

SUIVI DE L'INTENSIFICATION DES SUPERFICIES AGRICOLES A L'AIDE DE LA TELEDETECTION: CAS DU BASSIN DU KOU

Mémoire pour l'obtention du
Master en Ingénierie de l'eau et de l'environnement
Option: **Eau**

Présenté et soutenu publiquement le 15 Juin 2010 par:

GUEMNIN BOUTCHUENG Olivier

Travaux dirigés par:

Yélézouomin Stéphane Corentin SOME
Enseignant Chercheur UTER GVEA ZiE

Joost WELLENS

Conseiller Technique Principal GEeau, Coopérant
APEFE

Akoly Agblévi MIDEKOR

Chargé de mission Observatoire de l'Eau AEDE

Farid TRAORE

Doctorant de l'Université de Liège (ULG Belgique)

Jury d'évaluation du stage:

Président: **Yélézouomin Stéphane Corentin SOME**

Membres et correcteurs:

Akoly Agblévi MIDEKOR

Amadou Keïta

DEDICACES

Je dédie ce mémoire:

- A Dieu Tout Puissant qui a permis la réalisation de ce travail.
- A toute ma famille et plus particulièrement à mes parents: Monsieur et Madame BOUTCHUENG qui en plus de leurs affections et conseils respectifs, ont tout mis à contribution pour ma réussite.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes encadreurs M. Corentin SOME, M. Joost WELLENS et M. Amadou Keïta de l'attention et de l'affection qu'ils m'accordent, aussi de l'importance qu'ils ont donnée à la réalisation de ce mémoire.

Ce mémoire doit aussi beaucoup à M. Akoly MIDEKOR et M. Farid TRAORE. Leurs disponibilités respectives et leur assistance régulière m'ont été d'un grand soutien.

Je remercie le Directeur Général de la fondation 2IE M. Paul GINES, le DESA M. Kouame KOUASSI, le chef de l'UTER GVEA M. Hamma YACOUBA, des efforts multiples qu'ils ne cessent de consacrer afin que leurs étudiants puissent travailler dans les meilleures conditions.

De plus, je présente toute ma gratitude à tous les enseignants de la fondation 2IE, pour leurs contributions à ma formation d'ingénieur.

Je remercie également tous mes camarades de promotion. Leur présence permanente et leur bienveillance me sont d'un grand soutien moral.

Que ceux dont les noms ou les catégories ne figurent pas ici ne se sentent pas oubliés.

RESUME

Notre travail entre dans le cadre du projet *Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou* (Projet GEeau). Nous y avons traité du suivi de l'intensification des superficies agricoles à l'aide de la télédétection. Ainsi, nous avons estimé en termes de superficie, les parcelles de terre exploitées pour la pratique de l'agriculture irriguée, à partir du traitement numérique des images satellites à moyenne résolution des capteurs Landsat TM. Ceci dans le but de déterminer un taux d'accroissement des superficies agricoles dans le bassin versant du Kou, en contribution à la gestion des ressources en eau dans un contexte de rapports conflictuels des exploitants. Pour le traitement des images, nous avons élaboré un protocole spécifique à l'objectif visé et au type d'images à traiter. Ce protocole intègre deux techniques classiques complémentaires de classification d'image, soutenues par des analyses statistiques approfondies. Nous avons effectué ces analyses statistiques sur une grandeur spectrale caractéristique de la couverture végétale, appelée NDVI. L'approche adoptée a été évaluée à travers les résultats obtenus, par comparaison de ceux-ci aux résultats des inventaires effectués sur le terrain par l'équipe du projet GEeau. A l'issue de cette étude, nous avons abouti à la confirmation d'un accroissement considérable des superficies agricoles dans le bassin du Kou, avec une estimation de 17 ha par an, soient 136 ha de culture en Mai 1988 et 462 ha de culture en Mai 2007.

Mots clés:

1. Superficie agricole
2. Télédétection
3. Traitement d'image satellite
4. Bassin du Kou
5. NDVI

ABSTRACT

Our survey is a part of the project entitled “*Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l’agriculture dans le bassin du Kou*” (GEeau Project). In this survey, we dealt with the monitoring of agricultural areas with remote sensing. Then, we estimated the area of land for irrigated agriculture using digital processing of moderate resolution satellite images of Landsat TM sensors. This aims at determining the growth rate of agricultural area in the Kou watershed, to contribute to water resources management in a context of conflicting relationships between operators. The image processing required the development of a specific protocol depending on the aim and type of images to be processed. This protocol consists of two complementary traditional methods of image classification supported by in-depth statistical analyses. Statistical analyses are about NDVI which is a spectral parameter characterizing plant cover. The results of the approach adopted are compared to those obtained by the GEeau project team on the field. At the end, our survey confirmed the considerable growth of agricultural areas in the Kou watershed, with a growth rate of 17 ha per year. Then, we found 136 ha of agricultural areas in May 1988 and 462 ha in May 2007.

Key words

1. Agricultural areas
2. Remote sensing
3. Satellite image processing
4. Kou watershed
5. NDVI

LISTE DES ABREVIATIONS

NDVI: Normalized Difference Vegetation Indice

PVA: Prise de Vue Aérienne

ROIs: Region Of Interests

TM: Thematic Mapper

ETM+: Enhanced Thematic Mapper plus

SOMMAIRE

DEDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	III
ABSTRACT	IV
LISTE DES ABREVIATIONS	V
SOMMAIRE	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
 I. INTRODUCTION.	 1
II. OBJECTIFS ET HYPOTHESE DU TRAVAIL.....	4
2.1 objectifs.....	4
2.1.1 Objectif général	4
2.1.2 Objectifs spécifiques.....	4
2.2 Hypothèse.	5
III. MATERIELS ET METHODES.	6
3.1 Matériel.	6
3.1.1 Imagerie.	6
3.1.2 Logiciels utilisés.	6
3.1.3 Base de données GEeau.....	6
3.2 Démarche méthodologique.	7
3.2.1 Option de cadre d'étude.....	7
3.2.2 Type d'occupation des sols à identifier.	7
3.2.3 Choix des images.	7
3.2.4 Bandes spectrales retenues.	8
3.3 Protocole de classification.....	8
3.3.1 Prétraitement.....	9
3.3.2 Classification par «maximum de vraisemblance».	10
3.3.3 Classification par «arbre de décision».	12
IV. RESULTATS.	14
4.1 Résultats de la phase de prétraitement: Portions d'image contenant la zone étudiée.....	14
4.2 Résultats des classifications par «maximum de vraisemblance».	14
4.2.1 Représentations géographiques des résultats des classifications par «maximum de vraisemblance».	14
4.2.2 Estimation de superficies des types d'occupation des sols.....	15
4.3 Résultats de la conception des arbres de décision.	16
4.3.1 Résultats des analyses statistiques des Profils NDVI.....	16
4.3.2 Arbres de décision et sets de seuils NDVI retenus pour la génération de nouvelles classes.....	19

	4.4 Résultats des classifications selon les arbres de décision individuels.....	20
	4.4.1 Représentations géographiques des résultats des classifications effectuées par les Arbres de décision individuels.....	20
	4.4.2 Estimation de superficies des types d'occupation des sols.....	20
	4.5 Résultats des classifications selon l'arbre de décision général.	21
	4.5.1 Représentations géographiques des résultats des classifications effectuées par l'arbre de décision général.....	21
	4.5.2 Estimation de superficies des types d'occupation des sols.....	22
	4.6 Taux d'accroissement annuels des superficies agricoles.....	23
V.	DISCUSSION ET ANALYSES.....	24
	5.1 Observation des portions d'image Landsat TM	24
	5.2 Valeurs spectrales des zones d'intérêt	24
	5.3 Classification par «Maximum de vraisemblance».....	24
	5.3.1. Evaluation des classifications effectuées par «Maximum de vraisemblance».	24
	5.3.2 Superficies d'occupation des sols.....	25
	5.4 Analyses des arbres de décision	26
	5.5 Classifications selon les arbres de décision individuels.....	26
	5.5.1. Validation des classifications effectuées par les arbres de décision individuels.....	27
	5.5.2 Superficies d'occupation des sols.....	27
	5.6. Validation des classifications effectuées par l'arbre de décision général.....	28
	5.7 Étude comparative des superficies.....	28
VI.	CONCLUSIONS	30
VII.	BIBLIOGRAPHIE	31
VIII.	ANNEXES	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Estimations des superficies d'occupation des sols à partir des classifications effectuées par Maximum de vraisemblance.	16
Tableau 2: Statistiques descriptives des profils NDVI des pixels-échantillon des différentes années individuellement.	17
Tableau 3: Résultat du test de Kolmogorov-Smirnov sur les données NDVI des 2 groupes d'échantillons.	17
Tableau 4: Estimations des superficies des types d'occupation des sols à partir des classifications effectuées par les arbres de décision individuels.	21
Tableau 5: Estimations des superficies des types d'occupation des sols à partir des classifications effectuées par l'arbre de décision général.	22
Tableau 6: Synthèse des estimations des superficies agricoles.	23
Tableau 7: Matrices de confusion des classifications faites par maximum de vraisemblance de la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988.	25
Tableau 8: Comparaison des estimations de superficies agricoles	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation du Bassin versant du KOU	1
Figure 2: Localisation de la zone d'étude.	3
Figure 3: Portions d'image Landsat-4 TM.....	14
Figure 4: Représentations géographiques des résultats des classifications par Maximum de vraisemblance.....	15
Figure 5: Arbres de classification de pixels, proposés par l'analyse statistique.....	18
Figure 6: Arbres de décision et sets de seuils NDVI retenus pour la classification.....	19
Figure 7: Représentations géographiques des résultats des classifications faites par les arbres de décision individuels.....	20
Figure 8: Résultats des classifications faites par l'arbre de décision général.	22
Figure 9: Evolution des superficies agricoles	29

I. INTRODUCTION.

Le bassin versant du Kou (figure 1) se situe au Sud-Ouest du Burkina Faso, dans la province du Houet, entre 4,0° et 4,7° longitude Ouest et entre 10,8° et 11,6° latitude Nord. Il a une superficie de 1823 km² environ, comprenant le système hydraulique de la rivière Kou, ses affluents et les sources de Nasso (Mamadou Chérif, 2006). La végétation naturelle est à dominance de type savane arbustive et arborée (Wellens et al., 2008-a).

Le bassin se trouve à la limite sud de la zone climatique tropicale soudano-sahélienne. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons bien distinctes, une saison des pluies (mi-mai à octobre) et une saison sèche. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 900 à 1500 mm, tandis que l'évaporation potentielle moyenne annuelle est de l'ordre de 2 000 mm (Wellens et al., 2008-a).

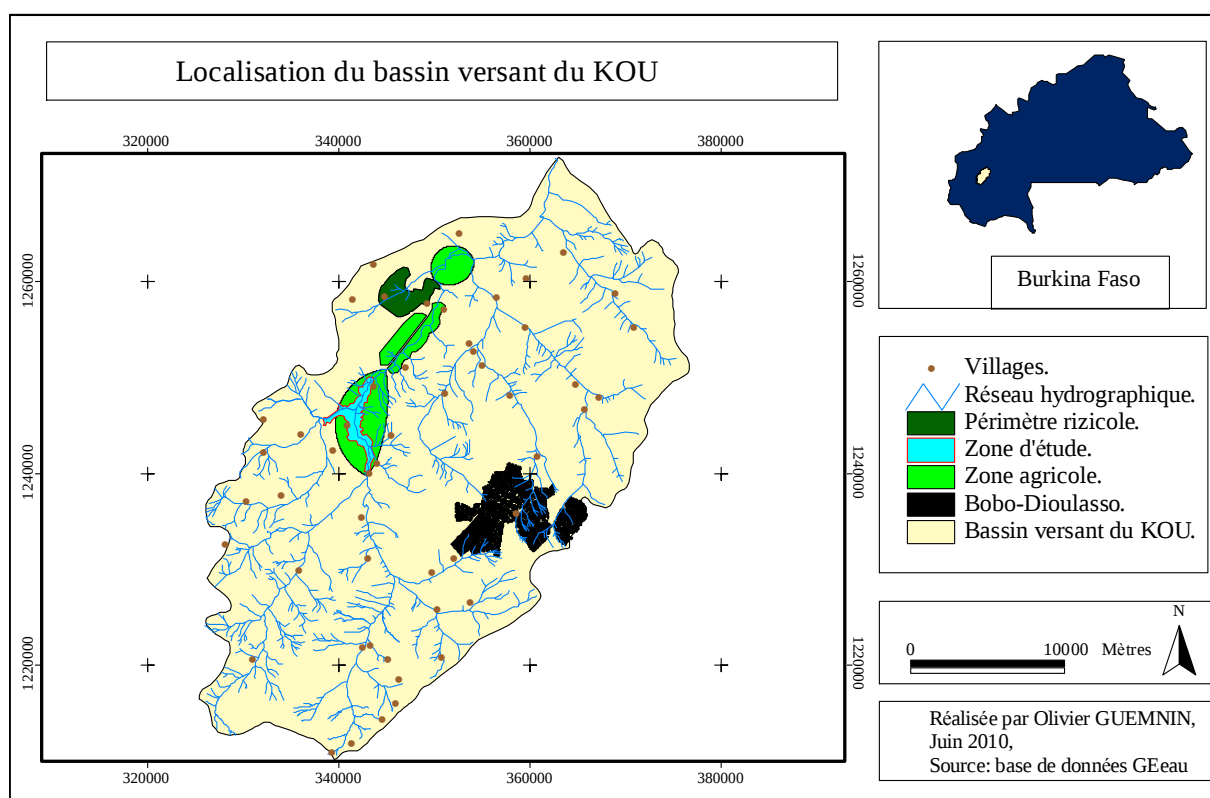


Figure 1: Localisation du Bassin versant du Kou

La présence d'une nappe phréatique facilement exploitable, d'un cours d'eau pérenne et d'un hivernage à caractère subhumide, fait du bassin du Kou un espace géographique disposant d'importantes ressources en eau. Les usages se répartissent entre: l'approvisionnement en eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso (deuxième ville du Burkina-Faso) et les localités environnantes; l'agriculture à travers de très importantes superficies en cultures irriguées; et l'industrie, sans toutefois oublier l'élevage.

Depuis quelques décennies, les ressources en eau du Kou subissent une pression de plus en plus accrue. Cette sollicitation des ressources en eau du bassin est à l'origine d'un déficit de débit qui a été estimé à 250 l/s en 1998 (Diallo, 1998). Un déficit qui croîtrait probablement avec la population.

En effet, au recensement de 2003, le bassin versant comptait environ 600 000 habitants (Akoly; 2009). Le taux de croissance étant estimé à 7%, on pourrait supposer une plus importante population dans les prochaines décennies. Cet accroissement démographique enregistré à l'échelle du bassin versant crée une situation concurrentielle remarquable entre besoins domestiques et besoins agricoles.

C'est dans ce contexte difficile que s'inscrit la présente étude, effectuée dans le cadre du Projet GEeauPlus *renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou*, qui dans son plan de mise au point d'outils de suivi de l'évolution de l'intensification de l'agriculture dans le bassin, a fait recours à la télédétection.

La présente étude ne recouvre pas entièrement le bassin versant du Kou, mais juste une de ses zones longeant la rivière Kou, celle où les pratiques agricoles sont considérables. La zone d'étude est située entre les villages Nasso au Sud et Diaradougou au Nord (figure 2), avec une superficie d'environ 1403,1 hectares et un périmètre de 30,63 Km environ. Elle connaît une agriculture irriguée intensive (choux, banane, maïs,...) entre la période de Janvier et Juin (pendant la saison sèche), grâce à une disponibilité abondante des ressources en eau, constituées essentiellement des eaux de la rivière Kou et des eaux de la nappe, peu profondes.

Les sols de la zone d'étude sont des sols peu évolués d'érosion sur matériaux gravillonnaires, des vertisols sur alluvions ou matériaux argileux, des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux, sablo argileux et argilo sableux et des sols ferralitiques (BUNASOLS, 2002). D'après Bonn.(1996), l'agriculture est devenue l'un des grands consommateurs de données de télédétection pour trois raisons principales:

- elle occupe la plus grande partie du territoire mis en valeur dans la majorité des pays en dehors de ceux dans lesquels les productions forestières jouent un rôle important;
- la densité des acteurs y est relativement faibles;
- les limites et le contenu des entités exploitées (exploitations agricoles, champs) qui composent le paysage agricole varient en permanence (ressource renouvelables).

Il est donc important de disposer d'un système d'information qui permette d'observer et d'analyser les paysages afin de connaître les productions et leur évolution au cours du temps. La télédétection, qui permet de couvrir rapidement de vastes superficies, est ainsi devenue une

source privilégiée d'acquisition d'informations complémentaires à celles obtenues à l'aide des autres techniques, car elle présente plusieurs avantages:

- elle permet une analyse exhaustive du territoire avec des données faciles à obtenir (si les conditions météorologiques sont favorables) en tout point de la planète;
- les jeux de données sont cohérents spatialement ou temporellement;
- les données obtenues sont plus objectives car elles résultent d'une mesure physique et leur interprétation peut être rendue indépendante du jugement individuel;
- les données sont acquises sous forme numérique, ce qui permet de les traiter et de les exploiter dans des délais raccourcis (Bonn, 1996).

La télédétection est ainsi utilisée comme un facteur primordial dans les stratégies économiques à l'échelle nationale ou régionale, la prise de décision, la mise en œuvre d'une politique (agricole par exemple)

Dans l'évolution de cette investigation, premièrement sont précisés les objectifs visés et l'hypothèse du travail; deuxièmement une approche appropriée pour l'atteinte des objectifs fixés est élaborée; troisièmement les résultats obtenus de cette approche à partir des données initiales, sont présentés. Pour terminer, les résultats sont analysés et discutés afin de faire une conclusion finale.

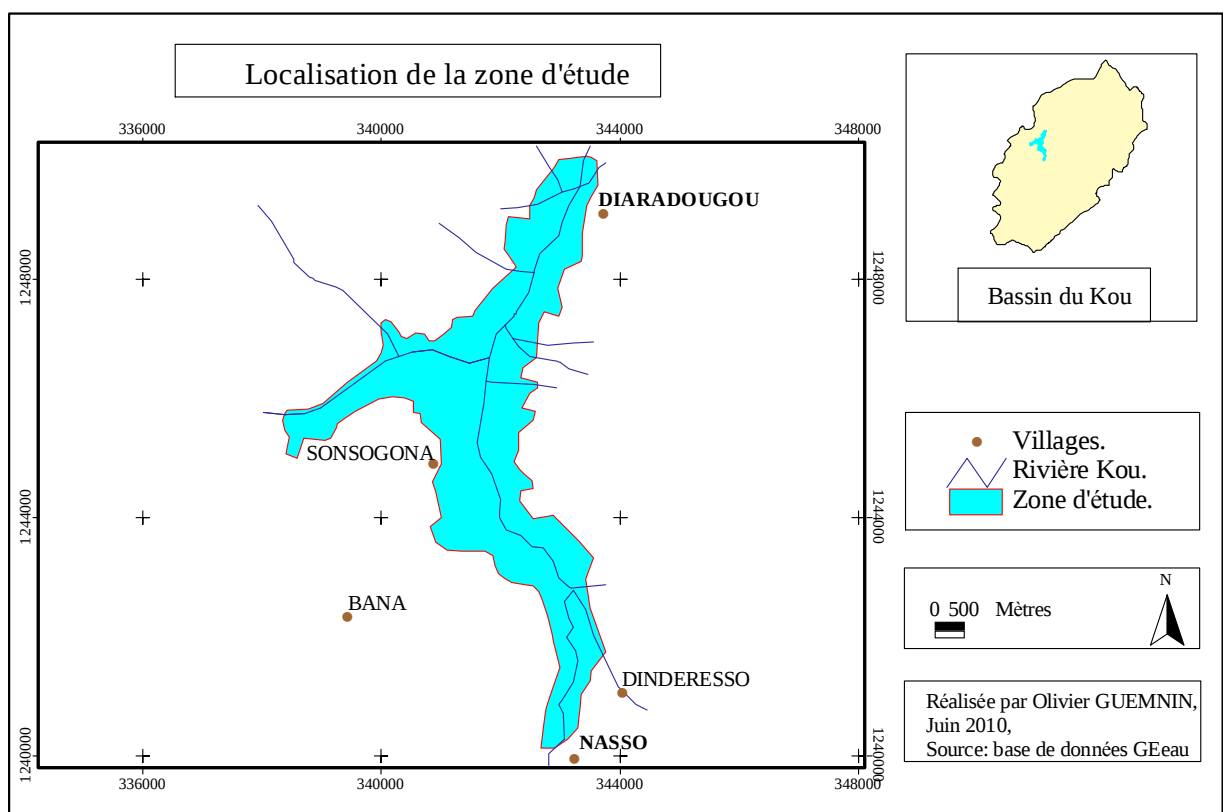


Figure 2: Localisation de la zone d'étude.

II. OBJECTIFS ET HYPOTHESE DU TRAVAIL

2.1 OBJECTIFS.

L'agriculture intensive est un système de production agricole axé sur l'accroissement de la productivité physique. Cet accroissement de productivité physique s'exprime par un accroissement du volume de production rapporté aux quantités de moyens utilisés. Car, elle est caractérisée par l'usage important ou optimal d'intrants (engrais chimiques, traitements herbicides, fongicides, insecticides, régulateurs de croissance, pesticides,...), et cherchant à maximiser la production par rapport aux facteurs de production, qu'il s'agisse de la main d'œuvre, du sol ou des autres moyens de production (matériel, intrants divers).

Dans la thématique de ce travail, il est important de remarquer que le terme « intensification » ne se réfère pas directement à une étude de l'agriculture intensive, mais plutôt à l'intensité de l'occupation des sols à des fins agricoles.

2.1.1 Objectif général

Le but de cette investigation est de se servir d'un traitement numérique d'images satellites bien approprié, pour estimer en termes de superficie l'évolution de l'occupation des terres par l'agriculture irriguée dans la zone d'étude (située dans le bassin versant du Kou). La connaissance des superficies d'occupation agricole dans le bassin est un élément déterminant pour des estimations futures de demandes agricoles en eau dans un contexte de gestion des ressources en eaux du bassin du Kou.

2.1.2 Objectifs spécifiques

Cheminer vers le but visée consisterait de façon spécifique à:

- Elaborer à partir des méthodes existantes de classification d'image, un protocole approprié de traitement numérique, qui permet d'effectuer une régionalisation de l'espace en classes d'occupation des terres.
- Évaluer les superficies occupées par les cultures irriguées dans les différentes années choisies, afin d'avoir pour chacune de ces années les pourcentages des sols exploités par la pratique de l'agriculture intensive (irriguée) dans la zone d'étude.
- Décrire l'évolution au cours du temps de ces superficies par la détermination d'un taux d'occupation des sols par les cultures irriguées dans le bassin du Kou, qui permettrait de faire des estimations pour des années à venir.

2.2 HYPOTHÈSE.

Le développement de cette investigation part principalement des deux hypothèses suivantes:

1. L'augmentation des superficies cultivées au cours du temps dans la zone d'étude ciblée.
En effet, une observation visuelle comparative de l'état des superficies en cultures irriguées au cours des années 1980 et au cours de années 2000 montre une augmentation importante des dites superficies à estimer (Wellens et al., 2008-b).
2. La possibilité d'estimer des superficies agricoles à partir des traitements numériques d'images satellites à moyenne résolution prises sur la zone d'étude considérée.

III. MATERIELS ET METHODES.

3.1 MATÉRIEL.

Le matériel utilisé au cours de cette étude se compose essentiellement de l'imagerie satellitaire, de prises de vues aériennes (PVA), de base de données agrométéorologiques et enfin de logiciels de traitement d'image, de systèmes d'information géographique, et d'analyses statistiques.

3.1.1 Imagerie.

L'imagerie utilisée est de type moyenne à haute résolution. Les images Landsat (Annexe 1) ont des résolutions spatiales de base de 30 m permettant leur exploitation pour le suivi de l'agriculture et de l'occupation du sol (Bastiaanssen et al., 2000). Toutefois, pour des entités (champs, par exemple) de moins de 30 m, les images Landsat ne permettent plus une bonne distinction, ce qui a tendance à créer des pixels de classe mixte.

Une image de haute résolution (PVA de 2007, annexe 2) est particulièrement utile dans le cadre de la vérification des classes des pixels.

Les images Landsat proviennent du site web de l'USGS [3]. Elles ont toutes été téléchargées gratuitement. La fenêtre concernée par notre zone d'étude est la suivante: path 197 ; row 52.

3.1.2 Logiciels utilisés.

ITT ENVI (Environment for Visualizing Images) est un logiciel permettant l'extraction d'informations à partir de l'imagerie géo spatiale. ITT ENVI propose à l'utilisateur des outils pour la lecture, l'exploration, l'analyse et le partage d'informations issues de l'imagerie. La version utilisée au cours de cette étude est ITT ENVI 4.3.

ESRI ArcGIS Desktop est une suite intégrée et extensible de logiciels SIG (Systèmes d'Information Géographique) professionnels. Elle permet de créer, importer, éditer, afficher, interroger, modéliser, analyser et gérer les données à caractères géographiques. La version utilisée au cours de cette étude est ESRI ArcGIS Desktop 9.2.

StatSoft Statistica est un logiciel proposant une large gamme d'outils d'analyse statistique, de gestion et de représentation graphique des données. La version utilisée au cours de cette étude est StatSoft Statistica 8.

3.1.3 Base de données GEeau.

La base de données du Projet GEeau a été constituée depuis le démarrage du Projet en début 2002, et enrichie au fil du temps. Cette base de données est très diversifiée et repose entre autres sur celles de la Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts-bassins (DRAHRH-HB), de l'Institut Géographique du Burkina, du

Projet Eaux Souterraines Bobo-Dioulasso, du Projet Ressources en Eaux du Sud-Ouest (RESO), etc.

La base de données comprend des données agrométéorologiques, des données cartographiques (SIG & Télédétection), des données d'enquête et recensements, sous formes diverses (ouvrages spécialisés, articles scientifiques, rapports, mémoires, posters, etc.).

Elle a été particulièrement sollicitée quant à l'utilisation de la mosaïque d'images de prises de vues aériennes (2007), ainsi que les résultats de vastes inventaires sur les pratiques hydro-agricoles dans le bassin versant du Kou (2007 et 2009) (Wellens et al., 2009; 2008-a).

La mosaïque de prises de vues aériennes réalisée en 2007 a permis l'échantillonnage des régions d'intérêt pour la classification des images satellite.

3.2 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE.

Afin de faciliter la détection des zones agricoles irriguées, la période concernée par l'étude se situe entre Janvier et Juin (contre-saison), où toutes les cultures sont irriguées à partir des eaux de surface et/ou des eaux souterraines du bassin versant. Ainsi ne sont pas prises en compte les zones agricoles situées sur les versants, tributaires des pluies (survenant entre Juin et Octobre).

3.2.1 Option de cadre d'étude

Le cadre d'étude adopté ici est une étude inter annuelle qui vise à estimer l'augmentation (à priori) des superficies cultivées à travers la comparaison des superficies agricoles de plusieurs dates, selon la disponibilité des données.

3.2.2 Type d'occupation des sols à identifier.

Les classes d'objets à distinguer sur les images choisies doivent être définies pour une classification qui vise à isoler les espaces agricoles. Puisque, d'une part la cible visée est l'agriculture irriguée et d'autre part les images, dont nous disposons sont de 30 m de résolution spatiale, la définition des types d'occupation des sols dans la zone d'étude est simplifiée. Ainsi, initialement seront distinguées, les classes culture irriguée, végétation naturelle et zone de parcours (intégrant les terres nues). Afin d'isoler finalement la classe culture. Les autres types d'occupation des sols sont non classés (plans d'eau, habitats,...).

3.2.3 Choix des images.

En fonction des données disponibles, l'étude inter annuelle choisie ici vise à estimer l'augmentation à priori des superficies cultivées à travers la comparaison des superficies de trois périodes.

De ce fait, nous avons porté notre intérêt sur les années 1988, 2000 et 2007. Cette étude inter annuelle a concerné les mois de Mai 1988, d'Avril 2000 et Mai 2007. Le mois de Mai (à l'instar

d'Avril) est considéré comme un mois d'intense activité en termes d'irrigation des plantes. Il se situe juste après le pic de températures chaudes du mois d'avril (30°C, d'après Traoré, 2007), favorisant une forte évapotranspiration des plantes.

En effet, parmi les images satellites disponibles, prises sur le bassin du Kou, sont choisies celles réalisées lors des stades phénologiques appropriés pour une meilleure identification de la couverture de la culture irriguée en particulier. C'est-à-dire des images prises pendant les mois de Mars, d'Avril ou de Mai à la limite.

Sur le point de vue qualité des images, la couverture nuageuse existante ne doit recouvrir le secteur des images contenant la zone d'étude.

Sur la base de ces critères, les images sélectionnées sont comprises entre 1988 et 2007. Toutefois, le choix des images a été limité par le manque d'images de qualité pour la décennie 1990-2000.

En outre, nous avons été limités par l'utilisation des images du capteur Landsat-7 ETM+ à celles dites « SLC on », soit celles datant d'avant le 31 Mai 2003 [1]

Un outil de correction des images Landsat-7 ETM+ « SLC off » est disponible gratuitement depuis peu, sur un lien du site web de la NASA [2]. Le temps imparti à cette étude n'a pas permis de corriger les images afin de les utiliser dans le traitement.

3.2.4 Bandes spectrales retenues.

Le proche infrarouge, le rouge et le vert qui sont caractéristiques des réponses spectrales des couvertures végétales, correspondent respectivement aux bandes TM 4, TM 3 et TM 2 des images Landsat TM. Ainsi, pour chaque image Landsat TM sélectionnées, seules les bandes spectrales TM 4, TM 3 et TM 2 sont retenues pour les traitements. De plus, une composition colorée «4-3-2» faite avec ces trois bandes permette une meilleure visualisation de la réponse des formations végétales qui se présentent en différents gradients de rouge.

3.3 PROTOCOLE DE CLASSIFICATION

Le but visé ici est de déterminer les superficies occupées par les cultures irriguées au sein de la zone d'étude à partir des images Landsat TM sélectionnées parmi celles disponibles. Pour y parvenir, on procède à une segmentation de l'espace spectral en classes reflétant des surfaces terrestres d'étendue variable plus ou moins identiques afin de ressortir celles représentant les zones occupées par l'agriculture irriguée en particulier.

Cependant la végétation naturelle et les cultures ont des signatures spectrales très proches au regard des résolutions spatiale et spectrale des scènes (Caloz et al.,2001), aussi au regard des méthodes purement statistiques de traitements envisagées. Leur séparabilité peut être très faible et constitue la principale difficulté à lever dans l'exécution des classifications dans cette étude.

Le protocole de classification élaboré ici, vise d'abord à extraire les surfaces végétales, puis à les classer en culture irriguée et végétation naturelle tout en minimisant leur confusion. Il s'appuie donc sur la combinaison de deux méthodes de classification des images, à savoir: la méthode par maximum de vraisemblance et par arbre de décision.

La deuxième méthode intervient dans le processus de classification en tant qu'outil de prise de décision dans la mesure où la première ne serait pas parvenue à réduire de façon acceptable la confusion des pixels (culture et végétation naturelle).

La procédure adoptée pour le traitement numérique des images Landsat TM choisie, suit la logique de la procédure méthodologique utilisée par Corentin et al. (2001). Elle est constituée principalement de trois phases: le prétraitement, la classification par «maximum de vraisemblance» et éventuellement la classification par «arbre de décision»:

3.3.1 Prétraitement.

Cette phase consiste à préparer les images Landsat TM sélectionnées pour rendre les opérations de classification plus optimales et plus rapides. Dans cette étude, le prétraitement des images est constitué successivement des trois étapes suivantes:

Etape 1: Découpage de chaque image Landsat TM sélectionnée, afin de ne retenir d'elle qu'une portion d'image présentant la zone étudiée.

Ce découpage est fait à partir des coordonnées géographiques du secteur ciblé. Chaque portion d'image obtenue est enregistrée en considérant seulement les bandes spectrales TM4, TM3 et TM2.

Etape 2: Calibrage en réflectance des bandes spectrale TM4, TM3 et TM2 de chacune des portions d'image obtenues dans l'étape précédent.

Le calibrage en réflectance est une forme de normalisation des bandes spectrales d'images satellites, en raison du fait que celles-ci sont prises soit par des capteurs différents et ou soit à des dates différentes, afin de les ramener dans une base commune avant d'effectuer sur elles des traitements. Une comparaison d'images traitées dans ces conditions de normalisation, serait judicieuse et plus exacte.

Cette étape consiste en des opérations mathématiques effectuées individuellement à chaque bande spectrale. Les procédures utilisées pour le calibrage en réflectance dans le cas de ce travail, sont celles proposées par la NASA (Chander et al., 2009).

Etape 3: Création d'une image arithmétique de type NDVI pour chaque portion d'image calibrée en réflectance.

En fait, l'exécution de la méthode par «arbre de décision» nécessite ici des analyses statistiques effectuées sur les profils d'une grandeur caractéristique de la couverture végétale en télédétection. Il s'agit du NDVI, l'indice de végétation normalisé.

En effet la couverture végétale est différente des autres types de surface en raison de sa tendance forte à absorber les longueurs d'ondes dans le rouge du rayonnement solaire, et à réfléchir dans le proche infrarouge. Le NDVI est donc une mesure de la différence de réflectance de ces deux longueurs d'onde. Tel qu'il est défini, les valeurs de NDVI se situent entre -1 et 1.

L'obtention d'une image NDVI se fait à partir des bandes spectrales TM4 et TM3 (canal du proche infrarouge et canal du rouge respectivement des capteurs Landsat TM) calibrées en réflectance par l'opération suivante:

$$\text{NDVI} = (\text{TM4} - \text{TM3}) / (\text{TM4} + \text{TM3})$$

Les différentes bandes NDVI générées serviront d'une part à la production des profils de valeurs de NDVI des pixels ciblés pour les différentes analyses statistiques à faire, et d'autre part la classification des pixels de formations végétales.

3.3.2 Classification par «maximum de vraisemblance».

La méthode par «Maximum de vraisemblance» est exécutée pour classer les pixels de différentes portions d'image dont les bandes sont calibrées en réflectance. Vu ses performances, elle a à priori pour but de retrouver tous les pixels représentant les deux formations végétales (culture et végétation naturelle) en les séparant de ceux des zones de parcours.

Il est important de savoir que cette première classification pourrait bien être la classification finale, s'il arrivait qu'à l'issue de l'application du «maximum de vraisemblance», la confusion constatée entre les pixels des deux formations végétales à distinguer, soit négligeable.

Cette phase est comme la précédente effectuée en trois étapes:

Etape 4: Détermination des classes de signatures

Les zones-échantillon ou zones d'intérêt (appelées ROIs dans ITT ENVI) de culture irriguée, de végétation naturelle et zone de parcours sont créées pour chaque portion d'image. Les zones d'intérêt servent de témoin, car elles sont constituées par des zones où on a la connaissance et la certitude du type d'occupation des sols.

Il faut noter que les zones d'intérêt de chaque portion d'image donnée sont enregistrées en deux groupes. Le premier groupe sera utilisé comme sites d'entraînement pour l'exécution de la méthode par maximum de vraisemblance et le deuxième servira de référence pour évaluer la qualité de la classification faite (échantillons de validation).

Etape 5: Application de la méthode par «maximum de vraisemblance» à chaque portion d'image dont les bandes sont calibrées en réflectance.

La classification par «maximum de vraisemblance» utilise des zones-échantillon (ou sites d'entraînement, premier groupe de ROIs) pour déterminer les caractéristiques des classes d'objets.

L'algorithme de cette méthode présuppose que les statistiques des sites d'entraînement de chaque classe suivent une distribution gaussienne. L'algorithme utilise ensuite les statistiques des sites d'entraînement pour calculer la probabilité d'appartenance du pixel à une classe en particulier. Cette approche permet d'introduire un facteur de variance spectrale intra classe. L'analyste peut aussi utiliser une connaissance à priori pour pondérer la fonction de probabilité [4].

La méthode du maximum de vraisemblance fait partie des classificateurs dits paramétriques puisqu'elle fait intervenir les informations relatives à la classe d'appartenance du pixel sous forme de probabilité.

Selon Caloz et al (2001), le défaut des approches paramétriques dérive de leur qualité dans la mesure où elles exigent une hypothèse de distribution paramétrique sur les signatures. La nature est trop souvent hétérogène et éloignée de la distribution multi normale à laquelle on fait appel généralement. On observe dans la réalité des histogrammes qui présentent des comportements non gaussiens.

Toutefois, aucune autre méthode de classification se basant sur des statistiques n'offre des performances nettement plus élevées que la méthode de maximum de vraisemblance (Caloz & al., 2001).

Etape 6: Validation ou évaluation de la qualité de la classification de pixels faite par Maximum de vraisemblance.

Il s'agit ici de vérifier l'appartenance de chaque pixel classé à la classe qui lui est réellement destinée. Cette vérification est faite par le biais d'une matrice de confusion, où sont comparés en termes de rapports d'accords/désaccords des pixels des classes obtenues d'une classification et ceux des zones d'intérêt prévues comme référence (deuxième groupe de zones d'intérêt, étape 4). L'évaluation de la classification est théoriquement donnée par la précision globale (en pourcentage) et par le coefficient Kappa (K) de la matrice d'erreur ou matrice de confusion.

La précision globale désigne le pourcentage de pixels correctement classifiés [5]. Cette précision résume le total d'accords/désaccords entre deux éléments (résultat d'une classification et ROI de référence) et ne prend en compte que la diagonale principale de la matrice de confusion, en excluant les autres éléments de la matrice. Son expression est de la forme: $(D/N) \times 100$, avec D

le nombre total de pixels correctement classifiés sur la diagonale principale et N le nombre total de pixels dans la matrice de confusion.

L'analyse du coefficient Kappa (K) est une technique multi variée, utilisée pour l'estimation de la précision pour la détermination statistique afin de savoir si une matrice d'erreur est significativement différente d'une autre (Bishop et al., 1975 in Zhan et al., 2002). Le coefficient Kappa varie entre 0 et 1. Il s'exprime comme:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}$$

Avec

r : Nombre de lignes de la matrice de confusion.

x_{ii} : Nombre d'observations dans la ligne i et la colonne i (diagonale de la matrice).

x_{i+} : Total des observations dans la ligne i .

x_{+i} : Total des observations dans la colonne i .

N : Nombre total d'observations dans la matrice de confusion.

3.3.3 Classification par «arbre de décision».

Il s'agit ici de reclasser éventuellement les pixels de couverture végétale pré-classée par «Maximum de vraisemblance», en essayant de réduire les confusions entre les cultures irriguées et la végétation naturelle, en se servant d'un outil d'aide à la décision.

Cette classification doit en principe intervenir dans le cas où les confusions sont grandes entre les deux types de formation végétale, du point de vue de l'observation visuelle à partir des PVA et du point de vue «théorique» selon la matrice d'erreur. Toutefois, il serait intéressant de l'appliquer par défaut à toutes les images, afin de faire des comparaisons et des constats.

La méthode utilisée ici est l'arbre de décision (Malek, 2008) avec pour variable le NDVI.

D'après White (1996), une discrimination peut être faite entre végétation naturelle et cultures en utilisant une limite inférieure de NDVI de 0.4, qui sépare le groupe des herbes et arbustes du groupe des cultures. La théorie utilisée pour la proposition de ce seuil NDVI de 0.4 se base sur le fait que pour un tel seuil, 75% de la radiation photosynthétiquement active (photosynthetically active radiation, PAR) a été absorbée. Les forêts et les cultures sont supposées absorber plus que 75% de PAR.

Dans cette étude, la détermination des seuils NDVI se base sur les résultats d'une analyse statistique des profils NDVI des pixels représentatifs des échantillons.

Cette phase est ainsi constituée de quatre étapes:

Etape 7: Extraction des signatures NDVI des échantillons de culture irriguée et de végétation naturelle sélectionnés parmi les pixels pré-classés comme couverture végétale.

Les profils NDVI des échantillons obtenus à ce niveau, sont destinés à une analyse statistique pour la détermination des seuils NDVI de séparation des différents types d'occupation des terres.

Etape 8: Détermination des seuils NDVI.

Dans le cas de ce travail, la détermination des sets de seuils NDVI, élément sur lequel porte la prise de décision, est basée sur une analyse statistique assez approfondie des profils NDVI des pixels d'échantillons représentatifs de culture irriguée et de végétation naturelle (vérité de terrain).

D'autre part, il serait intéressant si un set de seuils NDVI défini pour l'une des images à traiter, soit également applicable à toutes les autres images. Car la comparaison de deux résultats de classifications effectuées selon un même set de seuils NDVI, paraît théoriquement plus juste.

Cependant, il se trouve que les valeurs de NDVI varient en fonction des stades phénologiques, c'est-à-dire que les pixels (représentant une même formation végétale) d'images prise à des dates différentes ont des plages de NDVI différentes.

Alors, pour minimiser les erreurs commises en appliquant un même set de seuils NDVI d'une image à l'autre, celui retenu est déterminé à partir d'une analyse statistique portant sur les profils NDVI des pixels de formation végétale de l'ensemble de toutes les images à traiter.

Il serait judicieux de faire une comparaison entre les sets individuels de seuils NDVI et le set général au travers des différents résultats de classifications faites à partir de chacun d'eux.

Etape 9: Classifications selon les «arbres de décision» des pixels de chaque portion d'image à bande NDVI.

Il s'agit de concevoir, d'une part un arbre de décision pour chaque image à partir de son set propre de seuils NDVI et d'autre part un arbre unique de décision pour toutes les images à partir du set général de seuils NDVI. Par la suite, les classifications seront faites selon ces différents arbres de décision conçus.

Etape 10: Validation ou évaluation de la qualité de la classification des pixels, faite par arbre de décision.

De même qu'à l'étape 6, la qualité des résultats des classifications effectuées par les arbres de décision, est évaluée à partir des échantillons définis initialement à l'étape 7, à l'aide d'une matrice de confusion.

IV. RESULTATS.

4.1 RÉSULTATS DE LA PHASE DE PRÉTRAITEMENT: PORTIONS D'IMAGE CONTENANT LA ZONE ÉTUDIÉE.

Les trois figures suivantes représentent les portions d'image à traiter qui sont des surfaces rectangulaires qui recouvrent la zone d'étude. Ces portions d'image sont affichées en composition colorée 4-3-2

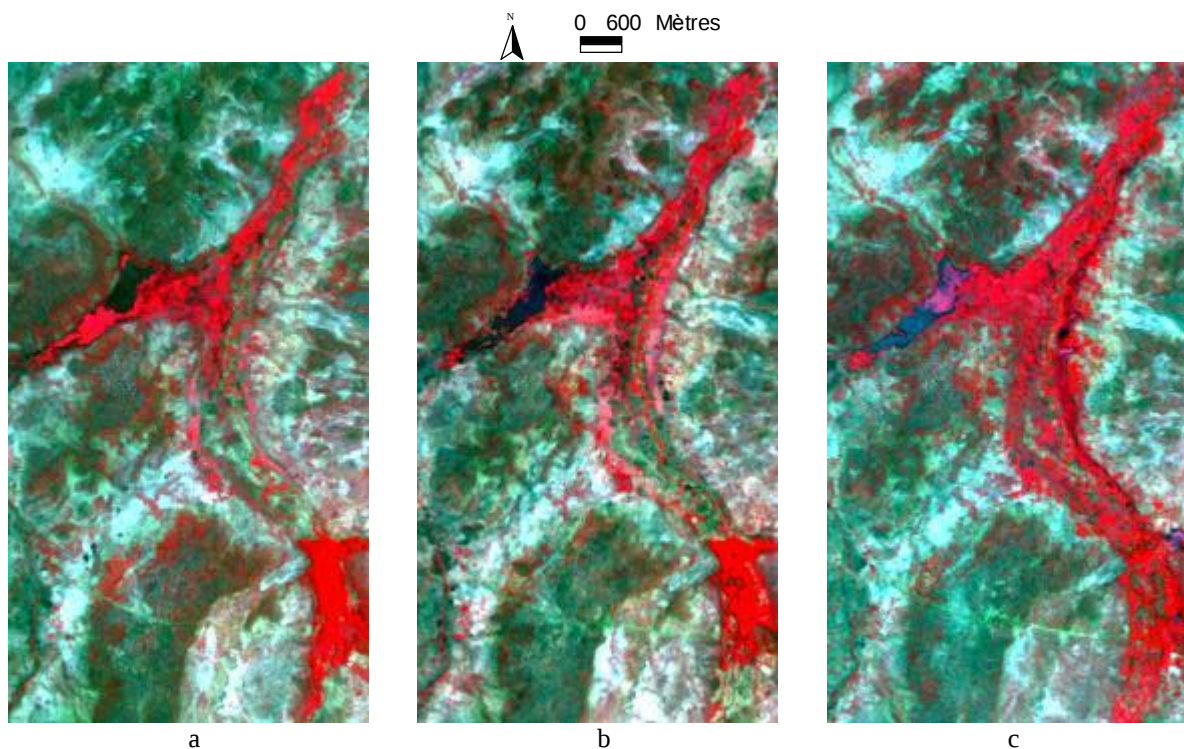


Figure 3: Portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988 (a), Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000 (b) et Landsat-5 TM du 18 Mai 2007 (c), en composition colorée 4-3-2.

4.2 RÉSULTATS DES CLASSIFICATIONS PAR «MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE».

4.2.1 Représentations géographiques des résultats des classifications par «maximum de vraisemblance».

Les signatures spectrales de zones d'entraînement (ROIs dans ENVI) des classes «culture», «végétation naturelle» et «zone de parcours» (annexe 4), ont permis par la méthode de «maximum de vraisemblance», de donner une classe d'appartenance à chaque pixel des différentes images. C'est ainsi, qu'on retrouve certains pixels classés comme «culture», comme «végétation naturelle» ou alors comme «zone de parcours» et d'autres présentés comme «non classé» (ceux dont le classificateur n'est pas parvenu à les identifier comme appartenant à l'une des classes préalablement définies dans l'échantillonnage).

Les trois figures suivantes sont des représentations géographiques des résultats des classifications effectuées par «maximum de vraisemblance» pour les images. Pour une meilleure visualisation, dans la présentation des différents résultats de classifications, tout est restreint à la zone d'étude.

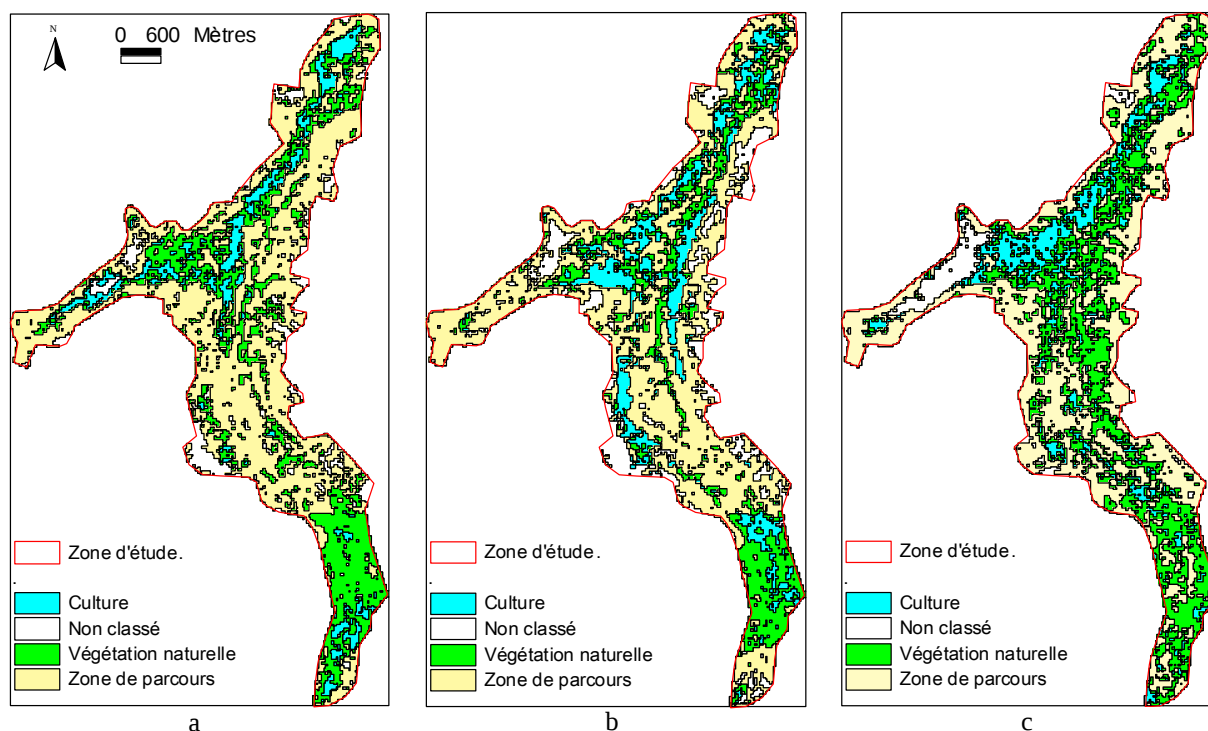


Figure 4: Représentations géographiques des résultats des classifications par Maximum de vraisemblance des portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988 (a), Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000 (b) et Landsat-5 TM du 18 Mai 2007 (c).

4.2.2 Estimation de superficies des types d'occupation des sols.

Une fois une classification terminée, il est aisé d'estimer les superficies des types d'occupation des sols définis. Le principe est simple: à chaque classe est attribué un nombre pixels à l'issue d'une classification; sachant qu'un pixel représente un carré de 30 m x 30 m (0.09 ha), une simple multiplication donne les superficies recherchées.

Les estimations de superficies relatives pour le «maximum de vraisemblance» (Tableau 1) donnent sur l'ensemble de la zone d'étude:

- 9.65% (135.45 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées et 39.54% (399.51 ha) à la classe végétation naturelle, le 05 Mai 1988;
- 15.87% (222.75 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées et 19.87% (278.82 ha) à la classe végétation naturelle, le 20 Avril 2000;
- 14.97% (210.15 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées et 33.41% (468.81 ha) à la classe végétation naturelle, le 18 Mai 2007.

Tableau 1: Estimations des superficies d'occupation des sols à partir des classifications effectuées par Maximum de vraisemblance.

Date	type d'occupation	Nombre de pixels	Superficie (ha)	Pourcentage
05-mai-88	Non classé	1207	108.63	7.7421
	Culture	1505	135.45	9.6536
	Végétation naturelle	4439	399.51	28.4734
	Zone de parcours	8439	759.51	54.1309
	Total	15590	1403.1	100
20-avr-00	Non classé	2120	190.8	13.5985
	Culture	2475	222.75	15.8756
	Végétation naturelle	3098	278.82	19.8717
	Zone de parcours	7897	710.73	50.6543
	Total	15590	1403.1	100
18-mai-07	Non classé	846	76.14	5.4266
	Culture	2335	210.15	14.9775
	Végétation naturelle	5209	468.81	33.4124
	Zone de parcours	7200	648	46.1835
	Total	15590	1403.1	100

4.3 RÉSULTATS DE LA CONCEPTION DES ARBRES DE DÉCISION.

4.3.1 Résultats des analyses **statistiques** des Profils NDVI.

Dans le but de déterminer les seuils de NDVI de séparation entre la culture et la végétation naturelle, des analyses statistiques sont effectuées sur des profils NDVI des pixels d'échantillons des deux types de formations végétales respectivement.

▪ **Statistiques descriptives des profils NDVI des pixels des échantillons des deux formations végétales:**

Les statistiques descriptives des profils NDVI des pixels-échantillon de culture et de végétation naturelle sont présentées dans le tableau suivant.

Les données fournies par ces statistiques permettent d'entrevoir les possibilités de séparation des deux types de couvertures végétales. Comme par exemple les valeurs minimales, maximales, moyennes des différents échantillons (tableau).

Il est important de remarquer, que les statistiques sont effectuées d'une part sur les pixels-échantillon propres à chaque image et d'autre part sur l'ensemble pixels-échantillon de toutes les images.

Au regard des diagrammes de dispersion qui leur sont associés (voir Annexe 5), ces statistiques montrent que les valeurs de NDVI des deux classes présentent assez de chevauchements qui rendent très complexe la discrimination des deux classes.

Tableau 2: Statistiques descriptives des profils NDVI des pixels-échantillon des différentes années individuellement.

Date	Echantillon	Nombre de Pixels	Min	Max	Moy	Ecart Type	Précision type
05-mai-88	Culture	70	0.408545	0.51279	0.457607	0.025038	0.002994
	végétation naturelle	60	0.306609	0.485276	0.385024	0.052998	0.006842
20-avr-00	Culture	80	0.179617	0.449709	0.327572	0.060167	0.006727
	végétation naturelle	70	0.180619	0.379456	0.268029	0.054273	0.006487
18-mai-07	Culture	70	0.440036	0.58075	0.513649	0.027577	0.003296
	végétation naturelle	60	0.383019	0.552969	0.466839	0.040357	0.005210
Générale	Culture	220	0.179617	0.58075	0.428153005	0.089734789	0.006049918
	végétation naturelle	190	0.180619	0.552969	0.367756695	0.09672357	0.007017065

Date	Echantillon	Variance	Médiane	Quartile Inf	Quartile Sup	limite de Confidence -90 %	+90 %
05-mai-88	Culture	0.000627	0.454944	0.440023	0.474362	0.452616	0.462598
	végétation naturelle	0.002809	0.372471	0.340941	0.421516	0.373590	0.396458
20-avr-00	Culture	0.003620	0.335317	0.291361	0.363915	0.316376	0.338768
	végétation naturelle	0.002946	0.267951	0.223505	0.300701	0.257214	0.278844
18-mai-07	Culture	0.000760	0.510669	0.494114	0.531086	0.508153	0.519144
	végétation naturelle	0.001629	0.466994	0.442002	0.499651	0.458132	0.475545
Générale	Culture	0.008052	0.452696	0.358620	0.495218	0.418160	0.438147
	végétation naturelle	0.009355	0.366515	0.290564	0.452998	0.356158	0.379356

▪ Test Non paramétrique de Kolmogov-Smirnov:

Le test de Kolmogov-Smirnov vise à caractériser les différences entre deux distributions qu'on voudrait séparer. Le test effectué vient du fait qu'en raison de l'enchevêtrement des données des classes de végétation et de cultures (voir Annexe 5), il importait, à travers des tests, de voir si les moyennes des échantillons des classes étaient significativement différentes. Ceci bien entendu, après avoir vérifié la non-normalité des distributions. Sinon en cas de normalité avérée des échantillons, on aurait plutôt procédé à une simple analyse de variance (ANOVA).

Les résultats de ces tests indiquent qu'il n'existe pas de différence significative entre les moyennes des deux échantillons pour chaque paire considérée (voir Tableau 3).

Tableau 3: Résultat du test de Kolmogorov-Smirnov sur les données NDVI des 2 groupes d'échantillons.

Date	Difference nég. max	Difference pos. Max	niveau de probabilité	Moyenne Culture	Moyenne végétation naturelle
05-mai-88	0.00	0.690476	p < .001	0.457607	0.385024
20-avr-00	-0.012500	0.489286	p < .001	0.327572	0.268029
18-mai-07	0.00	0.550000	p < .001	0.513649	0.466839
Général	-0.004545	0.295694	p < .001	0.428153	0.367757

▪ Arbres de classification des pixels des portions d'images:

Un arbre de classification proposé par des analyses statistiques effectuées dans le cadre de cette, présente une valeur-seuil de NDVI pour une séparation possible des deux types d'occupation des sols (culture et végétation naturelle) pour la distribution considérée.

Les valeurs-seuil de NDVI de séparation obtenues à partir des analyses statistiques des différentes distributions de pixels-échantillon, sont de:

- 0.408024 pour la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988;
- 0.315884 pour la portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000;
- 0.473839 pour la portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007;
- 0.421318 comme seuil général pour l'ensemble des images.

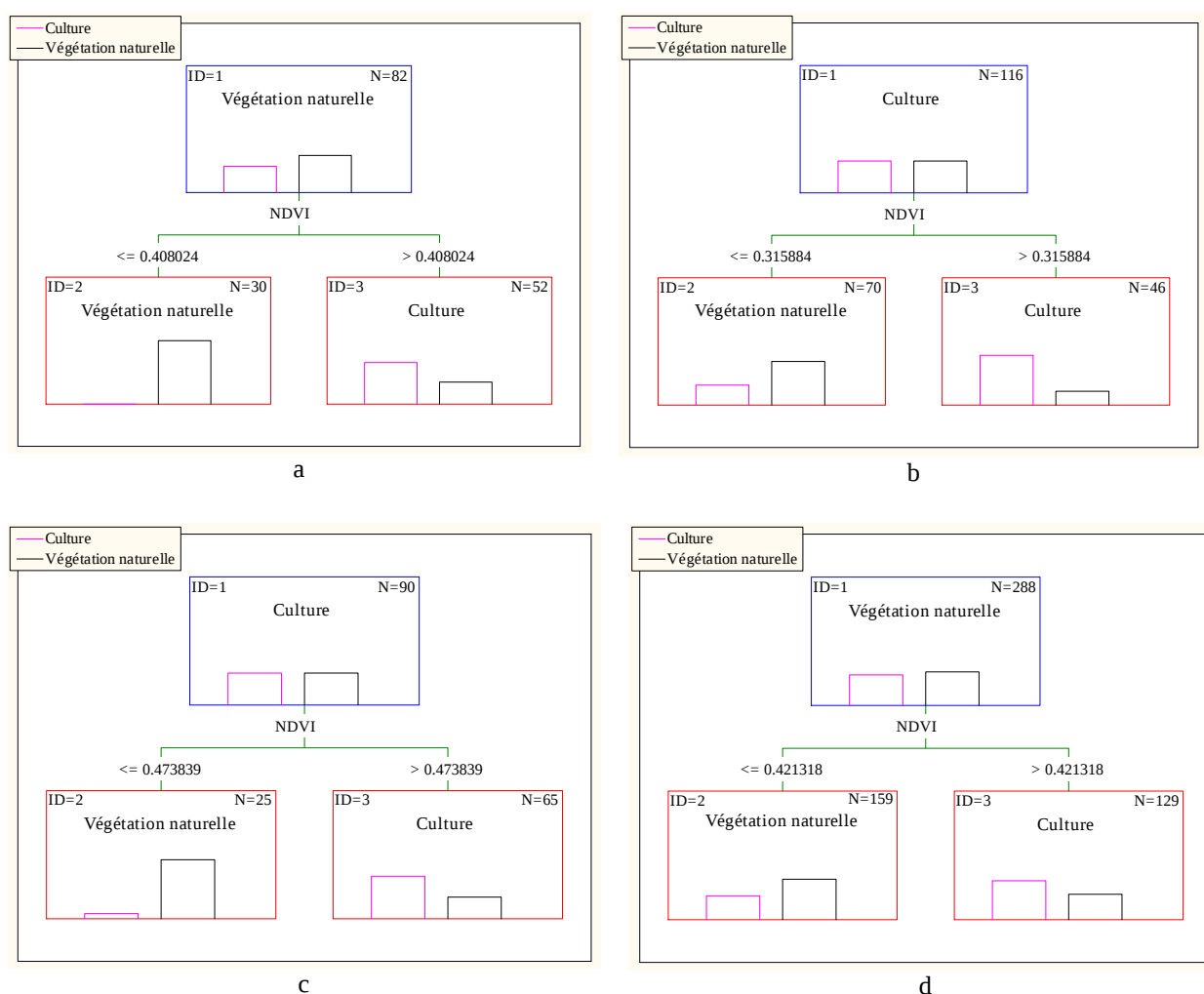


Figure 5: Arbres individuels de classification de pixels, proposés par l'analyse statistique pour les portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988 (a), Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000 (b), Landsat-5 du 18 Mai 2007 (c) et général pour les 3 portions d'image (d).

Aux valeurs-seuil présentées ci-dessus, les analyses statistiques associent deux classes: une classe mixte (de culture et végétation naturelle) où la végétation naturelle est dominante et une autre classe mixte pour laquelle, la classe des cultures est dominante (voir figure 5).

Il est important de remarquer que sur les arbres de classification ci-dessous, les classes à retenir sont représentées par des rectangles à bordures rouges.

4.3.2 Arbres de décision et sets de seuils NDVI retenus pour la génération de nouvelles classes.

Les arbres de décisions ci-dessous (figure 6) présentés, sont le résultat d'une prise de décision pour la séparation des deux types de formations végétales, à partir des données de statistiques descriptives des pixels-échantillon présentées plus haut et aussi des valeurs-seuil de NDVI proposées par les analyses statistiques.

Sur la figure 6, on distingue ainsi, trois premiers arbres de décision associés chacun individuellement à une image pour la classification de ses pixels et un quatrième pour effectuer des classifications sur toutes les images selon les valeurs-seuil communes.

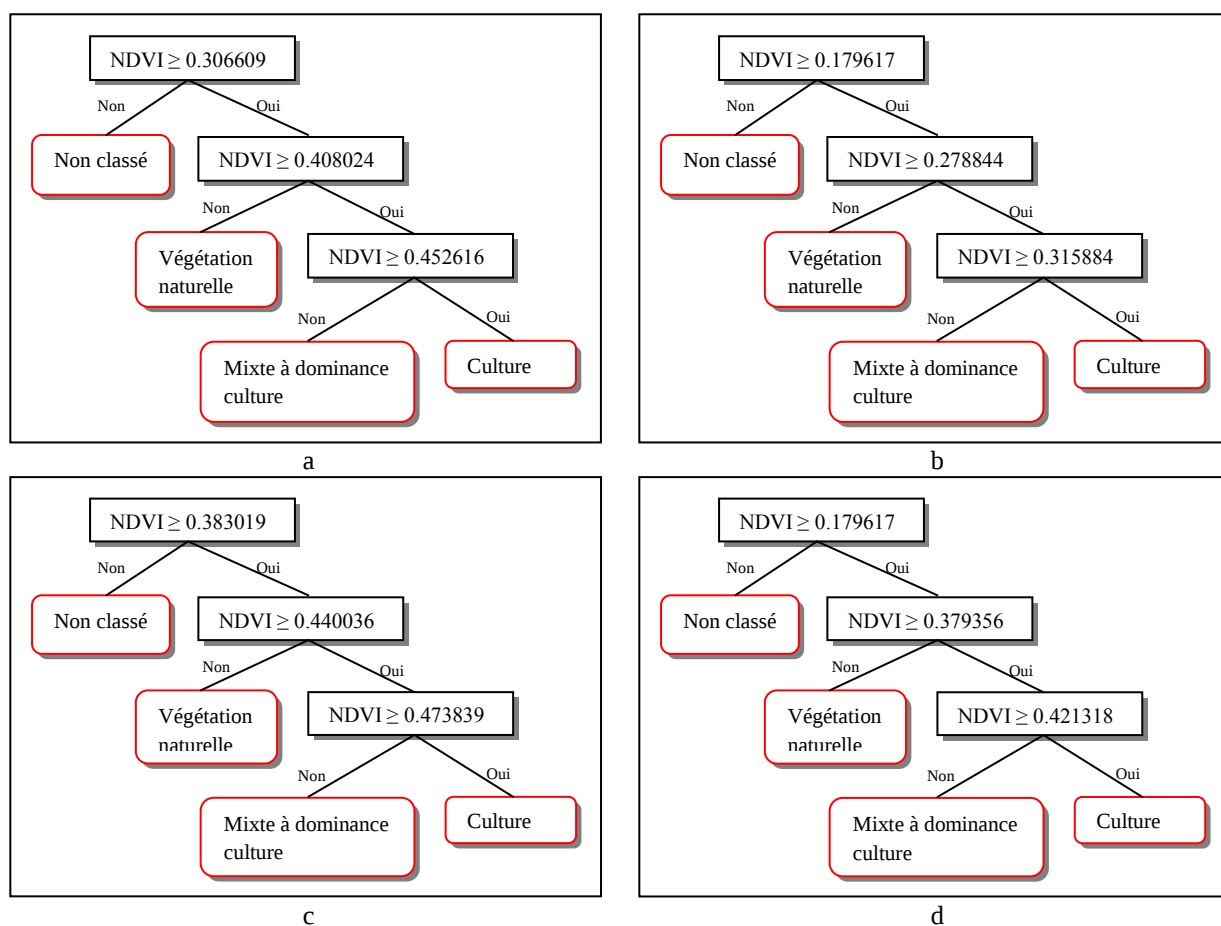


Figure 6: Arbres de décision et sets de seuils NDVI individuels, retenus pour la classification des pixels des portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988 (a), Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000 (b), Landsat-5 TM du 18 Mai 2007 (c) et généraux pour les 3 portions d'image (d).

Dans chaque arbre, les classes (types d'occupation des sols) à distinguer sont représentées par des cadres à bordures rouges et les valeurs-seuils NDVI de séparation sont présentées dans rectangles à bordures noires.

Pour la séparation des différentes classes définies, en plus des valeurs-seuil de NDVI proposées par les arbres de régression (figure 5), nous avons pris en compte certaines valeurs minimales, maximales et de limites de confiance présentées dans le tableau 2 (valeurs soulignées), pour en faire d'autres valeur-seuil de NDVI.

4.4 RÉSULTATS DES CLASSIFICATIONS SELON LES ARBRES DE DÉCISION INDIVIDUELS.

4.4.1 Représentations géographiques des résultats des classifications effectuées par les Arbres de décision individuels.

Les trois figures suivantes cartographient plus ou moins les résultats des classifications faites selon les arbres de décision propres à chaque image.

Dans les figure 7a et 7b particulièrement, la forêt classée de Dindéresso (au sud de la zone d'étude) est représentée en classe culture; et dans une moindre mesure dans la figure 7c.

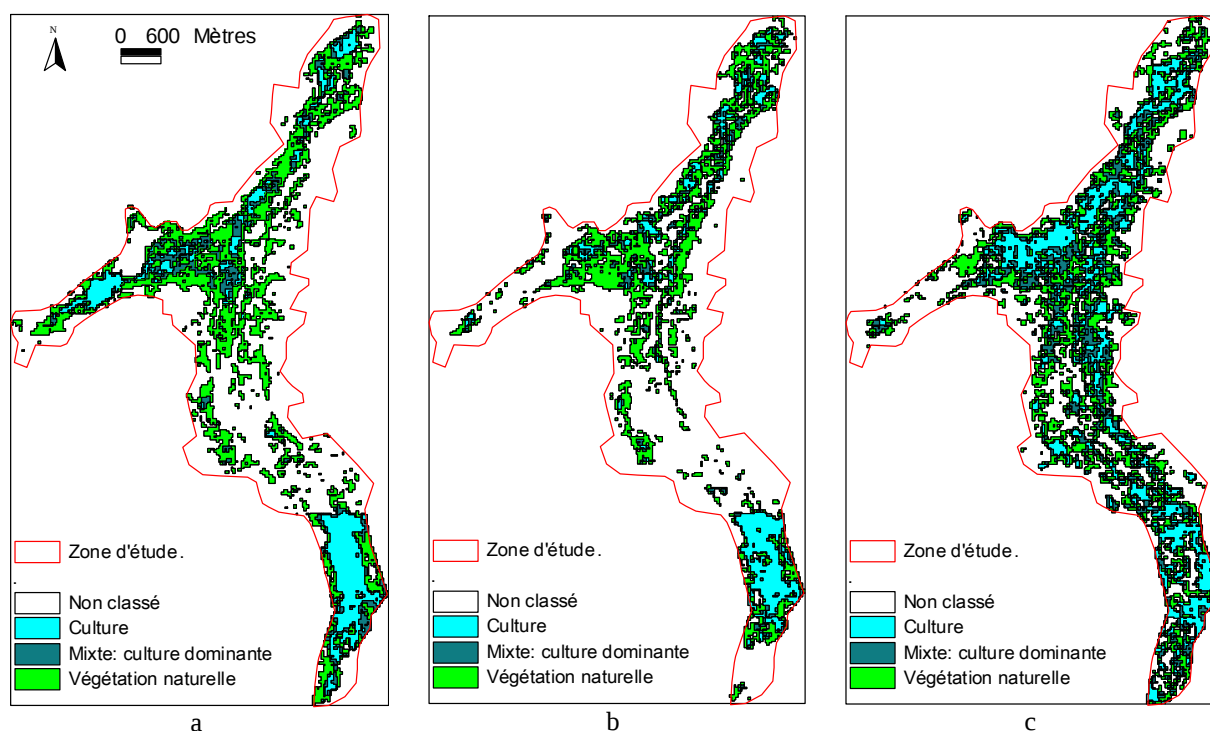


Figure 7: Représentations géographiques des résultats des classifications faites par les arbres de décision individuels des portions d'image Landsat-4 TM 05 Mai 1988 (a), Landsat-7 ETM+ 20 Avril 2000 (b) et Landsat-5 TM 18 Mai 2007 (c).

4.4.2 Estimation de superficies des types d'occupation des sols.

Les estimations de superficies relatives pour les arbres de décision individuels (Tableau 4) donnent sur l'ensemble de la zone d'étude:

- 10.48% (147.15 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées, 7.48% (127.62 ha) à la classe mixte et 25.25% (354.33 ha) à la classe végétation naturelle, le 05 Mai 1988;

- 9.09% (127.62 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées, 5.02% (70.56 ha) à la classe mixte et 20.61% (289.26 ha) à la classe végétation naturelle, le 20 Avril 2000;
- 17.83% (250.2 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées, 15.07 (211.5 ha) à la classe mixte et 23.32% (327.33 ha) à la classe végétation naturelle, le 18 Mai 2007.

Tableau 4: Estimations des superficies des types d'occupation des sols à partir des classifications effectuées par les arbres de décision individuels.

Date	type d'occupation	Nombre de pixels	Superficie (ha)	Pourcentage
05-mai-88	Non classé	8851	796.59	56.7736
	Culture	1635	147.15	10.4875
	Mixte à dominance culture	1167	105.03	7.4856
	Végétation naturelle	3937	354.33	25.2534
	Total	15590	1403.1	100
20-avr-00	Non classé	10174	915.66	65.2598
	Culture	1418	127.62	9.0956
	Mixte à dominance culture	784	70.56	5.0289
	Végétation naturelle	3214	289.26	20.6158
	Total	15590	1403.1	100
18-mai-07	Non classé	6823	614.07	43.7652
	Culture	2780	250.2	17.8319
	Mixte à dominance culture	2350	211.5	15.0738
	Végétation naturelle	3637	327.33	23.3291
	Total	15590	1403.1	100

4.5 RÉSULTATS DES CLASSIFICATIONS SELON L'ARBRE DE DÉCISION GÉNÉRAL.

4.5.1 Représentations géographiques des résultats des classifications effectuées par l'arbre de décision général.

De même, ci-dessous sont cartographiés les résultats de cette classification selon l'arbre général.

Dans les figures 8a et 8c, les sols nus en périphérie de la zone d'étude sont représentés en classe de végétation naturelle. La forêt classée de Dindéresso au Sud de la zone d'étude est en classe culture.

Quant à la figure 8b, elle ne présente aucune surface de culture dans la partie Nord de la zone d'étude.

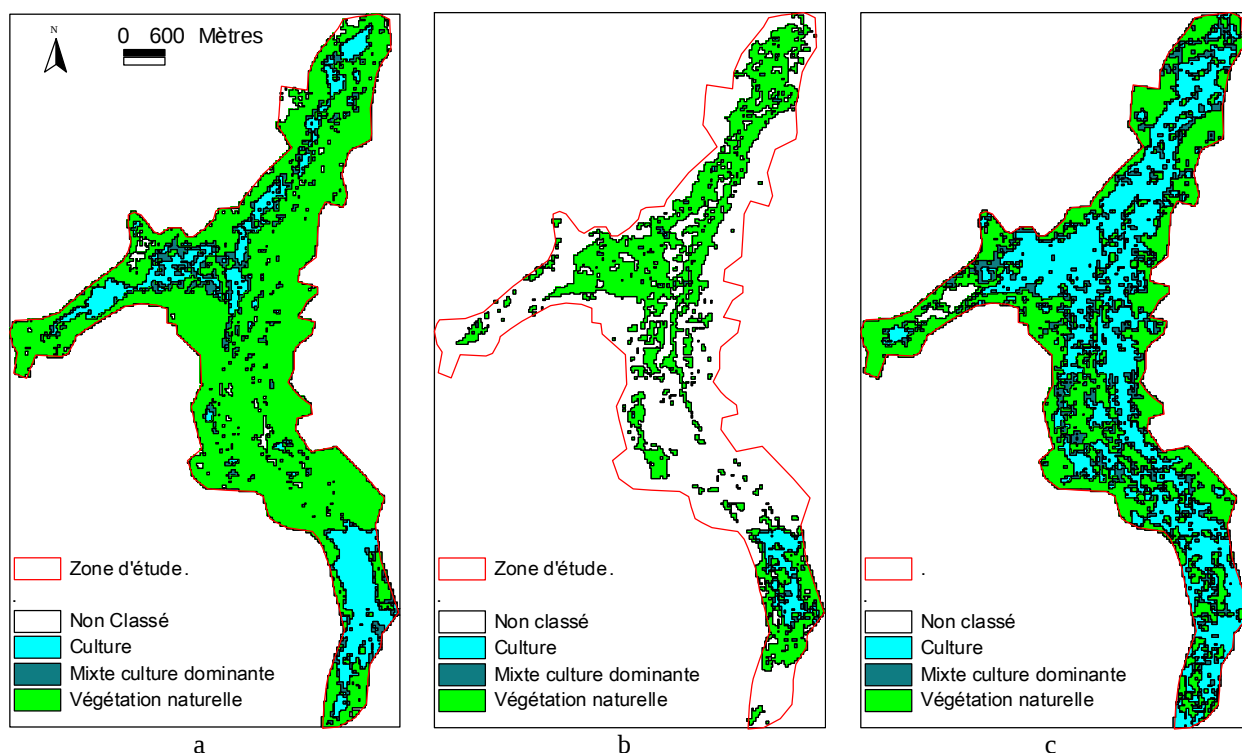


Figure 8: Résultats des classifications faites par l'arbre de décision général des portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988 (a), Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000 (b) et Landsat-5 TM du 18 Mai 2007 (c).

4.5.2 Estimation des superficies des types d'occupation des sols.

Tableau 5: Estimations des superficies des types d'occupation des sols à partir des classifications effectuées par l'arbre de décision général.

Date	type d'occupation	Nombre de pixels	Superficie (ha)	Pourcentage
05-mai-88	Non classé	480	43.2	3.0789
	Culture	2418	217.62	15.5099
	Mixte à dominance culture	1298	116.82	8.3258
	Végétation naturelle	11394	1025.46	73.0853
	Total	15590	1403.1	100
20-avr-00	Non classé	10174	915.66	65.2598
	Culture	418	37.62	2.6812
	Mixte à dominance culture	254	22.86	1.6292
	Végétation naturelle	4744	426.96	30.4298
	Total	15590	1403.1	100
18-mai-07	Non classé	185	16.65	1.1867
	Culture	6503	585.27	41.7126
	Mixte à dominance culture	2512	226.08	16.1129
	Végétation naturelle	6390	575.1	40.9878
	Total	15590	1403.1	100

Les estimations de superficie pour l'arbre de décision général (Tableau 5) donnent sur l'ensemble de la zone d'étude:

- 15.50% (217.62 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées, 8.32% (116.82 ha) à la classe mixte et 73.08% (1025.46 ha) à la classe végétation naturelle, le 05 Mai 1988;
- 2.68% (37.62 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées, 1.62% (22.86 ha) à la classe mixte et 30.42% (426.96 ha) à la classe végétation naturelle, le 20 Avril 2000;
- 41.71% (585.27 ha) d'occupation des sols à la classe des cultures irriguées, 16.11% (222.08 ha) à la classe mixte et 40.98% (575.1 ha) à la classe végétation naturelle, le 18 Mai 2007.

4.6 TAUX D'ACCROISSEMENT ANNUELS DES SUPERFICIES AGRICOLES

Le tableau suivant récapitule les estimations de superficies agricoles retenues des différentes classifications effectuées et évalue les taux d'accroissement de ces superficies. Le taux d'accroissement global des superficies agricoles dans la zone études est estimé à 17.17 ha par an.

Tableau 6: Synthèse des estimations des superficies agricoles.

	05-mai-88	20-avr-00	18-mai-07	
Superficies agricoles (ha)	135.45	222.75	461.7	Global
Accroissement de superficies agricoles (ha)	—	87.3	238.95	326.25
Taux d'accroissement annuel de superficies agricoles (ha par an)	—	7.28	34.14	17.17

V. DISCUSSION ET ANALYSES

5.1 OBSERVATION DES PORTIONS D'IMAGE LANDSAT TM

Sur les images Landsat-5 TM du mois de Mai 2007, l'observation en composition fausse couleur « proche infrarouge - rouge - vert » (ou « 4-3-2 », en référence aux numéros de bandes spectrales Landsat-5 TM) montre de grandes étendues de terres irriguées (voir Figure 3c). La couverture végétale paraît en rouge dans cette composition colorée.

Un affichage des portions d'images de Mai 1988, d'Avril 2000 et Mai 2007, en composition colorée 4-3-2, montre bien la différence entre les états des superficies de 1988 et 2007 (Figure 3a et 3c).

5.2 VALEURS SPECTRALES DES ZONES D'INTÉRÊT

Les délimitations des zones-échantillon ont été plus précises sur l'image Landsat TM du 18 Mai 2007, car faites à la lumière des prises de vues aériennes de 2007 regroupées en une mosaïque. Les zones d'entraînement servent à l'échantillonnage des signatures spectrales de chaque classe. Une fois ces signatures acquises, elles pourront servir à la constitution d'une bibliothèque spectrale. Toutefois, il est observé, une grande variabilité des valeurs des pixels au sein de ces classes, au cours des différentes années. Ceci a imposé la nécessité de considérer pour chaque année étudiée, un échantillonnage individuel (voir Annexe 4).

5.3 CLASSIFICATION PAR «MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE»

5.3.1. Evaluation des classifications effectuées par «Maximum de vraisemblance».

Les résultats de la classification par la méthode du maximum de vraisemblance, de chaque image Landsat TM sont exprimés numériquement par une matrice de confusion ou matrice d'erreur.

Dans une matrice de confusion, l'appartenance effective des pixels d'échantillons de validation à leurs véritables classes respectives est vérifiée à l'issue de chaque classification effectuée.

L'exemple de l'évaluation de la classification par «maximum de vraisemblance» des pixels de l'image du 05 Mai 1988 (Tableau 7), estime que pour l'échantillon de validation de la classe «culture», 97,14% de pixels ont effectivement été reconnus comme tels et les 2.86% restant ont été confondus à la classe «végétation naturelle». Il estime également que l'utilisateur a dû omettre 4.23 % de pixels de culture lors de son échantillonnage.

Pour la même image, 95% de pixels d'échantillon de validation de la classe «végétation naturelle» sont bien classés, 100 % de ceux de la classe «zone de parcours» sont bien classés.

Tableau 7: Matrices de confusion des classifications faites par maximum de vraisemblance de la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988.

Portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988	Echantillons de validation				Total (%)	Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Zone de parcours (%)			
	Non classé	0	0	0	0		
	Culture	97.14	5	0	35.5	97.14	2.86
	Végétation naturelle	2.86	95	0	29.5	95	5
	Zone de parcours	0	0	100	35	100	0
	Total (%)	100	100	100	100		
	Précision de l'utilisateur (%)	95.77	96.61	100			
	Erreur de l'utilisateur (%)	4.23	3.39	0			
	Précision globale de la classification (%)	97.5					
	Coéfficient Kappa	0.9624					

Les matrices de confusion (Annexe 6) ont fourni une précision globale de la classification et un coefficient Kappa respectivement de:

- 97.5% et 0.9624 pour la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988;
- 97.83% et 0.9674 pour la portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000;
- 93% et 0.8947 pour la portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007.

Les résultats de la précision globale sont plutôt très bons. Quant à ceux du coefficient Kappa, ils seraient presque parfaits, au regard des interprétations de Landis et al.(1977) ; Streiner et al.(1989) (voir annexe 3 pour les normes d'appréciation du coefficient Kappa).

La classe de zone de parcours serait la plus précise avec 100% de reconnaissance des zones d'entraînement pour la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988, 97.5% pour celle de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000 et 98,57% pour celle de l'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007. Ceci montre l'aptitude de cette approche à séparer la formation végétale des autres types d'occupation des sols.

Les classes de végétation et de cultures irriguées présentent, elles, des confusions mutuelles relativement faibles.

5.3.2 Superficies d'occupation des sols

Cette approche du maximum de vraisemblance a tendance à surestimer le nombre des pixels de végétation naturelle au détriment des pixels de cultures irriguées, en particulier pour l'année 2007. Car, par comparaison avec la mosaïque de prises de vues aériennes de 2007, les pixels de cultures irriguées semblent être plus importants (plus de 30% de la zone d'étude, après observation visuelle) que ceux estimés par cette approche (15% de culture).

De plus, une diminution d'environ 12.6 ha des superficies de cultures irriguées est constatée dans cette approche, entre les estimations d'Avril 2000 et de Mai 2007.

C'est autant d'imperfections qui ont conduit à l'idée d'une reclassification des pixels de couverture végétation à partir de la méthode par arbre de décision avec pour variable l'indice normalisé de végétation (NDVI).

Cependant, pour l'année 1988, à défaut des moyens de vérification, les faibles superficies de culture estimées pourraient être expliquées par le fait que le mois de Mai correspond aux périodes de récoltes. La totalité des terres de culture n'est plus entièrement recouvertes de cultures. On pourrait alors observer sur les terres agricoles, de la végétation naturelle ou des sols nus. Une autre explication serait que la pression foncière étant moindre à cette période, les équipements agricoles plus coûteux, le phénomène de migration moins marqué, etc; alors il y avait moins d'exploitations en contre-saison.

Il est important de remarquer que la «forêt classée» de Dindéresso au Sud de la zone d'étude a été reconnue effectivement comme végétation naturelle (figure 4) à l'issue de cette classification.

5.4 ANALYSES DES ARBRES DE DÉCISION

Les résultats des analyses statistiques ont été des éléments d'aide à la décision dans la séparation des couvertures végétales. Toutefois Ils ne sont pas les seuls éléments sur lesquels, il faut s'appuyer pour prendre une décision. L'interprétation visuelle et les observations faites lors des sorties de terrain, sont également prises en compte.

En effet, concernant les classes mixtes de végétation, dans la partie du bassin versant délimitée par la zone d'étude, il n'est pas toujours courant de rencontrer des zones de 30 m x 30 m de végétation naturelle dans les voisinages des terres agricoles, ou encore de petites surfaces de cultures de moins de 30 m x 30 m qui sont cachées au sein de vastes étendues de végétation naturelle.

Ainsi, les classes à distinguer qui ont été retenues dans les «arbres de décision individuels et général» (figure 6) sont: culture, classe mixte à dominance culture et végétation naturelle.

5.5 CLASSIFICATIONS SELON LES ARBRES DE DÉCISION INDIVIDUELS

Pour la classification par arbre de décision, il est très tentant de traiter uniquement les pixels pré-classés comme végétation naturelle à partir d'un masque. Mais les limites de l'utilisation de ce masque dans cette nouvelle classification ne sont pas connues. Il a été alors prudent de reclasser tous les pixels de formation végétale, car c'est parmi eux que l'occurrence de confusion est plus probable, contrairement à la classe «zones de parcours» qui d'ailleurs rejoint ici les «non classés». Bien entendu, le but est d'isoler les pixels de culture qui en tant que formation végétale

a été séparée des autres types d'occupation des sols par la méthode du Maximum de vraisemblance, comme il était souhaité.

5.5.1. Validation des classifications effectuées par les arbres de décision individuels.

Les matrices de confusion pour les classifications selon les arbres de décision individuels (Annexe 7) ont donné une précision globale de la classification et un coefficient Kappa respectivement de:

- 87.23% et 0.7531 pour la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988;
- 76.19% et 0.5233 pour la portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000;
- 75% et 0.4357 pour la portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007.

Les résultats de la précision globale sont bons dans l'ensemble. Quant au coefficient Kappa, il est bon pour 1988 et acceptable pour les deux autres années, toujours d'après des interprétations de Landis et al.(1977) ; Streiner et al.(1989) (voir annexe 3).

La classe de culture serait la plus précise avec 100% de reconnaissance des zones d'entraînement pour la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988, 76% pour celle de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000 et 98,55% pour celle de l'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007.

5.5.2 Superficies d'occupation des sols

Cette approche (par arbres de décision individuels) est plus en accord avec les observations visuelles de la mosaïque de prises de vues aériennes pour l'année 2007, et encore plus lorsqu'à la classe culture sont ajoutés les pixels de la classe mixte. La classe culture se retrouve ainsi à 32.90% d'occupation des sols.

Pour l'année 2000, l'ajout des pixels de la classe mixte à la classe culture, ramène cette dernière à environ 14 % d'occupation des sols. Ce qui rejoint approximativement le résultat obtenu par Maximum de vraisemblance (15,87%).

Cependant, une diminution d'environ 19.5 ha des superficies de cultures est constatée dans cette approche, entre les estimations de Mai 1988 et d'Avril 2000. On pourrait alors admettre qu'il y a eu une surestimation de superficie agricole pour l'année 1988 dans la reclassification et s'en tenir pour les années 1988 et 2000 (pour lesquelles on ne dispose pas de PVA) aux résultats obtenus par Maximum de vraisemblance (tableau 2).

Cette décision est soutenue par le fait que la «forêt classée» de Dindéresso (au Sud de la zone d'étude) est belle et bien classée comme végétation naturelle par l'approche de maximum de vraisemblance (figure 4), contrairement à celle de l'arbre de décision (figure 7).

En outre, théoriquement pour ces deux images (1988 et 2000), il n'a pas été nécessaire de faire recours à un outil d'aide de prise décision pour la séparation des deux types de couvertures

végétales, car les confusions entre celles-ci ont été estimées à l'issue de la classification par maximum de vraisemblance (matrices d'erreur, Annexe 6).

5.6. VALIDATION DES CLASSIFICATIONS EFFECTUÉES PAR L'ARBRE DE DÉCISION GÉNÉRAL.

Les matrices de confusion pour les classifications selon l'arbre de décision général (Annexe 8) ont donné une précision globale de la classification et un coefficient Kappa respectivement de:

- 86.49% et 0.7076 pour la portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988;
- 52.94% et 0.0526 pour la portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000;
- 58% et 0.0 pour la portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007.

La précision globale est bonne pour 1988 et acceptable pour les autres années. Le coefficient Kappa est bon pour 1988 et médiocre pour les deux autres années, encore d'après des interprétations de Landis et al.(1977) ; Streiner et al.(1989) (annexe 3).

La classe de culture serait la plus précise avec 100% de reconnaissance des zones d'entraînement pour les portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988 et Landsat-5 TM du 18 Mai 2007.

Une confusion totale de végétation naturelle en 2000, 0% de reconnaissance des zones d'entraînement (cette valeur 0% caractérise une défaillance de l'approche).

La classification par l'arbre de décision général n'a pas été convaincante, déjà théoriquement par sa précision globale et son coefficient kappa et de plus selon ce que révèle la mosaïque de prises de vues aériennes pour l'année 2007, cette classification considère les pixels de sols nus comme étant des pixels de végétation naturelle.

Toutefois cette approche a permis d'entrevoir la nécessité de définir des zones d'entraînement spécifiques à chaque image ou encore des échantillons individuels, afin de faire une classification plus précise. Il serait difficile de trouver des conditions de classification communes pour toutes les images.

5.7 ÉTUDE COMPARATIVE DES SUPERFICIES

Les méthodes de classification adoptées ont permis de faire plusieurs estimations des superficies agricoles. Dans cette section, il s'agit de discuter du bilan des estimations retenues (voir tableau 8 et annexe 9) et de l'évaluation de l'hypothèse selon laquelle l'évolution des superficies irriguées dans la zone d'étude serait croissante, dans le cadre de cette étude inter annuelle.

Dans ce cadre d'étude interannuelle mettant en jeu les estimations des superficies irriguées des mois de Mai 1988, Avril 2000 et Mai 2007, des augmentations de 87.3 ha de 1988 à 2000 et de 238.95 ha de 2000 à 2007, sont constatées. Soit une augmentation globale 326.25 ha de 1988 à 2007 et un taux d'accroissement maximal de 34.14 ha par an entre ces deux années (tableau 6, figure 9).

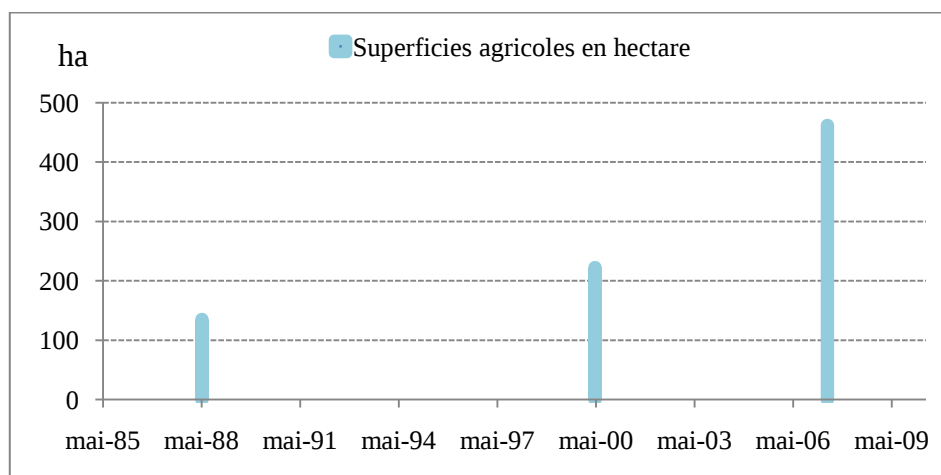


Figure 9: Evolution des superficies agricoles

D'après Wellens et al. (2008-b), un inventaire des parcelles en irrigation a été effectué par les enquêteurs du Ministère de la Question Paysanne en 1987. A partir des photographies aériennes à l'échelle de 1/5 000 prises par l'Institut Géographique du Burkina (IGB), une superficie sous irrigation de 170 ha a été estimée en amont de la prise d'eau de Diaradougou (IWACO-BERA, 1988).

Enfin, dans la même étude, Wellens et al. (2008-b), dans le cadre des activités du Projet GEeau, ont estimé les superficies des parcelles irriguées entre Nasso et Diaradougou, à 471 ha, sur la base d'un inventaire hydro agricole et d'une mosaïque de prises de vues aériennes à 0.8 m de résolution spatiale.

En comparant par des ratios les estimations de superficies en cultures irriguées à base d'inventaires hydro agricoles, avec celles de cette étude, à base de télédétection, il ressort que l'approche adoptée dans ce travail tend à sous-estimer un peu les superficies agricoles (voir Tableau 8).

Tableau 8: Comparaison des estimations de superficies agricoles

Période	Inventaires (ha)	Classifications (ha)	Ratio	Erreur	Pécision (%)
mai-88	170	136	0.80	34	20.00
mai-07	471	462	0.98	9	1.91

Le ratio entre les deux approches pourrait être amélioré (et tendre éventuellement vers 1) pour les années 1988 et 2000 dans le cas d'une meilleure classification des cultures irriguées par des échantillons rigoureusement choisis à l'aide des PVA disponibles pour ces années.

Au delà de ces comparaisons entre méthodes, il ressort de nos résultats, une diminution sensible des superficies de zones de parcours, au profit des zones de culture.

VI. CONCLUSIONS

Le but de la présente étude était l'estimation des superficies en cultures irriguées de la zone comprise entre Nasso et Diaradougou, par la télédétection. La problématique de la gestion de l'eau en agriculture dans la zone d'étude où les différents usages de l'eau sont devenus au fil du temps concurrentiels, a conduit à étudier l'évolution des superficies irriguées en saison sèche, afin de la comparer à l'évolution des prélèvements dans la rivière Kou pour l'agriculture. Cette étude est une contribution à la recherche d'un « point de rupture » au niveau du potentiel d'irrigation de la ressource en eau, à partir duquel les décideurs politiques pourront prendre des mesures pour freiner ou arrêter la création de nouvelles parcelles d'agriculture irriguée.

La télédétection choisie comme outil ou encore comme méthode pour parvenir au but ci-dessus mentionné, a consisté à un traitement numérique d'images Landsat TM à travers deux méthodes de classification. Elle a permis d'estimer jusqu'à un certain point les superficies des zones en cultures irriguées dans la zone d'étude considérée, sans toutefois avoir une information plus fine. En effet, sur des images à 30 m de résolution spatiale, couvrant une zone d'étude à parcellaire relativement moyen ou réduit, il est parfois difficile de discerner des pixels de végétation de ceux des cultures.

Toutefois, les estimations faites semblent être assez proches de celles obtenues par le moyen d'inventaires hydro agricoles menés sur la même zone. Les erreurs commises restent dans un intervalle de +/-20%. Dans ces conditions le taux d'accroissement moyen obtenu est de 17.17 ha par an.

Cette étude pourrait être améliorée au moyen: d'images satellites à haute résolution pouvant mieux prendre en charge le parcellaire, et permettre une meilleure reconnaissance des pixels « purs » de végétation ou de cultures. C'est-à-dire que dans la classe maraîchage (culture), la distinction des sous classes (choux, banane, maïs...) pourrait être envisageable si la résolution spatiales des images choisies et aussi la réalité du terrain (pratiques culturelles des exploitants des terres agricoles) le permettent.

En outre, pour la création des zones-échantillon qui permettent des classifications d'images Landsat, à défaut de la disponibilité des prises de vue aériennes, on peut disposer des images à trois canaux (Rouge, Vert, bleu) de 5 m de résolution spatiale, fournies sous format JPEG par l'application «Google Earth Pro». Il suffirait juste après acquisition, de géo-référencer ces images à partir des coordonnées géographiques (latitude, longitude) de quelques uns de leurs points.

VII. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

Akoly Agblévi MIDEKOR, 2009. Cartographie des utilisations du sol et des ressources en eau et analyse des perspectives associées à l'élevage dans le bassin du Kou. Mémoire de DEA, Université polytechnique de Bobo-Dioulasso, Juillet 2009.

Bastiaanssen W.G.M., Molden D, Makin I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46 (2000) 137-155.

Bishop Y., Fienberg S., Holland P., 1975. *Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*. MIT Press, Cambridge, MA (1975).

Bonn, F. (Ferdinand), 1996. *Précis de télédétection, volume 2: application thématiques*. Presses de l'Université du Québec. Université francophone. ISBN 2-7605-0888-9 (v. 2).

BUNASOLS, 2002: Etude morpho-pédologique de provinces du Houet et du Tuy. Bureau National des Sols du Burkina Faso, rapport technique N° 126, Juillet 2002.

Caloz R., Collet C., 2001. *Précis de télédétection, volume 3: traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec, Agence Universitaire de la Francophonie. ISBN-13: 978-2760511453.

Chander G., Markham B.L., Helder D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS TM ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113 (2009) 893–903.

Chander G., Markham B.L., 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 11, November 2003.

Corentin Y.S. SOME, Ibrahim BOUZOU MOUSSA, André NONGUIERMA, Antoine ROYER, , 2001, Evaluation et suivi des plans d'eau de surface par télédétection dans le bassin de Loumbila au Burkina Faso. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 12, Numéro 1, 31-6, Mars 2001, Note méthodologique.

Diallo M. 1998. Programme de valorisation des ressources en eau dans le sud ouest (RESO) du Burkina Faso.

Landis J.R., Koch G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. Vol. 33, pp. 159--174.

Malek M., 2008. Arbres de décision. Cours Intelligence Artificielle 03. Ecole Internationale des Sciences du Traitement de l'Information, France..

Streiner D.L., Norman G.R., 1989. *Health measurement scales: A practical guide to their development and use*. Oxford University Press, USA.

Traoré F., 2007. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. Mémoire de DEA. Université de Liège, Belgique.

Wellens J., Midekor A.A., Diallo M., Traoré F., Tychon B., 2009. Utilisation des prises de vue aérienne à basse altitude pour le suivi des activités hydro-agricoles – Cas du Bassin du Kou. 5ème Journées Scientifiques du 2IE: Modélisations et simulations - Des outils de gestion des ressources naturelles et des infrastructures. 09-14 mars 2009. 2IE, Ouagadougou, Burkina Faso.

Wellens J., Traoré F., Niamian M.-J., Diallo M., Compaoré N.F., Dakouré D., Tychon B., 2008-a. Elaboration du bilan d'eau du bassin versant du Kou et analyse critique des principaux composants. Rapport Projet GEau, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

Wellens J., Sawadogo I., Diallo M., Dakouré D., Compaoré N.F., Traoré F., Tychon B., 2008-b. Recensement exhaustif des activités hydro-agricoles du Bassin du Kou. Rapport Projet GEau, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

White M., 1995. Modeling Land Cover and Anthropogenic Changes in Biogeochemical Cycles. Elements of Change 1995, session 1: Changes in Global Vegetative Patterns and Their Relationship to Human Activity. Aspen Global Change Institute, USA.

Zhan Q., Molenaar M., Lucieer A., 2002. Pixel unmixing at the sub-pixel scale based on land cover class probabilities: application to urban areas. Uncertainty in remote sensing and GIS. Edited by Foody G.M., Atkinson P.M. Copyright 2002 John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-84408-6.

Sites internet

[1]- Le 31 Mai 2003, le Scan Line Corrector (SLC) de l'instrument ETM+ a connu une panne. Le SLC consiste en une paire de petits miroirs qui pivotent autour d'un axe, en tandem avec les mouvements du principal miroir de balayage d'ETM+. Le but du SLC est de compenser le mouvement "vers l'avant" de la plate-forme afin que les balayages résultants soient alignés en parallèle les uns par rapport aux autres. Sans l'effet du SLC, l'instrument photographie la terre avec des effets de "zig-zag" résultant en des images avec des zones dupliquées et des zones "ignorées" sur l'image. [http://en.wikipedia.org/wiki/Landsat_7 (dernière consultation: 31 Mai 2010)]

[2]- http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/software/gap_filling_software.html (dernière consultation: 31 Mai 2010).

[3]- <http://glovis.usgs.gov/> (dernière consultation: 31 Mai 2010)

[4]- http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_f.php?id=341 (dernière consultation: 31 Mai 2010).

[5]- http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_e.php?id=2965 (dernière consultation: 31 Mai 2010).

VIII. ANNEXES

.Annexe 1: Image Landsat-7 ETM+.du 20 Avril 2000 de la zone «path 197 ; row 52» en composition colorée 4-3-2.

Annexe 2: Mosaïque de prises de vues aériennes 2007 visualisée sur le logiciel ENVI

Annexe 3: Norme d'appréciation du coefficient kappa

Annexe 4: Statistiques basiques des valeurs des pixels des échantillons d'entraînement.

Annexe 5: Diagrammes de dispersion des données NDVI des échantillons.

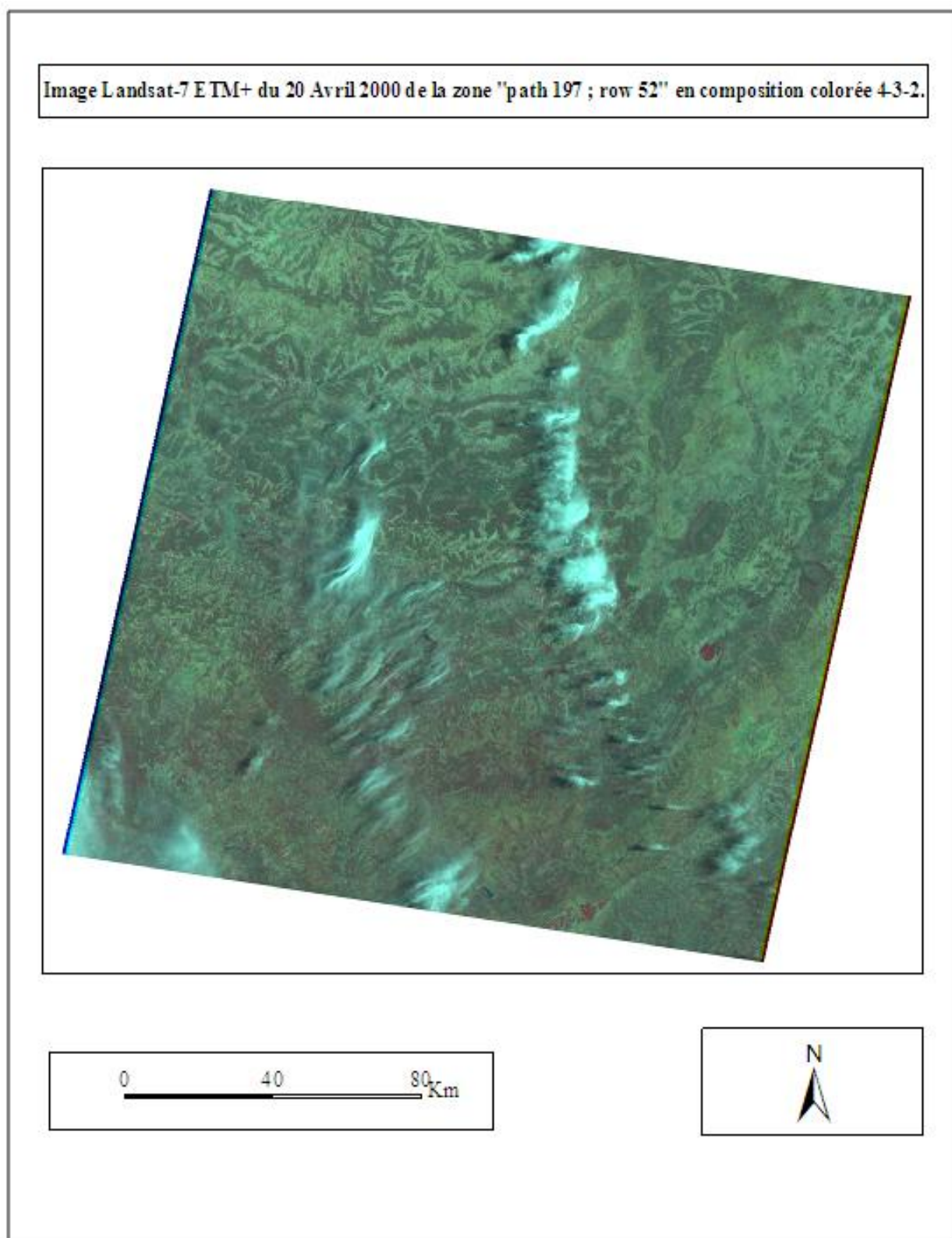
Annexe 6: Matrices de confusion des classifications faites par maximum de vraisemblance

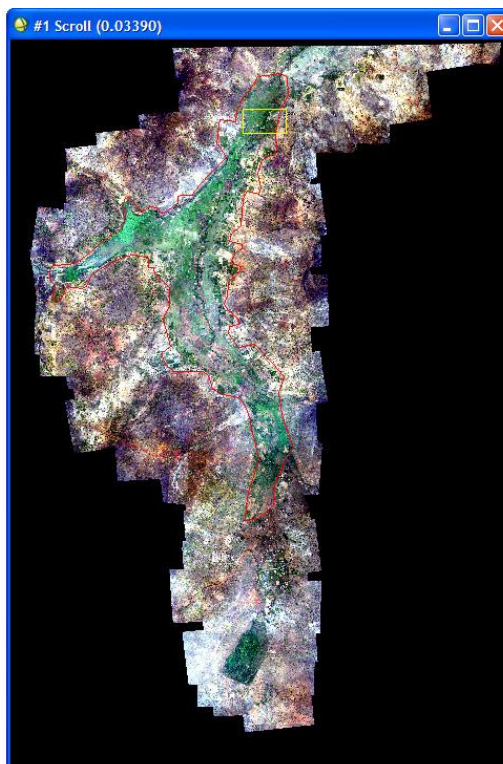
Annexe 7: Matrices de confusion des classifications faites par les arbres de décision individuels

Annexe8: Matrices de confusion des classifications faites par l'arbre de décision général

Annexe 9: Bilan des estimations des superficies agricoles

Annexe 1: Image Landsat-7 ETM+.du 20 Avril 2000 de la zone «path 197 ; row 52» en composition colorée 4-3-2.



Annexe 2: Mosaïque de prises de vues ariennes 2007 visualisée sur le logiciel ENVI.

Annexe 3: Norme d'appréciation du coefficient kappa.

Accord	<i>Kappa</i>
Excellent	0,81
Bon	0,80 - 0,61
Modéré	0,60 - 0,21
Mauvais	0,20 - 0,0
Très mauvais	< 0,0

Source: LANDIS JR, KOCH GG - The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 1977a ; 33: 159-174.

Annexe 4: Statistiques basiques des valeurs des pixels des échantillons d'entrainement.

Les données dans les tableaux sont présentées en réflectance (grandeurs adimensionnelles).

Portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988	Classe	Bande	Min	Max	Moyenne	écart type
	Culture	Band 4	0.44881	0.536235	0.480327	0.021445
		Band 3	0.168761	0.188458	0.178384	0.004957
		Band 2	0.187805	0.20126	0.196903	0.00366
	Végétation naturelle	Band 4	0.39224	0.515664	0.429782	0.025021
		Band 3	0.156943	0.223912	0.190427	0.015699
		Band 2	0.178835	0.2192	0.19685	0.008319
	Zone de parcours	Band 4	0.320243	0.402526	0.357931	0.021153
		Band 3	0.192397	0.239669	0.214964	0.010666
		Band 2	0.19229	0.22817	0.207283	0.006383

Portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000	Classe	Bande	Min	Max	Moyenne	écart type
	Culture	Bande 4	0.378854	0.480142	0.403295	0.020452
		Bande 3	0.173897	0.269605	0.20435	0.022692
		Bande 2	0.208053	0.271112	0.232607	0.01431
	Végétation naturelle	Bande 4	0.3172	0.4317	0.357401	0.020201
		Bande 3	0.168097	0.237703	0.206173	0.017338
		Bande 2	0.185982	0.23643	0.215935	0.009599
	Zone de parcours	Bande 4	0.237931	0.348027	0.285272	0.022153
		Bande 3	0.2058	0.301508	0.241654	0.018367
		Bande 2	0.211206	0.2585	0.231503	0.009235

Portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007	Classe	Bande	Min	Max	Moyenne	Ecart type
	Culture	Bande 4	0.554545	0.72655	0.620451	0.036229
		Bande 3	0.186154	0.215637	0.198649	0.005203
		Bande 2	0.201478	0.228091	0.217218	0.00547
	Végétation naturelle	Bande 4	0.5054	0.64669	0.564681	0.033965
		Bande 3	0.186154	0.225465	0.204499	0.011186
		Bande 2	0.196156	0.217446	0.209019	0.005654
	Zone de parcours	Bande 4	0.376396	0.536115	0.474422	0.031401
		Bande 3	0.210723	0.289346	0.247156	0.018679
		Bande 2	0.201478	0.254704	0.227179	0.009925

Annexe 5: Diagrammes de dispersion des données NDVI des échantillons.

Les diagrammes de dispersion est associés aux statistiques descriptives des pixels échantillon, afin de permettre d'entrevoir de façon visuelle des possibilités de séparation de deux distributions à partir des valeurs-seuil.

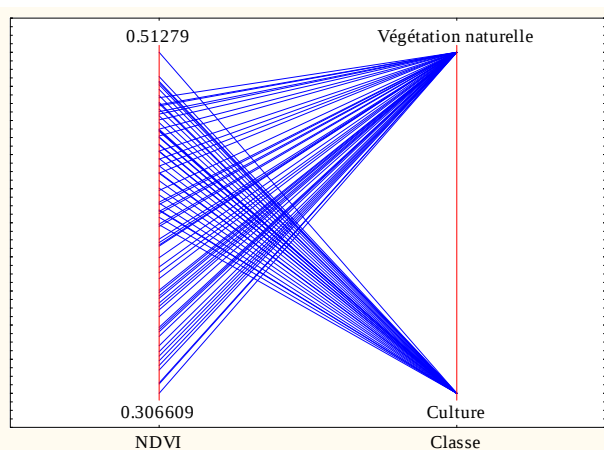


Diagramme individuel de dispersion des données NDVI des échantillons pour les portions d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988.

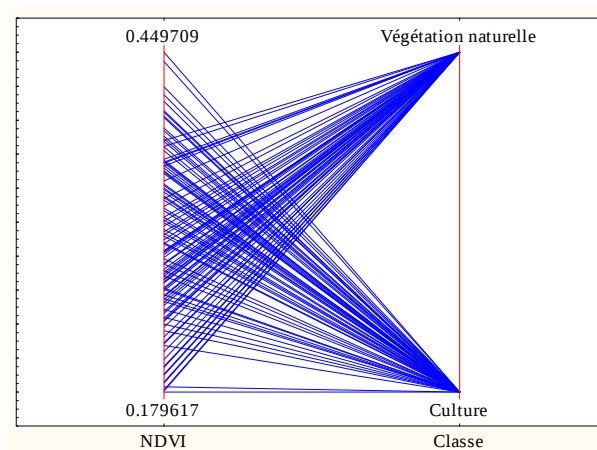


Diagramme individuel de dispersion des données NDVI des échantillons pour les portions d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000.

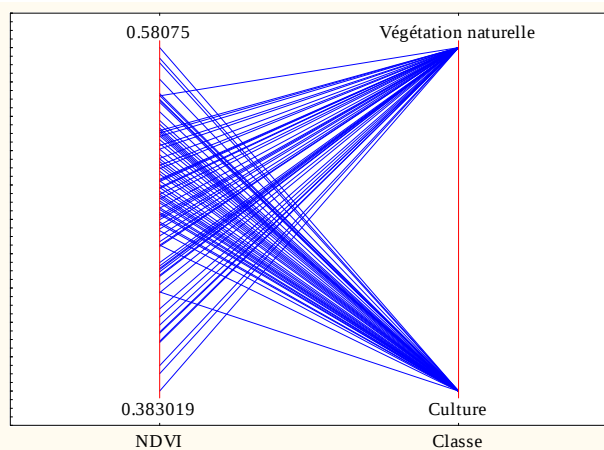


Diagramme individuel de dispersion des données NDVI des échantillons pour les portions d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007.

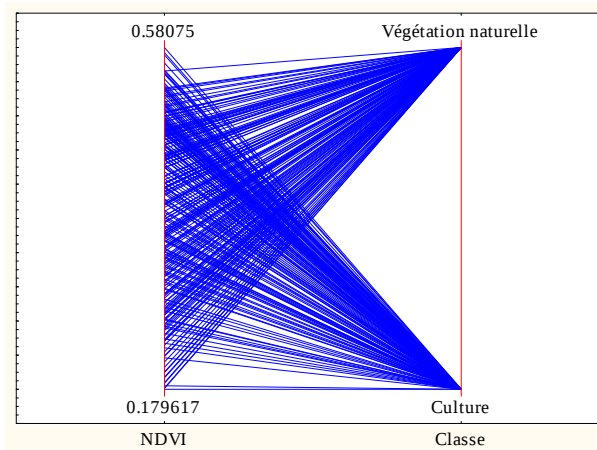


Diagramme général dispersion des données NDVI des échantillons de l'ensemble des trois images Landsat.

Annexe 6: Matrices de confusion des classifications faites par maximum de vraisemblance.

Portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988	Classes obtenues	Echantillons de validation			Total (%)	Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
		Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Zone de parcours (%)			
	Non classé	0	0	0	0		
	Culture	97.14	5	0	35.5	97.14	2.86
	Végétation naturelle	2.86	95	0	29.5	95	5
	Zone de parcours	0	0	100	35	100	0
	Total (%)	100	100	100	100		
	Précision de l'utilisateur (%)	95.77	96.61	100			
	Erreur de l'utilisateur (%)	4.23	3.39	0			
	Précision globale de la classification (%)	97.5					
	Coefficient Kappa	0.9624					

Portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000	Classes obtenues	Echantillons de validation			Total (%)	Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
		Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Zone de parcours (%)			
	Non classé	0	0	0	0		
	Culture	97.5	1.43	0	34.35	97.5	2.5
	Végétation naturelle	2.5	98.57	2.5	31.74	98.57	1.43
	Zone de parcours	0	0	97.5	33.91	97.5	2.5
	Total (%)	100	100	100	100		
	Précision de l'utilisateur (%)	98.73	94.52	100			
	Erreur de l'utilisateur (%)	1.27	5.48	0			
	Précision globale de la classification (%)	97.83					
	Coefficient Kappa	0.9674					

Portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007	Classes obtenues	Echantillons de validation			Total (%)	Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
		Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Zone de parcours (%)			
	Non classé	0	0	0	0		
	Culture	91.43	11.67	0	35.5	91.43	8.57
	Végétation naturelle	8.57	88.33	1.43	30	88.33	11.67
	Zone de parcours	0	0	98.57	34.5	98.57	1.43
	Total (%)	100	100	100	100		
	Précision de l'utilisateur (%)	90.14	88.33	100			
	Erreur de l'utilisateur (%)	9.86	11.67	0			
	Précision globale de la classification (%)	93					
	Coefficient Kappa	0.8947					

Annexe 7: Matrices de confusion des classifications faites par les arbres de décision individuels

Portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988	Echantillons de validation			Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Total (%)	
	Non classé	0	3.92	2.13	
	Culture	100	19.61	56.38	100
	Végétation naturelle	0	76.47	41.49	76.47
	Total (%)	100	100	100	23.53
	Précision de l'utilisateur (%)	81.13	100		
	Erreur de l'utilisateur (%)	18.87	0		
	Précision globale de la classification (%)	87.23			
	Coefficient Kappa	0.7531			

Portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000	Echantillons de validation			Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Total (%)	
	Non classé	1.41	0	0.79	
	Culture	76.06	23.64	53.17	76.06
	Végétation naturelle	22.54	76.36	46.03	76.36
	Total (%)	100	100	100	23.64
	Précision de l'utilisateur (%)	80.6	72.41		
	Erreur de l'utilisateur (%)	19.4	27.59		
	Précision globale de la classification (%)	76.19			
	Coefficient Kappa	0.5233			

Portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007	Echantillons de validation			Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Total (%)	
	Non classé	0	2.13	0.86	
	Culture	98.55	57.45	81.9	98.55
	Végétation naturelle	1.45	40.43	17.24	40.43
	Total (%)	100	100	100	59.57
	Précision de l'utilisateur (%)	71.58	95		
	Erreur de l'utilisateur (%)	28.42	5		
	Précision globale de la classification (%)	75			
	Coefficient Kappa	0.4357			

Annexe 8: Matrices de confusion des classifications faites par l'arbre de décision général

Portion d'image Landsat-4 TM du 05 Mai 1988	Echantillons de validation			Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Total (%)	
	Non classé	0	0	0	
	Culture	100	32.61	72.07	100
	Végétation naturelle	0	67.39	27.93	67.39
	Total (%)	100	100	100	32.61
	Précision de l'utilisateur (%)	81.25	100		
	Erreur de l'utilisateur (%)	18.75	0		
	Précision globale de la classification (%)	86.49			
	Coefficient Kappa	0.7076			

Portion d'image Landsat-7 ETM+ du 20 Avril 2000	Echantillons de validation			Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Total (%)	
	Non classé	1.49	0	0.74	
	Culture	4.48	0	2.21	4.48
	Végétation naturelle	94.03	100	97.06	100
	Total (%)	100	100	100	95.52
	Précision de l'utilisateur (%)	100	52.27		
	Erreur de l'utilisateur (%)	0	47.73		
	Précision globale de la classification (%)	52.94			
	Coefficient Kappa	0.0526			

Portion d'image Landsat-5 TM du 18 Mai 2007	Echantillons de validation			Précision du classificateur (%)	Erreur du classificateur (%)
	Classes obtenues	Culture (%)	Végétation naturelle (%)	Total (%)	
	Non classé	0	0	0	
	Culture	100	100	100	100
	Végétation naturelle	0	0	0	0
	Total (%)	100	100	100	100
	Précision de l'utilisateur (%)	58.82	0		
	Erreur de l'utilisateur (%)	41.18	0		
	Précision globale de la classification (%)	58.82			
	Coefficient Kappa	0			

Annexe 9: Bilan des estimations des superficies agricoles

