie, Hanoi, 31 p.

Vietnam. VTGeo Centre de Télédétection et Géomatique (2004b) *Landcover mapping of Tam Dao National Park from satellite images*. Institut de Géologie, Hanoi, 87 p.

Walter V (2004) Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 58(3-4): 225-238.

Weih RC & Riggan ND (2010) Object-based classification vs. pixel-based classification : Comparative importance of multi-resolution imagery. *Proceedings of Geographic Object-Based Image Analysis 2010*. (Ghent, Belgium, 29 June - 2 July, 2010), ISPRS (38-4):1-6.

Whiteside T & Ahmad W (2005) A comparison of object-oriented and pixel-based classification methods for mapping land cover in northern Australia. *Proceedings of Spatial Sciences Institute*, (Melbourne, September 2005). Spatial Sciences Institute, 1225 - 1231.

Willhauck G, Schneider T, De Kok R & Ammer U (2000) Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos. *In: ISPRS*, 33. (Amsterdam, 2000).

Wilson MF & Henderson-Sellers A (1992) A global archive of land cover and soils data for use in general circulation models. *In: Kineman JJ & Ochsenschall MA (Eds.), Global Ecosystems Database version 1.0: Disc A, Documentation Manual*. US. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.

Wu MC & Chen KS (2007) Fusion of SPOT and SAR Images for land cover classification. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 12(1): 59-72.

Wu RS, Sue WR & Chang JS (1997) A simulation model for investigating the effects of rice paddy fields on runoff system. *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation*, (Hobart, Australia 8 - 11 December 1997). University of Tasmania, 422-427.

Xiao X, Boles S, Liu J, Zhuang D, Froking S, Li C, Babu JY, Salas W & Moore B (2006) Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.* 100: 95-113.

Xiao X, Boles S, Liu J, Zhuang D, Froking S, Li C, Salas W & Moore B (2005) Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.* 95: 480-492.

Xu W, Zhang G & Huang J (2008) An object-oriented approach of extracting special land use classification by using quick bird image. *Proceedings of IGASS 2008*, (Boston, Massachusetts, le 7-11 Juillet). IGASS08, 727-730.

Xie Y, Sha Z & Yu M (2008) Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review. *J. Plant Ecol.* 3(1): 9-23.

Yan G, Mas JF, MAATHUIS BHP, ZHANG X & VAN DIJ PM (2006) Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches—a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. *Int. J. Remote Sens.* 27(18): 4039–4055.

Zadeh L.A (1965) Fuzzy sets. *Inf. Control.* 8(3):338-353.

Zhang J (2010) Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *Int. J. Image and Data Fusion.* 1(1): 5-24.

Zhang L, Zou B, Zhang J & Zhang Y (2010) Classification of Polarimetric SAR Image Based on Support Vector Machine Using Multiple-Component Scattering Model and Texture Features. *J. Adv. in Signal Process.* 2010: 1-9.

Zhu G & Blumberg DG (2002) Classification using ASTER data and SVM algorithms. The case study of Beer Sheva, Israel. *Remote Sens. Environ.* 80(2): 233-240.

ANNEXE I FICHES DE TERRAIN

Cette annexe présente les fiches de terrain collectées durant les campagnes de terrain en 2007, 2009-2010 et en 2012. La première campagne de terrain a été effectuée à la province de Thai Nguyen en décembre 2007, soit pendant la période d'acquisition des images SPOT-4. Les deux autres campagnes de terrain ont été effectuées sur des périodes plus longues, soit de décembre 2009 à février 2010 et ensuite de février 2012 à juin 2012.

1. Campagne de terrain de 2007 et 2009-2010

Tableau A1.1 : Résumé des informations des 25 points d'observation à Thai Nguyen

| No du point | Coordonnées X | Coordonnées Y | Information résumée au point d'observation | Lieu |
|-------------|---------------|---------------|---|---------------------------|
| 1 | 586457 | 2388649 | La rivière Cáu, zones résidentielles, plantations (bambou, eucalyptus), | Pont Gia Bay, Dong Hy |
| 2 | 586695 | 2389080 | Les jardins familiaux (tomates, choux), les cultures vivrières (maïs) et les arbustes alternent les zones résidentielles. | Dong Tam, Dong Hy |
| 3 | 588117 | 2399777 | Arbustes, plantations (eucalyptus), arbustes sur les montagnes calcaires. | Hoa Trung, Vo Nhai |
| 4 | 592831 | 2399678 | Montagne La Hien : zone industrielle La Hien; les arbustes sur les montagnes calcaires. Plateau : zones résidentielles + plantations | Montagne La Hien, Vo Nhai |
| 5 | 595849 | 2400413 | Mélange des zones résidentielles + jardins (fruitier + manioc) + plantations (eucalyptus). Les arbustes sur la montagne. Quelques nouvelles zones résidentielles. | La Hien, Vo Nhai |
| 6 | 597214 | 2401271 | Rizières, maïs, zones résidentielles + jardins. Les montagnes calcaires sont couvertes par les arbustes (canopée fermée) ou feuillus (canopée ouverte). | La Hien, Vo Nhai |
| 7 | 598446 | 2401763 | Couvert forestier ouvert sur la montagne. Mélange de plantations + zones résidentielles, jardins (fruitiers). | La Dong, Vo Nhai |

| | | | | |
|----|--------|---------|--|----------------------------|
| 8 | 594200 | 2399342 | Plantations (eucalyptus) + théiers + arbustes sur les petites collines. | Deo Khe, Dong Hy |
| 9 | 594247 | 2399217 | Plantations (eucalyptus, acacia, bambou) + arbustes. | Deo Khe, Dong Hy |
| 10 | 592793 | 2397531 | Plantations (acacia + pin), théiers sur les collines. Zones résidentielles + jardins (bananiers) | Khe Mo, Dong Hy |
| 11 | 589572 | 2387034 | Zones résidentielles + jardins (légumes) + maïs. | Huong, la rivière Cáu |
| 12 | 590954 | 2385790 | Maïs + prairie, jardins familiaux | Barrage Ba Da, Cam Gia |
| 13 | 590916 | 2385810 | | |
| 14 | 592029 | 2386468 | Rizières + maïs + prairie | Dong Tien, Thai Nguyen |
| 15 | 594109 | 2385607 | Arbustes + plantations (eucalyptus) au long de la rivière. | Phu Binh |
| 16 | 592466 | 2383744 | Maïs | Pont Tra Vuon |
| 17 | 592432 | 2383481 | Maïs, arbustes + plantations (bambou) | An Ninh, Cam Gia, Phu Binh |
| 18 | 593455 | 2385541 | Rizières, plantations (eucalyptus, bambou), arbustes | Phu Binh |
| 19 | 592267 | 2386523 | Rizières, maïs, canne à sucre | Dong Tien, Phu Binh |
| 20 | 586753 | 2388306 | Milieu urbain (forte densité) | Ville de Thai Nguyen |
| 21 | 589691 | 2384471 | Milieu urbain (forte densité) | Thai Nguyen |
| 22 | 571863 | 2393631 | Rizières, zones résidentielles | Huong Thuong, Dai Tu |
| 23 | 575375 | 2392643 | Rizières, zones résidentielles | Cu Van, Dai Tu |
| 24 | 577437 | 2392725 | Rizières + cultures vivrières | Cu Van, Dai Tu |
| 25 | 591013 | 2385746 | Plantations + zones résidentielles | Phu Luong |

Tableau A1.2 : Exemple d'une fiche résumant les informations recueillies au point d'observation No.5

| Date : 14 décembre 2007 | | Météo : Brouillard | | |
|--|---|---|--|-------|
| Numéro de point : 05 | | | | |
| Coordonnées : X: 595849 Y: 2400413 Z: 46m | | | | |
| Commune : montagne La Hien - district Vo Nhai - province Thai Nguyen | | | | |
| Observateur : Kim Huong Hoang | | | | |
| <p>Note (Point d'observation): Sur l'ensemble du secteur, les rizières (déjà récolté) alternent avec les champs de maïs. Le milieu urbain est de faible densité, les maisons sont éparées et elles sont entourées par des végétaux comme des plantations d'acacias et divers types de plantes cultivés. Plus loin, les collines où les montagnes sont dénudées.</p> | | | | |
| | Information d'occupation du sol | Carte interprétée | Image SPOT-4 | Photo |
| Est | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), zones résidentielles + jardins | urbain faible + sol nu | Le mélange des couleurs : gris-vert et rose pâle, ton clair. Texture : fin | 24 |
| Ouest | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), montagnes dénudées | urbain faible + sol nu, mélange | Le mélange des couleurs : gris-vert et rouge pâle, ton clair. Texture : fin | 26-28 |
| Sud | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), zones résidentielles + jardins + plantations. | Milieu forestier sol nu, mélange, | Le mélange des couleurs : rouge, rose clair. Texture : grain fin | 29-31 |
| Nord | rizières, champs de maïs (déjà récoltés), zones résidentielles + jardins + plantations. | Mélange d'agricole, d'habitations et de plantations | Le mélange des couleurs vert, rose pâle et ton clair. Texture : fin et grain | 25 |

| | | | |
|----|---|----|--|
| 24 |  | 28 |  |
| 30 |  | 25 |  |

2. Campagne de terrain de 2012

Le but de cette mission était de recueillir des informations à propos de l'activité agricole et d'identifier l'état des champs durant une saison de culture. Cette campagne de terrain a été réalisée pendant cinq mois, de février à juin 2012, une fois par mois pour dix champs expérimentaux de cinq communes de quatre districts différents de la province de Thai Nguyen.

Les tableaux AI.3 à AI.7 présentent un exemple complet des fiches d'information et des photos recueillies pour un champ expérimental, à chaque mois.

Les tableaux AI.8 à AI.17 présentent des fiches résumant les informations recueillies pour un champ expérimental pour toute la saison de riz du printemps 2012.

2.1. Exemple des fiches d'information sur le terrain à chaque mois d'un champ (de février à juin 2012), le cas du champ 1 de la commune Cù Vân (CV1) :

Tableau AI.3 : Fiche d'information du mois de février 2012

| | | | | | | | | |
|--|--|----------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Date : 05 fév. 2012 | | Météo : Pluie | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | Y : 2392453 | | Z : | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | | | | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vân/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Nguyen Van Hieu et Mai Hoang Long | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | terre agricole au stade de la préparation du sol pour la saison du riz de printemps 2012 | | | | | | 58 | |
| Est | terre en labour, zones résidentielles (faible) | | | | | | 61 | |
| Ouest | terre en labour, zones résidentielles (faible) | | | | | | 66 | |
| Sud | terre en labour | | | | | | 63 | |
| Nord | terre en labour, zones résidentielles | | | | | | 65 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 575422 | | | 2392917 | | | |
| | coin 2 | 575535 | | | 2392868 | | | |
| | coin 3 | 575470 | | | 2392742 | | | |
| coin 4 | 575353 | | | 2392763 | | | 67 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis plateau | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | 58 | |
| | les champs sont au state de la préparation du sol | | | | | | | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage | Élongation de tige | Booting | Épiaison/ Floraison | Lait et Dough | Maturité |
| | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Autres caractéristiques : hauteur de diguettes : 30 cm | | | | | | 52 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



58)



61)



66)



67)

Tableau A1.4 : Fiche d'information du mois de mars 2012

| | | | | | | | | |
|--|---|----------------------|--|--|-------------------------------------|--|---|------------------------|
| Date : 25 mar. 2012 | | Météo : Nuage | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | Y : 2392453 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vn/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 45 | |
| Est | rizières, zone aquacole, zones résidentielles, plantation | | | | | | 66 | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | | 64 | |
| Sud | rizières, zones résidentielles (faible + jardins), plantations, forêt | | | | | | 62 | |
| Nord | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | | 65 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 575907 | | | 2392567 | | | 46 |
| | coin 2 | 575856 | | | 2392443 | | | 54 |
| | coin 3 | 576012 | | | 2392352 | | | 56 |
| coin 4 | 576113 | | | 2392565 | | | 57 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis plateau | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 45, 46, 56, 57 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input type="checkbox"/> | Booting <input type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input type="checkbox"/> | Lait et Dough <input type="checkbox"/> | |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 51, 60, 68, 69, 70, 71 |
| | | | 18-34 | | | | | |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 49, 50 |
| | | | 2 - 4,5 | | | | | |
| Autres caractéristiques : hauteur de diguettes : 30 cm | | | | | | | 52 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



64)



56)



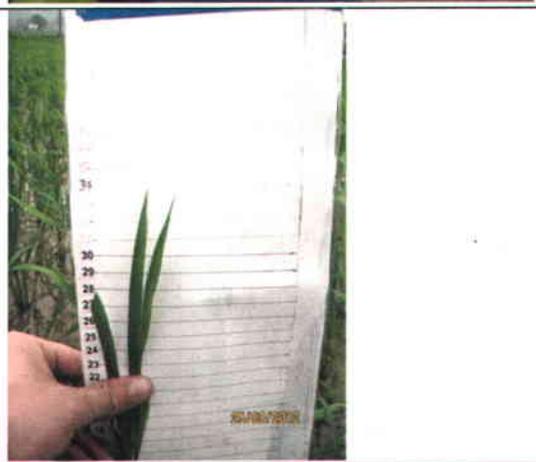
49)



50)



52)



60)

Tableau A1.5 : Fiche d'information du mois d'avril 2012

| | | | | | | | | |
|--|---|----------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|----------------|---|
| Date : 18 avr. 2012 | | Météo : Nuage, Ensoleillé | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | Y : 2392453 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vn/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | 71 | | |
| Est | rizières, zone aquacole, zones résidentielles, plantation | | | | | 72, 73 | | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | 80 | | |
| Sud | rizières, zones résidentielles (faible + jardins), plantations, forêt | | | | | 77 | | |
| Nord | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | 83 | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | Photo | | |
| | | X | | Y | | | | |
| | coin 1 | 575907 | | 2392567 | | 74, 75 | | |
| | coin 2 | 575856 | | 2392443 | | 76 | | |
| | coin 3 | 576012 | | 2392352 | | 78, 79 | | |
| coin 4 | 576113 | | 2392565 | | 84 | | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis plateau | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | 87, 88, 91 | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input type="checkbox"/> | | Lait et Dough <input type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | 85, 86, 92, 93 | |
| | | | | 60 | | | | |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | 89, 90 | |
| | | | | 0 - 3,5 | | | | |
| Autres caractéristiques : hauteur de diguettes : 30 cm | | | | | | 52 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/03/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



77)



86)



90)



91)

Tableau A1.6 : Fiche d'information du mois de mai 2012

| | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------|-------------------------------------|--|--|---|--|--------------------------------------|
| Date : 12 mai 2012 | | Météo : Ensoleillé | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | Y : 2392453 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vn/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 3, 4 | |
| Est | rizières, zone aquacole, zones résidentielles, plantation | | | | | | 2 | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | | 15 | |
| Sud | rizières, zones résidentielles (faible + jardins), plantations, forêt | | | | | | 19 | |
| Nord | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | | 22 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 575907 | | | 2392567 | | | 1 |
| | coin 2 | 575856 | | | 2392443 | | | 17, 18 |
| | coin 3 | 576012 | | | 2392352 | | | 14 |
| coin 4 | 576113 | | | 2392565 | | | 21 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis plateau | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | 16, 20 | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input type="checkbox"/> | Élongation de tige <input type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | 5, 6 | |
| | | | | | | 94 - 98 | | |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | 11, 12 | |
| | | | | | | 0 - 4 | | |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 30 cm - Profondeur racinaire : 12 -14 cm | | | | | | 52 7,8 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : - La croissance du riz entres les petites parcelles sont différente. Certaines entre eux sont en stade de floraison, autres sont en stade de <i>Booting</i> ou Lait et <i>Dough</i> (20). - Certaines parcelles de riz présentent la parasite agricole comme la <i>pyriculariose</i> (photos : 23, 24, 25) | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.

16)



12)



7)



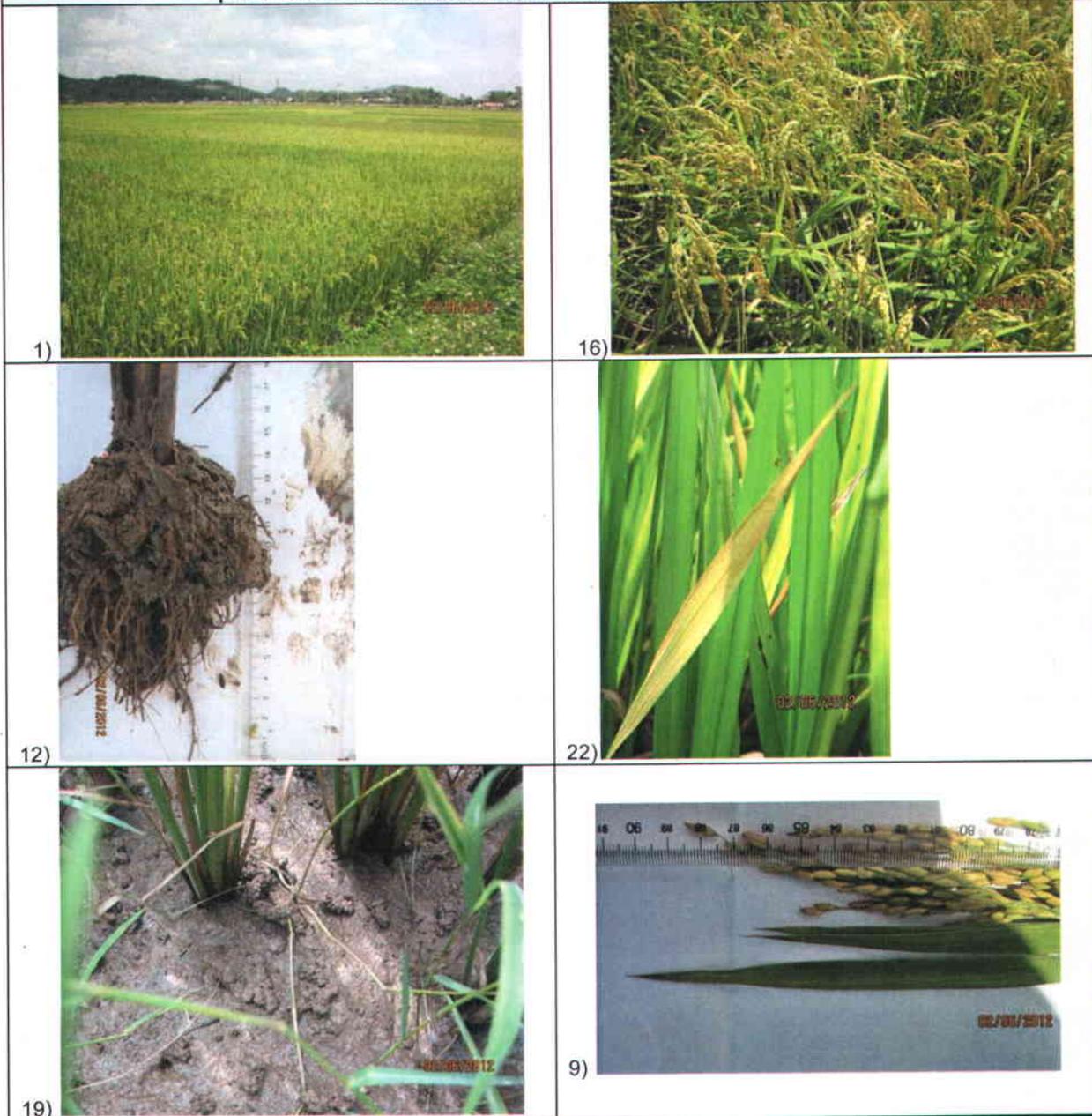
20)



Tableau A1.7 : Fiche d'information du mois de juin 2012

| | | | | | | | | |
|--|---|--------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Date : 02 juin 2012 | | Météo : Ensoleillé | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | Y : 2392453 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vn/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 1 | |
| Est | rizières, zone aquacole, zones résidentielles, plantation | | | | | | 3 | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | | 18 | |
| Sud | rizières, zones résidentielles (faible + jardins), plantations, forêt | | | | | | 29 | |
| Nord | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | | 5 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 575907 | | | 2392567 | | 2 | |
| | coin 2 | 575856 | | | 2392443 | | 27 | |
| | coin 3 | 576012 | | | 2392352 | | 17 | |
| coin 4 | 576113 | | | 2392565 | | 4 | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis plateau | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 16, 23 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage | Élongation de tige | Booting | Épiaison/ Floraison | Lait et Dough | Maturité |
| | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 9, 10 |
| | | | | | | | | 90 - 100 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 19, 20 |
| | | | | | | | 0 | |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 30 cm - La profondeur racinaire : 14 -18 cm | | | | | | | 52 12,14 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : - Les riz de certaines parcelles sont prêts à récolter (17) - Certaines parcelles présentent le parasite agricole comme la <i>pyriculariose</i> (photos : 21, 22) | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



2.2. Fiches résumé des dix champs expérimentaux

Tableau A1.8 : Fiche résumé du champ Cho Chu 1 (CC1)

| | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|--|--|---|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | Y : 2422591 | | Z : | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 566928 | | | | | | | | |
| Commun/District/Province : Chợ Chu/Định Hóa/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation | | | | | | | | |
| Point d'observation | Rizières, zones résidentielles, montagnes calcaire sont couvertes de forêt ou d'arbustes. | | | | | | 143 | |
| Est | Rizières, zones résidentielles, montagne calcaire | | | | | | 32, 151 | |
| Ouest | Plantations sur les collines, zones résidentielles, rizières, montagne calcaire | | | | | | 38, 156 | |
| Sud | Rizières, zones résidentielles, montagne calcaire | | | | | | 33, 145 | |
| Nord | Rizières, zones résidentielles, plantations sur les collines | | | | | | 156 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | | Photo |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 566896 | | | 2422803 | | | 43, 144 |
| | coin 2 | 567014 | | | 2422713 | | | 153 |
| | coin 3 | 566963 | | | 2422579 | | | 42, 155 |
| | coin 4 | 566807 | | | 2422557 | | | 157 |
| coin 5 | 566781 | | | 2422707 | | | 158 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18, riz hybride | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Semis direct , Repiquage manuel | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | 101,102, 104 | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 89, 125, 112, 114,147 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 87, 133, 137,162, 165 |
| | | | 18 - 34 | 70 - 75 | 82 - 95 | 85 -100 | - | 100-105 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 83, 148, 119, 149 |
| | | | 1.5 – 2.5 | 0 - 3 | 0 | 0 | - | 0 |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 18-19 cm - Profondeur racinaire : 10 -17 cm | | | | | | | 88 129,167 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 24/2 - 15/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | Début juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : la qualité du riz est moins bonne, il y a beaucoup de mauvaises herbes dans les rizières (160, 161) | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.

153



101



089



114



147



087



083



149



Tableau A1.9 : Fiche résumé du champ Cho Chu 2 (CC2)

| | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|--|--|---|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | |
| Numéro de point : 2 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : | | Y : | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Chợ Chu/Định Hóa/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, les collines sont couvertes de plantations (bambou), zones résidentielles (faible + jardins), montagnes calcaire sont couvertes de forêt ou d'arbustes. | | | | | | 140 | |
| Est | rizières, plantations (bambou), zones résidentielles (faible + jardins), montagne calcaire avec couvert par divers types de végétation. | | | | | | 117 | |
| Ouest | rizières, collines des plantations, zones résidentielles (faible + jardins) | | | | | | 142 | |
| Sud | rizières, collines des plantations, zones résidentielles (faible + jardins) | | | | | | 49, 148 | |
| Nord | rizières, collines des plantations | | | | | | 57, 154 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 565864 | | | 2423322 | | | 44 |
| | coin 2 | 565907 | | | 2423357 | | | 47 |
| | coin 3 | 565936 | | | 2423354 | | | 50 |
| | coin 4 | 565975 | | | 2423338 | | | 51 |
| | coin 5 | 565968 | | | 2423279 | | | 52 |
| | coin 6 | 565985 | | | 2423189 | | | 54 |
| coin 7 | 565937 | | | 2423194 | | | 56 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18, riz hybride | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | 114,166, 148,143, 126, 121 | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | 117,162, 137 | |
| | | | 24 - 29 | 45 - 85 | - | 85 - 100 | - | 90 - 111 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | 116,168, 119 | |
| | | | 0 - 1 | 0 | - | 0 | - | 0 |
| Autres caractéristiques : - La profondeur racinaire : 10 -16 cm | | | | | | 138,159 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 24/2 - 15/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | Début juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : la croissance du riz dans les parcelles est différente. La qualité du riz est moins bonne causé par le parasite agricole. | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.

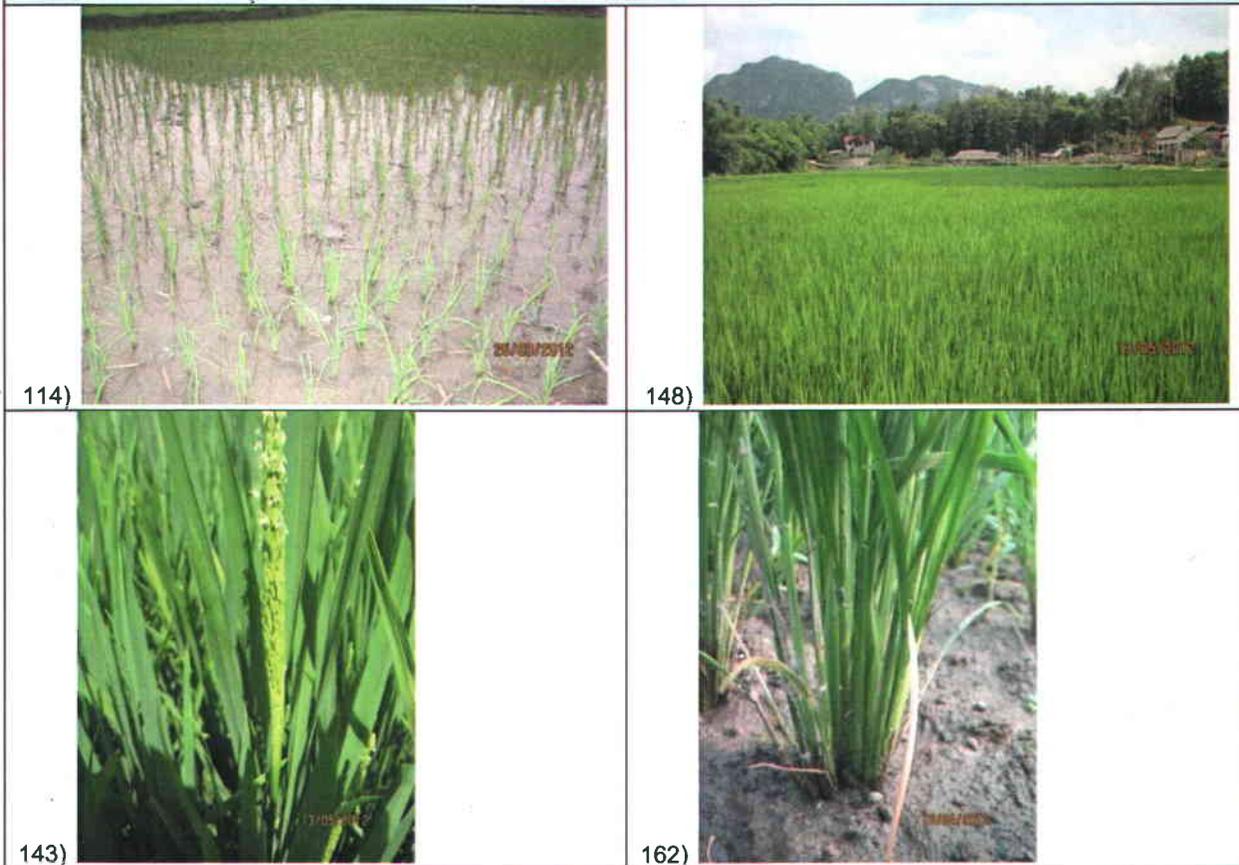


Tableau AI.10 : Fiche résumé du champ Cù Vàn 1(CV1)

| | | | | | | | | |
|---|---|--|--|---|--|--|--|---|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | Y : 2392453 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vàn/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen van Hieu | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 45 | |
| Est | rizières, zone aquacole, zones résidentielles, plantation | | | | | | 66 | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | | 64 | |
| Sud | rizières, zones résidentielles (faible + jardins), plantations, forêt | | | | | | 62 | |
| Nord | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | | 65 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 575907 | | | 2392567 | | | 46 |
| | coin 2 | 575856 | | | 2392443 | | | 54 |
| | coin 3 | 576012 | | | 2392352 | | | 56 |
| coin 4 | 576113 | | | 2392565 | | | 57 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Semis plateau, Repiquage manuel | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 56, 91, 20, 8 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 59, 86, 6, 9 |
| | | | 18-34 | 60 | - | 94-98 | - | 99-100 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 49, 90, 12, 19 |
| | | | 2 - 4,5 | 0 - 3,5 | - | 0 - 4 | - | 0 |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 30 cm - La profondeur racinaire : 12 - 18 cm | | | | | | | 52, 7, 14 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.

| | |
|--|---|
| <p>52)</p>  | <p>56)</p>  |
|--|---|

Tableau AI.11 : Fiche résumé du champ Cù Vàn 2 (CV2)

| | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|---|--|-------------------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | |
| Numéro de point : 2 | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 575835 | | Y : 2392453 | | Z : | | | | |
| Commun/District/Province : Cù Vàn/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, forêt | | | | | | 67 | |
| Est | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 74 | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | | 79 | |
| Sud | rizières, zones résidentielles, plantations, forêt | | | | | | 76 | |
| Nord | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 69 | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 575422 | | | 2392917 | | | 77 |
| | coin 2 | 575535 | | | 2392868 | | | 78 |
| | coin 3 | 575470 | | | 2392742 | | | 68 |
| coin 4 | 575353 | | | 2392763 | | | 75 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Semis direct, Repiquage manuel | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | 1, 69 | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 77, 99, 27, 202, 30, 35 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 109,204 |
| | | | 18 -27 | 58-77 | - | 87-90 | 97-98 | |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 72, 115 |
| | | | 1 | 0 | - | 0 | 0 | |
| Autres caractéristiques : Profondeur racinaire : 10-19cm | | | | | | | 50, 209 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



77)



99)

Tableau A1.12 : Fiche résumé du champ Đào Xá 1 (DX1)

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|---|--|---|--|---|-------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 594201 | | Y : 2381294 | | Z : | | | |
| Commun/District/Province : Đào Xá/Phú Bình/Thái Nguyên | | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, forêt | | | | | | | | |
| Est | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | | | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations, forêt | | | | | | | | |
| Sud | rizières, zones résidentielles, plantations, forêt | | | | | | | | |
| Nord | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | | |
| | | X | | Y | | | | | |
| | coin 1 | 595314 | | 2379874 | | 27 | | | |
| | coin 2 | 595199 | | 2379806 | | 32 | | | |
| | coin 3 | 595120 | | 2379842 | | 38 | | | |
| coin 4 | 595181 | | 2379952 | | 41 | | | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Semis plateau, Repiquage manuel | | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> | 32,9,39,215 |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 31-34 | 59-70 | - | 90-95 | - | 90-98 | 30,16,259 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 0 - 2,5 | 0 - 2,5 | - | 0-11 | - | 0 | 31,11,71 |
| Autres caractéristiques : Profondeur racinaire : 16 - 20cm | | | | | | | 63,68 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | | |
| Repiquage | 18/2 - 07/3/2012 | | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | 222,223 | | |
| Autres notes : la qualité du riz est moins bonne, il y a beaucoup de mauvaises herbes dans les rizières | | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



71)



222)

Tableau AI.13 : Fiche résumé du champ Đào Xá 2 (DX2)

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|---|--|--|--|---|-----------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Bouillard (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | | |
| Numéro de point : 2 | | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N) : X : 595186 | | Y : 2379893 | | Z : | | | | | |
| Commun/District/Province : Đào Xá/Phú Bình /Thái Nguyên | | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 45 | | |
| Est | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 160 | | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 152 | | |
| Sud | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 151 | | |
| Nord | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 156 | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | | |
| | | X | | Y | | | | | |
| | coin 1 | 594284 | | 2381371 | | 150 | | | |
| | coin 2 | 594262 | | 2381213 | | 153 | | | |
| | coin 3 | 594190 | | 2381219 | | 154 | | | |
| | coin 4 | 594207 | | 2381258 | | 155 | | | |
| | coin 5 | 594202 | | 2381298 | | 157 | | | |
| | coin 6 | 594178 | | 2381304 | | 158 | | | |
| coin 7 | 594168 | | 2381368 | | 159 | | | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18, Xi dèo | | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Semis plateau, Repiquage manuel | | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | 21 | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 8-35 | 40-55 | 70-90 | 70-90 | | 100 | 6,43, 95,97 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 0-1,5 | 0 | - | 0-2,5 | - | 0 | 16,59, 107, 246 |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 18-30 cm Profondeur racinaire : 10 - 16 cm | | | | | | | 9 97 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | | |
| Repiquage | 18/2 - 07/3/2012 | | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | | |
| Autres notes : la qualité du riz est moins bonne causé par les parasites agricoles | | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



45)



21)

Tableau A1.14 : Fiche résumé du champ Lục Ba 1 (LB1)

| | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|---|--|---|----------------------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 567757 | | Y : 2386870 | | Z : | | | |
| Commun/District/Province : Lục Ba/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 150,151 | | |
| Est | zones résidentielles, plantations | | | | | | 152 | | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | | 171 | | |
| Sud | rizières, plantations, | | | | | | 172 | | |
| Nord | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 169 | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | | |
| | coin 1 | 567757 | | | 2386870 | | | 153 | |
| | coin 2 | 567715 | | | 2386773 | | | 168 | |
| | coin 3 | 567546 | | | 2386833 | | | 170 | |
| coin 4 | 567614 | | | 2386956 | | | 173 | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis direct | | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | 165 | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> | 180, 170,218, 281,91 |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 20-28 | 49-76 | | 83-100 | | 90-100 | 156,225, 230,97 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 0-1 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 158, 88 |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 14 cm - Profondeur racinaire : 9- 18 cm | | | | | | | | 163 105, 234 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | | |
| Repiquage | 16/2 - 26/2/2012 | | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | | |
| Autres notes : les plantes de riz poussent lentement aux coins 2 et 4 | | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



180)



151)



228)



91)

Tableau AI.15 : Fiche résumé du champ Lục Ba 2 (LB2)

| | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|---|--|---|-------------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | | |
| Numéro de point : 2 | | Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 567677 | | Y : 2389871 | | Z : | | | |
| Commun/District/Province : : Lục Ba/Đại Từ/Thái Nguyên | | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations, forêt | | | | | | 123, 124 | | |
| Est | rizières, plantations, forêt | | | | | | 125 | | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | | 192 | | |
| Sud | rizières, zones résidentielles, plantations, forêt | | | | | | 139 | | |
| Nord | rizières, plantations | | | | | | 148 | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | | |
| | coin 1 | 567677 | | | 2389871 | | | 185 | |
| | coin 2 | 567797 | | | 2389971 | | | 188 | |
| | coin 3 | 567888 | | | 2389890 | | | 191 | |
| coin 4 | 567797 | | | 2389822 | | | 193 | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis direct | | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | 136 | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> | 141, 196, 167, 54 |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 28-35 | 66-75 | | 100-110 | | 100-110 | 129, 211, 181 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 0-2,5 | 0-1 | | 0-1 | 0 | 0 | 130, 214, 193 |
| Autres caractéristiques : - Hauteur de diguettes : 10 - 23 cm - Profondeur racinaire : 10 - 13cm | | | | | | | | 132, 133, 76 | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | | |
| Repiquage | 11/2 - 07/3/2012 | | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



136)



196)

Tableau AI.16 : Fiche résumé du champ Minh Đức 1 (MD1)

| | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|--|--|-------------------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | |
| Numéro de point : 1 | | Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 583340 | | Y : 2371446 | | Z : | | |
| Commun/District/Province : Minh Đức/Phổ Yên/Thái Nguyên | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long, Nguyen Van Hieu | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, plantations | | | | | 174, 175 | | |
| Est | rizières, plantations | | | | | 193 | | |
| Ouest | rizières, zones résidentielles (dense), plantations | | | | | 187 | | |
| Sud | rizières, plantations | | | | | 177 | | |
| Nord | rizières, zones résidentielles, plantations | | | | | 189 | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | | Photo | |
| | | X | | | Y | | | |
| | coin 1 | 583421 | | | 2371357 | | | 176 |
| | coin 2 | 583332 | | | 2371257 | | | 186 |
| | coin 3 | 583219 | | | 2371326 | | | 188 |
| coin 4 | 583315 | | | 2371381 | | | 192 | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18, Xi dẻo | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis direct | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Semi- actif | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | 192,240, 264, 200 |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/ Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 178, 260, 282, 202 |
| | | | 16-35 | 50-80 | | 93-95 | | |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | 183, 241, 199, 204, 281 |
| | | | 0 - 2,5 | 0 | | 0 | 0 | |
| Autres caractéristiques : Profondeur racinaire : 13 - 19 cm | | | | | | | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | | 30 Phase de maturation | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | |
| Repiquage | 16/2 - 02/3/2012 | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | |
| Autres notes : les plantes de riz poussent lentement aux coins 3, 4. Dans certaines parcelles, la qualité des plants de riz est mauvais causée par les parasites agricoles (<i>pyriculariose</i>). (photo : 247, 248). | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



200)



247)

Tableau A1.17 : Fiche résumé du champ Minh Đức 2 (MD2)

| | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|---|--|---|--------------------|
| Date : fév. - juin 2012 | | Météo : Pluie (fév.), Nuage (mar.), Ensoleillé (avril, mai, juin) | | | | | | | |
| Numéro de point : 2 | | | | | | | | | |
| Coordonnées (UTM, WGS84, zone 48N): X : 581478 | | Y : 2371895 | | Z : | | | | | |
| Commun/District/Province : Minh Đức/Phổ Yên/Thái Nguyên | | | | | | | | | |
| Observateur : Mai Hoang Long | | | | | | | | | |
| SECTION 1 : Informations de l'occupation au point d'observation (champ expérimental) | | | | | | | | | |
| Point d'observation | rizières, zones résidentielles, plantations (acacia) | | | | | 178 | | | |
| Est | rizières, zones résidentielles, jardins familiaux, plantations | | | | | 213 | | | |
| Ouest | rizières, plantations | | | | | 196 | | | |
| Sud | rizières, plantations | | | | | 210 | | | |
| Nord | rizières, plantations | | | | | 215 | | | |
| SECTION 2 : Informations sur le plant et la parcelle de riz (tout au long de sa croissance) | | | | | | | | | |
| Coordonnées de la parcelle de riz | Description | | | | | Photo | | | |
| | | X | | Y | | | | | |
| | coin 1 | 581375 | | 2371927 | | 172 | | | |
| | coin 2 | 581379 | | 2371850 | | 174 | | | |
| | coin 3 | 581495 | | 2371848 | | 176 | | | |
| coin 4 | 581494 | | 2371909 | | 179 | | | | |
| Variétés de riz | Khang Dân 18 | | | | | | | | |
| Méthodes de culture | Repiquage manuel, semis direct | | | | | | | | |
| Méthode d'irrigation | Actif (par le system de canaux ou de fossés) | | | | | | | | |
| Caractéristiques du riz, de parcelle de riz | (1) Stades de la croissance du riz | | | | | | | | |
| | Germin-ation | Plantule | Tallage <input checked="" type="checkbox"/> | Élongation de tige <input checked="" type="checkbox"/> | Booting <input checked="" type="checkbox"/> | Épiaison/Floraison <input checked="" type="checkbox"/> | Lait et Dough <input checked="" type="checkbox"/> | Maturité <input checked="" type="checkbox"/> | 204,265, 242, 171 |
| | (2) Hauteur du plant de riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 8-26 | 50-65 | | 70-72 | | 80-100 | 197, 275, 272, 188 |
| | (3) Hauteur d'eau de la parcelle du riz au stade (1), (cm) | | | | | | | | |
| | | | 0-2 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 211, 203 |
| Autres caractéristiques : Profondeur racinaire : 10 - 13 cm | | | | | | | 186, 273 | | |
| Durée de la croissance (jour) | 65 Phase végétative | | 30 Phase de production | | 30 Phase de maturation | | | | |
| Semis | 02/2012 | | | | | | | | |
| Repiquage | 16/2 - 02/3/2012 | | | | | | | | |
| Récolte | juin 2012 | | | | | | | | |
| Autres notes : | | | | | | | | | |

SECTION 3 : Photos illustrant certaines des informations représentées dans le tableau. Le numéro de photo est lié à celui mentionné dans les sections 1 et 2 de la fiche.



ANNEXE II

DESCRIPTION DES CLASSES DE L'OCCUPATION DU SOL

Cette annexe porte sur la description des six classes thématiques et l'affichage des sites d'entraînement correspondant à chaque classe (sauf la classe rizière) sur l'image SPOT-4. Les objets sur cette image sont affichés par la combinaison des bandes spectrales donnant une composition en fausses couleurs RVB : Rouge = bande vert (XI1), Vert = Rouge (XI2), Bleu = PIR (XI3).

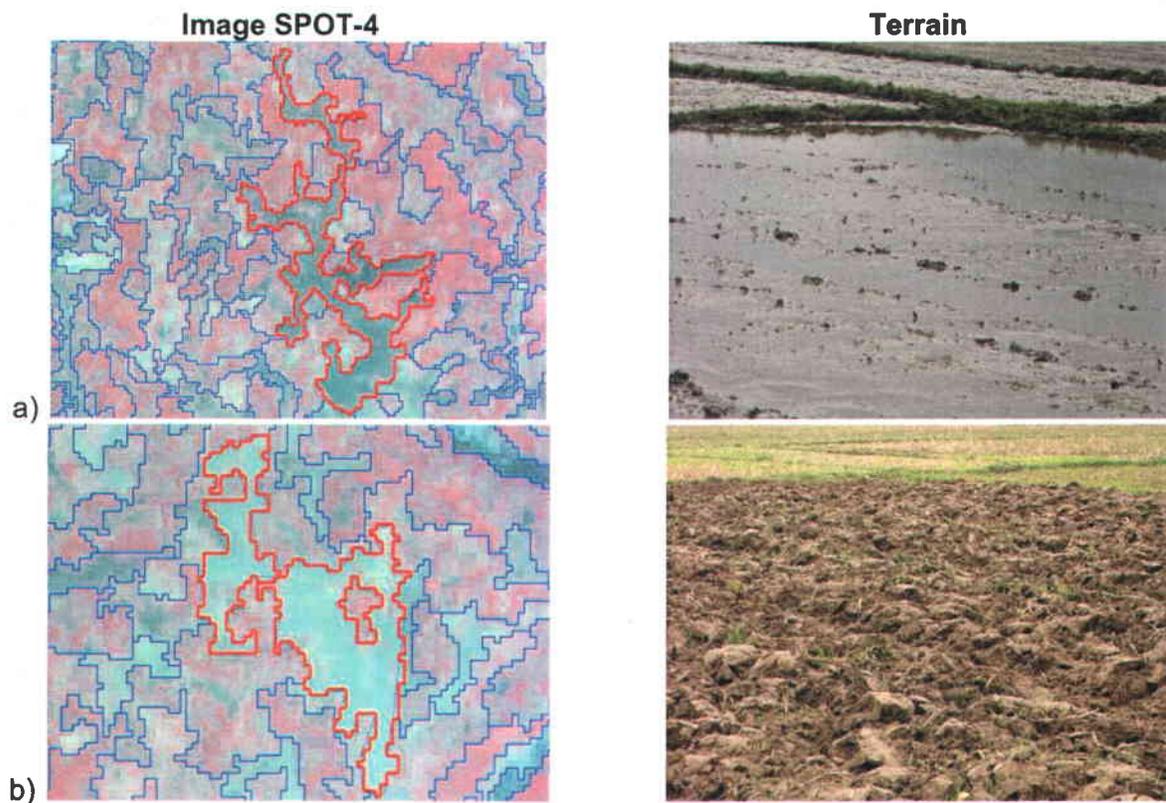
Les photos d'illustration ont été prises durant la mission en décembre 2007, 2009-2010 et au printemps 2012 à la province de Thai Nguyen. Les six classes thématiques sont :

- (1) Milieu agricole : Terre agricole (humide, sèche) utilisée pour le riz ainsi que pour des cultures autres que le riz.
- (2) Milieu urbain : Urbain forte densité : ville ou centre-ville des districts
Urbain faible densité : villages, incluant des jardins
Constructions, routes, zones industrielles
- (3) Milieu forestier : Feuillus, plantations d'acacias, d'eucalyptus et de pins
- (4) Arbustif : Buissons, herbages et arbustes
- (5) Eau : Lacs, réservoirs, rivières
- (6) Rizières : Champs de riz

1. Milieu agricole

Cette classe comprend la terre agricole, donc les champs de riz avant ou pendant la période de semence du riz (terre humide) et les champs de riz dans la période de transition entre les deux saisons de culture du riz ou bien les champs de cultures vivrières (terre sèche).

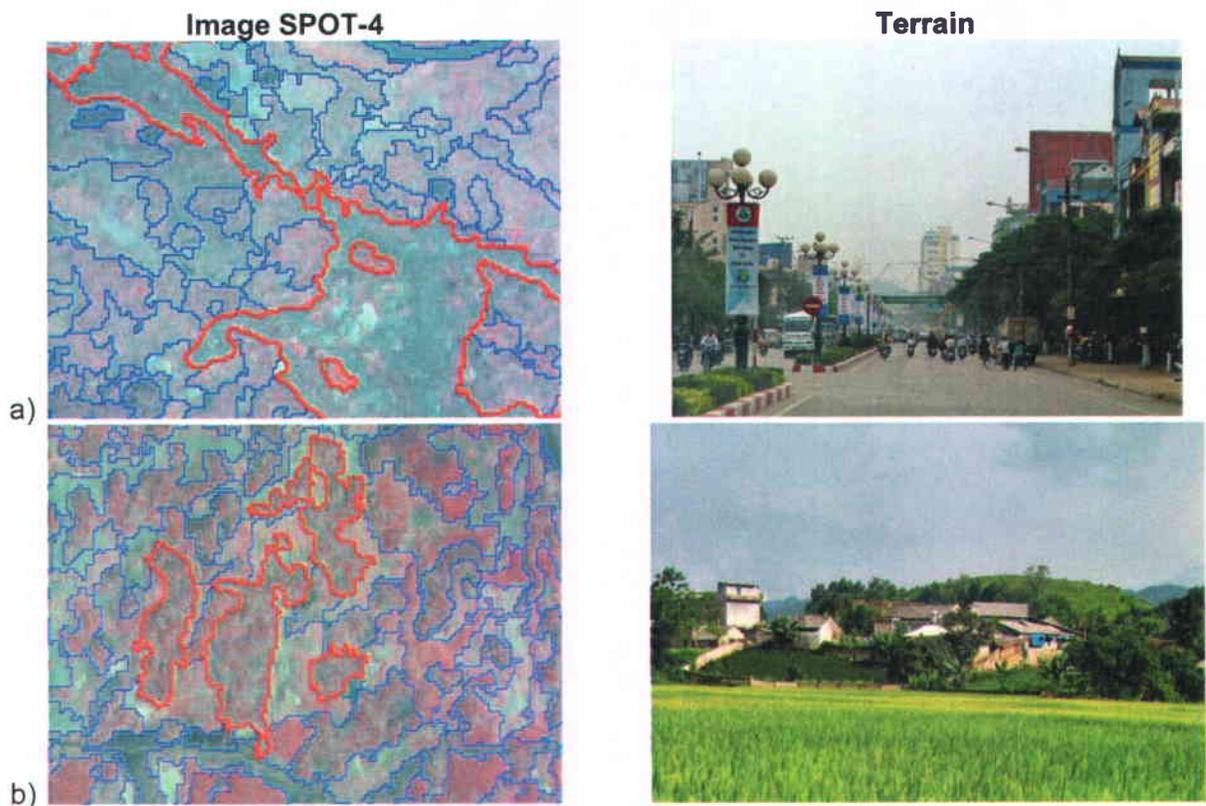
Visuellement, sur la composition colorée, elles apparaissent sous des teintes bleu-gris s'approchant à l'occasion du bleu pâle ou du bleu ciel.



2. Milieu urbain

Cette classe représente : 1) les zones urbanisées de forte densité comme les villes, les bourgs ou les villages en banlieue des grandes villes (All.2a); 2) les zones urbanisées de faible densité qui incluent des jardins; elles se situent dans la plaine ou bien sur les petites collines. Ces zones sont hétérogènes et contiennent souvent d'autres types d'utilisations : arbres, milieu humide, plantations, etc. (All.2b). Cependant, la création d'entités homogènes de zones urbaines minimise la prise en compte d'autres types d'occupation du sol; 3) les éléments caractérisant le milieu urbain soit les routes, les bâtiments, les zones industrielles, les constructions et les surfaces asphaltées, etc. (All.2c et All.2d).

Les objets de la zone All.2a s'affichent sous la teinte bleu-gris pâle avec la texture de grain. Les objets de la zone All.2b apparaissent sous des teintes assez foncées de rouge et bleu-gris avec la texture de grain fin. Les éléments des zones All.2c et All.2d s'affichent sous des teintes bleu ciel/ blanche. Leurs textures sont fines et leurs formes sont spéciales.



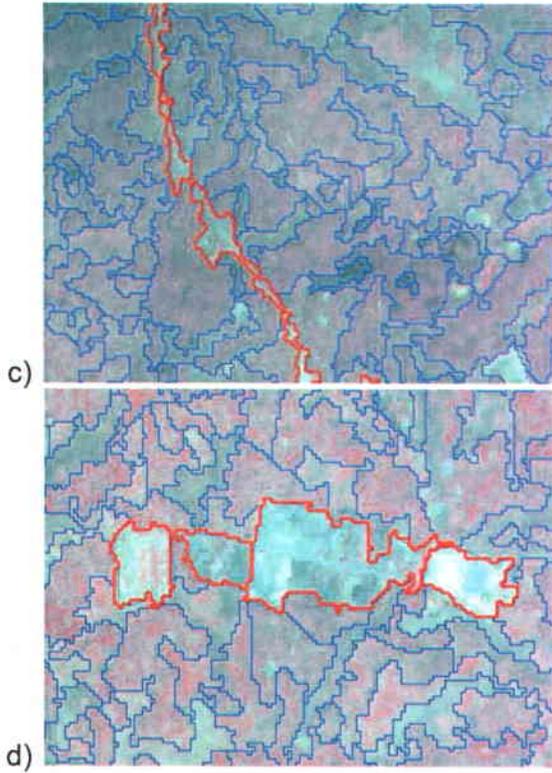


Figure All.2 : Illustration du milieu urbain : a) zone urbaine de fort densité; b) zone urbaine de faible densité; c) route; d) zone industrielle.

3. Milieu forestier

La classe Forêt se différencie essentiellement des autres classes par sa distribution dans l'espace et par son activité chlorophyllienne qui lui confère une signature spectrale propre. Pour la zone d'étude, cette classe inclut les feuillus, les plantations de pins, d'acacias et d'eucalyptus.

Les feuillus sont situés sur les montages, ils apparaissent sur l'image dans les tons de rouge très foncé à rouge.

Les plantations sont situées sur les petites collines et les pentes modérées des montagnes. Elles apparaissent sur l'image dans les tons rouge à rouge pâle avec leurs textures d'écailles de poisson.

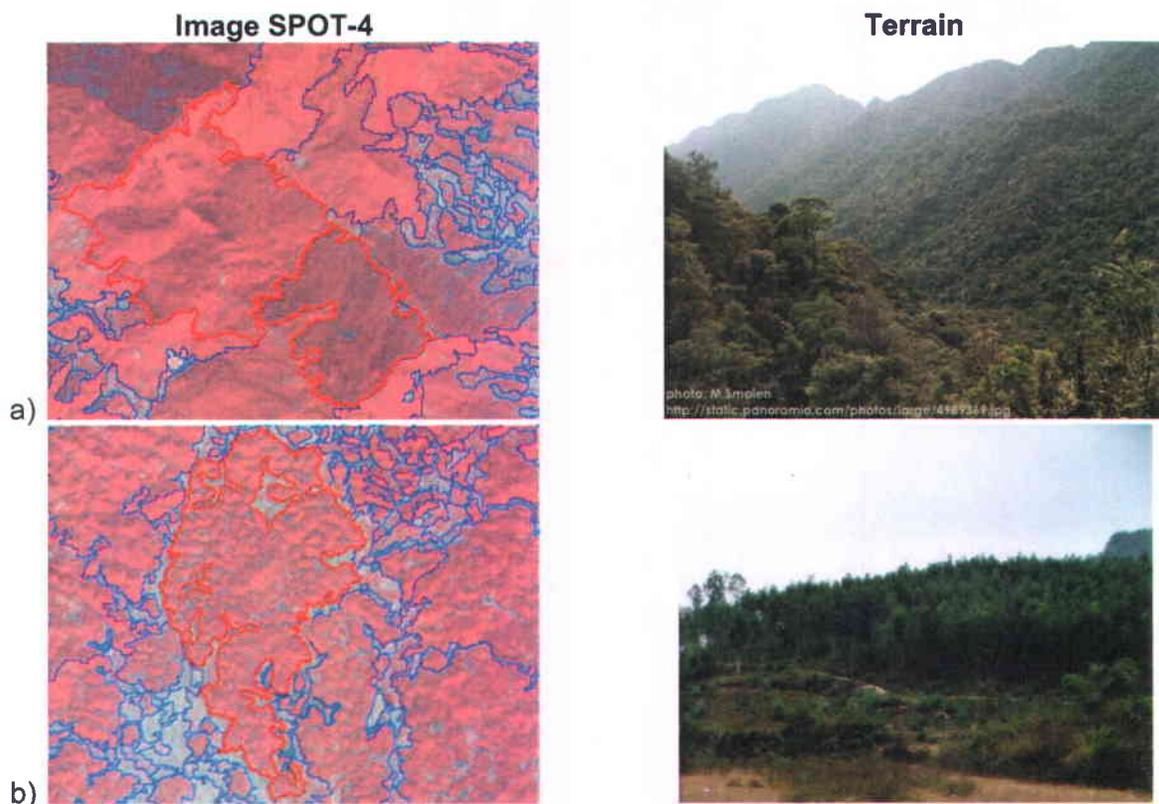


Figure All.3 : Illustration du milieu forestier : a) les feuillus; b) les plantations.

4. Arbustif (arbuste, buisson, herbage)

Cette classe est composée de divers types de végétation qui sont situés en montagne, au pied de la montagne et dans la plaine. Elle inclut des friches herbacées, partiellement arbustives et les zones de coupes. Elle s'affiche sur l'image par une couleur dominée par le rouge-gris clair signalant une plus faible activité chlorophyllienne, se différenciant ainsi de la signature spectrale de la forêt.



Figure All.4 : Illustration de la classe arbuste.

5. Eau

L'eau inclut les mares, les réservoirs, les lacs et les rivières. Cette classe s'affiche en bleu, de pâle à foncé. Dans certains secteurs, elle apparaît en rouge-mauve foncé lorsque les mares sont couvertes de lentilles et de jacinthes d'eau.

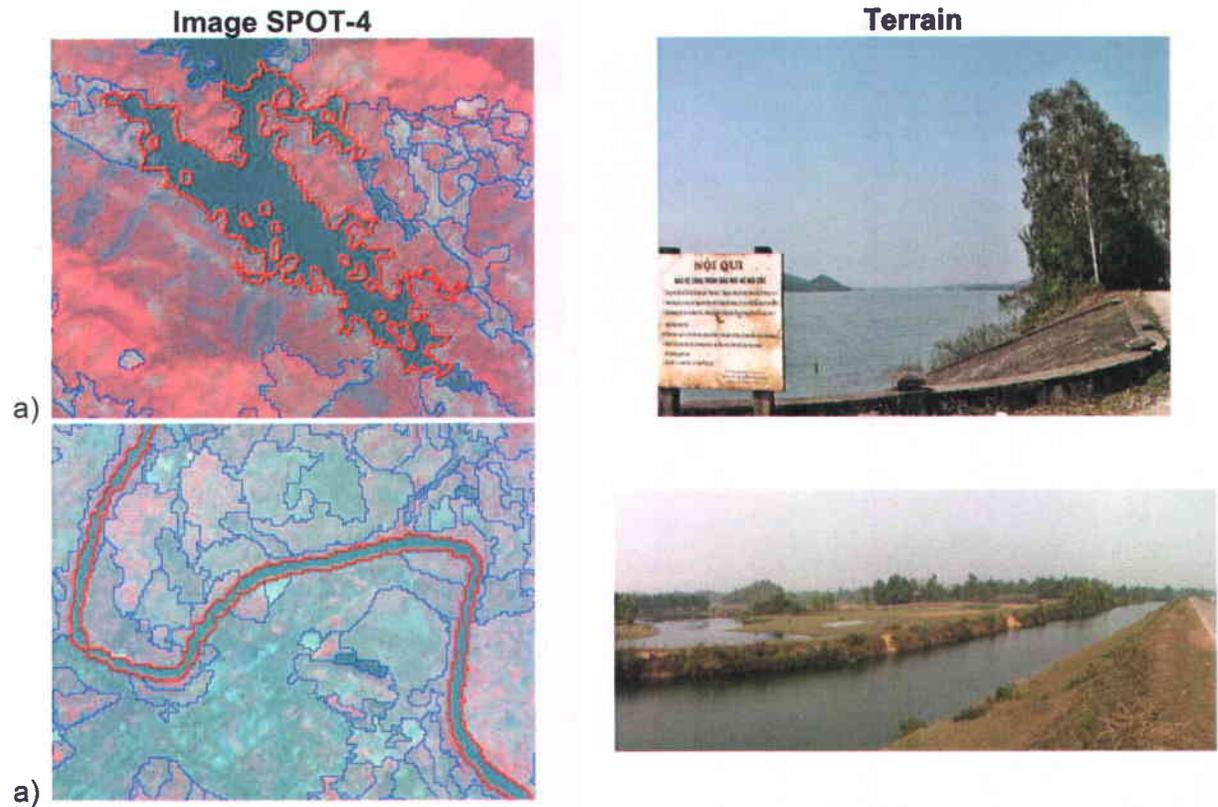


Figure All.5 : Illustration de la classe eau : a) lac, b) rivière.

6. Rizières

La classe Rizières présente les parcelles de riz pendant les saisons de culture où il y a des plants de riz. Les rizières se forment habituellement près des rivières ou des marais.



Figure All.6 : Illustration des rizières durant la croissance du riz.

ANNEXE III COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION

La surface équivalente radar (SER) caractérise l'amplitude d'une cible, notée σ_{ij} , définie comme étant le rapport entre la puissance diffusé par la cible et la puissance surfacique reçue par la cible lorsque l'illumination par l'onde émise par l'antenne (Lee et Pottier, 2009; Bouvet, 2009):

$$\sigma_{ij} = 4\pi R^2 \frac{P_d}{P_t} \quad (33)$$

où P_t est la puissance transmise par l'antenne en polarisation i et P_d représente la puissance diffusée par la cible. R est la distance entre le radar et la cible.

Pour caractériser ces cibles de manière plus générale, la SER est normalisée par la surface au sol de la cible A_c , et on introduit le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) :

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{\sigma_{ij}}{A_c} \quad (34)$$

Les puissances étant proportionnelles au carré des modules des champs électriques, à partir des Équation (33) et (34), on obtient l'expression suivant :

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{4\pi}{A_c} \left(|S_{ij}|^2 \right) \quad (35)$$

Le coefficient σ^0 est donc une estimation directe d'un paramètre de la matrice de diffusion (Équation 1, Chapitre 2). Il mesure l'intensité du signal radar, qui est le carré de l'amplitude.

Par l'intermédiaire de l'équation radar, on peut relier ce coefficient de rétrodiffusion à la puissance P_r reçue par l'antenne en polarisation j :

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 A_c \sigma_{ij}^0}{(4\pi)^3 R^4} \quad (36)$$

où G représente le gain de l'antenne.

ANNEXE IV

CARTES DE L'OCCUPATION DU SOL ET DES RIZIÈRES

Cette annexe comprend deux catégories de cartes:

1. Carte des rizières de l'ensemble des sites retenues :

- Distribution des rizières de deux saisons de culture : traditionnelle 2009 (Annexe VI.1) et printemps 2010 (Annexe VI.2). Ces cartes sont dérivées d'images RADARSAT-2 en double polarisation.
- Distribution des rizières de deux saisons de culture traditionnelle 2009 (Annexe VI.3) et printemps 2010 (Annexe VI.4) dérivées d'images polarimétriques RADARSAT-2 par la classification SVM
- Distribution des rizières de deux saisons de culture traditionnelle 2009 (Annexe VI.5) et printemps 2010 (Annexe VI.6) dérivées d'images RADARSAT-2 en polarisation HH par la classification SVM.

2. Carte de l'occupation du sol de l'ensemble du bassin versant de la rivière Cáu :

Ces cartes contiennent l'information de l'occupation du sol de la zone d'étude, dérivée de l'image SPOT-4 et de rizières de saison de riz traditionnelle 2009 (Annexe VI.7) et de printemps 2010 (Annexe VI.8).

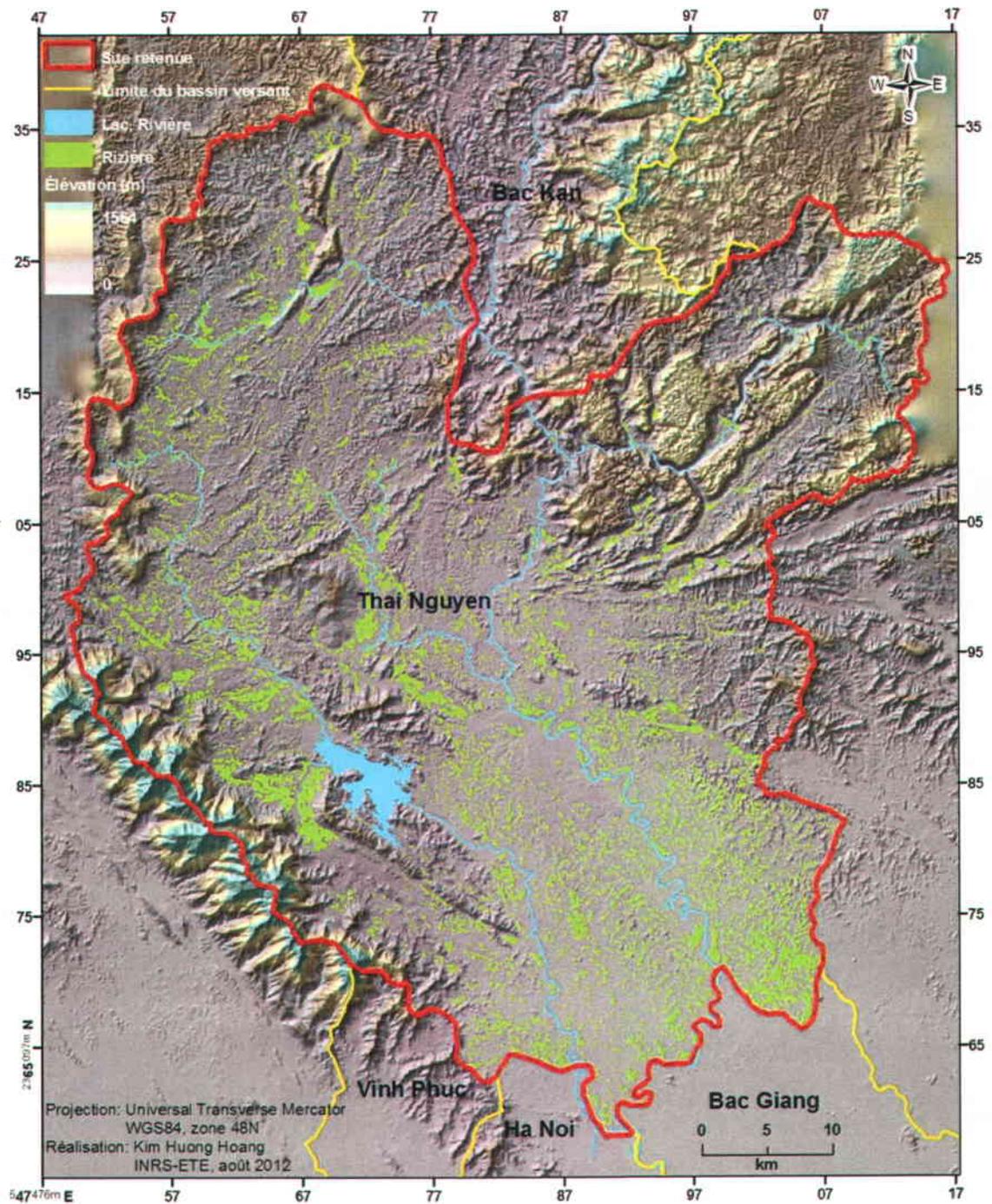


Figure IV.1 : Distribution du riz (en vert) de la saison de culture traditionnelle de 2009, dérivée des rapports (R1 et R2) d'images RADARSAT-2 en polarisation HH, acquises le 02 juillet, 26 juillet et le 19 août.

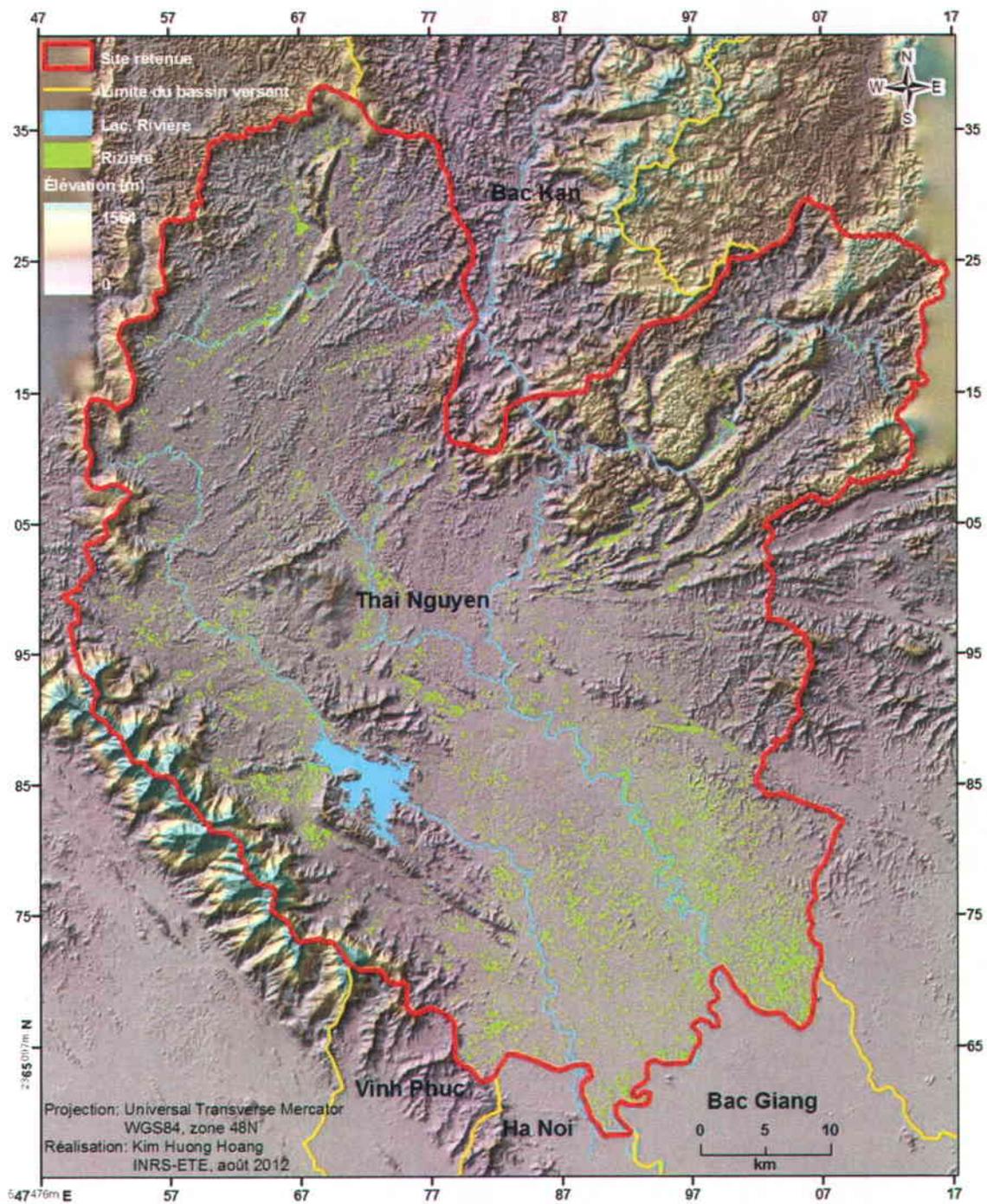


Figure IV.2 : Distribution du riz (en vert) de la récolte de printemps de 2010, dérivée des rapports (R3 et R4) d'images RADARSAT-2 en polarisation HH, acquise le 10 janvier, 16 avril et 10 mai.

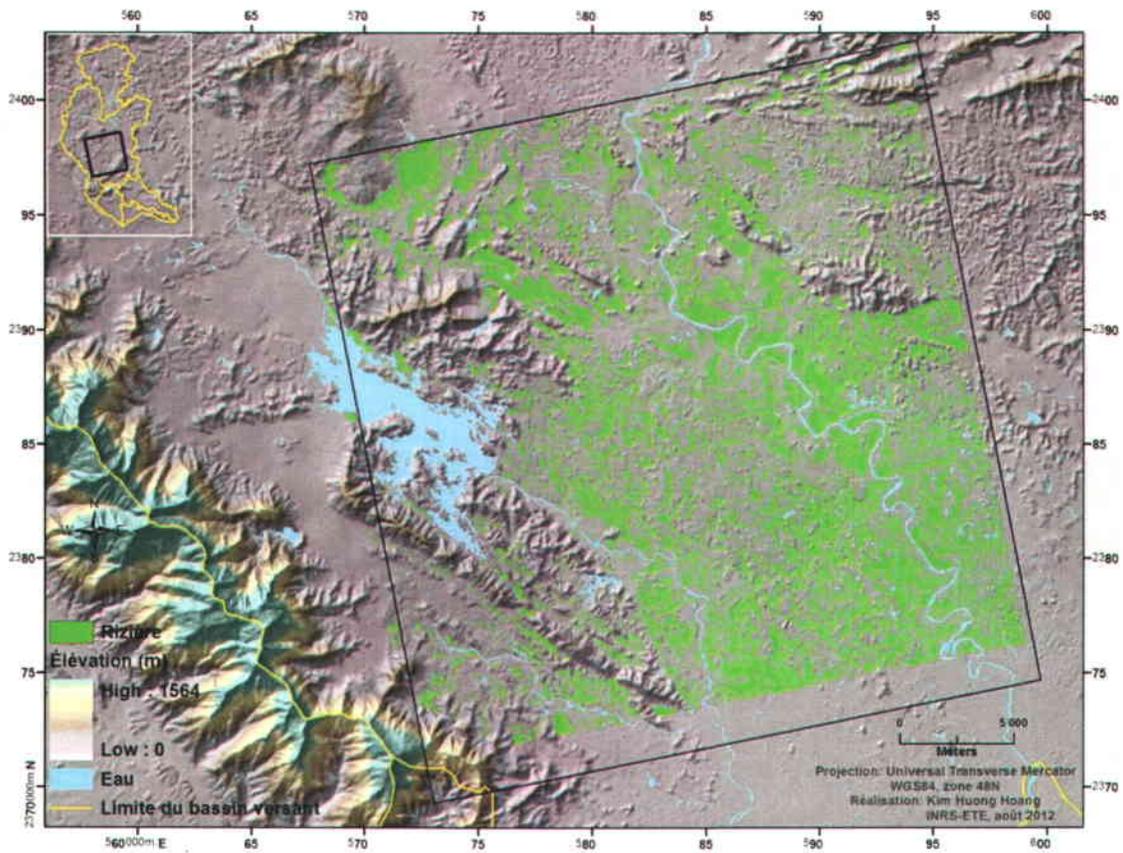


Figure IV.3 : Carte de la distribution du riz (en vert) de la récolte traditionnelle de 2009 du site 2 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 polarimétriques, acquise le 21 août, par la classification SVM.

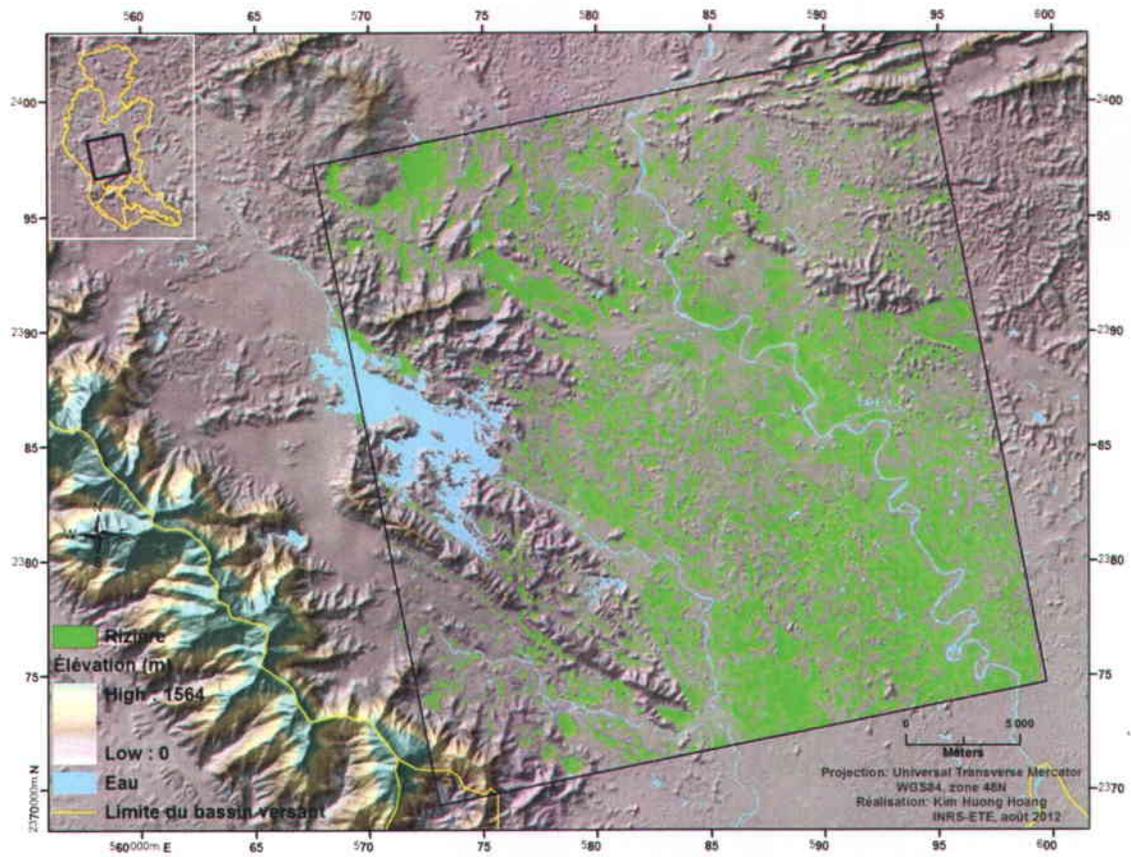


Figure IV.4 : Distribution du riz (en vert) de la récolte de printemps de 2010 (carré noir), dérivée de l'image RADARSAT-2 polarimétriques, acquise le 18 avril, par la classification SVM.

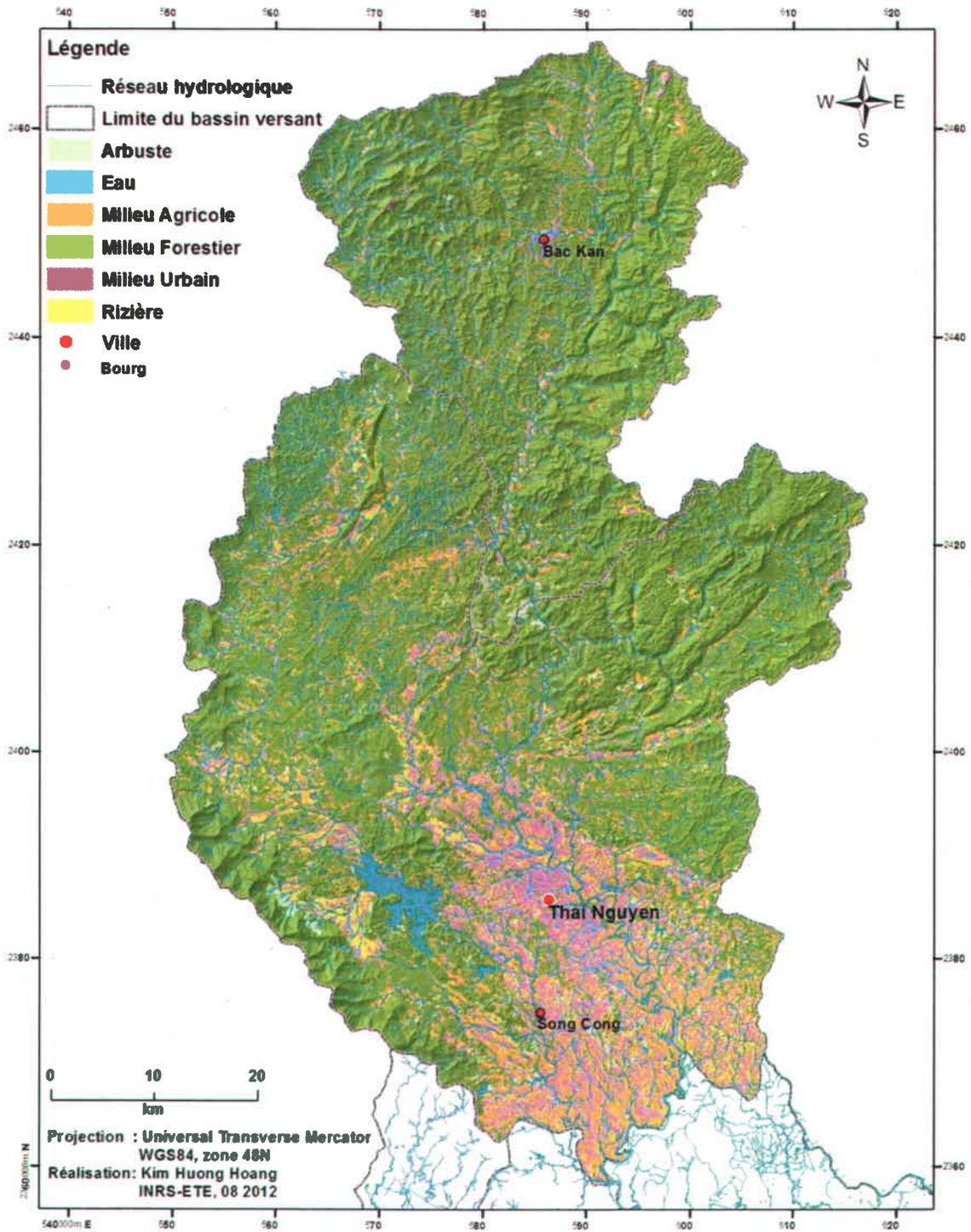


Figure IV.7 : Carte de l'occupation du sol en aval du bassin versant de Thai Nguyen extraite des images SPOT de 2007. Les rizières (en jaune) de l'année 2009 y sont intégrées.

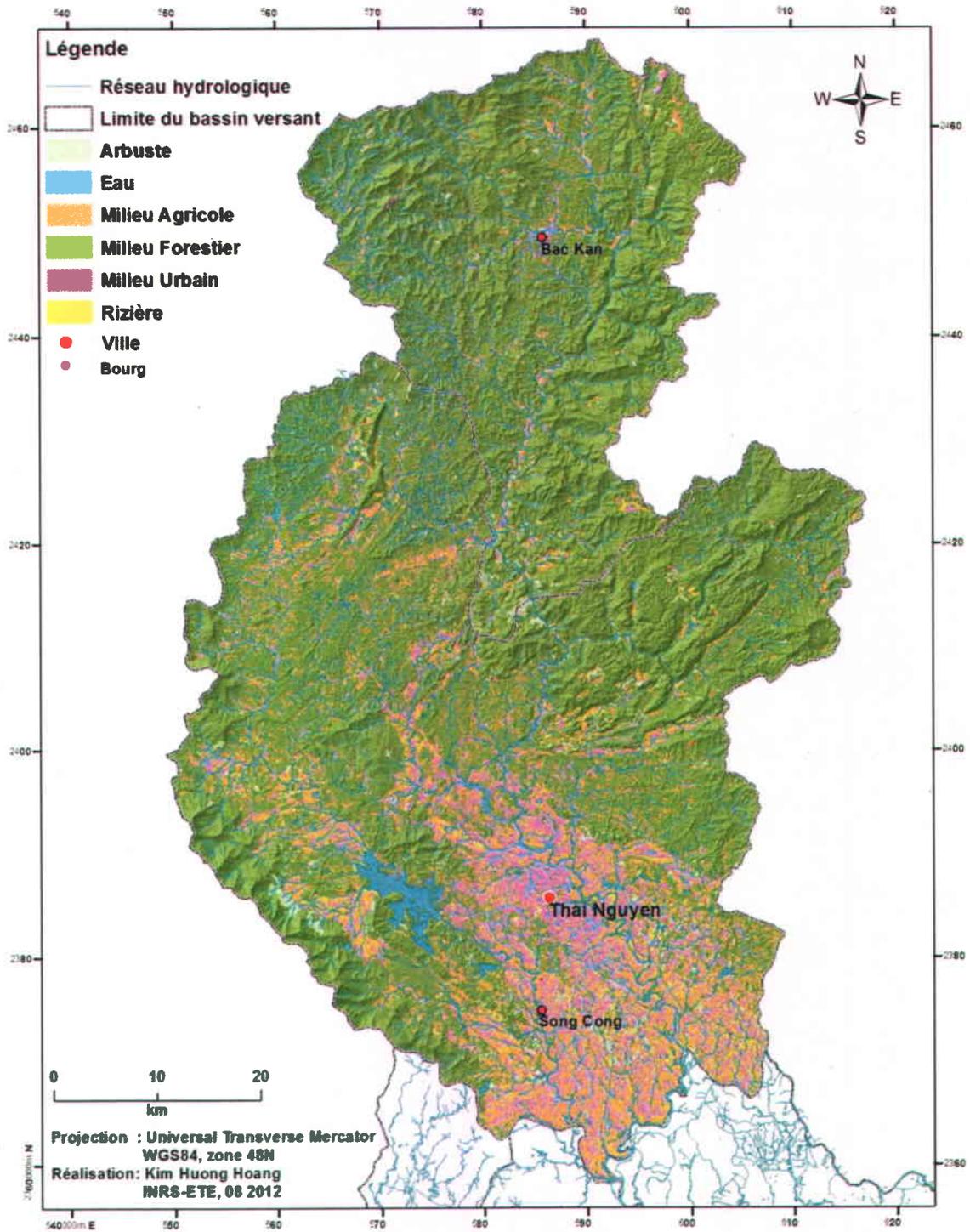


Figure IV.7 : Carte de l'occupation du sol en aval du bassin versant de Thai Nguyen extraite des images SPOT de 2007. Les rizières (en jaune) de l'année 2010 y sont intégrées.

